ISSN 1341-9080

第 13 回

ファジィ システム シンポジウム

講 演 論 文 集

期日　1997年6月4日（水）～6月6日（金）
会場　富 山 大 学　　経 済 学 部

SOFT

主催　日本ファジィ学会
(Japan Society for Fuzzy Theory and Systems)

第 13 回

ファジィ システム シンポジウム

― 人間と共生する知的システムをめざして ―

講 演 論 文 集

期日： 1997年6月4日（水）～6月6日（金）

会場： 富 山 大 学　経 済 学 部　（〒930 富山市五福 3190）

主催： 日本ファジィ学会
（SOFT: *Japan Society for Fuzzy Theory and Systems*）
〒113 東京都文京区本郷 4-24-5　春日ビル 8F　システム総研内

共催： 国際ファジィシステム学会（IFSA）日本支部

協賛： 計測自動制御学会，システム制御情報学会，日本オペレーションズリサーチ学会，日本行動計量学会，日本経営工学会，情報処理学会，電子情報通信学会，電気学会，日本人間工学会，日本機械学会，土木学会，日本医療情報学会，人工知能学会，日本ロボット学会，化学工学会，日本発酵生物学会，日本ＭＥ学会，日本原子力学会，日本神経回路学会，バイオメディカルファジィシステム学会，社会-経済システム学会，日本繊維製品消費科学会，日本デザイン学会，日本心理学会，日本応用数理学会，数理社会学会，日本建築学会，日本応用心理学会，日本教育工学会，日本塑性加工学会，CSFTS（台湾），KFMS（韓国）

第１３回ファジィシステムシンポジウムの開催にあたって



日本ファジィ学会会長
田中英夫　（大阪府立大学教授）

第１３回ファジィシステムシンポジウムの開催にあたってご挨拶申し上げます．本シンポジウムは「人間と共生する知的システムをめざして」という副題のもとに，北信越支部が中心になり，富山大学で開催される運びとなりました．シンポジウムの開催地は最近では，都市（東京，大阪，名古屋 等）と地方とを交互に選んでいます．これは都市と地方とのバランスをとり，本学会の理念である地域分散的であることによっていると思われます．本シンポジウムによって，北信越がより活発になることが期待されています．

１９８４年にIFSA（国際ファジィシステム学会）が設立され，それにともなってIFSA日本支部を設立し，IFSA日本支部主催で１９８５年に第１回のファジィシステムシンポジウムを京都大学で開催しました．IFSAの組織が変わり，IFSA Federation Systemと呼ばれる各国の学会の連合体に移行することが昨年決まりました．いままでよりも，よりオープンな組織になることと思っています．IFSAの組織の変更にともないIFSA日本支部の役割をSOFT（日本ファジィ学会）が引き受けることになりました．ファジィシステムに関する国際会議はかなり活発です．昨年開催されたニューオリンズのFUZZ-IEEE'96と台湾のAFSS '96（アジアファジィシステムシンポジウム）では，ラフ集合の招待セッションが，大変人気があり，またファジィ集合との相性がよく，これからラフ集合によるデータ解析や知識獲得などが盛んになりそうに感じました．

ファジィ応用研究で１９９０年代初期には，日本が世界をリードしたのですが，その後米国，ヨーロッパ，アジアなどが日本に追いついたように思われます．ファジィシステムの新しい研究が芽生えることが期待されています．本シンポジウムでは，企画講演，企画セッション，パネルディスカッションなど多くの企画がなされ，一般講演とあわせると，２９６件の論文が発表されます．興味ある企画がなされていますので，研究発表およびパネルディスカッションを通して，ファジィの新しい枠組みを模索できるよい機会であると思います．活気あるシンポジウムになりそうな予感がいたします．

本学会の現状ですが，日本の経済が失速し，その影響を受けて，法人会員数，企業に所属されている会員数の減少が目立っています．しかし，大学，研究所に所属されている会員数の割合が高くなり，また，ファジィ応用の分野も広がってきていますので，より基盤の強い学会になりつつあるといえます．学会は会員相互の協力で成り立っています．したがって，学会の仕事は会員が分担して行うことが基本になっていますので，ご協力をお願い申しあげます．学会組織を効率的に運営するために，組織と運営との簡素化，合理化を行う必要がありますので，会員皆様の素直なご意見をお聞かせいただければ幸いです．会員の意向が反映できるような学会運営にしたいと存じます．

最後に，本シンポジウムの開催にあたり，中島信之実行委員長，山田耕一プログラム委員長，大藪多可志北信越支部長および実行委員，また富山大学の皆様のご尽力に深く感謝する次第です．

プログラム概要

特別講演　富山大学　黒田講堂

6月4日（水）13:00～14:00　司会：田中英夫（大阪府立大学）

「情報革命の意味」

公文俊平氏（国際大学グローバル・コミュニケーション・センター　所長）

招待講演　富山大学　黒田講堂

6月5日（木）13:00～14:00　司会：中島信之（富山大学）

「富山の売薬と情報産業」

中尾哲雄氏（株式会社インテック　代表取締役社長）

企画セッション

(a) 企画講演　　オーガナイザ／司会

1)複雑系モデルとしてのカオスとファジィ　　中村和男（長岡技術科学大学）

講演：寺野寿郎（東京工業大学）

2)チュートリアル講演：DEAの理論と応用　　椎塚久雄（工学院大学）

講演：上田徹（成蹊大学）

3)リスクの概念と評価方法　　松下裕（清水建設）

講演：武井勲（富山大学）

4)対話型システムのユーザビリティ設計とその評価　　田丸恵理子（富士ゼロックス）

講演：小松原明哲（金沢工業大学）

(b) パネルディスカッション

1)ビアセッション：ファジィ・富山・いいたい放題　　菅野道夫（東京工業大学）

司　　会　：　菅野道夫（東京工業大学）

話題提供者：　中村和男（長岡技術科学大学）

今岡春樹（奈良女子大学）

西尾チヅル（筑波大学）

2)パネルディスカッション：ファジィ知識の学習・獲得・発見　　林 勲（阪南大学）

司　会：　林 勲（阪南大学）

パネラ：　田野俊一（電気通信大学）

古橋武　（名古屋大学）

高木英行（九州芸術工科大学）

石渕久生（大阪府立大学）

3)感性工学パネルディスカッション　　長沢伸也（立命館大学）

司　会：　中森義輝（甲南大学）

パネラ：　森　典彦（甲南大学）
長町三生（呉高等専門学校）
清水義雄（信州大学）
長沢伸也（立命館大学）

4)工学以外の分野へファジィ理論を普及するには？　小田哲久（愛知工業大学）

司　会：　小田哲久（愛知工業大学）

パネラ：　黒田　充（青山学院大学）　：生産管理への応用の視点から
土居道栄（奈良女子大学　）：心理学の視点から
高坂健次（関西学院大学）　：社会学の視点から

5)若手研究者パネルディスカッション：研究テーマと人間　中川友紀子（東京工業大学）

司会　：　中川友紀子（東京工業大学）：計算機と人間のマルチメディア

パネラ：　西野順二　（福井大学）　：ファジィ制御の未来と人間
橋山智訓　（名古屋大学）　：遺伝的に決定されていること？
吉田　香　（九州工業大学）：感性と研究
藤本太郎　（東京工業大学）：言語とファジィ

(c) 研究発表

1)カオスとその応用	五百旗頭正，木村孝（明電舎）	6件
2)ＤＥＡ（包絡分析法）	高萩栄一郎（専修大学）	3件
3)ファジィ知識の学習・獲得・発見	林　勲（阪南大学）	9件
4)感性工学	長沢伸也（立命館大学）	4件
5)ファジィ理論の建築分野への応用	新宮清志（日本大学） 谷明勲（神戸大学）	4件
6)ファジィ理論の土木分野への応用	宮本文穂（山口大学）	5件
7)ファジィとエボルーショナリコンピュテーション	古橋武（名古屋大学）	8件
8)進化システム	和多田淳三（大阪工業大学）	5件
9)教育工学	磯本征雄（名古屋市立大学）	１４件
10)ファジィデータ解析	中森義輝（甲南大学）	２３件
11)認知心理	椎名乾平（早稲田大学）	4件
12)経済・経営	塚本弥八郎（名城大学）	4件
13)医療とバイオソフトコンピューティング	矢鳴虎夫（九州工業大学）	6件
14)ファジィＯＲ	玄光男（足利工業大学）	１８件
15)若手研究者企画：進化的計算	橋山智訓（名古屋大学）	4件
16)若手研究者企画：感性と言語	白濱成希（北九州高専）	4件

一般講演　４５セッション　１５１件

デモンストレーション　1件

6月4日（水）　セッション名と司会者

	A室	B室	C室	D室	E室	F室	S室
9:30 10:30	WEA1 制御 － 安定性 － 安信誠二 （筑波大学）	WEB1 規則学習 （1） 小沢和浩 （法政大学）	WEC1 画像（1） 黒須顕二 （近畿大学）	WED1 推論（1） 片井修 （京都大学）	WEE1　企画 医療とバイオソフトコンピューティング（1） 有田清三郎 （関西医科大学）	WEF1 データベース 西野順二 （福井大学）	WES1　企画 講演：対話型システムのユーザビリティ設計とその評価 講師：小松原明哲 田丸恵理子 （富士ゼロックス）
10:45 11:45	WEA2 制御 － 設計 － 村上周太 （九州工業大学）	WEB2 規則学習 （2） 小林俊一 （信州大学）	WEC2 画像（2） 廣田薫 （東京工業大学）	WED2 推論（2） 水本雅晴 （大阪電気通信大学）	WEE2　企画 医療とバイオソフトコンピューティング（2） 矢鳴虎夫 （九州工業大学）	WEF2 エンジニアリング － 交通 － 前田博 （九州工業大学）	WES2　企画 講演：リスクの概念と評価方法 講師：武井勲 松下裕 （清水建設）
	昼食						
13:00 14:00	特別講演　「情報革命の意味」 講師：公文俊平氏（国際大学グローバル・コミュニケーション・センター　所長） 司会：田中英夫（大阪府立大学） 会場：富山大学　黒田講堂						
14:15 15:15	総　会 会場：富山大学　黒田講堂						
15:30 16:30	WEA3 制御方法論 田中一男 （金沢大学）	WEB3 規則学習 （3） 本多中二 （電気通信大学）	WEC3　企画 ファジィデータ解析（1） 中森義輝 （甲南大学）	WED3 推論（3） 磯部光朗 （NECシステム建設）	WEE3 支援システム 加藤浩介 （広島大学）	WEF3 エンジニアリング 野本弘平 （三菱電機）	16:00 WES3　企画 経済・経営 塚本弥八郎 （名城大学） 17:20
16:40 17:40	WEA4 制御方法論 ・応用 増井重弘 （法政大学）	WEB4 学習・ モデリング 愛須英之 （東芝）	WEC4　企画 ファジィデータ解析（2） 奥田徹示 （大阪工業大学）	WED4 推論（4） 王 碩玉 （高知工科大学）	WEE4　企画 若手研究者パネル：研究テーマと人間 中川友紀子 （東京工業大学）	WEF4 エンジニアリング － 生産システム － 鳶敏和 （ダイダン）	
18:00							WES4　企画 ビアセッション 菅野道夫 （東京工業大学）

6月5日（木）　セッション名と司会者

	A室	B室	C室	D室	E室	F室	S室
8:30	THA1 制御応用（1） 谷哲次（出光興産）	THB1　企画 若手研究者企画セッション：進化的計算 橋山智訓（名古屋大学）	THC1　企画 ファジィデータ解析（3） 宮本定明（筑波大学）	THD1 知的情報処理（1） 江澤義典（関西大学）	THE1 感性情報処理（1） 菅野直敏（玉川大学）	THF1　企画 ファジィ理論の建築分野への応用 新宮清志（日本大学）	THS1　企画 パネルディスカッション：ファジィ知識の学習・獲得・発見 林　勲（阪南大学）
9:50							10:10
10:10	THA2 制御応用（2） 前田幹夫（九州工業大学）	THB2　企画 進化システム 下原勝憲（ＡＴＲ）	THC2　企画 ファジィデータ解析（4） 田中英夫（大阪府立大学）	THD2 知的情報処理（2） 中津山幹男（秋田公立美術工芸短期大学）	THE2 感性情報処理（2） 山口亨（宇都宮大学）	THF2　企画 ファジィ理論の土木分野への応用 宮本文穂（山口大学）	10:30 THS2　企画 ファジィ知識の学習・獲得・発見（1） 田野俊一（電気通信大学）
11:30		11:50	11:50			11:50	
	昼食						
13:00	招待講演　「富山の売薬と情報産業」 講師：中尾哲雄氏（株式会社インテック 代表取締役社長） 司会：中島信之（富山大学） 会場：富山大学　黒田講堂						
14:00							
14:15	THA3　企画 パネルディスカッション：工学以外の分野へファジィ理論を普及するには？ 小田哲久（愛知工業大学）	THB3　企画 ファジィとエボルーショナリコンピュテーション（1） 古橋武（名古屋大学）	THC3　企画 ファジィデータ解析（5） 吉川歩（京都工芸繊維大学）	THD3 モデリング（1） 柴野俊弘（新菱冷熱工業）	THE3 感性情報処理（3） 横川壽彦（帝京平成大学）	THF3 論理・数学（1） 河口万由香（北海道大学）	14:35 THS3　企画 ファジィ知識の学習・獲得・発見（2） 馬野元秀（大阪府立大学）
15:35							
15:50	THA4　企画 若手研究者企画セッション：感性と言語 白濱成希（北九州高専）	THB4　企画 ファジィとエボルーショナリコンピュテーション（2） 菊池浩明（東海大学）	THC4　企画 ファジィデータ解析（6） 和多田淳三（大阪工業大学）	THD4 モデリング（2） 林陽一（明治大学）	THE4　企画 ファジィＯＲ（1） 玄光男（足利工業大学）	THF4 論理・数学（2） 向殿政男（明治大学）	THS4　企画 ファジィ知識の学習・獲得・発見（3） 小澤順（松下電器）
17:10							16:50
	懇親会 会場：高志会館						

6月6日（金）　セッション名と司会者

	A室	B室	C室	D室	E室	F室	S室
8:30	FRA1	FRB1	FRC1	FRD1　企画	FRE1　企画	FRF1	FRS1　企画
	知識獲得・概念学習	ニューラルネットワーク（1）	エボリューショナリコンピュテーション	教育工学（1）	ファジィOR（2）	生活計測・人間分析	感性工学
	椹木哲夫（京都大学）	内野英治（九州工業大学）	中西祥八朗（東海大学）	宮武直樹（法政大学）	石井博昭（大阪大学）	山口静馬（山口大学）	長沢伸也（立命館大学）
9:50							
10:10	FRA2	FRB2	FRC2　企画	FRD2　企画	FRE2　企画	FRF2	FRS2　企画
	学習システム	ニューラルネットワーク（2）	認知心理	教育工学（2）	ファジィOR（3）	ヒューマン・インタフェース	パネルディスカッション：感性工学
	三好哲也（大阪府立大学）	田崎栄一朗（桐蔭学園横浜大学）	椎名乾平（早稲田大学）	北垣郁雄（ポリテクカレッジ群馬）	乾口雅弘（広島大学）	荒井良徳（東京工芸大学）	中森義輝（甲南大学）
11:30							
	昼食						
13:00	FRA3　企画	FRB3	FRC3	FRD3　企画	FRE3　企画	FRF3	
	講演：複雑系モデルとしてのカオスとファジィ 講師：寺野寿郎	ニューラルネットワーク（3）	心理・評価	教育工学（3）	ファジィOR（4）	測度・積分（1）	
	中村和男（長岡技科大）	秋山孝正（岐阜大学）	奥田裕紀（金城短期大学）	吉根勝美（南山大学）	市橋秀友（大阪府立大学）	今岡春樹（奈良女子大学）	
14:00							
14:15	FRA4　企画	FRB4　企画	FRC4	FRD4　企画	FRE4　企画	FRF4	
	カオスとその応用（1）	チュートリアル講演：DEAの理論と応用 講師：上田徹	ロボット（1）	教育工学（4）	ファジィOR（5）	測度・積分（2）	
	五百旗頭正（明電舎）	椎塚久雄（工学院大学）	前田陽一郎（大阪電気通信大学）	磯本征雄（名古屋市立大学）	井田憲一（足利工業大学）	室伏俊明（東京工業大学）	
15:15							
15:30	FRA5　企画	FRB5　企画	FRC5	FRD5		FRF5	
	カオスとその応用（2）	ＤＥＡ（包絡分析法）	ロボット（2）	ノンエンジニアリング		不確実性	
	木村孝（明電舎）	高萩栄一郎（専修大学）	福田敏男（名古屋大学）	大薮多可志（富山国際大学）		鬼沢武久（筑波大学）	
16:30							

目　次

特別講演　富山大学　黒田講堂　1

6月4日（水）13:00～14:00　司会：田中英夫（大阪府立大学）

「情報革命の意味」

公文俊平氏（国際大学グローバル・コミュニケーション・センター　所長）

招待講演　富山大学　黒田講堂　9

6月5日（木）13:00～14:00　司会：中島信之（富山大学）

「富山の売薬と情報産業」

中尾哲雄氏（株式会社インテック　代表取締役社長）

一般講演

―――― 6月 4日(水) ――――

A室

WEA1 制御 ー安定性ー 9:30～10:30 司会 安信誠二 (筑波大学)

WEA1-1：ファジイ係数を持つ線形動的系の安定性 11
徐浩源、影井清一郎、関口隆（横浜国立大学）

WEA1-2：シングルトン後件部を持つファジィシステムの安定化制御 13
李昌勲、菅野道夫 （東京工業大学）

WEA1-3：離散事象近似を用いたファジィ制御系の安定解析に関する一考察 17
長谷川貴史、古橋武 （名古屋大学）

WEA2 制御 ー設計ー 10:45～11:45 司会 村上周太 （九州工業大学）

WEA2-1：Decay Rate, 入出力制限などの LMI 条件を用いたファジィ補償器と 19
ファジィ状態観測器の設計
田中一男、西村正孝（金沢大学）

WEA2-2：2次形式評価関数に基づくファジィ制御系の設計法 23
○池田貴幸、田中一男（金沢大学）

WEA2-3：未来の目標値を考慮した予見ファジィ制御方式の実システムへの適用 27
安信誠二、殖栗俊明（筑波大学）

WEA3 制御方法論 15:30～16:30 司会 田中一男 （金沢大学）

WEA3-1：FUZZY ALGORITHMS FOR CASCADE CONTROL SYSTEMS 31
Anjel TZANEV（University of Chemical Technology and Metallurgy），
Gancho VACHKOV （Kitami Institute of Technology）

WEA3-2：自走式倒立振子の階層的適応型ファジィ制御 35
小林貴生、西野順二、小高知宏、小倉久和（福井大学）

WEA3-3：ファジィコントローラを用いた二自由度位置制御システム 39
福見淳二、鎌野琢也、鈴木茂行、安野卓（徳島大学）、野口真児（タダノ）

WEA4 制御方法論・応用 16:40～17:40 司会 増井重弘 （法政大学）

WEA4-1：SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの提案 43
湯場崎直養、○易建強（マイコム）、廣田薫（東京工業大学）

WEA4-2：SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを用いた未拘束物体の 47
軌道追従制御
湯場崎直養、○易建強、畝村暢一（マイコム）、廣田薫（東京工業大学）

WEA4-3：LMI による3台のトレーラを有する移動ロボットのファジィ後退制御 51
田中一男、○谷口唯成、大岡純（金沢大学）

B室

WEB1 規則学習(1) 9:30～10:30 司会 小沢和浩 （法政大学）

WEB1-1：非対称なガウス型関数からなるファジィ規則の学習 53
成田雄彦（大阪電気通信大学）、石岩（九州東海大学）、
水本雅晴（大阪電気通信大学）

WEB1-2：時変非線形系のファジィ推論則の学習 57

小林俊一（信州大学）
WEB1-3：非線形最適化手法を用いた倒立振子ファジィ制御規則の学習 61
阪井節子、高濱徹行（福井大学）

WEB2 規則学習(2) 10:45～11:45 司会 小林俊一 （信州大学）
WEB2-1：遺伝的アルゴリズムによるファジィルールの生成と選択 65
○富岡重光、村田忠彦、石渕久生（大阪府立大学）
WEB2-2：構造適応型 Reflective Neural Network によるファジィルールの抽出 67
○松本昇、市村匠、田崎栄一郎（桐蔭横浜大学）、
吉田勝美（聖マリアンナ医科大学）

WEB3 規則学習(3) 15:30～16:30 司会 本多中二 （電気通信大学）
WEB3-1：ファジィクラスタリングによる疫学データからのファジィルール抽出 71
佐藤礼、林陽一（明治大学）、吉田勝美（聖マリアンナ医科大学）
WEB3-2：ファジィクラスタリングとニューロ・ファジィ手法によるファジィ 75
規則のチューニング
石岩（九州東海大学）、水本雅晴（大阪電気通信大学）
WEB3-3：ＫＴアルゴリズムを用いて正確なルールを抽出するための問題点 79
及びその改善策に関する一考察
仲光廣晃、林陽一（明治大学）

WEB4 学習・モデリング 16:40～17:40 司会 愛須英之（東芝）
WEB4-1：中央値の移動とルール生成を含むファジィモデリング 83
太田幸広、小林俊一（信州大学）
WEB4-2：ファジィモデリングにおけるメンバーシップ関数配置に関する一提案 87
○橘完太、長谷川貴史、古橋武、内川嘉樹（名古屋大学）、藤目葉子、
山口昌志（ヤマハ発動機）
WEB4-3：A NEW METHOD FOR ESTABLISHING AND SAVING 91
FUZZY MEMBERSHIP FUNCTIONS
Saeed Bagheri Shouraki, Nakaji Honda

C室

WEC1 画像(1) 9:30～10:30 司会 黒須顕二 （近畿大学）
WEC1-1：ファジィ特徴量による注視点フィードバックファジィ階層化車名認識 95
○関口悟朗、荒井良徳（東京工芸大学）、廣田薫（東京工業大学）
WEC1-2：画像処理におけるファジィ観測値の検討 99
荒井良徳（東京工芸大学）、廣田薫（東京工業大学）
WEC1-3：FuMICS （Fuzzy Multimedia Intelligent Communication System） 103
における動画像からの抽出情報を用いたファジィ知識ベース構築
中川友紀子、廣田薫（東京工業大学）

WEC2 画像(2) 10:45～11:45 司会 廣田薫（東京工業大学）
WEC2-1：イメージングプレートを用いた材料損傷評価のためのＸ線回折像の解析 105
廣瀬幸雄、佐々木敏彦、○森俊也、安川昇一（金沢大学）
WEC2-2：近似分岐点を用いた画像合成実験Ⅱ 107
○守田圭、黒須顕二（近畿大学）
WEC2-3：絵画意味理解のための光学ファジィ・ニューロ・カオス・システム 109

－２画像表示絵画の意味のカオス応答による表現－
玉野和保（広島工業大学）

WEC3 ファジィデータ解析（１） 15:30～16:30 司会 中森義輝 （甲南大学）
WEC3-1：ファジィデータ解析の動向 １１３
和多田淳三（大阪工業大学）
WEC3-2： 遺伝的アルゴリズムによる学習用データからの知識獲得 １１７
村田忠彦（足利工業大学）、石渕久生（大阪府立大学）
WEC3-3：GAによるファジィ・プロトタイプ選択 １１９
○中島智晴、石渕久生（大阪府立大学）

WEC4 ファジィデータ解析（２） 16:40～17:40 司会 奥田徹示 （大阪工業大学）
WEC4-1：エントロピー正則化法によるファジィクラスタリング １２１
宮本定明（筑波大学）、向殿政男（明治大学）
WEC4-2：3-wayデータに対するクラスタリングモデル １２３
佐藤美佳（北海道武蔵女子短期大学）、佐藤義治（北海道大学）
WEC4-3：ファジィクラスタリング －N次元をみるために－ １２５
馬屋原一孝、中森義輝（甲南大学）

D室

WED1 推論（１） 9:30～10:30 司会 片井修（京都大学）
WED1-1：距離型ファジィ推論法 Part4 １２９
―ファジィ集合間の距離計算法について―
王碩玉（高知工科大学）、土谷武士（北海道大学）
WED1-2：距離型ファジィ推論法 Part5 １３３
―パラメータ空間における距離型ファジィ推論法―
王碩玉（高知工科大学）、土谷武士（北海道大学）
WED1-3：ファジィ関数型推論法 １３７
水本雅晴（大阪電気通信大学）

WED2 推論（２） 10:45～11:45 司会 水本雅晴（大阪電気通信大学）
WED2-1：距離型ファジィ推論法 Part6 １４１
―距離型ファジィ推論法の逆問題解法―
王碩玉（高知工科大学）、土谷武士（北海道大学）
WED2-2：距離型ファジィ推論法 Part7 １４５
―距離型ファジィ推論法の学習アルゴリズム―
王碩玉（高知工科大学）、土谷武士（北海道大学）
WED2-3：階層型因果ネットワークにおけるグレード制約の伝播 １４９
山田耕一（長岡技術科学大学）

WED3 推論（３） 15:30～16:30 司会 磯部光朗（NECシステム建設）
WED3-1：ファジィ推論規則の線形補間に関する一考察 １５３
河口万由香、宮腰政明（北海道大学）
WED3-2：凸性・漸近性・分離性を持つ適合度型ファジィ推論法の提案 １５７
○王碩玉（高知工科大学）、土谷武士（北海道大学）
WED3-3： 推論結果におけるファジネス学習機能を有するファジィ推論 １６１
上原清彦（東芝）、廣田薫（東京工業大学）

WED4 推論(4) 16:40～17:40 司会 王碩玉（高知工科大学）

WED4-1： Application of Thornber's Fidelity to Petri Net 165
Mitsuro Isobe (NEC System Integration & Construction)
WED4-2：ファジィカラーペトリネットによるルール学習型推論エンジンの構築 169
○大内裕士、田崎栄一郎（桐蔭横浜大学）
WED4-3：プログラマブル制御のためのファジィ的操作タイミングのチューニング 173
西守克己（鳥取大学）、宮内肇（松江高専）、石原永伯（鳥取大学）、
平川進（富士通）

E室

WEE1 医療とバイオソフトコンピューティング(1) 9:30～10:30 司会 有田清三郎（関西医科大学）

WEE1-1：医療診断システムにおけるファジィ入力情報の総合評価 177
廣田博（大阪電気通信大学）、有田清三郎（関西医科大学）、
堀義巳（川崎医療福祉大学）、坂口聡、馬庭芳朗、谷村弘
（和歌山県立医科大学）、水本雅晴（大阪電気通信大学）
WEE1-2：ファジィ推論を応用したCT画像診断支援システム 181
－第4報：メンバーシップ関数の調整とシステムの再構築－
○片山佳之、細田超（川崎医科大学）、有田清三郎（関西医科大学）、
堀義巳（川崎医療福祉大学）
WEE1-3：ファジィ推論を用いた診断支援システム 183
－2群鑑別システムの構築法－
斎藤恵一、内山明彦（早稲田大学）

WEE2 医療とバイオソフトコンピューティング(2) 10:45～11:45 司会 矢鳴虎夫（九州工業大学）

WEE2-1：動物ロボットの主観と行動の設計－視覚センサを用いた追跡行動実験－ 187
久保公彦、喜多村直（九州工業大学）
WEE2-2：Theoretical approach to complex many-body systems 191
Actin myosin system as an example
Masahiro Nakano (University of Occupation and Environmental Health),
Hiroyuki Matsuura (University of Tokyo)
WEE2-3：周波数スペクトラムに基づく信号のコード化と記号粒子蓄積型ニューロンモデル 193
矢鳴虎夫（九州工業大学）

WEE3 支援システム 15:30～16:30 司会 加藤浩介 （広島大学）

WEE3-1：ファジィ発想推論を用いた発散的思考支援システムに関する研究 197
宮田裕次郎、古橋武、内川嘉樹（名古屋大学）
WEE3-2：ファジィクラスタリングの概念に基づく意思決定支援手法の提案 199
北島康広、亀井且有（立命館大学）
WEE3-3：FSM（Fuzzy Structural Modeling）による合意形成支援システム 203
○若狭浩、奥田通大、田崎栄一郎（桐蔭横浜大学）

WEE4 若手研究者パネル：研究テーマと人間 16:40～17:40 司会 中川友紀子 （東京工業大学）

パネラ：西野順二（福井大学） ：ファジィ制御の未来と人間
橋山智訓（名古屋大学） ：遺伝的に決定されていること?
吉田香（九州工業大学） ：感性と研究
藤本太郎（東京工業大学） ：言語とファジィ
中川友紀子（東京工業大学）：計算機と人間のマルチメディア

F室

WEF1 データベース 9:30～10:30 司会 西野順二（福井大学）

WEF1-1：ファジィデータベースにおける割り算 207
中田典規（千葉経済大学短期大学部）
WEF1-2：正規化相互出現頻度に基づくファジィ関連語行列生成法 211
野本弘平（三菱電機）
WEF1-3：音声認識と自然言語処理を用いたデータベースインタフェース 215
○波呂浩一郎、前田博（九州工業大学）

WEF2 エンジニアリング － 交通 10:45～11:45 司会 前田博（九州工業大学）

WEF2-1：ファジィ・ニューロモデルによる経路選択行動の分析 219
秋山孝正、坪井兵太（岐阜大学）、松浦貴宏（大日コンサルタント）
WEF2-2：可能性指標を用いた交通量配分モデルの提案 221
秋山孝正（岐阜大学）、川原徹也（森本組）

WEF3 エンジニアリング 15:30～16:30 司会 野本弘平（三菱電機）

WEF3-1：RBF ネットワークフィルタの量子化観測機構を持つシステムへの応用 223
内野英治（九州工業大学）、中村真（ダイダン）、山川烈（九州工業大学）
WEF3-2：スペクトル包絡のダイナミクスを考慮した音声のファジィベクトル量子化 225
内野英治（九州工業大学）、仁泉大輔（ローランド）、山川烈（九州工業大学）
WEF3-3：ファジイ論理による非圧縮性非線形超弾性構造解析計算の制御 227
菊池愛子（三菱重工業）、大西巍（高松高専）

WEF4 エンジニアリング －生産システム－ 16:40～17:40 司会 鳶敏和（ダイダン）

WEF4-1：ファジィ納期によるスケジューリング問題の定式化 229
村田忠彦（足利工業大学）、石渕久生、李揆亨（大阪府立大学）
WEF4-2：Fuzzy Inference Guided Multi-criteria Job-shop Scheduling 231
Lian Yu(Yokohama National University),
Heloisa M.Shin(Hong Kong University of Techonology and Sceience),
Takashi Sekiguchi(Yokohama National University)
WEF4-3：ファジィ推論によるワイヤボンディングの最適パラメーターの設定手法 235
○許振相（日立半導体（マレーシア））、根津紀久雄（群馬大学）

S室

WES1 講演：対話型システムのユーザビリティ設計とその評価 9:30～10:30
司会 田丸恵理子（富士ゼロックス）

WES1-1：対話型システムのユーザビリティ設計とその評価 237
小松原明哲（金沢工業大学）

WES2 講演：リスクの概念と評価方法 10:45～11:45 司会 松下裕（清水建設）

WES2-1：リスクの概念と評価方法 241
武井勲（青山学院大学）

WES3 経済・経営 16:00～17:20 司会 塚本弥八郎 （名城大学）

WES3-1：ＤＥＡモデルにファジィ目標の概念を導入することに対する一考察 245
植村芳樹（三重大学）
WES3-2：ファジィ理論の経済指標への応用 247

松田充夫（樟蔭女子短大）
WES3-3：DEAのクロス効率値とファジィ測度-ショケ積分モデルによるDMUの評価 251
高萩栄一郎（専修大学）
WES3-4：遺伝的機械学習を用いた交渉支援システムの構築 253
和多田淳三（大阪工業大学）、奥野豊（オージス総研）、渡邊輝幸（大阪工業大学）

WES4 ビアセッション 18:00～
「ファジィ・富山・いいたい放題」 司会 菅野道夫（東京工業大学）
話題提供者： 中村和男（長岡技術科学大学）
今岡春樹（奈良女子大学）
西尾チヅル（筑波大学）

——— 6月 5日(木) ———

A室

THA1 制御応用(1) 8:30～9:50 司会 谷哲次（出光興産）

THA1-1：フレキシブルアームのファジィ制御 257
増井重弘、寺野寿郎、○加藤亮（法政大学）
THA1-2：救急車の架台の防揺・防振ファジィ制御 261
前田幹夫、村上周太、成松聖也（九州工業大学）、韓虎剛（広島県立大学）
THA1-3：人間の制御戦略による倒立振子の振り上げ安定化制御 265
安信誠二、森宗仁（筑波大学）
THA1-4：ルール自動生成機能を有するカスケード形ファジィ学習制御を用いたACサーボシステムのオートチューニング 269
井上堅治（神鋼電機）、中岡睦雄（山口大学）

THA2 制御応用(2) 10:10～11:30 司会 前田幹夫（九州工業大学）

THA2-1：飛行モニタを用いた無人ヘリコプタのFBW制御 271
影山暁久、菅野道夫（東京工業大学）
THA2-2：GPS及び、画像情報を用いた無人ヘリコプタの知的誘導制御 275
中村心哉、上地正昭、菅野道夫（東京工業大学）
THA2-3：知的運転支援による飛行機操縦システム 279
安信誠二、足立剛史（筑波大学）
THA2-4：複数の水素発生装置と消費装置における水素消費モデルとファジィの複合による水素バランス制御 283
福山雅弘、江山優、小林隆広、一色真吾、谷哲次（出光興産）

THA3 パネル：工学以外の分野へファジィ理論を普及するには？ 14:15～15:35
司会 小田哲久（愛知工業大学）

THA3-1：「工学以外の分野へファジィ理論を普及するには」 287
小田哲久（愛知工業大）

パネラ：黒田充（青山学院大学） ：生産管理への応用の視点から
土居道栄（奈良女子大学） ：心理学の視点から
髙坂健次（関西学院大学） ：社会学の視点から

THA4 若手研究者企画：感性と言語 15:50～17:10 司会 白濱成希（北九州高専）

THA4-1：ファジィ言語処理システムに関する一考察 289

藤本太郎、菅野道夫（東京工業大学）
THA4-2：状況に依存した情報の選択に関する一考察 293
岩崎正宏、橋山智訓、大熊繁（名古屋大学）
THA4-3：感性語処理システムについて 297
白濱成希（北九州高専）、東原正和、矢鳴虎夫（九州工業大学）
THA4-4：程度表現語の程度表現以外の機能の実験的検討 301
吉川歩、西村武（京都工芸繊維大学）

B室

THB1 若手研究者企画：進化的計算 8:30～9:50 司会 橋山智訓（名古屋大学）

THB1-1：ファジィ推論規則と進化的計算についての一考察 303
仲田明紀、水本雅晴（大阪電気通信大学）
THB1-2：じゃんけん戦略の知識表現 307
牧野泰裕、西野順二、小高知宏、小倉久和（福井大学）
THB1-3：3次元CGにおけるライティングデザイン支援 311
青木研、高木英行（九州芸術工科大学）
THB1-4：DNAコーディング法によるホメオティック遺伝子の実現に関する一考察 315
吉川大弘、古橋武（名古屋大学）

THB2 進化システム 10:10～11:50 司会 下原勝憲（ＡＴＲ）

THB2-1：進化システム概論
○下原勝憲（ＡＴＲ）
THB2-2：プログラムされた自己解体モデルによる進化システム 319
大橋力、前川督雄（ＡＴＲ）、佐山弘樹（東京大学）、上野修（岐阜大学）
THB2-3：ハードウェアの行動の進化 323
邊見均、日陰智文、下原勝憲（ＮＴＴ）
THB2-4：進化アルゴリズムの理論について 327
喜多一（京都大学）
THB2-5：社会システムと進化 331
野村竜也（ＡＴＲ）

THB3 ファジィとエボルーショナリコンピュテーション(1) 14:15～15:35 司会 古橋武 （名古屋大学）

THB3-1：ファジィ遺伝的機械学習の改良アルゴリズム 335
○中島智晴、石渕久生、村田忠彦（大阪府立大学）
THB3-2：遺伝的アルゴリズムを用いた見習い学習によるユーザ概念の構築 337
○椹木哲夫（京都大学）、谷直樹（JR西日本）、片井修（京都大学）
THB3-3：遺伝的アルゴリズムによる超楕円錘形メンバーシップ関数を用いた 341
ファジィルールの自動生成
井上博行、亀井且有、井上和夫（立命館大学）
THB3-4：An Evolutionary Computation-Based Approach to 345
Fuzzy Clustering with Relational Data
Linhu Zhao, Yasuhiro Tsujimura,
Mitsuo Gen（Ashikaga Institute of Technology）

THB4 ファジィとエボルーショナリコンピュテーション(2) 15:50～17:10 司会 菊池浩明（東海大学）

THB4-1：GAによるファジィシステムの同定と性格診断 349
岡村正和、大谷忍（東海大学）、菊池浩明、R.R.Yager（Iona College）、

中西祥八郎（東海大学）
THB4-2：Degree of Truth Value as a Criterion for Division of Chromosomes for Pseudo-Bacterial Genetic Algorithm 353
Norberto Eiji Nawa, Tomonori Hashiyama, Takeshi Furuhashi, Yoshiki Uchikawa (Nagoya University)
THB4-3：免疫機構を用いたオンライン手書き文字認識システム 357
友田大輔、柿ヶ尾仁司、菊池浩明、中西祥八郎（東海大学）
THB4-4：逆問題としてのファジィモデリングに関する一考察 359
古橋武（名古屋大学）、松下聖一（名古屋市工業研究所）、筒井宏明（山武ハネウエル）、内川嘉樹（名古屋大学）

C室

THC1 ファジィデータ解析（3） 8:30～9:50 司会 宮本定明（筑波大学）
THC1-1：分位法によるファジィ回帰分析 363
田中英夫、小山研一、○李海寛（大阪府立大学）
THC1-2：Dealing with Outliers by Fuzzy Regression Reflecting Central Tendency 365
○Haekwan Lee, Hideo Tanaka（Osaka Prefecture Univ.）
THC1-3：メディアン型ファジィ線形回帰 367
乾口雅弘、坂和正敏（広島大学）、後呂智（新菱冷熱工業）
THC1-4：可能性回帰分析における決定係数の定義 369
渡邊匠、小沢和浩（法政大学）

THC2 ファジィデータ解析（4） 10:10～11:50 司会 田中英夫 （大阪府立大学）
THC2-1：ファジィ自己回帰モデルとその適用 373
小沢和浩、渡邊匠（法政大学）、菅家正康（明電舎）
THC2-2：データの持つ特性を活かしたファジィ回帰モデルの同定法 377
田島博之（創価大学）
THC2-3：干渉するファジィ時系列の予測 381
菅家正康（明電舎）、小沢和浩、渡辺匠（法政大学）
THC2-4：重複観測データ概念を用いるデータ解析 383
○古殿幸雄、西本由紀恵、浅居喜代治（福山平成大学）
THC2-5：ＡＩＣによるファジィ区間データに基づく独立性の分析 385
小西幹彦、奥田徹示（大阪工業大学）、浅居喜代治（福山平成大学）

THC3 ファジィデータ解析(5) 14:15～15:35 司会 吉川歩（京都工芸繊維大学）
THC3-1：剣道における打突速度の向上支援への可能性線形回帰分析の適用 389
杉本光公、安信誠二（筑波大学）
THC3-2：可能性線形回帰分析における推定区間について 391
永井栄一、堀内敦司、奥田徹示（大阪工業大学）
THC3-3：同時方程式体系における可能性回帰モデルの導出 393
渡邊匠、小沢和浩（法政大学）、菅家正康（明電舎）
THC3-4：ファジィ数に基づく主成分分析 395
藪内賢之、和多田淳三（大阪工業大学）、中森義輝（甲南大学）

THC4 ファジィデータ解析(6) 15:50～17:10 司会 和多田淳三（大阪工業大学）
THC4-1：計算機シミュレーションによる類似性指標の分類 397
吉川歩、西村武（京都工芸繊維大学）

THC4-2：ニューラルネットワークによるファジィ識別の性能評価 399
新居学、石渕久生（大阪府立大学）
THC4-3：感性評価データの解析手法について 401
川中愛、中森義輝（甲南大学）
THC4-4：ファジィデータ解析への期待 －人間に対する実験・調査の視点から－ 405
小田哲久（愛知工業大学）

D室

THD1 知的情報処理(1) 8:30～9:50 司会 江澤義典（関西大学）

THD1-1：ファジィ指向型囲碁システムFOGの局面理解 409
横川壽彦（帝京平成大学）
THD1-2：囲碁の読み筋への意味付け 413
西野順二、小高知宏、小倉久和（福井大学）
THD1-3：ファジィルールに基づいたマルチメディア情報獲得法の提案 415
呉甲錫、廣田薫（東京工業大学）
THD1-4：簡易言語EDLによるマルチメデイアのファジィ表現 417
中津山幹男、佐藤智子（秋田公立美術工芸短期大学）

THD2 知的情報処理(2) 10:10～11:30 司会 中津山幹男（秋田公立美術工芸短期大学）

THD2-1：国連売買条約における事例の曖昧さの表現と類似性の判定 419
廣田薫、徐明強（東京工業大学）、吉野一（明治学院大学）
THD2-2：鉄棒体操における動作知識のファジィ言語表現 421
田川聡洋、西野順二、小高知宏、小倉久和（福井大学）
THD2-3：粒度を考慮した時間表現の選択 425
松下光範、牧野俊朗（NTT）
THD2-4：自律分散系における柔らかい協調機構について（3） 429
江澤義典（関西大学）

THD3 モデリング(1) 14:15～15:35 司会 柴野俊弘（新菱冷熱工業）

THD3-1：ファジィモデルによる最適化に関する考察 431
領家美奈、田村坦之（大阪大学）、中森義輝（甲南大学）
THD3-2：ファジィモデリングにおけるルール獲得基準の検討 433
福元伸也、宮島廣美、岸田一也、長澤庸二（鹿児島大学）
THD3-3：直交線形関数による階層化ファジィモデリング 435
菊池浩明（東海大学）、高木昇（富山県立大学）、中西祥八郎（東海大学）
THD3-4：推移的矛盾を利用したファジィ構造モデリング 439
三田村保、大内東（北海道大学）

THD4 モデリング(2) 15:50～17:10 司会 林陽一（明治大学）

THD4-1：推論結果が複雑にならないファジィ推論法と
そのファジィモデリングへの応用 443
島川学（弓削商船高専）、村上周太（九州工業大学）
THD4-2：HIGH DIMENSIONAL FUZZY MODELING APPLIED TO
NON-LINEAR REACTION KINETICS 447
Gancho VACHKOV、Masayoshi KOBAYASHI（Kitami Institute of Technology）
THD4-3：並列ファジィ処理による自動車運転特性のモデリング 451
○五反田秋彦、木村誠志、本多中二、板倉直明（電気通信大学）、

猪飼國夫（エム・アイ・ベンチャー）
THD4-4：可動ノズルを用いた大空間空調に関するファジィモデリングの研究 453
土田孝弘、（電気通信大学）、植田俊克、柴野俊弘、鈴木正美（新菱冷熱工業）、
萩野剛二郎、本多中二（電気通信大学）

E室

THE1 感性情報処理(1) 8:30～9:50 司会 菅野直敏（玉川大学）

THE1-1：ファジィ推論による感情の分析 457
○川島康広、菅野直敏、米山忠暲（玉川大学）
THE1-2：知情意の工学的モデルの試作と適用 459
○橋本智己、山口亨（宇都宮大学）
THE1-3：マルチメディアの支援による感性的美術教育の一手法 461
飯田誠、清原知二、長尾尚（大阪信愛女学院短期大学）、藤吉誠（日立造船）
THE1-4：SAKANA (Search Agent for Kansei Applied Navigation Assistant) 463
感性情報処理を応用した画像データを検索キーに用いた、
WWWナビゲーションシステム
服部隆二、藤吉誠（日立造船）、山埼秀城、近藤邦雄（埼玉大学）

THE2 感性情報処理(2) 10:10～11:30 司会 山口亨（宇都宮大学）

THE2-1：ファジィ言語表現による似顔絵生成の試み 465
西野順二、島崎素子、小高知宏、小倉久和（福井大学）
THE2-2：顔表情を用いた人間とコンピュータとの会話ー道に迷った場を例にしてー 469
鬼沢武久、枡田行央（筑波大学）
THE2-3：感情を考慮した絵の言語表現 473
岩田満、鬼沢武久（筑波大学）
THE2-4：言葉による似顔絵描写に関する研究 －線種による影響－ 477
岩下志乃、鬼沢武久（筑波大学）

THE3 感性情報処理(3) 14:15～15:35 司会 横川壽彦（帝京平成大学）

THE3-1：ファジィ・ニューラルネットワークによるハンカチデザインの 481
ための感性評価モデル
小松由香、亀井且有（立命館大学）
THE3-2：イメージ表現付きファジィカラーネーミングシステム 485
○菅野直敏、大貫雄一、竹川宙史（玉川大学）
THE3-3：巡回セールスマン問題を利用した色彩感覚の分析 487
○松浦瑞樹、菅野直敏（玉川大学）
THE3-4：ファジィ理論を用いた広告色彩変化 489
○鈴木尚、椎塚久雄（工学院大学）

THE4 ファジィOR(1) 15:50～17:10 司会 玄光男（足利工業大学）

THE4-1：State Permutation-based Genetic Algorithms for 491
Multi-stage Process Planning Problem
Gengui Zhou, Mitsuo Gen（Ashikaga Institute of Technology）
THE4-2： Single Machine Scheduling Problem using Hybrid Genetic Algorithms 495
Dawei Zheng, Mitsuo Gen （Ashikaga Institute of Technology）
THE4-3：ファジイ処理時間を考慮したファジイ納期スケジューリング問題 499
伊藤健、石井博昭（大阪大学）

THE4-4 : Evolutionary Computation for Multiobjective Chance-constrained Solid Transportation Problem 501
Yin-Zhen Li , Mitsuo Gen , Kenichi Ida (Ashikaga Institute of Technology)

F室

THF1 ファジィ理論の建築分野への応用 8:30～9:50 司会 新宮清志（日本大学）

THF1-1 : 市民が求める公共建築物のファジィシステムによる耐震設計 505
中島賢二、田崎宗邦、河村廣、谷明勲（神戸大学）
THF1-2 : ファジィシステムによる制振構造システムの最適設計に関する研究（GAを用いた最適化） 509
西端雅浩、河村廣、谷明勲（神戸大学）
THF1-3 : 上下動を受ける質点系構造物のファジィ振動制御に関する研究 513
入江寿弘、新宮清志（日本大学）
THF1-4 : 制御用アクチュエータの周波数応答特性が FUZZY 非線形履歴応答制御の制震効果に与える影響について 515
山田登志郎、澤本佳和（鹿島技術研究所）

THF2 ファジィ理論の土木分野への応用 10:10～11:50 司会 宮本文穂（山口大学）

THF2-1 : ファジィ理論とＧＡによるボーリングデータ解釈の改良 519
大野研（三重大学）、渡部勉（愛知県）
THF2-2 : 重力探査とウェーブレット解析およびファジィ理論による三重県地域の活断層の可視化 521
大野研、○原敬徳、柴原吉成（三重大学）
THF2-3:ニューラルネットワークに基づく標準化された切り土のり面データベースと容易に得られる降雨要因による降雨継続中の崩壊発生予測システムについて 525
菊池英明（山口大学）、上田靖之（宇部市）、神谷誠（日本道路公団）、古川浩平（山口大学）
THF2-4 : 斜面の崩壊危険度診断システムへのラフ集合の適用 527
広兼道幸、古田均（関西大学）、三雲是宏（ニュージェック）
THF2-5 : 橋梁診断ニューロ・ファジィエキスパートシステムの開発と適用性 531
中村秀明（山口大学）、山本秀夫（山口県庁）、河村圭、宮本文穂（山口大学）

THF3 論理・数学(1) 14:15～15:35 司会 河口万由香 （北海道大学）

THF3-1 : 定数係数を持ったファジィ論理関数の基本的性質（1）－未知，矛盾，不明－ 535
荒木智行、巽久行（神奈川工科大学）、向殿政男（明治大学）、荒川道康（神奈川工科大学）
THF3-2 : 定数係数を持ったファジィ論理関数の基本的性質（2）－表現能力の限界について－ 539
巽久行、荒木智行（神奈川工科大学）、向殿政男（明治大学）
THF3-3 : ファジィ値の代数的、位相的性質について 543
川瀬真（帝京平成大学）、柳原二郎（千葉大学）、陳啓浩（北京郵電大学）
THF3-4 : ON FUZZY RADICALS , PRIME FUZZY QUASI-IDEALS AND PRIMARY FUZZY QUASI-IDEALS IN A COMMUTATIVE BCK-ALGEBRA 547
Takeshi Sakuragi (Kobe Univercity)

THF4 論理・数学(2) 15:50～17:10 司会 向殿政男（明治大学）

THF4-1：ファジィ論理関数とルカシェヴィッツの含意に基づく標準形式について　549
黒崎美和子、高木昇、中島恭一（富山県立大学）
THF4-2：遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ論理関数に基づくデータ表現　551
轡田崇、高木昇、中島恭一（富山県立大学）
THF4-3：ファジィ論理関数に基づくデータ表現法における最適解の探索について　553
轡田崇、高木昇、中島恭一（富山県立大学）
THF4-4：ファジイ数間のパラメトリックな順序関係とファジイ最短路問題への応用　555
古川長太（創価大学）

S室

THS1　パネル:ファジィ知識の学習・獲得・発見　8:30～10:10　司会 林 勲（阪南大学）

THS1-1：パネルディスカッション：ファジイ知識の学習・獲得・発見　559
林 勲（阪南大学）、田野俊一（電気通信大学）、古橋武（名古屋大学）、
高木英行（九州芸術工科大学）、石渕久生（大阪府立大学）
パネラ：　田野俊一（電気通信大学）
古橋武（名古屋大学）
高木英行（九州芸術工科大学）
石渕久生（大阪府立大学）

THS2　ファジィ知識の学習・獲得・発見（1）　10:30～11:30　司会 田野俊一（電通大）

THS2-1：知識獲得作業における課題と考察　561
熊本浩、糀谷和人、中嶋宏（オムロン）
THS2-2：知識獲得作業の効率化のためのアーキテクチャに関する考察　565
糀谷和人、熊本浩、中嶋宏（オムロン）
THS2-3：ルールの生成法を変化させる学習について　569
馬野元秀（大阪府立大学）、北辻桂憲、鳩野逸生、田村坦之（大阪大学）

THS3　ファジィ知識の学習・獲得・発見（2）　14:35～15:35　司会 馬野元秀（大阪府立大学）

THS3-1：パターンと記号の相互作用に関する一考察　573
竹内一郎、古橋武（名古屋大学）
THS3-2：記号とパターンによる情報表現と不良設定問題の枠組み　577
服部陽一郎、古橋武（名古屋大学）
THS3-3：マルチモーダルユーザインタフェースにおける計算的・記号的
コンピューティングの融合　581
田野俊一（電気通信大学）

THS4　ファジィ知識の学習・獲得・発見（3）　15:50～16:50　司会 小澤順（松下電器産業）

THS4-1：ファジィ集合を用いた概念形成モデルの提案　585
林勲、津田エミ子（阪南大学）、小澤順（松下電器産業）
THS4-2：ディストータによるＲＢＦネットワークのモデル選択　589
○三好哲也、市橋秀友、田渕創、田中洋司（大阪府立大学）
THS4-3：Ｍ－アポトーシスによるニューロ・ファジィＧＭＤＨの構造明確化学習　591
○大谷崇、金海好彦、市橋秀友、三好哲也、長坂一徳（大阪府立大学）

——— 6月 6日(金) ———

A室

FRA1 知識獲得・概念学習 8:30～9:50 司会 椹木哲夫（京都大学）

FRA1-1：ID3の概念を用いた制御ルール獲得手法の提案とその応用 593
高木浩、亀井且有（立命館大学）
FRA1-2：ファジイクラシファイアシステムによる言語指示の理解と 597
一般化知識獲得に関する一提案
○藤井誠、古橋武（名古屋大学）
FRA1-3：ニューラルネットワークとGAによる知識獲得 601
石渕久生、新居学、村田忠彦（大阪府立大学）
FRA1-4：属性値重要度に基づく逐次呈示型概念学習についての一考察 603
白石匡央、林陽一（明治大学）

FRA2 学習システム 10:10～11:30 司会 三好哲也（大阪府立大学）

FRA2-1：大局性志向型学習法によるあいまいな概念のファジィ集合化アルゴリズム 607
鈴木泉、大里有生（長岡技術科学大学）
FRA2-2：学習機能付ファジィシステム構築ツール 611
今崎直樹、愛須英之、関根智、加納誠（東芝）
FRA2-3：免疫型学習システムによる信号制御ルール設計 613
○愛須英之、加納誠、吉川泰文（東芝）
FRA2-4：ファジィ推論を用いた落雷予測システム 615
鎌野琢也、鈴木茂行、安野卓、細谷敏哉（徳島大学）、
川崎憲介（四国総合研究所）

FRA3 講演：複雑系モデルとしてのカオスとファジィ 13:00～14:00 司会 中村和男（長岡技術科学大学）

FRA3-1：複雑系モデルとしてのカオスとファジィ 619
寺野寿郎（東京工業大学）、増井重弘（法政大学）

FRA4 カオスとその応用（その1） 14:15～15:15 司会 五百旗頭正（明電舎）

FRA4-1：カオス的想起に基づく知的エージェント群の協調動作生成 623
山口亨、佐藤誠、若松良行、木幡直樹（宇都宮大学）
FRA4-2：通信トラヒックのカオスモデル 627
田中尚樹、岡本博司、内藤正美（日立製作所）
FRA4-3：生体カオスとマンマシンインタフェース応用 631
－生体信号のカオス力学的構造とその測定分析システムの構築－
○渡部弘隆、山口明宏、三上貞芳、和田充雄（北海道大学）

FRA5 カオスとその応用（その2） 15:30～16:30 司会 木村孝（明電舎）

FRA5-1：炭火のフラクタル次元解析に基づく加熱制御法 633
甲田哲也、原由美子、近藤信二、九津見洋、野村博義（松下電気産業）
FRA5-2：時系列変動の連続性評価に基づくシステム状態診断 635
○宮野尚哉（住友金属工業）、五百旗頭正、村田昌司、谷村隆義（明電舎）
FRA5-3：時系列の決定論的性質と確立過程的性質の識別のための軌道平行測度法 639
○藤本泰成、五百旗頭正、谷村隆義（明電舎）

B室

FRB1 ニューラルネットワーク（1） 8:30～9:50 司会 内野英治（九州工業大学）

FRB1-1：複合構造型リカレントニューラルネットワークに対する Hybrid GA による学習法 641
○高橋理、田崎栄一郎（桐蔭横浜大学）
FRB1-2：ビルディングブロック仮説を用いた Parallel Hybrid GA による ニューラルネットワークの学習 645
○栗山裕、平野奈穂美、高橋総子、市村匠、田崎栄一郎（桐蔭横浜大学）
FRB1-3：階層型ニューラルネットワークの生成的学習における一考察 649
石井真樹、林陽一（明治大学）
FRB1-4：M-アポトーシスとフィードバック誤差学習による随意運動の脳内形成モデル 653
○岸川信二、三好哲也、市橋秀友、本多克宏（大阪府立大学）

FRB2 ニューラルネットワーク(2) 10:10～11:30 司会 田崎栄一郎（桐蔭学園横浜大学）
FRB2-1：想起過程に初期パターン依存性を持たせた動的連想メモリ 655
○下野雅芳、神酒勤、山川烈（九州工業大学）
FRB2-2：自己組織化特徴マップによるファジィ識別システムの構成法（II） 659
堀川慎一（沖電気工業）
FRB2-3：ベクトル量子化によるファジィモデルの生成的構築法 663
岸田一也、 宮島廣美、前田道治、福元伸也（鹿児島大学）
FRB2-4：ニューラルネットワークによる学習グループ構成問題の解法 667
宮地功（岡山理科大学）

FRB3 ニューラルネットワーク(3) 13:00～14:00 司会 秋山孝正（岐阜大学）
FRB3-1：知識ベースアプローチによるニューラルネットワークを用いた ファジィルールの抽出並びに高血圧発症モデルへの適用 669
○大場和宏、市村匠、田崎栄一郎（桐蔭横浜大学）、高橋英孝、
吉田勝美（聖マリアンナ医科大学）
FRB3-2：適応的自己組織化ネットワークとその温度分散制御システムへの応用 673
山川烈（九州工業大学）、○中村めぐみ（沖電気工業）、内野英治（九州工業大学）
FRB3-3：ニューラルネットを用いた負荷温度推定方式とその温度制御方式への応用 675
甲斐郁子、原由美子、近藤信二、大森秀樹（松下電器産業）

FRB4 チュートリアル講演：DEA の理論と応用 14:15～15:15 司会 椎塚久雄 （工学院大学）
FRB4-1：DEA の理論と応用 677
上田徹（成蹊大学）

FRB5 DEA(包絡分析法) 15:30～16:30 司会 高萩栄一郎（専修大学）
FRB5-1：三角型ファジィ数を用いた DEA 681
上田徹、上村哲志（成蹊大学）
FRB5-2：重み制約付き DEA について 683
前田豊、高橋範光、田中英夫（大阪府立大学）
FRB5-3：Fuzzy DEA with Fuzzy Data 685
Peijun Guo, Hideo Tanaka（Osaka Prefecture Univ.）

C 室

FRC1 エボリューショナリ・コンピュテーション 8:30～9:50 司会 中西祥八郎（東海大学）
FRC1-1：ウイルス進化型遺伝的アルゴリズムにおける進化的状態遷移 687
久保田直行、○荒川丈昌、福田敏男（名古屋大学）

FRC1-2 : An Immune System Derived Approach for Finding Firing Sequences of a Sub-class of Petri Nets 691
John Takuya Ootsuki, Takashi Sekiguchi (Yokohama National Univ.), Hiroyuki Mizutani (Toshiba)
FRC1-3 : 遺伝的プログラミングによるモジュール構造獲得 695
橋山智訓（名古屋産業科学研究所）、苗村高義、大熊繁（名古屋大学）
FRC1-4 : FPGA を用いた進化的計算の高速化 699
矢野良和、橋山智訓、大熊繁（名古屋大学）

FRC2 認知心理 10:10～11:30 司会 椎名乾平（早稲田大学）
FRC2-1 : 笑いの程度の分析とその表現に関する一考察 703
伊達大輔、鬼沢武久（筑波大学）
FRC2-2 : 二重マッピングモデルとその製品デザイン支援ツールへの応用 707
北島宗雄（生命工学工業技術研究所）、金燉漢（筑波大学）
FRC2-3 : 同時的複数対象認知に関するアニメーション刺激提示効果 711
奥田裕紀（金城短期大学）
FRC2-4 : A CATEGORY LEARNING MODEL USING FUZZY RULES 715
K.Shiina (Waseda Univ.)

FRC3 心理・評価 13:00～14:00 司会 奥田裕紀（金城短期大学）
FRC3-1 : ファジィシステムモデルに基づく無意味ランダム音響刺激に対する心理的応答予測 719
山口静馬、○佐伯徹郎（山口大学）、加藤裕一（島根大学）、老松建成（海上保安大学校）
FRC3-2 : 音声信号へ寄せる関心の度合が外来雑音に対する心理的評価に及ぼす影響 723
○山口静馬、佐伯徹郎（山口大学）、老松建成（海上保安大学校）、加藤裕一（島根大学）
FRC3-3 : ファジィシステムの性格診断 727
大谷忍、岡村正和、菊池浩明（東海大学）、ロナルド R.イェガー（Iona College）、中西祥八郎（東海大学）

FRC4 ロボット(1) 14:15～15:15 司会 前田陽一郎（大阪電気通信大学）
FRC4-1 : 人間との対戦を実現するファジィピンポンロボット 731
田中一男、奥大輔（金沢大学）
FRC4-2 : 二足歩行ロボットのための RNN の最適化 733
福田敏男、○古俣洋一郎、荒川丈昌（名古屋大学）
FRC4-3 : 遺伝的アルゴリズムによる仮想的な移動ロボットの環境変化に対応する一般化行動判断ルールの獲得手法 735
大野 宏司（豊田中央研究所）、古橋武、内川嘉樹（名古屋大学）

FRC5 ロボット(2) 15:30～16:30 司会 福田敏男（名古屋大学）
FRC5-1 : マルチエージェントロボットの集団行動学習における進化シミュレーション 739
前田陽一郎、松永貴司（大阪電気通信大学）
FRC5-2 : 基本心理状態に基づく自律移動ロボットの感情シミュレータ 743
前田陽一郎、田中秀樹（大阪電気通信大学）
FRC5-3 : Q-Learning による CMAC 学習マップのチューニング手法の提案 747
中西康仁、前田陽一郎（大阪電気通信大学）

D室

FRD1 教育工学(1) 8:30～9:50 司会 宮武直樹（法政大学）

FRD1-1：インターネットを用いた絵画データベースにおけるファジィ情報検索 751
野崎浩成（名古屋市立大学）、吉根勝美（南山大学）、
磯本征雄（名古屋市立大学）、山崎初夫（名城大学）

FRD1-2：インターネットに対応した絵画データベースの構築 753
吉根勝美（南山大学）、磯本征雄、野崎浩成（名古屋市立大学）、
山崎初夫（名城大学）

FRD1-3：‘笑うコンピュータ’のソフト開発事例とファジイ推論 755
北垣郁雄（ポリテクカレッジ群馬）

FRD1-4：手書き文字の一変動評価 757
但馬文昭、呉健（横浜国立大学）

FRD2 教育工学(2) 10:10～11:30 司会 北垣郁雄（ポリテクカレッジ群馬）

FRD2-1：コンピュータシュミレーションを活用した教授方略 759
－ライフゲームと太陽系モデルを例にして－
磯本征雄、野崎浩成、中野宇宙（名古屋市立大学）、吉根勝美（南山大学）、
山崎初夫（名城大学）、伊藤敏（愛知技術短期大学）、松永公廣（摂南大学）

FRD2-2：大学（文系）基礎教育におけるファジィ数，ファジィ推論の教材について 761
須田宏（慶応義塾大学）

FRD2-3：メディア利用と授業戦略との関連性 763
成瀬喜則（富山商船高等専門学校）、前田隆（金沢大学）、中島信之（富山大学）

FRD2-4：インターネット上でのファジィ推論による CAI の 765
試行錯誤型学習支援システム－Excel を使った学習制御のモデル化－
磯本征雄（名古屋市立大学）、吉根勝美（南山大学）、山崎初夫（名城大学）、
野崎浩成、中野宇宙（名古屋市立大学）

FRD3 教育工学(3) 13:00～14:00 司会 吉根勝美 （南山大学）

FRD3-1：感性評価のためのファジィ測度の同定について（Ⅱ） 769
宮武直樹、松田修三、布施光男（法政大学）、中島洋一（滝川市立江陵中学校）

FRD3-2：感性評価を用いた授業実践と生徒の変容（Ⅱ） 771
中島洋一（滝川市立江陵中学校）、宮武直樹（法政大学）

FRD3-3：ファジイ推論を応用した教育評価法Ⅲ 775
奥田良治（早稲田大学）、箭内顯彦（早稲田実業）、箭内美智子（淑徳高校）、
津田栄（國學院高校）、稲井田次郎（日本大学）、山下元（早稲田大学）

FRD4 教育工学(4) 14:15～15:15 司会 磯本征雄（名古屋市立大学）

FRD4-1：ファジィグラフの特性解析システムⅢ 779
木藤智光、駒形真樹、富樫正彦、土田賢省、佐藤章（東洋大学）、
山下元（早稲田大学）

FRD4-2：ファジイグラフを応用した曲順の編集法Ⅱ 783
浜中雅俊、稲井田次郎（日本大学）、箭内顯彦（早稲田実業）、
箭内美智子（淑徳高校）、奥田良治、山下元（早稲田大学）

FRD4-3：ファジイグラフを応用した教材構造分析Ⅳ 787
津田栄（國學院高校）、箭内美智子（淑徳高校）、箭内顯彦（早稲田実業）、
稲井田次郎（日本大学）、瀧澤武信、奥田良治、山下元（早稲田大学）

FRD5 ノンエンジニアリング 15:30～16:30 司会 大薮多可志（富山国際大学）

FRD5-1：楽観・悲観軸を用いた直感的推論による財務分析システムに関する一研究 791
○谷久壹朗、亀井且有（立命館大学）
FRD5-2：ジャーナリズムの英語の年代による推移 793
－TIME と Newsweek を中心として－
伴浩美（富山国際大学）、森俊也（金沢科学技術専門学校）、
大薮多可志（富山国際大学）

E室

FRE1 ファジィOR(2) 8:30～9:50 司会 石井博昭（大阪大学）

FRE1-1：ファジイ在庫問題 797
片桐英樹、石井博昭、伊藤健（大阪大学）
FRE1-2：Data Allocation in Distributed Database System with 799
Fuzzy Coefficients Using GA
Mitsuo Gen ,Yasuhiro Tsujimura ,Sucbum Ko （Ashikaga Institute of Technology）
FRE1-3：ファジィ係数を伴う最小木問題の一解法 803
玄光男、井田憲一、周根貴、高山政人（足利工業大学）
FRE1-4：ファジイ配置問題 807
石井博昭（大阪大学）、松富達夫（近畿大学）

FRE2 ファジィOR(3) 10:10～11:30 司会 乾口雅弘（広島大学）

FRE2-1：角型構造の大規模多目的ファジィ線形計画問題に 811
対する分解手法の有効性
坂和正敏、加藤浩介、茂原英樹（広島大学）
FRE2-2：遺伝的アルゴリズムによる多目的整数計画問題に 815
対する対話型ファジィ満足化手法
坂和正敏（広島大学）、柴野俊弘（新菱冷熱工業）、加藤浩介（広島大学）
FRE2-3：凸多面体に制限された目的関数の係数ベクトルをもつ線形計画問題に 819
対する最大リグレット最小化
乾口雅弘、坂和正敏（広島大学）
FRE2-4：多目的0－1計画問題に対する遺伝的アルゴリズムに基づくファジィ意思決定 821
矢野均（名古屋市立大学）、坂和正敏（広島大学）、柴野俊弘（新菱冷熱工業）

FRE3 ファジィOR(4) 13:00～14:00 司会 市橋秀友（大阪府立大学）

FRE3-1：アダプティブB－スプラインによる認知地図 823
○大谷崇、市橋秀友、三好哲也（大阪府立大学）
FRE3-2：射影追跡ＩＤ３による感性データ処理 825
○三好哲也、市橋秀友（大阪府立大学）、下村武（常磐会短期大学）
FRE3-3：カラートラッカーを用いた手と指によるポインティングデバイス 827
○山川あす香、早川武、大谷崇、三好哲也、市橋秀友（大阪府立大学）

FRE4 ファジィOR(5) 14:15～15:15 司会 井田憲一（足利工業大学）

FRE4-1：ファジイネットワーク上のフロー問題 829
島田文彦、石井博昭、伊藤健（大阪大学）
FRE4-2： Shortest Path Routing Problem with Fuzzy Coefficients 831
Using Genetic Algorithm
Mitsuo Gen , Kenichi Ida , Runwei Cheng ,

Jongryul Kim （Ashikaga Institute of Technology）
FRE4-3：ニューラルネットワーク技法による２目的ファジィ最短経路問題の一解法 835
玄光男、井田憲一、小淵礼子（足利工業大学）

F室

FRF1 生活計測・人間分析 8:30～9:50 司会 山口静馬（山口大学）

FRF1-1：生活計測のための柔軟な情報統合機構 －基本的考え方－ 839
中村和男、小池清之（長岡技術科学大学）
FRF1-2： ガスセンサ出力による季節感の同定 843
○吉浦真由美、大薮多可志（富山国際大学）
FRF1-3：作業順序を考慮した人間の信頼性解析モデル 845
大森明央、鬼沢武久（筑波大学）
FRF1-4：MACROERGONOMIC APPROACH TO SAFETY ANALYSIS 849
A.R.ARREDONDO, J.WATADA,
Y.YABUUCHI (Osaka Institute of Technology)

FRF2 ヒューマン・インタフェース 10:10～11:30 司会 荒井良徳（東京工芸大学）

FRF2-1：Japanese Sign Language Recognition System Using Image Processing 853
○Zhixiong XU, Shoko NISHIMURA,
Toru YAMAGUCHI (Utsunomiya University)
FRF2-2：福祉指向インターフェイスにおけるスポッティング機能 857
山口亨、○新井隆之、西村晶子、小俣寿之（宇都宮大学）
FRF2-3：対話型遺伝的アルゴリズムのインタフェース改善 859
－ ＧＡの高速化手法の提案 －
印具毅雄、高木英行、大崎美穂（九州芸術工科大学）
FRF2-4：日本語によるＣ言語のプログラミング 863
佐藤健、鬼沢武久（筑波大学）

FRF3 測度・積分（1） 13:00～14:00 司会 今岡春樹（奈良女子大学）

FRF3-1：集計オペレータとしてのファジィ測度－ショケ積分モデル 867
高萩栄一郎（専修大学）
FRF3-2：ファジィ測度によるＦＣＲ法 －逆ＦＣＲ法の存在，多項目への拡張－ 871
高萩栄一郎（専修大学）
FRF3-3：ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分と微分形式の積分 873
松下裕（清水建設）

FRF4 測度・積分（2） 14:15～15:15 司会 室伏俊明（東京工業大学）

FRF4-1：ファジィ測度同定法に関する考察 877
岩本直子（三菱電機）、中森義輝（甲南大学）
FRF4-2：人間の評価モデルにおけるファジィ測度の調整 879
鬼沢武久、杢屋銑一（筑波大学）
FRF4-3：一般化したファジィ積分の評価問題への応用 883
今岡春樹（奈良女子大学）

FRF5 不確実性 15:30～16:30 司会 鬼沢武久（筑波大学）

FRF5-1：選択における不確実性の変容 885
塚本弥八郎（名城大学）

FRF5-2：”ファジィ”のある確率的見方と考察 887
間淵重昭（大阪学院大学）
FRF5-3：ファジィ確率分布関数の提案 891
加藤裕一（島根大学）、山口静馬（山口大学）

S室

FRS1 感性工学 8:30～9:50 司会 長沢伸也 （立命館大学）

FRS1-1：感性検索システムへの取り組みについて 893
○今中武、三浦康史、九津見洋、小澤順（松下電器産業）
FRS1-2：富士通における「印象の工学」の研究について 895
大沢光（富士通）
FRS1-3：日立製作所中央研究所における感性情報メディア研究 897
北原義典（日立製作所）
FRS1-4：日本ファジィ学会における感性工学研究 901
中森義輝（甲南大学）

FRS2 パネルディスカッション：感性工学 10:10～11:30 司会 中森義輝（甲南大学）

FRS2-1：感性工学をこう考える 903
森典彦（東京工芸大学）
FRS2-2：感性工学をこう考える －人間の感性をデザインに造り込む技術－ 907
長町三生（呉工業高等専門学校）
FRS2-3：感性工学をこう考える 911
清水義雄（信州大学）
FRS2-4：感性工学をこう考える 915
長沢伸也（立命館大学）

パネラ ： 森典彦（甲南大学）
長町三生（呉工業高等専門学校）
清水義雄（信州大学）
長沢伸也（立命館大学）

特別講演
６月４日（水）

会場：富山大学　黒田講堂

時間：13:00～14:00

演題：情報革命の意味

講師：公文俊平氏（国際大学 グローバル・
コミュニケーション・センター 所長）

司会：田中英夫（大阪府立大学）

情報革命の意味

公文 俊平

一、はじめに、

今日急速に進行中の情報革命には、さまざまな見方や側面があるように思われる。

その一つは、これを19世紀末から始まった第二次産業革命の成熟段階（大量生産・大量消費段階）の継続と見るものである。テレビがケーブルテレビから衛星テレビになっていくとか、電話にファックスが入ったり、さまざまな移動体通信手段が加わったりするのは、その典型的な例だろう。テレビゲームや通信カラオケの普及なども、その一環だろう。乗用車と家電に代表される第二次産業革命の成熟段階は、今日でもまだ完全には終了していない。それどころか、第三次産業革命の成果を積極的に導入することによって、費用を急激に低下させている。たとえば、電話の費用は光ファイバーの敷設やディジタル交換機の導入によって、急激に低下している。数年前に一分１０セントといわれていた大西洋横断の電話の費用は、現在では一分６セントからさらに４セントに下がってきたという。後数年すれば、一時間３セントを割るという予測もある。同様な費用の低下は、放送業にも出版業にも、またその他のあらゆる既存の産業にもみられる。

もう一つの見方は、現在（おそらく遅くとも１９７０年代の半ば以降）、１８世紀末以来の（第一次）産業革命や１９世紀末以来の第二次産業革命に匹敵する、新しい産業革命（情報産業革命、あるいはディジタル革命などとも呼ばれる）が進行中だという見方である。それによって、新しい技術パラダイム、新しい産業や産業構造、新しい雇用形態や経営組織が生まれつつある。とりわけ、この第三次産業革命は、まず情報通信の分野からそのディジタル化という形で起こっていて、そこから、既存の電話や放送とは質的に異なる新たな情報通信基盤や情報通信産業が出現している。それがインターネットや、その上の新情報通信産業（電子貨幣、インターネット電話、検索サービス等々）に他ならないというのである。さらに、これまでのビジネスはインターネットをプラットフォームとする「電子商取引」に転換していくだろうし、経営組織は単にフラット化するだけでなく、ダウンサイジングやネットワーキングが広く見られるようになり、ついには経営自体の「バーチャル・コーポレーション（VC）化」も広汎に起こってくるだろうという。雇用形態にも、いわゆるテレワーキングの普及だけでなく、さらに異なった雇用者あるいはクライエントのために、異なったサービスを提供する（一部はボランティアーでの仕事もする）、いわゆるポートフォリオ・ワーキングへの転換といった現象が、広く見られるようになるだろう。

しかし、第三次産業革命はまだ始まったばかりであって、現在は、過去の第二次産業革命との比較でいえば、１９世紀末の重化学工業の出現期にあたる。１９世紀末には、自動車も電話も無線電信も、すでに発明されていた。しかし、それらの技術はまだ、安価な製品やサービスを大量生産して一般大衆の利用に供しうるまでには成熟していなかった。つまり、１９世紀末の第二次産業革命は、まだその成熟というには程遠い、「突破」段階にあったのである。同様に現在の第三次産業革命も、今はまだその突破段階にあるということができよう。もちろん、第三次産業革命も、いずれはその成熟段階を迎える。その暁には、今日すでにその萌芽が見られるバーチャル・リアリティの技術や、各種の「エージェント」技術あるいは「人工生命」関連の技術などが、広く利用される製品やサービスを提供しうるまでに成熟し、それらを日常生活のすみずみにまで取り入れた新しいライフスタイルが普及・定着するようになるだろう。しかし、それはまだまだ何十年か先の話であって、現在の突破段階での課題は、既存の産業（第一次産業から第三次産業までのすべてにわたる）が、新しい情報通信技術を積極的に導入するための情報化投資を行って、みずからの業務の生産性のそれこそ革命的な向上をはかるべき時だと思われる。

他方、第三次産業革命の到来を、過去の第二次産業革命の成熟段階とそのまま短絡させて、家電の次は「情報家電」の時代だとするのは、期待はずれに終わるだろう。それは、近年の「双方向テレビ」騒ぎが一時の空騒ぎに終わったことや、ＤＶＤの不振などからも明らかだろう。インターネットがただちに大衆的な宣伝・広告の場になったり、大規模な小売り店舗になったりするといった期待も、同様な短絡的発想からくる希望的観測にすぎない。

第三の見方として、トフラー流の「第三の波」仮説がある。あるいは、さまざまな形での「ポスト・モダン」論がある。これらの議論に共通しているのは、今や近代文明そのものを超える新たな文明に向かう社会変化が起こっているという見方が取られていることである。これまでの近代文明を特徴づけてきた個人主義や進歩主義、あるいはデカルト、ニュートン流の二元論や還元主義的機械論への反省や批判が、ただちにその全面的な否定につながるばかりか、そもそも現実の問題として近代文明は存続不能になりつつあるというのである。

私もまた、近代文明がいずれはその発展の限界に到達するであろうということや、近代文明を支えてきた基本的な世界観や価値観とは異なるものに立脚する新文明[1]が、いずれは出現するという可能性まで否定するものではない。それどころか、今日の近代文明社会の中に、すでに新たな文明の到来を予見させるような新しい思想的な動きや社会的活動が見られることも否定しない。しかし私は、そのような動きが本格化するのはまだまだかなり遠い将来のことであって、現在は、上述した第二次産業革命の成熟のいっそうの推進や、第三次産業革命の突破の試みと並行して、近代文明それ自体のいわば第三局面とも呼ぶべき新たな局面

への進化が、起こっていると見ている。そこには、これまでの近代文明を支えてきた世界観や価値観への反省はあっても、その全面的な否定にまではいたらない。現に、第三次産業革命の進行という一事をとってみてもわかるように、近代社会の進歩は終わったどころか、これまでには見られなかったほどの急速で全面的な進歩が、まさにわれわれの眼前で進行しているではないか。また、今日見られるような社会思想や人間観の進化は、すでに今世紀の前半から始まっていた量子力学の発展に代表されるような、自然科学の進化と（かなりのタイムラグを伴いながらではあるが）密接不可分に連動していると思われる。そこでは、進歩主義や個人主義は、全面的に否定されるのではなく、より成熟した、いってみればしなやかな形のものへと進化しているという見方が、十分に成立しうるように思われる。[2)]

そういうわけで、私としては、今日進行中の「情報革命」の第三の（しかも中心的な）意味、ないし側面として、「近代文明の第三局面への移行」をあげることにしたい。いうまでもないが、情報革命のこれら三つの側面は、単に同時並行的に進展しているというだけでなく、互いに密接に関連し、相互作用しあっている。とりわけそのことが、「第三次産業革命」に対して、これまでの産業革命には見られない、複雑な性格を付与していると考えられるのである。以下本稿では、情報革命のこの第三の意味ないし側面に、もっぱら焦点をあわせて議論を進めてみたい。

1) 私は、それを「智識文明」と呼んでいる。公文俊平、『情報文明論』（NTT 出版、１９９４年）参照。

2) この論点については、秋元勇巳、『しなやかな世紀』（日本電気協会新聞部、１９９５年）を参照。なお、私が近代文明の成熟として特徴づけたいような新しい生命観や人間・社会観を提示している試みの例としては、とりあえず、

清水博、『生命知としての場の論理』（中公新書、１９９６年）や、

Danah Zohar, *The Quantum Society.* Quill, 1994

をあげておこう。

二、近代化の第三局面としての情報化

近代文明は、互いに一部重複する三つの局面を経て進化していると解釈できる。私は以前、そのような解釈を『情報文明論』のなかで提示してみた。

すなわち、近代化の第一局面は、古典古代の宗教文明帝国の周辺での領域的な権力体の自立（封建化）に始まり、軍事・航海技術の一連の革新（軍事革命）が引き起こした近代主権国家と近代的国民、および主権国家を要素とする広域的な社会システムである国際社会の共進化（軍事化）によって、その頂点に達する。近代主権国家は、国際社会を舞台として一般的

な脅迫・強制力としての国威の増進・発揚競争（威のゲーム）を行う。しかし、２０世紀に入ると、威のゲームの社会的正統性は次第に疑問視されるようになり、今日では威のゲームの手段としての侵略戦争は国際的に是認されなくなっている。

近代化の第二局面は、ヨーロッパや日本での商業活動の活発化（商業化）に始まり、生産・輸送技術の一連の革新（産業革命）が引き起こした近代産業企業と近代的市民、および産業企業を要素とする広域的な社会システムである世界市場の共進化(産業化)によって、その頂点に達する。近代産業企業は、世界市場を舞台として、一般的な取引・搾取力としての富の蓄積・誇示競争（富のゲーム）を行う。今日でも、富のゲームの社会的正統性は、やや疑問視される面がなくはないとはいえ、依然として否定はされていない。むしろ、国家主導の社会主義的産業化（主権国家がプレヤーとなって行われる富のゲーム）の有効性が否定された今日では、企業をプレヤーとする世界市場での富のゲームの正統性は、あらためて世界的に是認の度を強めているということができよう。

近代化の第三局面は、ルネサンスや宗教革命、科学革命（人文化）に始まり、情報通信技術の一連の革新（情報革命）が引き起こした近代情報智業と近代的智民、および情報智業を要素とする広域的な社会システムである地球智場の共進化(情報化)によって、その頂点に達するものと思われる。すでに、これまでのシティズン(市民)とは異質の、ネットワークを本拠として活動するネティズン(智民)の台頭や、国家や企業とは性格を異にするボランティア一活動体としてのＮＧＯやＮＰＯの台頭は、多くの人の注目するところとなっている。近代情報智業は単なるボランティア活動の域を越えて、地球智場を舞台として、一般的な説得・誘導力としての智の獲得・発揮競争（智のゲーム）を、意図的に行うようになっていくだろう。しかし、そのための倫理や規則の形成は、現在はまだその緒についたばかりである。

以上は『情報文明論』での議論のごく手短な要約だが、ここではあらためて、近代化の進展過程を、人々の生活・活動能力の増大（エンパワーメント）と生活・活動領域の拡大という視点から見直してみよう。[1)]

封建化＝軍事化の過程は、なによりもまず、人々の軍事的エンパワーメントの過程だった。同時に、人々の生活・活動領域は、地球の全表面にわたって拡大した（地理上の発見)。人々は競って、独立した領域的権力体を作り上げ、その支配の範囲を人的・空間的に拡大していこうとした。しかしながら、さまざまな個人や集団による軍事力の自由な入手と行使の試みは、平和な社会秩序の崩壊をもたらすことが懸念された。そこで、近代化の第一局面において採用された制度的な工夫は、局所的な集権的解決と広域的な分権的解決との組み合わせであった。すなわち、局所的には、近代主権国家は、軍事力の保有と行使の権利を自らの手に集中すると共に、私人によるその保有と行使を制限もしくは禁止しようとした。国家（及び

国民）は、軍事力の国家独占と引き換えに、国家主権を国民の手に委ねること（民主主義体制の採用）によって、さらにそれに加えて各種の人権を国民に対して保障することによって、少なくとも対内的な軍事力の乱用には歯止めをかけようとした。他方、広域的には一定のルール（国際法、なかんずく戦時国際法）にもとづく、主権国家の正規軍による軍事力の分権的な保有と行使の自由を互いに認め合った。その結果としての「バランス・オブ・パワー」による平和が、あるいは自然に（つまり、１８世紀におけるように、国際社会における見えざる手の働きによって）、あるいは政策的に（つまり、１９世紀におけるように、意図的に「バランサー」としてとしての役割を演じようとする軍事大国の活動を通じて）、達成されるものと期待されたのである。さらに威のゲームの正統性が否定された後の２０世紀には、二度の世界大戦および冷戦における民主主義国家陣営の勝利の教訓が、「民主主義（体制の国際的な普及）を通じての平和の達成と維持」というイデオロギーを生み出した。しかし、地球上のすべての国家や地域に対して民主主義体制の導入を性急に迫ることが本当に望ましいのか、あるいはそもそも可能なのか、また、民主主義になれば本当に平和は守れるのかといった論点は、必ずしも証明済みだとはいえない。

続く商業化＝産業化の過程は、人々の経済的エンパワーメントの過程だった。同時に、人々の生活・活動領域は、地球の表面から、地中、空中、海中を含む三次元の空間（「テクノスペース」）に拡大した。そして、人々はこのテクノスペースを、多種多様な人為物、すなわち人間が手を加えた土地や、新たに作り出した建物、機械、器具で満たそうとした。今日では、とりわけ都市生活者の周辺には、「自然」はほとんど見当たらないまでになっている。

しかしながら、さまざまな個人や集団による経済力の自由な入手と利用の試みは、結果的に独占体の発生や、貧富の格差の拡大と固定をもたらしはしないかと懸念された。そこで、近代化の第二局面においては、近代主権国家の成功を前提として、二通りの互いに競合する制度的な工夫が、国によってそれぞれ別々に試みられた。その一つは、経済力（私有財産）の保有と利用は、基本的には分権的な私的主体の自由に委ねるという、市場機構に依存した自由主義的な解決であった。自由主義的な解決方式には、その後２０世紀に入って、独占の形成は規制しようとする反独占政策や、所得や財産の不平等の拡大を防ごうとする再分配政策、労働環境や自然環境の安全・保全をめざす諸種の政策や制度が付け加えられていった。

いま一つの解決方式は、経済力（とりわけ生産手段）を国家が独占して、生産や分配は国家の指令の下に行うという社会主義的な指令（計画）経済方式であった。この方式は、産業化の初期局面では相当の有効性を持つと思われたが、発展した産業社会の運営には不適切な方式であることが次第に明らかとなり、１９９１年のソ連の崩壊にいたって、自由主義的解決方式の優位が世界的に明らかになったと考えられている。しかしながら、市場を万能と考

える極端な自由主義的イデオロギーが、産業化のあらゆる局面において適切といえるかどうか、とりわけ第三次産業革命の突破段階にさいしてどこまでの有効性や普遍妥当性をもちうるかは、なお疑問の余地が残っている。少なくとも、国家や、後述する智民・智業の果たす補完的な役割にも、重要なものがあると考えられる。

以上を前提にして、かつての人文化から今日の情報化へと続く、近代化の第三局面での社会変化過程の意味を考えてみよう。この過程は、人々の知的エンパワーメントの過程だといってよいのではないだろうか。同時に、人々の生活・活動領域は、三次元の物理的な空間としてのテクノスペースを超える新次元の空間、すなわちサイバースペースにわたって拡大しようとしている。上述した智業の説得・誘導活動の場としての「智場」のもっとも重要な部分は、まさにこのサイバースペースに位置することになるだろう。また、人々がサイバースペースに入っていくための入り口というかインターフェースが、インターネットに他ならないということもできよう。実際、インターネットの発達の歴史をふりかえるならば、それが研究者の間のコミュニケーションとコラボレーションのもっとも強力な手段として、まず発達してきたことは明らかである。その意味では、インターネットは、第三次産業革命の産物というよりはむしろ、その原動力だということができよう。近代化の第三局面において、とりわけその中での情報化の開始と共に台頭してくる近代情報智民たち——彼らは、近代産業社会の市民たちが、一方では企業の従業員として生産や販売に従事しながら、他方では消費者として企業の販売活動の対象となっていたのと同様な意味で、一方では智業への積極的参加者であると同時に、他方では智業による説得や誘導の働きかけの対象でもあるのだが——は、産業社会の大衆のような情報や知識の受け身の受容者ではない。彼らは、積極的に情報を収集すると同時に、みずから情報の発信者としても活動する。これからの情報社会においては、生み出され通有される情報や知識の圧倒的に多くの部分は、企業ではなく智業や智民たちによるものになると私は予想している。智場に構築される多種多様なデータベースや知識ベースの多くは、智業や智民たちによって分散的に構築され、互いに連結されて利用されることになるだろう。それは、商品として販売されたり、商品としての著作権を主張されたりはせず、むしろ積極的な通有の対象として、たかだか（集団的な）情報権[2)]の対象とされるにとどまるだろう。その利用は、無料であるか、あるいはたかだか実費の支払いでよいことになるだろう。

さて、この意味での情報化の進展、とりわけさまざまな智業による競争的な説得・誘導活動の進展は、これまでの近代社会で懸念されたのと似たような種類の社会問題を引き起こすことが懸念される。すなわち、知的な強者ないし富者と、知的な弱者ないし貧者との間の階級分裂を引き起こしたり、固定させたりすることが懸念されるのである。軍事化や産業化の

初期にもそうだったように、この種の階級分裂をまったく無しで済ませることは不可能に近いだろう。分裂を恐れるあまり、あまりにも強い規制の網をかければ、情報化の過程全体が進行を押しとどめられることにもなり兼ねない。しかし、だからといって単純に放置しておくわけにもいかないだろう。

産業社会の場合と同様、ここでも二つの異なる政策的・制度的対応の試みが考えられる。その一つは、かつてジョージ・オーエルが『１９８４年』の中で予想したような、国家による知識や情報の独占的保有と利用、私人の情報生活への超集権的な干渉の試みである。あるいは、極端な「管理社会」としての情報社会の構築の試みである。しかし、ピーター・ヒューバーが説得的に示したように[3)]、また、インターネットの発達過程が現に示しているように、情報社会の集権化は、困難極まる試み、事実上そもそも実現不可能な試みといわざるを得ない。おそらく現実的に意味のある唯一の解決方式は、知力の獲得や発揮に関しては、私有財産の場合よりもより徹底した、超分権的な解決方式を考える以外にないと思われる。

しかし、人々による知力の獲得や発揮の試みを無制限に自由にするわけにもいかないだろう。かつて、「自由」な産業活動が長時間の危険な労働や自然環境の汚染をしばしば引き起こしたように、「自由」な知的活動の放任は、無際限の長時間作業による肉体と精神の破壊や、社会の情報環境の汚染を引き起こす恐れが、決してないとはいえない。そうであるならば、なんらかの社会的な規制措置の導入は、やはり必要不可欠だろう。そのような規制は、情報や知識の「表現の自由」と「秘匿の自由」の、二つの側面から考えてみることができる。

「表現の自由」に対する規制は、基本的には各人の個人的なレベルで主体的に対処することから出発し、それで対処が困難な場合にのみ、家族やコミュニティのレベルに、それでも難しい場合は、自治体や国家、あるいは国際機関のレベルに委ねるといった順序で進むことを考えるのがよさそうだ。他方、「秘匿の自由」（暗号化技術の利用や、なりすまし等）への規制の仕組みの導入は、その逆の順序で考えていくのが良いように思われる。しかし、最終的な諸規制の決定の権限をどのレベルにそれぞれ分担して委ねるにせよ、決定への到達にあたっては、できるだけ多様なレベルからの見解や情報のインプットがあることが望ましい。

1) 私は、以下の議論とよく似た議論を、編著『ネティズンの時代』の第一部でも試みている。そちらの方が、やや古い（しかし、より詳しいところもある）バージョンなので、比較参照していただければ幸いである。

2) 「情報権」の概念については、拙著『情報文明論』を参照されたい。

3) Peter Huber, *Orwell's Revenge: The 1984 Palimpsest.* New York: The Free Press, 1994.

三、情報化と産業化の関係

私は本稿で、近代社会の産業化が依然として終わらないどころか、第二次産業革命もまだ続いている一方で、第三次産業革命とも呼ぶべき新たな産業革命の突破段階が始まっているという見方を示した。しかし、それと同時に、産業化を超えるような（しかし、それ自体としては依然として近代社会の内部での変化にとどまっているような）、いわば狭義の情報化とでも呼ぶべき変化も今起こりつつあると主張した。そして、新しい生活・活動領域としてのサイバースペースおよび、それとのインターフェースとしてのインターネットは、まず智民たちによって構築され、智場として利用されていると主張した。

しかし、サイバースペース（およびインターネット）を企業のための「電子市場」とみなすことも、もちろん可能である。現に、最近発表された米国政府のレポート「電子商取引のグローバルな枠組み」には、そのような理解が明確に表明されている。だが、私はそのような見方を、少なくともそのまま受け入れることには抵抗を覚える。ましてや、インターネットの上で２０世紀のマスコミの世界と同様な商品の広告や「プッシュ」型の情報提供が主流となったり、商品としての情報や知識が氾濫することには、危惧の念を抱かざるを得ない。

もちろん、だからといって、インターネットが商取引のためにいっさい利用されてはならないなどという主張をするつもりはない。私が望んでいるのは、これまでの産業社会ではその他の社会的活動（たとえば、医療や教育）にとってのプラットフォームとしての役割を市場が果たしてきたのと似たような意味で、これからの情報社会では、智場がその他の社会活動、とりわけ産業活動のためのプラットフォームとなることである。いいかえれば、これからのビジネスには、智場のルールや慣行を十分尊重しつつ智場を利用してほしい。智場でのもっとも基本的な社会関係は、相互の知己と信頼関係の上に築かれる、情報と知識の通有、相互の説得・誘導と協働の関係である。そうだとすれば、智場での商取引は、まさにそのような相互の知己と信頼の関係、およびそれを前提とした緊密なコミュニケーションと自発的なコラボレーションに、立脚したものになってほしい。また、個々の企業は、智場での智業や智民たちの活動に十分な関心を払い、可能な限りの協働関係を展開していくよう努力してほしい。他方、智場から選られるあらゆる情報を「知的財産権」の対象として抱え込んだり、顧客のプライバシーに関する情報を商品として販売の対象にしたり、あるいは顧客たちを自社の独占する顧客として囲い込んだりは、しないでほしい。智業と企業（とそして国家）は、情報社会において、協働を通じての共生関係を発展させていくことこそ望ましいのである。

招待講演
6月5日（木）

会場：富山大学　黒田講堂

時間：13:00～14:00

演題：富山の売薬と情報産業

講師：中尾哲雄（株式会社インテック
代表取締役社長）

司会：中島信之（富山大学）

富山の売薬と情報産業

中 尾 哲 雄
株式会社インテック

メモ用紙

メモ用紙

一般講演論文
6月4日（水）

A室

WEA1	制御 －安定性－	司会 安信誠二 （筑波大学）
WEA2	制御 －設計－	司会 村上周太 （九州工業大学）
WEA3	制御方法論	司会 田中一男 （金沢大学）
WEA4	制御方法論・応用	司会 増井重弘 （法政大学）

B室

WEB1	規則学習（1）	司会 小沢和浩 （法政大学）
WEB2	規則学習（2）	司会 小林俊一 （信州大学）
WEB3	規則学習（3）	司会 本多中二 （電気通信大学）
WEB4	学習・モデリング	司会 愛須英之（東芝）

C室

WEC1	画像（1）	司会 黒須顕二 （近畿大学）
WEC2	画像（2）	司会 廣田薫（東京工業大学）
WEC3	ファジィデータ解析（1）	司会 中森義輝 （甲南大学）
WEC4	ファジィデータ解析（2）	司会 奥田徹示 （大阪工業大学）

D室

WED1	推論（1）	司会 片井修（京都大学）
WED2	推論（2）	司会 水本雅晴（大阪電気通信大学）
WED3	推論（3）	司会 磯部光朗（NECシステム建設）
WED4	推論（4）	司会 王碩玉（高知工科大学）

E室

WEE1	医療とバイオソフトコンピューティング（1）	司会 有田清三郎（関西医科大学）
WEE2	医療とバイオソフトコンピューティング（2）	司会 矢鳴虎夫（九州工業大学）
WEE3	支援システム	司会 加藤浩介 （広島大学）
WEE4	若手研究者パネル：研究テーマと人間	司会 中川友紀子 （東京工業大学）

F室

WEF1	データベース	司会 西野順二（福井大学）
WEF2	エンジニアリング － 交通 －	司会 前田博（九州工業大学）
WEF3	エンジニアリング	司会 野本弘平（三菱電機）
WEF4	エンジニアリング－生産システム－	司会 鳶敏和（ダイダン）

S室

WES1	講演：対話型システムのユーザビリティ設計とその評価 講師：小松原明哲（金沢工業大学）	司会 田丸恵理子（富士ゼロックス）
WES2	講演：リスクの概念と評価方法 講師：武井勲（富山大学）	司会 松下裕 （清水建設）
WES3	経済・経営	司会 塚本弥八郎 （名城大学）
WES4	ビアセッション：ファジィ・富山・いいたい放題	司会 菅野道夫（東京工業大学）

WEA1-1

ファジィ係数を持つ線形動的系の安定性

Stability of Linear Dynamic System with Fuzzy Coefficients

徐　浩源、　影井　清一郎、　関口　隆
H.Y. Xu,　S. Kagei,　T. Sekiguchi

横浜国立大学　工学部　電子情報工学科
Division of Electrical Computer Engineering
Faculty of Engineering, Yokohama National University, Japan 240

Abstract : A marginal grade of stability is introduced to fuzzy linear dynamic systems whose equations are described with fuzzy numbers. An algorithm for its evaluation is shown as well as some numerical examples.

1　はじめに

線形動的システムのあいまい性は、微分方程式の係数をファジィ化することによって表わすことも可能である。本報告では、ファジィ数を係数とする微分方程式で記述される線形動的系の安定性について議論する。

2　安定性のグレード

ファジィ数を係数に持つファジィ線形動的系を考える。

$$\dot{x} = \tilde{A}x + \tilde{B}u \qquad (1)$$

$$y = \tilde{C}x \qquad (2)$$

ここで、$\tilde{A},\tilde{B},\tilde{C}$ はファジィ数を要素とする行列（ファジィ行列）である[1]。

いま、同じ次数のクリスプな係数行列を持つ安定でない系を

$$\dot{x} = Px + Qu \qquad (3)$$

$$y = Rx \qquad (4)$$

とするとき、ファジィ線形動的系（式（1）と式（2））の安定性の限界：ϕを、メンバシップ関数を用いて、次のように定義する。

$$\phi = \sup_{(P,Q,R)} \{f_{\tilde{A}}(P) \wedge f_{\tilde{B}}(Q) \wedge f_{\tilde{C}}(R)\} \qquad (5)$$

ここで、ファジィ行列 $\tilde{A}$ とクリスプ行列 P との等価性の度合：$f_{\tilde{A}}(P)$ は次のように定義される。

$$f_{\tilde{A}}(P) = \min_{i,j} f_{\tilde{a}_{ij}}(p_{ij}) \qquad (6)$$

また、式（5）の sup はすべての安定でないクリスプなシステムについて取られる。

システムの安定性は行列 $\tilde{A}$（または P）だけで定まるので、式（5）は次のように書ける。

$$\phi = \sup_{P} f_{\tilde{A}}(P) \qquad (7)$$

ここで、Pは安定でない行列、すなわち、実数部が正又はゼロの固有値を持つ行列である。

従って、安定性のグレード：gは

$$g = 1 - \phi \qquad (8)$$

で定義される（$g=1$が最も安定）。

3　グレードを求めるアルゴリズム

ファジィ行列 $\tilde{A}$ の α-cut から得られる区間行列を $\tilde{A}_\alpha=\{[a_{ij}^-,a_{ij}^+]\}$ とし、(i,j) 要素が a_{ij}^- または a_{ij}^+ となる行列を P^* とする。行列 P^* は 2^M 個ある（Mは $\tilde{A}$ に含まれるファジィ数の要素の個数）。このとき、あらゆる P^* が安定であるような α の下限が式（7）の ϕ となる。

なお、ファジィ行列 $\tilde{A}$ の特性多項式

$$\tilde{\mu}(s)=\tilde{a}_0 s^n+\tilde{a}_1 s^{n-1}+\cdots+\tilde{a}_{n-1}s+\tilde{a}_n \qquad (9)$$

の係数 $\tilde{a}_0,\tilde{a}_1,\cdots,\tilde{a}_{n-1},\tilde{a}_n$ を拡張原理で求めるとすると、すべての固有値の実数部が複素平面の左半面にあるときの限界は ϕ で与えられる。

4　数値例

$\tilde{A}$ のすべての要素がファジィ数となる場合について安定性のグレード：g を求める。なお、簡単のため、ファジィ数 $\tilde{a}$ のメンバシップ関数は三角型とし、台集合は $(a-1,a+1)$ とする(図1)。

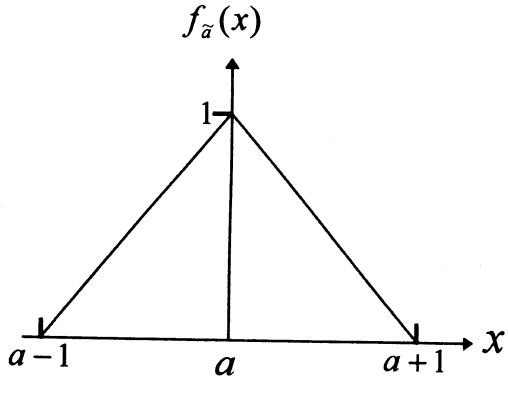


図1　ファジィ数 $\tilde{a}$ のメンバシップ関数

[例1]

行列 $\tilde{I}$ を対角要素が $\tilde{1}$、他の要素が $\tilde{0}$ となる行列とする。これを $diag[-\tilde{1},-\tilde{1},\cdots,-\tilde{1}]$ と書くことにする。

$-\tilde{I}$	g
$diag[-\tilde{1},-\tilde{1}]$	0.500
$diag[-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{1}]$	0.333
$diag[-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{1}]$	0.250
$diag[-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{1}]$	0.200

[例2]　4行4列の対角行列

4×4行列	Aの特性多項式	g
$diag[-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{1}]$	$(s+1)^4$	0.250
$diag[-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{2}]$	$(s+1)^3(s+2)$	0.286
$diag[-\tilde{1},-\tilde{1},-\tilde{2},-\tilde{2}]$	$(s+1)^2(s+2)^2$	0.333
$diag[-\tilde{1},-\tilde{2},-\tilde{2},-\tilde{2}]$	$(s+1)(s+2)^3$	0.400
$diag[-\tilde{2},-\tilde{2},-\tilde{2},-\tilde{2}]$	$(s+2)^4$	0.500

[例3]

$$\tilde{A}=\begin{bmatrix}-\tilde{1}&\tilde{0}&\tilde{0}&\tilde{0}\\ \tilde{0}&-\tilde{1}&\tilde{0}&\tilde{0}\\ \tilde{0}&\tilde{0}&-\tilde{1}&\tilde{0}\\ \tilde{0}&\tilde{0}&\tilde{0}&-\tilde{1}\end{bmatrix}+n\times\begin{bmatrix}-3&1&1&1\\ 1&-3&1&1\\ 1&1&-3&1\\ 1&1&1&-3\end{bmatrix}$$

n	Aの特性多項式	g
0	$(s+4)^4$	0.250
1	$(s+1)(s+5)^3$	0.250
2	$(s+1)(s+9)^3$	0.250

参考文献

[1]S.Kaguei and A.Ohsato : Rank of Fuzzy Matrix and its Evaluation, Int.J.Fuzzy Set & System, 38, pp.355-364(1990).

問い合わせ先：

〒240　横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5
横浜国立大学工学部
電子情報工学科　影井研究室
徐　浩源
Email:haoxu@fuzzy.dnj.ynu.ac.jp

シングルトン後件部を持つファジィシステムの安定化制御

Stabilizing Control of Fuzzy System with Singleton Consequents

李 昌勲　　菅野 道夫
Chang-Hoon Lee　　Michio Sugeno

東京工業大学 知能システム科学専攻

Department of Computational Intelligence and Systems science, Tokyo Institute of Technology

Abstract : This paper discusses as the stabilizing control of a fuzzy system with singleton consequents. Firstly a canonical form of an unforced fuzzy system and its stability theorem recently given by Sugeno are introduced. The concept of vertex assignment is then proposed to design a fuzzy state-feedback controller. Two simple examples are shown to verify the stability theorem and the idea of the vertex assignment for stabilizing control.

1 はじめに

モデルに基づくファジィ制御器設計法に関して、近年、TSKシステムのファジィモデル規範制御器設計に関する多くの研究 [3,4,6] が行なわれている。一方、後件部がファジィ集合である通常のファジィ制御について、ファジィモデル規範制御に関する研究はほとんどない。代わりに、線形システムにファジィ制御を加え、伝統的な非線形制御理論のなかに埋め込んだ形態の研究 [1,2] は数多くある。通常のファジィ制御の場合、モデル規範制御がなかったのは入力のないファジィシステムの安定理論がなかったためである。

しかし、最近、菅野によりシングルトン後件部 [5] を持つファジィシステムに関する安定解析の研究 [7] が行なわれている。本稿では、その安定定理に基づいた制御器を含む閉ループシステムの安定条件を導き、安定条件において格子状に分割された状態空間の端点が重要な役割を果たしていることに着目して端点配置による安定化制御とその設計手順に関して述べる。

2 標準形と安定定理

本章では、シングルトン後件部を持つ連続時間ファジィシステムにおける菅野による標準形と安定定理について述べる。以下、簡単のためにシステムはすべて 2 次の場合に限る。

$$\begin{aligned} &if\ x(t)\ is\ G^{\sigma\tau}(x(t)),\ then\ \dot{x}(t)\ is\ h(\sigma,\tau). \\ &\qquad \sigma = 1,2,\cdots,n_1,\ \tau = 1,2,\cdots,n_2. \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、$x(t) = (x_1(t),\ x_2(t))^T$ は 2 次元状態ベクトル、$G^{\sigma\tau}(x) = (G_1^{\sigma}(x_1),\ G_2^{\tau}(x_2))^T$ は x に関するメンバーシップ関数ベクトル、$h(\sigma,\tau) = (h_1(\sigma,\tau),\ h_2(\sigma,\tau))^T$ はシングルトンベクトル、$n_1, n_2 \geq 2$ であり、T は '転置' を表す。そして、G_1^{σ} と G_2^{τ} は次のような三角型の正規メンバーシップ関数であると仮定する：

$$G_i^{\lambda}(x_i) = \begin{cases} \dfrac{x_i - d_i(\lambda-1)}{d_i(\lambda) - d_i(\lambda-1)} & d_i(\lambda-1) \leq x_i \leq d_i(\lambda) \\ \dfrac{d_i(\lambda+1) - x_i}{d_i(\lambda+1) - d_i(\lambda)} & d_i(\lambda) \leq x_i \leq d_i(\lambda+1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

ここで、$i = 1,2$ であり、$d_i(\lambda) < d_i(\lambda+1)$、$\lambda = \sigma,\ \tau$ である。

2 次元状態空間でのスクエア $R_{\sigma\tau}$ とベクトル $d(\sigma,\tau)$ を

$$R_{\sigma\tau} \equiv [d_1(\sigma),\ d_1(\sigma+1)] \times [d_2(\tau),\ d_2(\tau+1)] \tag{3}$$

$$d(\sigma,\tau) \equiv (d_1(\sigma),\ d_2(\tau))^T \tag{4}$$

と定義する。特に、$d_1(\sigma) < 0 < d_1(\sigma+1)$ と $d_2(\tau) < 0 < d_2(\tau+1)$ である $R_{\sigma\tau}$ をゼロスクエア $R^o_{\sigma\tau}$ と定義する。図 1 に

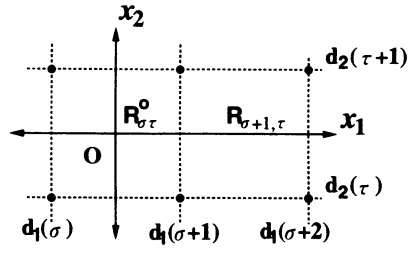


図 1: 状態空間上のスクエア (・はスクエアの端点)

$x_1 - x_2$ 平面をスクエアに分割した例を示す。(1) 式に基づくファジィ推論が h の重み付き平均で求められるとすると、$G_1^{\sigma} + G_1^{\sigma+1} = 1$、$G_2^{\tau} + G_2^{\tau+1} = 1$、そして $\sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{j=\tau}^{\tau+1} G_1^i G_2^j = 1$ であることにより、次の 標準形が導かれる。

標準形 1 (パラメトリック表現 [7]) $x(t) \in R_{\sigma\tau}$ に対して、(1) 式のファジィシステムは次のように表される。

$$\begin{aligned} x &= \alpha_1\alpha_2 d(\sigma,\tau) + \alpha_1(1-\alpha_2)d(\sigma,\tau+1) \\ &\quad +(1-\alpha_1)\alpha_2 d(\sigma+1,\tau) \\ &\quad +(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)d(\sigma+1,\tau+1) \end{aligned} \tag{5a}$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha_1\alpha_2 h(\sigma,\tau) + \alpha_1(1-\alpha_2)h(\sigma,\tau+1) \\ &\quad +(1-\alpha_1)\alpha_2 h(\sigma+1,\tau) \\ &\quad +(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)h(\sigma+1,\tau+1) \end{aligned} \tag{5b}$$

ここで、

$$\alpha_1(x_1) = \frac{d_1(\sigma+1) - x_1}{d_1(\sigma+1) - d_1(\sigma)},\ 0 \leq \alpha_1 \leq 1 \tag{6a}$$

$$\alpha_2(x_2) = \frac{d_2(\tau+1) - x_2}{d_2(\tau+1) - d_2(\tau)},\ 0 \leq \alpha_2 \leq 1. \tag{6b}$$

なお、(5) 式は次シングルトンルールを含んでいる。

$$x = d(i,j) \longmapsto \dot{x} = h(i,j) \tag{7}$$

ここで、$i = \sigma, \sigma+1$、$j = \tau, \tau+1$ である。
引続き、状態空間表現を導き出すため

$$a_{11} = \frac{h_1(\sigma+1,\tau) - h_1(\sigma,\tau)}{d_1(\sigma+1) - d_1(\sigma)} \tag{8a}$$

$$a_{21} = \frac{h_2(\sigma+1,\tau) - h_2(\sigma,\tau)}{d_1(\sigma+1) - d_1(\sigma)} \tag{8b}$$

$$a_{12} = \frac{h_1(\sigma,\tau+1) - h_1(\sigma,\tau)}{d_2(\tau+1) - d_2(\tau)} \tag{8c}$$

$$a_{22} = \frac{h_2(\sigma,\tau+1) - h_2(\sigma,\tau)}{d_2(\tau+1) - d_2(\tau)} \tag{8d}$$

$$a_{11}^{+} = \frac{h_1(\sigma+1,\tau+1)-h_1(\sigma,\tau+1)}{d_1(\sigma+1)-d_1(\sigma)} \quad (9a)$$

$$a_{21}^{+} = \frac{h_2(\sigma+1,\tau+1)-h_2(\sigma,\tau+1)}{d_1(\sigma+1)-d_1(\sigma)} \quad (9b)$$

$$a_{12}^{+} = \frac{h_1(\sigma+1,\tau+1)-h_1(\sigma+1,\tau)}{d_2(\tau+1)-d_2(\tau)} \quad (9c)$$

$$a_{22}^{+} = \frac{h_2(\sigma+1,\tau+1)-h_2(\sigma+1,\tau)}{d_2(\tau+1)-d_2(\tau)} \quad (9d)$$

とし、$\alpha_1^o \equiv \alpha_1(0)$、$\alpha_2^o \equiv \alpha_2(0)$ と定義すると、(5) 式と (6) 式により以下のような 2 次システムに対する状態空間表現が求められる。

標準形 2 (状態空間表現 [7]) (1) 式のファジィシステムは以下のように表される。

$$\dot{x} = A_{\sigma\tau}(x)x + \mu_{\sigma\tau}, \quad x \in R_{\sigma\tau} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}\mu_{\sigma\tau} = {} & \alpha_1^o\alpha_2^o h(\sigma,\tau) + \alpha_1^o(1-\alpha_2^o)h(\sigma,\tau+1) \\ & +(1-\alpha_1^o)\alpha_2^o h(\sigma+1,\tau) \\ & +(1-\alpha_1^o)(1-\alpha_2^o)h(\sigma+1,\tau+1)\end{aligned} \quad (11)$$

ここで、$x \in R_{\sigma\tau}^o$対して$\mu_{\sigma\tau} = \mathbf{0}$である。そして、行列 $A_{\sigma\tau}$ は 4 つの等価表現を持つが、以降は次の表現を用いる。

$$A_{\sigma\tau} : \alpha_2 S(\tau) + (1-\alpha_2)S(\tau+1) \quad (12)$$

$$S(\tau) = \begin{pmatrix} a_{11} & \alpha_1^o a_{12} + (1-\alpha_1^o)a_{12}^{+} \\ a_{21} & \alpha_1^o a_{22} + (1-\alpha_1^o)a_{22}^{+} \end{pmatrix} \quad (13a)$$

$$S(\tau+1) = \begin{pmatrix} a_{11}^{+} & \alpha_1^o a_{12} + (1-\alpha_1^o)a_{12}^{+} \\ a_{21}^{+} & \alpha_1^o a_{22} + (1-\alpha_1^o)a_{22}^{+} \end{pmatrix} \quad (13b)$$

一般に $A_{\sigma\tau}$はxの関数行列であり、(12) 式の場合、α_2を通して x_2の関数になっている。(12) 式の表現から (10) 式のシステムは区分的にポリトピックなアフィンシステムであることがわかる。

状態空間表現より、$R_{\sigma\tau}$の端点におけるシングルトンルールは、簡単に次のように求められ、これを端点条件 VCと呼ぶ。

$$VC : h(i,j) = A_{\sigma\tau}(d(i,j))d(i,j) + \mu_{\sigma\tau} \quad (14)$$

ここで、$i = \sigma, \sigma+1$、$j = \tau, \tau+1$ である。そこで、VCを求めることにより、状態空間表現からパラメトリック表現を再現できる。そして、$x \in R_{\sigma\tau}^o$対して以下の条件を果し、ゼロ条件 ZCと呼ぶ。

$$ZC : \mu_{\sigma\tau} = \mathbf{0}. \quad (15)$$

$$AC : h(\sigma+1,\tau) - h(\sigma,\tau) = h(\sigma+1,\tau+1) - h(\sigma,\tau+1) \quad (16)$$

をアフィン条件 ACと呼ぶ。ACが成り立つと、(8)、(9) 式において $a_{ij} = a_{ij}^{+}$となるので (12) 式において、$S(\tau) = S(\tau+1)$ となり、(10) 式のシステムは定数行列 $A = \{a_{ij}\}$ を持つアフィンシステムとなる。

安定条件を導出するためリヤプノフ関数 $V(x) = x^T Px$を考える。ここで、Pは正定行列である。(5) 式を用いると $V(x)$ の時間微分$\dot{V}(x) = \dot{x}^T Px + x^T P\dot{x}$は

$$\begin{aligned}\dot{V}(x) = {} & \alpha_1^2\dot{V}(\sigma,*) + (1-\alpha_1)^2\dot{V}(\sigma+1,*) \\ & +2\alpha_1(1-\alpha_1)C(\cdot,*) \\ & \text{但し、} d_2(\tau) \le d_2(*) \le d_2(\tau+1)\end{aligned} \quad (17a)$$

あるいは、

$$\begin{aligned}\dot{V}(x) = {} & \alpha_2^2\dot{V}(*,\tau) + (1-\alpha_2)^2\dot{V}(*,\tau+1) \\ & +2\alpha_2(1-\alpha_2)C(*,\cdot) \\ & \text{但し、} d_1(\sigma) \le d_1(*) \le d_1(\sigma+1)\end{aligned} \quad (17b)$$

と書ける。ここで、

$$\dot{V}(i,*) = h(i,*)^T Pd(i,*) + d(i,*)^T Ph(i,*) \quad (18a)$$

$$\dot{V}(*,j) = h(*,j)^T Pd(*,j) + d(*,j)^T Ph(*,j) \quad (18b)$$

$$i = \sigma, \sigma+1, \quad j = \tau, \tau+1$$

$$C(\cdot,*) = h(\sigma,*)^T Pd(\sigma+1,*) + h(\sigma+1,*)^T Pd(\sigma,*) \quad (19a)$$

$$C(*,\cdot) = h(*,\tau)^T Pd(*,\tau+1) + h(*,\tau+1)^T Pd(*,\tau) \quad (19b)$$

である。そして、上式から得られた以下の不等式を安定端点条件 SVCと安定エッジ条件 SECと呼ぶ。

$$SVC : \dot{V}(i,j) < 0 \quad (20)$$

$$SEC : c(i,\cdot) - \sqrt{\dot{V}(i,j)\dot{V}(i,j+1)} < 0$$

$$c(\cdot,j) - \sqrt{\dot{V}(i,j)\dot{V}(i+1,j)} < 0 \quad (21)$$

ここで、$i = \sigma, \sigma+1$、$j = \tau, \tau+1$ である。

さて、(10) 式のシステムは次の 2 つのサブシステム

$$\dot{x} = S(\tau)x + \mu_{\sigma\tau} \quad (22a)$$

$$\dot{x} = S(\tau+1)x + \mu_{\sigma\tau} \quad (22b)$$

のα_2による凸結合により表される。それぞれのサブシステムに関する$\dot{V}(x)$ の時間微分を$\dot{V}_\tau(x)$、$\dot{V}_{\tau+1}(x)$ とすると、

$$\dot{V}(x) = \alpha_2\dot{V}_\tau(x) + (1-\alpha_2)\dot{V}_{\tau+1}(x) \quad (23)$$

ここで、$\dot{V}_\tau(x)$ と$\dot{V}_{\tau+1}(x)$ は各サブシステムの VCを求めることにより$\dot{V}_\tau(i,*)$、$C_\tau(\cdot,*)$ 等を用い、(17) 式の$\dot{V}(x)$ と同様に求めることができる。

安定定理 [7] 次のような区分的ポリトピックアフィンシステムを考える。

$$x(t) = A(\alpha_2)x(t) + \mu_{\sigma\tau}, \quad x(t) \in R_{\sigma\tau}$$

ここで、$R_{\sigma\tau}^o$において$\mu_{\sigma\tau} = 0$、

$$A(\alpha_2) = \alpha_2 S(\tau) + (1-\alpha_2)S(\tau+1).$$

ある共通の$P > 0$ に対して以下の条件を満たすならばシステムは大局的漸近安定である。

(1) ゼロスクエア $R_{\sigma\tau}^o$で、SVCと SECを満たし、$Q(\alpha_2^o) = -A(\alpha_2^o)^T P - PA(\alpha_2^o) > 0$ である。

(2) 他の領域で、2 つの extreme アフィンシステム：$\dot{x}(t) = S(\tau)x(t) + \mu_{\sigma\tau}$と$\dot{x}(t) = S(\tau+1)x(t) + \mu_{\sigma\tau}$に対して SVCと SECを満たす。

3 安定化ファジィ制御

本章では、(10) 式のファジィシステムに単一操作量 u を加えたファジィ制御系を考える。

$$\dot{x} = [A_{\sigma\tau}(x)x + \mu_{\sigma\tau}] + bu, \quad x \in R_{\sigma\tau} \quad (24)$$

すべての $R_{\sigma\tau}$において、ACと ZCが成り立つとき、上記の制御系は線形制御システムになる。

$$\dot{x} = Ax + bu \quad (25)$$

ここで、Aは定数行列、bは定数ベクトルである。

さて、ファジィモデルに基づく状態フィードバック安定化ファジィ制御を考える。問題は、安定定理に基づき複数個のプラント法則によって記述されているプラントモデルから全体制御系が安定になるような制御規則を求めることである。このために、安定定理に基づいて、端点配置 (vertex assignment) による設計法を提案する。

状態フィードバックファジィ制御器として各 $R_{\sigma\tau}$において以下のようなルールを考える。

$$if\ x(t)\ is\ G^{\sigma\tau}(x(t)),\ then\ u(t)\ is\ l(\sigma,\tau) \quad (26)$$

ここで、$l(\sigma,\tau)$ はスカラーで、シングルトンである。
(26) 式のパラメトリック表現は

$$\begin{aligned} u(t) &= \alpha_1\alpha_2 l(\sigma,\tau)+\alpha_1(1-\alpha_2)l(\sigma,\tau+1) \\ &\quad +(1-\alpha_1)\alpha_2\, l(\sigma+1,\tau) \\ &\quad +(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)l(\sigma+1,\tau+1) \end{aligned} \tag{27}$$

となる。
(5) 式のプラントモデルのパラメトリック表現と (27) 式の u のパラメトリック表現により、(24) 式のファジィフィードバック制御系のパラメトリック表現は次のように求められる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha_1\alpha_2\{h(\sigma,\tau)+bl(\sigma,\tau)\} \\ &\quad +\alpha_1(1-\alpha_2)\{h(\sigma,\tau+1)+bl(\sigma,\tau+1)\} \\ &\quad +(1-\alpha_1)\alpha_2\{h(\sigma+1,\tau)+bl(\sigma+1,\tau)\} \\ &\quad +(1-\alpha_1)(1-\alpha_2) \\ &\quad \{h(\sigma+1,\tau+1)+bl(\sigma+1,\tau+1)\} \end{aligned} \tag{28}$$

そして、

$$a_1 = \frac{l(\sigma+1,\tau)-l(\sigma,\tau)}{d_1(\sigma+1)-d_1(\sigma)} \tag{29a}$$

$$a_2 = \frac{l(\sigma,\tau+1)-l(\sigma,\tau)}{d_2(\tau+1)-d_2(\tau)} \tag{29b}$$

$$a_1^+ = \frac{l(\sigma+1,\tau+1)-l(\sigma,\tau+1)}{d_1(\sigma+1)-d_1(\sigma)} \tag{30a}$$

$$a_2^+ = \frac{l(\sigma+1,\tau+1)-l(\sigma+1,\tau)}{d_2(\tau+1)-d_2(\tau)} \tag{30b}$$

とすると、ファジィ制御器の状態空間表現が求められる。

$$u(t) = c_{\sigma\tau}^T x+\xi_{\sigma\tau},\quad x\in R_{\sigma\tau} \tag{31}$$

$$\begin{aligned} \xi_{\sigma\tau} &= \alpha_1^o\alpha_2^o l(\sigma,\tau)+\alpha_1^o(1-\alpha_2^o)l(\sigma,\tau+1) \\ &\quad +(1-\alpha_1^o)\alpha_2^o l(\sigma+1,\tau) \\ &\quad +(1-\alpha_1^o)(1-\alpha_2^o)l(\sigma+1,\tau+1) \end{aligned} \tag{32}$$

ここで、$x\in R_{\sigma\tau}^o$ に対して $\xi_{\sigma\tau}=0$ とする。ベクトル $c_{\sigma\tau}$ は 2 つの表現ができるが、以下の表現を使うことにする。

$$c_{\sigma\tau} : \alpha_2 k(\tau)+(1-\alpha_2)k(\tau+1) \tag{33}$$

$$k(\tau) = (a_1,\ \alpha_2^o a_2+(1-\alpha_2^o)a_2^+)^T \tag{34a}$$

$$k(\tau+1) = (a_1^+,\ \alpha_2^o a_2+(1-\alpha_2^o)a_2^+)^T \tag{34b}$$

(24) 式と (31) 式から閉ループシステムの状態空間表現

$$\dot{x}=[A_{\sigma\tau}+bc_{\sigma\tau}^T]x+[\mu_{\sigma\tau}+b\xi_{\sigma\tau}],\ x\in R_{\sigma\tau} \tag{35}$$

が得られる。さて、(28) 式からわかるように

$$\hat{h}(i,j) = h(i,j)+bl(i,j) \tag{36}$$

とおけば、閉ループシステムは (5) 式と同形になる。また、

$$\hat{A}_{\sigma\tau} = A_{\sigma\tau}+bc_{\sigma\tau}^T \tag{37}$$

$$\hat{\mu}_{\sigma\tau} = \mu_{\sigma\tau}+b\xi_{\sigma\tau} \tag{38}$$

とすれば、(35) 式の閉ループシステムも (10) 式と同形になる。特に、

$$\hat{A}_{\sigma\tau} : \alpha_2\hat{S}(\tau)+(1-\alpha_2)\hat{S}(\tau+1) \tag{39}$$

$$\hat{S}(\tau) = S(\tau)+bk(\tau)^T \tag{40a}$$

$$\hat{S}(\tau+1) = S(\tau+1)+bk(\tau+1)^T \tag{40b}$$

と表せる。従って、ファジィフィードバック制御系に 2 章の安定定理を変形なしで適用できることがわかる。そこで、(36) 式より制御規則の後件部シングルトン l を動かすことにより安定条件を満たすように閉ループ制御系の端点における $\hat{h}$ を配置することを端点配置と呼ぶ。そして、端点配置する端点を含む領域での各 extreme アフィンシステムが可制御となるとき、端点可配置と呼ぶ。

安定定理はシステムの定性的な情報を与えてくれる。例えば、いくつかの領域の内部全体が安定条件を満たさなく、それを囲んだ回りの領域はすべて安定条件を満たす場合は、その境界の環状領域でリミットサイクルを持つことがわかる。それに加え、端点配置による制御はシングルトンルール表現からわかるようにファジィルールを操作することにつながり、言語レベルの定性的な制御の可能性を示している。

[端点配置による安定化制御器の設計手順]

(step 1) 適当に P を選び、プラントモデルについて 2 章の安定定理の条件 (1)、(2) をチェックする。そして、全ての領域において端点可配置を調べる。全領域で安定条件を満たすならばそのファジィシステムは大局的漸近安定である。端点可配置であるときは (step 2) を実行する。不安定端点あるいはエッジを含む領域で端点配置が不可能であれば、安定化制御できないため (step 1) で終了する。

(step 2) ゼロスクエアにおいては、通常の線形制御の方法 (例えば、最適制御) に従って、2 つの extreme システムについて、(31) 式のような安定化フィードバック則を求める。このときの $\hat{h}(i,j)$ は端点条件から求めることができる。

(step 3) ゼロスクエア以外において、ファジィ制御則を安定条件を満たし、かつ、開ループにおいて閉ループシステムの動特性が改善されるよう $\hat{V}$ を小さくできる望ましい応答を想定し ($\hat{h}$ または $\hat{S}$ を決め)、(40) 式より k を求める。求められるまで (step 3) を繰り返す。

4 例題

図 1 のような状態空間を 25 個のスクエアに分割したファジィシステムを例として扱うことにする。また、表記の簡略のため、システムの端点条件 (シングルトンルール) のみをテーブルで表すことにする。2 段になっているテーブルのパラメータは各点における上段: $h_1(\sigma,\tau)$ と下段: $h_2(\sigma,\tau)$ の値である。

例題 1 (不安定線形システム) 安定化制御の例として固有値 $\lambda=0.5\pm j$ を持つ次の不安定線形システムを考える。

$$\dot{x}=Ax+bu \tag{41}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 4.0 \\ -1.0 & 0.5 \end{bmatrix},\quad b=\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

(14) 式の端点条件 SVC から求められたファジィシステムのパラメータが表 1 である。設計手順に従い、まず、(step 1) このシステムの全ての端点で端点安定条件 SVC を満たさないため、全空間が不安定であることがわかる。そして、一般的には不安定端点やエッジを含む全ての領域での extreme アフィンシステムが端点配置であることを調べなければならないが、線形システムの場合は AC と ZC を満たしているためゼロスクエアだけを調べる。(step 2) ゼロスクエア $R_{\sigma\tau}^o$ において $S(\tau)=S(\tau+1)=A$ であり、例えば、最適制御により

$$k = k(\tau+1)\simeq(1.49,\ 8.26)^T$$

が求められる。(step 3) 速応性を要求するため安定定理の条

表 1: 線形システムのファジィモデル

$h1,\ h2$	$d_1(1)$	$d_1(2)$	$d_1(3)$	$d_1(4)$	$d_1(5)$	$d_1(6)$
		-2.0	-1.0	1.0	2.0	2.5
$d_2(1)$	-2.5	-9.25 9.00	-5.25 9.50	2.75 10.50	6.75 11.00	8.75 11.25
$d_2(2)$	-2.(	-9.00 7.00	-5.00 7.50	3.00 8.50	7.00 9.00	9.00 9.25
$d_2(3)$	-1.(	-8.50 3.00	-4.50 3.50	3.50 4.50	7.50 5.00	9.50 5.25
$d_2(4)$	1.(	-7.50 -5.00	-3.50 -4.50	4.50 -3.50	8.50 -3.00	10.50 -2.75
$d_2(5)$	2.(	-7.00 -9.00	-3.00 -8.50	5.00 -7.50	9.00 -7.00	11.00 -6.75
$d_2(6)$	2.5	-6.75 -11.00	-2.75 -10.50	5.25 -9.50	9.25 -9.00	11.25 -8.75

件 (2) を満たす望ましい応答を想定してkを求める。但し、線形であるため (step 2) で求めたkをそのまま使っても良いが、この場合、完全に線形制御を行うことになるのでトリビアルである。表 2 は設計した安定化制御器のパラメータである。そして、図 2 は元のシステムと安定化制御を行なった全体制御系との軌跡の比較である。例で使った初期値は$x(0) = (0.5,\ 0)^T$と$x(0) = (1.5,\ 0)^T$ であり、それぞれ実線と点線で表す。

表 2: ファジィ安定化制御器のパラメータ

$l(d_1, d_2)$		$d_1(1)$	$d_1(2)$	$d_1(3)$	$d_1(4)$	$d_1(5)$	$d_1(6)$
		-2.5	-2.0	-0.9	0.9	2.0	2.5
$d_2(1)$	-2.5	8.83	7.27	4.16	-2.06	-5.17	-6.72
$d_2(2)$	-2.0	8.62	12.18	6.90	-3.64	-8.91	-6.94
$d_2(3)$	-0.9	8.20	11.36	9.74	-6.77	-9.73	-7.36
$d_2(4)$	0.9	7.36	9.73	6.77	-9.74	-11.36	-8.20
$d_2(5)$	2.0	6.94	8.91	3.64	-6.90	-12.18	-8.62
$d_2(6)$	2.5	6.72	5.17	2.06	-4.16	-7.27	-8.83

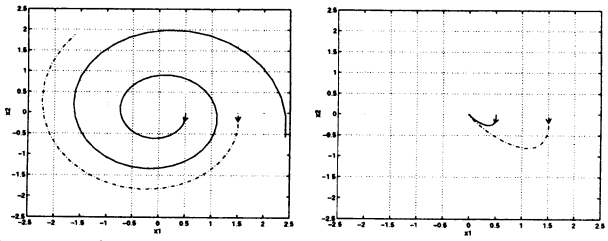


図 2: 不安定線形システム（左）と安定化制御（右）の状態空間での軌跡比較

例題 2 (不安定非線形システム) 非線形制御で入出力線形化による制御の例で使われている Van der Pol システム

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_1 + (1 - x_1^2)x_2 + u \end{aligned} \qquad (42)$$

の近似ファジィモデルの安定化制御を考える。表 3 は近似ファジィモデルのパラメータである。
(step 1) 全領域で端点可配置であるが、$(d_1(*), d_2(3))$ と

表 3: Van der Pol システムの近似ファジィモデル

$h_1,\ h_2$		$d_1(1)$	$d_1(2)$	$d_1(3)$	$d_1(4)$	$d_1(5)$	$d_1(6)$
		-2.5	-2.0	-0.9	0.9	2.0	2.5
$d_2(1)$	-2.5	-2.500 15.63	-2.000 13.00	-0.900 7.23	0.900 -2.23	2.000 -8.00	2.500 -10.63
$d_2(2)$	-2.0	-2.500 9.50	-2.000 8.00	-0.900 4.70	0.900 -0.70	2.000 -4.00	2.500 -5.50
$d_2(3)$	-0.9	-2.500 0.43	-2.000 0.52	-0.900 0.73	0.900 1.07	2.000 1.28	2.500 1.38
$d_2(4)$	0.9	-2.500 -1.38	-2.000 -1.28	-0.900 -1.07	0.900 -0.73	2.000 -0.52	2.500 -0.43
$d_2(5)$	2.0	-2.500 5.50	-2.000 4.00	-0.900 0.70	0.900 -4.70	2.000 -8.00	2.500 -9.50
$d_2(6)$	2.5	-2.500 10.63	-2.000 8.00	-0.900 2.23	0.900 -7.23	2.000 -13.00	2.500 -15.63

$(d_1(*), d_2(4))$ の端点で端点安定条件 SVCを満たさない。特に、内部全体が不安定でそれを取り囲んでいる回りは安定であるため、その境界の環状領域でリミットサイクルまたは特異点を持つことが定性的にわかる。(step 2)$R^o_{\sigma\tau}$において Sは

$$S(\tau) = S(\tau + 1) \simeq \begin{bmatrix} 0.00 & 1.00 \\ -1.00 & 0.19 \end{bmatrix}$$

であり、最適制御により、例えば、

$$k(\tau) = k(\tau + 1) \simeq (1.65,\ 3.24)^T$$

が求められる。(step 3) ゼロスクエアを除いた領域の内で不安定な端点を中心で安定定理の条件 (2) を満たす望ましい応答を想定してkを求める。表 4 は設計した安定化制御器のパラメータである。そして、図 2 は近似ファジィモデルと安定化制御を行なった制御系との軌跡の比較である。ここで、初期値は$x(0) = (0.7,\ 0)^T$と$x(0) = (2.3,\ 0)^T$ であり、それぞれ実線と点線で表す。

表 4: ファジィ安定化制御器のパラメータ

$l(d_1, d_2)$		$d_1(1)$	$d_1(2)$	$d_1(3)$	$d_1(4)$	$d_1(5)$	$d_1(6)$
		-2.5	-2.0	-0.9	0.9	2.0	2.5
$d_2(1)$	-2.5	32.25	25.95	7.01	24.21	21.60	13.99
$d_2(2)$	-2.0	32.10	14.95	7.55	12.59	3.07	3.59
$d_2(3)$	-0.9	31.84	14.12	4.40	-1.44	-8.13	-21.81
$d_2(4)$	0.9	21.81	8.13	1.44	-4.40	-14.12	-31.84
$d_2(5)$	2.0	-3.59	-3.07	-12.59	-7.55	-14.95	-32.10
$d_2(6)$	2.5	-13.99	-21.60	-24.21	-7.01	-25.95	-32.25

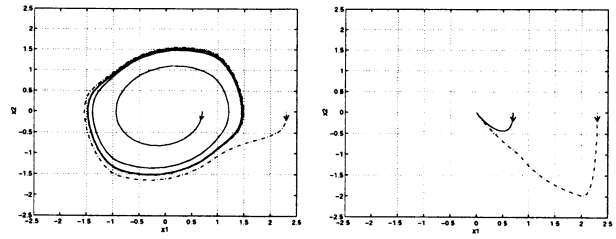


図 3: 近似 Van der Pol（左）と安定化制御（右）の状態空間での軌跡比較

5 まとめ

本稿では、シングルトン後件部を持つファジィシステムは線形システムを完全に含んであり、例を通して菅野の安定定理とそれに基づいた端点配置による安定化制御器設計の有効性を示した。なお、安定定理は定性的な情報を与え、端点配置によるルール制御は言語レベルの定性的制御の可能性を示した。問題点として同じ$\dot{V}$でも共通のPにより速応性と減衰特性が違うのでより良い制御のためにはそれの解析的な求め方が必要である。図の表示とシミュレーションの一部で Matlab を使った。

参考文献

[1] K.S.Ray and D.D.Majumder, "Application of Circle Criteria for Stability Analysis of Linear SISO and MIMO System Associated with Fuzzy Logic Controller," *IEEE Trans. Syst. Man and Cybern.*, SMC-14, 345/349, 1984.

[2] J.Aracil et al., "Fuzzy Control of Dynamical Systems, and Stability Analysis Based on the Conicity Criterion, " *IFSA World Congress*, Brussels, 1991.

[3] K.Tanaka and M.Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 45, 135/156, 1992.

[4] S.Kawamoto et al., "An Extension of Tanaka-Sugeno's Stability Theorem for Fuzzy Systems," *J. Japan Soc. of Fuzzy Theory and Systems*, Vol. 5, No. 5, 1190/1199, 1993.

[5] M.Mizumoto, "Realization of PID Controls by Fuzzy Control Methods," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 70, 171/182, 1995.

[6] H.O.Wang et al., "An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems : Stability and Design Issues," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 4, 14/23, 1996.

[7] M.Sugeno, "On Stability of Fuzzy Systems Expressed by Fuzzy Rules with Singleton Consequents," submitted to *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*

問い合わせ先：
〒 226 横浜市 緑区 長津田町 4259
東京工業大学 知能システム科学専攻
菅野研究室内 李昌勲
Tel: 045-924-5645
Email: chlee@fz.dis.titech.ac.jp

WEA1-3

離散事象近似を用いたファジィ制御系の安定解析に関する一考察
A Study on Stability Analysis of Fuzzy Control Systems Using Petri Nets

長谷川 貴史　　古橋 武
Takashi HASEGAWA　　Takeshi FURUHASHI
(名古屋大学工学研究科)
(Graduate School of Engineering, Nagoya University)

Abstract : Fuzzy controls can describe control rules using if-then fuzzy rules, and it can incorporate experts' control rules. It is, however, difficult to guarantee the stability of fuzzy control systems. The authors presented a new method for stability analysis of fuzzy control systems using matrix based on a bipartite directed multi-graph of petri nets, and derived a theory of asymptotic stability. The approximation of fuzzy control systems by this method sacrifices the regirous description of the behavior of the fuzzy control system.

This paper analyses transitions between fuzzy sub-regions using numerical expressions. Simulation is done to verify the proposed stability analysis method.

1 はじめに

ファジィ制御は人間のノウハウを記述したif-then型のルールにより記述され、熟練者の経験に基づいた制御規則を制御器に取り込むことができるため、さまざまな分野で応用されている。ファジィ制御は安定性の保証が困難であるといわれていたが、最近ではファジィ制御における安定性の保証に関する研究が進められている[1-4]。これらの手法は、ファジィ制御系の安定性に対して厳密な判別を行なうことが可能であり、ファジィ制御系の安定性の保証に有効な手法であるが、数式に依存しファジィ制御系の安定判別を行なうものであり、ファジィ制御の特徴である言語的な分かりやすさを活かした安定性の判別手法はこれまで提案されていなかった。

筆者ら[5,6]はこれまでに、制御対象および制御器のファジィルールを、通常のルールベースとして近似し、ペトリネット[7]の状態推移関数に基づく安定解析の手法を提案してきた[5,6]。この手法では、制御系の挙動とファジィルールの対応がとりやすく、ファジィ制御の特徴である言語的分かりやすさを損なわない解析法である。しかし、これらの手法はファジィ制御系を通常のルールベースとして解析を行なうため、厳密な挙動の保証は行なえなかった。そこで、筆者ら[8]は、ファジィ制御系をペトリネットの状態遷移行列で表現し、ファジィ制御系の漸近安定性の定理を導出した。

本稿では、離散近似の妥当性を検証するために、ルール間の状態遷移を数式を用いて解析し、離散近似における安定定理がファジィ制御系の挙動の大筋の把握に有効であることを示す。

2 事象間遷移の数値解析

本稿では表1,2に示されるファジィ制御系を例とする。表1, 2に示されるは制御系は、文献 [?] の離散近似手法によれば漸近安定である。

メンバーシップ関数は簡単のため三角形とし、隣り合うメンバーシップ関数の交点の値は0.5とする。y_k の 'N' と 'Z' の境界における挙動を解析する。各メンバーシップ関数の中心値を N $= -1$, Z $= 0$, P $= 1$ とする。表2より制御器の出力 u_k は

$$u_k = a\mathrm{P} + (1-a)\mathrm{Z} : y_k < 0 \qquad (1)$$

となる。a は、y_k is 'N' の前件部メンバーシップ関数の値を表す。

操作量 u_k により、制御対象の出力は、表1より次の

表 1: 制御対象のルール

y_{k+1}		y_k N	y_k Z	y_k P
u_k	N	N	N	Z
	Z	N	Z	Z
	P	Z	N	P

表 2: 制御器のルール

u_k		y_k N	y_k Z	y_k P
r_k	Z	P	Z	N

ように場合分けされる。

$$y_{k+1} = \begin{cases} a\mathrm{N} + (1-a)\mathrm{N} : u_k = \mathrm{N} \\ a\mathrm{N} + (1-a)\mathrm{Z} : u_k = \mathrm{Z} \\ a\mathrm{Z} + (1-a)\mathrm{N} : u_k = \mathrm{P} \end{cases} \quad (2)$$

(1) 式より、操作量は a の値により、Z~P の間を変化する。操作量は $a = 1$ の時 'P' であり、$a = 0$ の時 'Z' である。したがって、u_k is 'P' のメンバーシップ関数のグレードは a であり、u_k is 'Z' のメンバーシップ関数のグレードは $1 - a$ と求められる。y_{k+1}は、次式により与えられる。

$$\begin{aligned} & y_{k+1} \\ &= (1-a)(a\mathrm{N} + (1-a)\mathrm{Z}) + a(a\mathrm{Z} + (1-a)\mathrm{N}) \\ &= (1 - 2a + 2a^2)\mathrm{Z} + 2(a - a^2)\mathrm{N} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、N = −1, Z = 0 より、(3) 式は、

$$y_{k+1} = -2(a - a^2) \quad (4)$$

と求められる。

(4) 式の a は y is 'N' のメンバーシップ関数の値であり、メンバーシップ関数を三角型とすれば$-1 < y < 0$ の領域において、$y = -a$ と表される。$y_{k+1} = y_k$となる点は

$$-2(a - a^2) = -a \quad (5)$$

より

$$a = \begin{cases} 0 \\ 0,5 \end{cases} \quad (6)$$

と求められる。

3 シミュレーション

図 1に、目標値 r_k = 'Z', 初期値 $y_0 = -0.8$ の場合のシミュレーション結果を示す。横軸はサンプル時間、縦軸は制御対象の出力を表す。図 1に示されるように、制御系の出力は解析結果と同様に時間がたつにつれて −0.5 に収束していく。

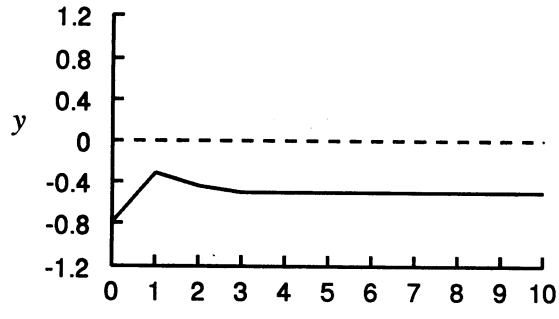


図 1: シミュレーション結果 (r_k = 'Z', $y_0 = -0.8$)

4 まとめ

本稿では、離散近似による安定解析結果に対して、ルール間の状態遷移を数式を用いて解析した。離散近似における安定定理がファジィ制御系の挙動の大筋の把握に有効であり、ルール間の境界の詳細な挙動は数値解析により知ることができることが判った。

参考文献

[1] 北村：ファジィルール制御系の絶対安定条件, 第 5 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.505–508, 1989

[2] S.Kitamura and T.Kurozumi : "Extended Circle Criterion and Stability Analysis of Fuzzy Control Systems", Proceedings of the International Fuzzy Eng. Symp.'91, Vol.2, pp.634–643, 1991

[3] 北條, 寺野, 増井：位相面によるファジィ制御系の安定性解析, 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.6, pp.1133–1146, 1992

[4] 田中：アドバンストファジィ制御, 共立出版

[5] 長谷川, 古橋, 内川：ペトリネットを用いたファジィ制御系の安定解析に関する一提案, 第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.285–288, 1996

[6] T.Hasegawa, T.Furuhashi and Y.Uchikawa : Stability Analysis of Fuzzy Control Systems Simplified as a Discrete System, Proceedings of the 4th International Conference on Soft Computing IIZUKA'96, pp.354–357, 1996

[7] J.L.Peterson, 市川 惇信, 小林 重信：ペトリネット入門, 共立出版

[8] 長谷川, 古橋, 内川：ペトリネットによるファジィ制御系の安定解析に関する一考察, 電気学会産業システム情報化研究会, IIS–96–29, pp.37–46, 1996

[問い合わせ先]
〒 464-01 名古屋市千種区不老町
名古屋大学工学部電子情報学科
長谷川 貴史
TEL (052)789-2792 FAX (052)789-3166
e-mail tak@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

WEA2-1

Decay Rate, 入出力制限などのLMI条件を用いたファジィ補償器とファジィ状態観測器の設計

Design of Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers via LMIs

田中一男　西村正孝
Kazuo TANAKA and Masataka NISHIMURA
金沢大学工学部　人間・機械工学科
Department of Human and Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University

Abstract : This paper presents new stability conditions and design of fuzzy regulators and fuzzy observers . New stability conditions are obtained by relaxing the stability conditions derived in previous works. We presents LMI-based designs for fuzzy regulators and fuzzy observers using the so-called parallel distributed compensation and the relaxed stability conditions. A design example for the ball and beam system shows the effects of the new stability conditions and the proposed design procedures.

1. はじめに

ファジィモデルに基づくアプローチで設計されたファジィ制御系の安定条件についてはすでに導出[2)3)]されているが、この安定条件は複数のリアプノフ不等式を同時に満足するリアプノフ関数を見つける問題に帰着できることから、規則数が多い場合には得られる結果は保守的なものになる恐れがある。このため、さらに緩い安定条件の導出[6)]が行われた。本論文では、これらの条件がLMI[4)-6) 9)-14)]で表現できることからLMIに基づく設計法を提案し、さらにファジィ制御系に対するDecay rate、入出力制限に関するLMI条件も導出する。また、本論文では、ファジィ状態観測器を含むファジィ制御系の安定条件を導出し、これに対するLMIに基づく設計法についても提案する。最後に、本設計法の有効性を示すためにシミュレーション結果を示す。

2. ファジィ制御系モデルとファジィ補償器

次のようなファジィモデルを考える。

Plant Rule i : if $z_1(t)$ is M_1^i and $\cdots$ and $z_p(t)$ is M_p^i

$$\text{then} \quad \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \cdots, r \qquad (1)$$

ここで、rは規則数であり、M_j^iはファジィ集合である。$z_1(t)$～$z_p(t)$は前件部変数であり、前件部変数は必ずしも状態変数でなくてもよいが、$\mathbf{u}(t)$には依存しないものとする[1)]。推論は(2.A)式、(2.B)式のように行われる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^{r} w_i(\mathbf{z}(t)) \{\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t)\} / \sum_{i=1}^{r} w_i(\mathbf{z}(t))$$

$$= \sum_{i=1}^{r} h_i(\mathbf{z}(t)) \{\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t)\} \qquad (2.A)$$

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{i=1}^{r} h_i(\mathbf{z}(t)) \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t) \qquad (2.B)$$

ここで、$w_i(\mathbf{z}(t)) = \prod_{j=1}^{p} M_j^i(z_j(t))$ である。ただし、メンバーシップ関数の特性上、$w_i(\mathbf{z}(t)) \geq 0$, $\sum_{i=1}^{r} w_i(\mathbf{z}(t)) > 0$ となる。また、

$$h_i(\mathbf{z}(t)) = \frac{w_i(\mathbf{z}(t))}{\sum_{i=1}^{r} w_i(\mathbf{z}(t))}, \quad \sum_{i=1}^{r} h_i(\mathbf{z}(t)) = 1 \qquad (3)$$

である。いま、並列分散的補償[5)]の考え方に基づいて(1)式に対するファジィ補償器を次のように設計する。

Control. Rule i : if $z_1(t)$ is M_1^i and $\cdots$ and $z_p(t)$ is M_p^i

$$\text{then} \quad \mathbf{u}(t) = -\mathbf{F}_i \mathbf{x}(t) \qquad i = 1, 2, \cdots, r \qquad (4)$$

このとき、推論は次のように行われる。

$$\mathbf{u}(t) = -\sum_{i=1}^{r} h_i(\mathbf{z}(t)) \mathbf{F}_i \mathbf{x}(t) \qquad (5)$$

ファジィ制御器の設計は(5)式の$\mathbf{F}_i$を求める問題である。(5)式を(2.A)式に代入してまとめると、ファジィ制御系全体のモデルは(6)式のようになる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} h_i(\mathbf{z}(t)) h_j(\mathbf{z}(t)) \{\mathbf{A}_i - \mathbf{B}_i \mathbf{F}_j\} \mathbf{x}(t) \qquad (6)$$

次に緩い安定条件を示す。

《定理1》[9)] (7)式、(8)式の条件をともに満たす共通の正定対称行列P、準正定行列Qが存在するならば、(6)式で示されるファジィ制御系は大域的漸近安定である。

$$\mathbf{G}_{ii}^{\mathrm{T}} \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{G}_{ii} + (s-1)\mathbf{Q} < \mathbf{0} \qquad i = 1,2,\cdots,r \qquad (7)$$

$$\frac{(\mathbf{G}_{ij} + \mathbf{G}_{ji})^{\mathrm{T}}}{2} \mathbf{P} + \mathbf{P} \frac{(\mathbf{G}_{ij} + \mathbf{G}_{ji})}{2} - \mathbf{Q} < \mathbf{0} \qquad i<j \leq r \qquad (8)$$

ここで、$\mathbf{G}_{ij} = \mathbf{A}_i - \mathbf{B}_i \mathbf{F}_j$ である。また、$s\ (1 < s \leq r)$ は(2)式のファジィモデルにおいて、同時刻に発火する規則の最大数である。

これは、従来の安定条件[2)3)]を緩めた安定条件である。定理1においてQ=0としたものが従来の安定条件に帰着する。緩い安定条件が成り立つためには、(2.A)式、(2.B)式の$h_i(\mathbf{z}(t))$と(5)式の$h_i(\mathbf{z}(t))$がつね値に等しい値であることが必要である[6)]。定理1より、定理2が導出できる。

《定理2》 (9)式、(10)式の条件をともに満たす共通の正定対称行列Xと準正定対称行列Y、および行列$\mathbf{M}_1,\cdots,\mathbf{M}_r$が存在するならば、(2)式で示されるファジィシステムは並列分散的補償(5)式により安定化可能であり、このとき$\mathbf{F}_i = \mathbf{M}_i \mathbf{X}^{-1}$である。

$$-\mathbf{X}\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}} - \mathbf{A}_i \mathbf{X} + \mathbf{M}_i^{\mathrm{T}} \mathbf{B}_i^{\mathrm{T}} + \mathbf{B}_i \mathbf{M}_i - (s-1)\mathbf{Y} > \mathbf{0} \qquad i = 1,2,\cdots,r \qquad (9)$$

$$2\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}} - \mathbf{A}_i \mathbf{X} - \mathbf{X}\mathbf{A}_j^{\mathrm{T}} - \mathbf{A}_j \mathbf{X} + \mathbf{M}_j^{\mathrm{T}} \mathbf{B}_i^{\mathrm{T}} + \mathbf{B}_i \mathbf{M}_j + \mathbf{M}_i^{\mathrm{T}} \mathbf{B}_j^{\mathrm{T}} + \mathbf{B}_j \mathbf{M}_i > \mathbf{0} \qquad i < j \leq r \qquad (10)$$

（証明）誌面の都合上省略する。ここで、$\mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1}, \mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{Q}\mathbf{X}$である。

LMIに基づく解法により、定理2の安定条件を満たす共通の正定対称行列X、準正定対称行列Y、および行列$\mathbf{M}_1,\cdots,\mathbf{M}_r$を求めることができる。これらの行列より、正定対称行列$\mathbf{P} = \mathbf{X}^{-1}$と準正定対称行列$\mathbf{Q} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{X}^{-1}$、フィードバックゲイン$\mathbf{F}_i = \mathbf{M}_i \mathbf{X}^{-1}$を同時に求めることができる。

次に、decay rate条件を求める。decay rateでは、リアプノフ

関数の微分値が $\dot{V}(x(t)) \le -2\alpha V(x(t))$ を満たすPの条件を求める。これは、次の条件をみたすPを見つけることと同じである

$$G_{ii}^{T} P + P G_{ii} + (s-1) Q + 2\alpha P < 0 \qquad i = 1,2,\cdots,r \qquad (11)$$

$$\frac{(G_{ij} + G_{ji})^{T}}{2} P + P \frac{(G_{ij} + G_{ji})}{2} - Q + 2\alpha P < 0 \quad i<j \le r \qquad (12)$$

ここで、$\alpha > 0$である。この条件をX, Y, $M_1,\cdots,M_r$に関するLMI条件に変換すると次のように書き換えられる。

$$\underset{M_{21}\cdots M_{2r}}{\text{maximize}}\ \alpha$$

subject to $X > 0, Y \ge 0$

$$-X A_i^{T} - A_i X + M_i^{T} B_i^{T} + B_i M_i - (s-1) Y - 2\alpha X > 0 \qquad i = 1,2,\cdots,r \qquad (13)$$

$$2Y - X A_i^{T} - A_i X - X A_j^{T} - A_j X + M_j^{T} B_i^{T} + B_i M_j + M_i^{T} B_j^{T} + B_j M_i - 4\alpha X > 0 \quad i<j \le r \qquad (14)$$

(13)式、(14)式の条件をともに満たす共通の正定対称行列Xと準正定対称行列Y、および行列$M_1,\cdots,M_r$が存在する範囲で、αをできるだけ大きくとることによって系の速応性を高めることができる。このときフィードバックゲインは$F_i = M_i X^{-1}$で求められる。

次に、入力値、出力値制限のLMI条件を導出する。

[入力の制限] $x(0)$が既知であると仮定する。(15)式の条件を満たす共通の正定対称行列Xと行列$M_1,\cdots,M_r$が存在するとき入力$u(t)$は$\|u(t)\|_2 < \mu$となる。

$$\begin{bmatrix} 1 & x^{T}(0) \\ x(0) & X \end{bmatrix} > 0, \quad \begin{bmatrix} X & M_i^{T} \\ M_i & \mu^2 I \end{bmatrix} > 0 \qquad (15)$$

（証明）誌面の都合上、省略する。

[出力の制限] $x(0)$が既知であると仮定する。(16)式の条件を満たす共通の正定対称行列 Xが存在するとき出力$y(t)$は$\|y(t)\|_2 < \lambda$となる。

$$\begin{bmatrix} 1 & x^{T}(0) \\ x(0) & X \end{bmatrix} > 0, \quad \begin{bmatrix} X & X C_i^{T} \\ C_i X & \lambda^2 I \end{bmatrix} > 0 \qquad (16)$$

（証明）誌面の都合上、省略する。

3．ファジィ状態観測器の設計

状態観測器は$t \to \infty$で$x(t) - \hat{x}(t) \to 0$となることが要求される。ここで、$\hat{x}(t)$は状態観測器によって推定される状態である。プラントのファジィモデルの状態を推定するファジィ状態観測器を次のように構成する。

Observer Rule i :

Obs. Rule i : if $z_1(t)$ is M_1^i and $\cdots$ and $z_p(t)$ is M_p^i

then $\dot{\hat{x}}(t) = A_i \hat{x}(t) + K_i (y(t) - \hat{y}(t)) + B_i u(t)$ (17)

ここで、$i = 1, 2, \cdots, r$である。このとき、推論は(18.A)式、(18.B)式のように行われる。

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^{r} h_i(z(t)) \left\{ A_i \hat{x}(t) + K_i (y(t) - \hat{y}(t)) + B_i u(t) \right\} \qquad (18.A)$$

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^{r} h_i(z(t)) C_i \hat{x}(t) \qquad (18.B)$$

つぎに、ファジィ補償器とファジィ状態観測器からなる併合系の設計法を提案する。

以下、次の2つの場合に分けて考える。

[case A] $z_1(t) \sim z_p(t)$が推定したい状態変数に依存しない場合

[case B] $z_1(t) \sim z_p(t)$が推定したい状態変数に依存する場合

case B の場合の方が、制御系の安定性を保証することは難しい。その理由は、各規則の適合度が推定したい状態変数に依存するため、状態$x(t)$を推定する時に適合度も未知の値として考えなければならないからである。誌面の都合上case B についての設計法は別報[14]で報告する。

case A の場合のファジィ制御系全体のモデルは、次のようになる。

$$\dot{x}_a(t) = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} h_i(z(t)) h_j(z(t)) H_{ij} x_a(t)$$

$$= \sum_{i=1}^{r} h_i(z(t)) h_i(z(t)) H_{ii} x_a(t) + 2 \sum_{i<j}^{r} h_i(z(t)) h_j(z(t)) \frac{H_{ij} + H_{ji}}{2} x_a(t) \qquad (19)$$

ここで、$e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$

$$x_a(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}, \quad H_{ij} = \begin{bmatrix} A_i - B_i F_j & B_i F_j \\ 0 & A_i - K_i C_j \end{bmatrix} \qquad (20)$$

である。(19)式に緩い安定条件（定理１）を適用すると次の定理が得られる。

《定理３》 (21)式、(22)式の条件をともに満たす共通の正定対称行列P、準正定行列Qが存在するならば(19)式で示されるファジィシステムは大域的漸近安定である。

$$H_{ii}^{T} P + P H_{ii} + (s-1) Q < 0 \qquad i = 1,2,\cdots,r \qquad (21)$$

$$\frac{(H_{ij} + H_{ji})^{T}}{2} P + P \frac{(H_{ij} + H_{ji})}{2} - Q < 0 \qquad i<j \le r \qquad (22)$$

（証明）定理１より明らか

線形システムでは補償器と状態観測器を独立に設計しても系の安定性は保証されるが、ファジィシステムでは一般に保証されない。すなわち、ファジィ補償器及びファジィ状態観測器の設計において$A_i - B_i F_i$や$A_i - K_i C_i$が望ましい固有値を持つようにF_iやK_iを求めても、制御系の安定性は必ずしも保証されるとは限らない。定理３の安定条件を満たせば制御系の安定性は保証される。

《定理４》 (23)式、(24)式、(25)式の条件をともに満たす共通の正定対称行列X_1, X_2と行列Y_{11}, Y_{21}, Y_{22}、および行列$M_{21},\cdots,M_{2r}$が存在するならば、(19)式で示されるファジィ制御系は並列分散的補償により安定化可能であり、このとき$F_i = M_{2i} X_2^{-1}$である。

$$\begin{bmatrix} U_{ii} + (s-1) Y_{11} & X_1 C_i^{T} K_i^{T} + (s-1) Y_{21}^{T} \\ K_i C_i X_1 + (s-1) Y_{21} & V_{ii} + (s-1) Y_{22} \end{bmatrix} < 0 \qquad (23)$$

$$\begin{bmatrix} U_{ij} + U_{ji} - 2 Y_{11} & X_1 C_j^{T} K_i^{T} + X_1 C_i^{T} K_j^{T} - 2 Y_{21}^{T} \\ K_i C_j X_1 + K_j C_i X_1 - 2 Y_{21} & V_{ij} - V_{ji} - 2 Y_{22} \end{bmatrix} < 0 \qquad (24)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{21}^{T} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \ge 0 \qquad (25)$$

ここで、

$$U_{ij} = A_i X_1 + X_1^{T} A_i^{T} - K_i C_j X_1 - X_1 C_j^{T} K_i^{T} \qquad (26)$$

$$V_{ij} = A_i X_2 + X_2^{T} A_i^{T} - B_i M_{2j} - M_{2j}^{T} B_i^{T} \qquad (27)$$

である。

(証明)証明は省略する。ここで

$$P=\begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix}^{-1}>0,\quad Q=\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{21}^T \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}\geq 0 \qquad (28)$$

である。さらに$M_{2i}=F_iX_2$, $Y_{11}=X_1Q_{11}X_1$, $Y_{21}=X_2Q_{21}X_1$, $Y_{22}=X_2Q_{22}X_2$である。ただし、この条件をLMI条件として用いるには、はじめにオブザーバゲインK_iを求めておく必要がある。

また、定理4は次のようなdecay rateについての設計問題へ拡張できる。

[decay rate] (29)式、(30)式、(31)式の条件をともに満たす共通の正定対称行列X_1,X_2と行列Y_{11}, Y_{21}, Y_{22}、および行列M_{21}, …,M_{2r}が存在する範囲で、αをできるだけ大きくとることによって系の速応性を高めることができる。

$$\underset{M_{21}\cdots M_{2r}}{\text{maximize}}\ \alpha$$

subject to $X_1, X_2>0,\ Y_{11}, Y_{21}, Y_{22}>0$

$$\begin{bmatrix} U_{ii}+(s-1)Y_{11}+2\alpha X_1 & X_1C_i^TK_i^T+(s-1)Y_{21}^T \\ K_iC_iX_1+(s-1)Y_{21} & V_{ii}+(s-1)Y_{22}+2\alpha X_2 \end{bmatrix}<0 \qquad (29)$$

$$\begin{bmatrix} U_{ij}+U_{ji}-2Y_{11} & X_1C_j^TK_i^T+X_1C_i^TK_j^T-2Y_{21}^T \\ K_iC_jX_1+K_jC_iX_1-2Y_{21} & V_{ij}-V_{ji}-2Y_{22}+4\alpha X_2 \end{bmatrix}<0 \qquad (30)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{21}^T \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}\geq 0 \qquad (31)$$

ここで、U_{ij},V_{ij}は、(26)式、(27)式で定義されたものである。

次に、ファジィ補償器とファジィ状態観測器の設計に関して2つの設計法を提案する。

[設計法1]

(1) 線形制御系設計手法により、(A_i, B_i, C_i)からオブザーバゲインK_iを決定する。

(2) (23)式、(24)式、(25)式（あるいは(29)式、(30)式、(31)式）のLMI条件を解きフィードバックゲインF_iを決定する。もし、設計法1のLMI条件が可解でなければ、次の設計法2を用いる。

[設計法2]

(1) 線形制御系設計手法により、(A_i, B_i, C_i)からF_iとK_iを決定する。

(2) 定理3の条件を満たすPとQをLMIに基づく解法により求める。もし、PとQが存在しないならば、(1)に戻りほかのF_iとK_iを選択する。

すでに、我々はLMIによるファジィ制御系の設計法[4)-6) 9)-14)]を提案してきた。設計法1の利点は、フィードバックゲインF_iもLMI条件に帰着させて求めることができる点である。この場合には、安定条件を満たす正定対称行列$P=X^{-1}=(\mathrm{diag}\{X_1,X_2\})^{-1}$とフィードバックゲイン$F_i$を同時に求めることができる。すなわち、安定条件を満たすフィードバックゲインが存在するならば、$X=\mathrm{diag}\{X_1,X_2\}$のもとでそれを必ず見つけだすことができる。また、安定条件を満たしながらdecay rate、入出力の制限などの制御性能を高めることも可能である。しかし、Xを$\mathrm{diag}\{X_1,X_2\}$と限定しているため結果は少し保守的になる。解が存在しない場合には、設計法2を用いる必要がある。

ファジィ補償器のみの設計では、$X=P^{-1}>0$は任意に選べるので、設計法1の結果でも保守的にはならないことに注意する。

4. Ball and beam 安定化問題への応用

Fig.1は本シミュレーションで使用したball and beamのモデル[7)]を示している。

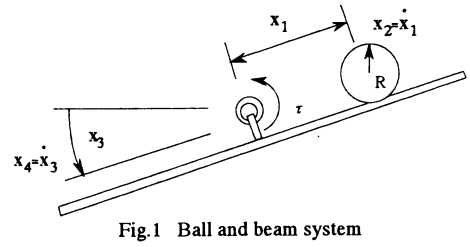


Fig.1 Ball and beam system

このモデルは次のような非線形システムで表現できる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x_2(t) \\ B\,x_1(t)\,x_4(t)^2-B\,G\,\sin x_3(t) \\ x_4(t) \\ 0 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}u(t) \qquad (32)$$

ここで、Gは重力加速度、Mは質量、J_bは慣性力、Rはballの半径、u(t)はトルク入力、BはB:=M/(J_b/R^2+M)=0.7143である。制御目的は、ballをbeamの中心にもっていくことである。これは、$x_1(t)\to 0$、$x_2(t)\to 0$、$x_3(t)\to 0$、$x_4(t)\to 0$のレギュレータ問題と解釈できる。まず、$x_3(t)\in[-\pi/2,\pi/2]$, $x_4(t)\in[-a,a]$であると仮定して、文献(8)の方法により(32)式を厳密に表現するファジィモデルを導出すると以下のようになる。

$$\dot{x}(t)=\sum_{i=1}^{4}h_i(z(t))\{A_ix(t)+B_iu(t)\}$$

$$y(t)=\sum_{i=1}^{4}h_i(z(t))C_ix(t)$$

ここで、$x^T(t)=[x_1(t),x_2(t),x_3(t),x_4(t)]$, $z^T(t)=[x_3(t),x_4(t)]$

$$A_1=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -BG & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\quad A_2=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ Ba^2 & 0 & -BG & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_3=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2}{\pi}BG & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\quad A_4=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ Ba^2 & 0 & -\frac{2}{\pi}BG & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1=B_2=B_3=B_4=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},\quad C_1=C_2=C_3=C_4=\begin{bmatrix} 1&0&0&0 \\ 0&0&1&0 \\ 0&0&0&1 \end{bmatrix}$$

である。$h_i(z(t))$の具体的な関数については省略する。本シミュレーションではa=3とした。

本例題では、前件部変数は$x_3(t)$、$x_4(t)$となるので、前件部変数は状態推定したい変数には依存しない。よって、本例題では、case Aの設計法が適用できる。

まず、状態がすべて観測可能であると仮定してファジィ補償器を設計する。decay rate条件のみと、decay rate条件と入力値制限の条件を考慮して設計した制御系の応答をそれぞれ**Fig.2**、**Fig.3**に示す。decay rate条件のみを考慮した場合は、速応性のみを求めいているため入力が$\max_t|u(t)|=291.2$と非常に大きくなっている。実際には入力値の飽和などを考えなければならず、これは実装には大きな問題となる。一方、入力値

制限の条件を加えると、速応性を失うことなしに入力値を $\max_t \|u(t)\| = 49.96$ と抑えることができる。これは、LMIに基づく設計[13)14)]の非常に有効な点である。本例題では、出力制限のLMI条件を用いなかったが、この条件を付加することにより、特定の状態変数の最大値を制限するフィードバックゲインを求めることができる（詳細は文献(14)を参照）。

つぎに、$x_2(t)$が直接観測できないものと仮定し、ファジィ状態観測器によって$x_2(t)$を推定する場合を考える。この場合、定理4を満たす$\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_{11}, \mathbf{Y}_{21}, \mathbf{Y}_{22}, \mathbf{M}_2$が存在し、このとき設計されたファジィ補償器とファジィ状態観測器によって、制御を行った結果を**Fig.4** に示す。ここで、$x_2(t)$の点線はオブザーバにより推定された状態を示している。推定された状態は誤差なく真値に追従しており、制御系も安定化されている。

本例題では、$\mathbf{B}_1=\mathbf{B}_2=\mathbf{B}_3=\mathbf{B}_4$の共通の$\mathbf{B}$と$\mathbf{C}_1=\mathbf{C}_2=\mathbf{C}_3=\mathbf{C}_4$の共通の$\mathbf{C}$の場合を扱った。共通の$\mathbf{B}$及び共通の$\mathbf{C}$の場合に限定すると、本論文で導出した安定条件をかなり簡単化することが可能である[14)]。誌面の都合上省略する。

5. まとめ

本論文では、ファジィ制御系の緩い安定条件を用いたLMIに基づく設計法を提案した。また、簡単な例題でその有効性を示した。本論文で示したように、たとえすべての状態が観測できなくとも、ファジィ補償器とファジィ状態観測器を構成することにより制御目的を達成することができることを示した。ここでは誌面の都合上、連続系の場合のみを示したが、離散系への拡張も可能である[14)]。

参考文献

1) 菅野，ファジィ制御、日刊工業新聞社 (1988)
2) 田中，アドバンストファジィ制御、共立出版 (1994)
3) K. Tanaka and M. Sugeno, Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems, FUZZY SETS AND SYSTEMS, Vol.45, No.2,pp. 135-156(1992)
4) K. Tanaka, T. Ikeda and H. Wang, "Robust Stabilization of a Class of Uncertain Nonlinear Systems via Fuzzy Control: Quadratic Stabilizability, H∞ Control Theory and Linear Matrix Inequalities," IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Feb. 1996.
5) H. Wang, K. Tanaka and M. Griffin, "Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems via Takagi-Sugeno Fuzzy model," 4th IEEE Int.Conf.on Fuzzy Systems,pp. 531-538,1995
6) K. Tanaka, T. Ikeda and H. Wang,"Design of Fuzzy Control Systems Based on Relaxed LMI stability Conditions", 35th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 598-603, 1996.
7) J. Hauser, S. Sastry and P. Kokotovic, "Nonlinear control viaapproximate input-output linearization:the ball and beam example," IEEE Trans. on Automatic Control, pp. 392-398, 1992
8) 川本ほか，"非線形システムの厳密なファジィシステム構成と安定解析，" 第8回ファジィシステムシンポジュウム ,pp. 517-520(1993)
9) 田中、小嵜、並列分散的補償の概念を用いたトレーラ・トラックタイプのロボットのファジィ後退制御、計測自動制御学会 ,Vol.32, No.3 (1996)
10) H. Wang, K. Tanaka and M. Griffin, "An Analytical Framework of Fuzzy Modeling and Control of Nonlinear Systems," Proc. of ACC'95, vol. 3, pp.2272-2276, 1995
11) H. Wang, K. Tanaka and M. Griffin,"An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems : Stability and Design Issues", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Feb. 1996.
12) H. Wang and K. Tanaka, "An LMI-based Stable Fuzzy Control of Nonlinear Systems its Application to Control of Chaos," 5th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp.1433-1438, 1996.
13) K.Tanaka et.al, "Fuzzy Control System Designs via LMIs", Proc. of 1997 American Control Conference (to appear).
14) K.Tanaka et.al, "Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers : Relaxed Stability Conditions and LMI-based Design", IEEE Trans. on Fuzzy Systems (submitted).

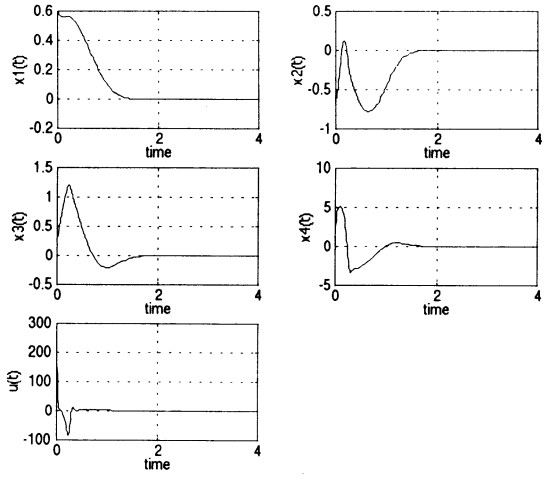


Fig.2 Simulation result (Decay rate α=0.24)

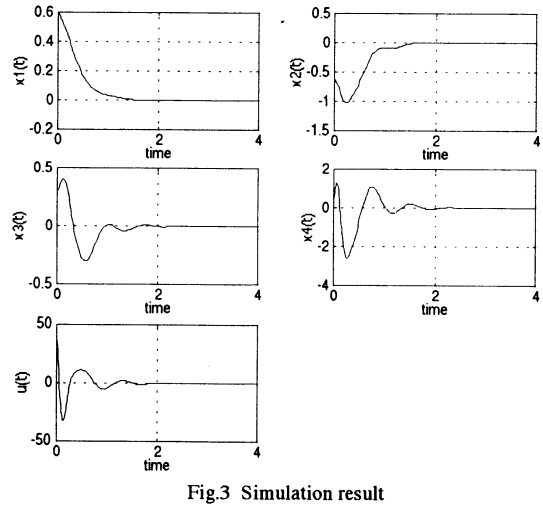


Fig.3 Simulation result
(Decay rate + Constraint on input α=1.62, μ=200)

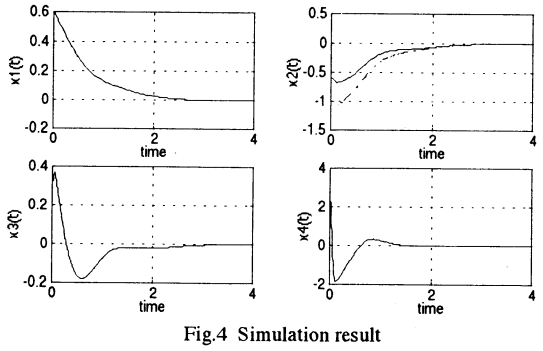


Fig.4 Simulation result

[問い合わせ先]〒920　金沢市小立野2-40-20
金沢大学工学部人間・機械工学科
田中　一男
TEL & FAX 0762-34-4736
E-mail ktanaka@t.kanazawa-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEA2-2

2次形式評価関数に基づくファジィ制御系の設計法

Synthesis of Fuzzy Control Systems with Quadratic Perfomance Indexes

○池田　貴幸　　田中　一男
Takayuki IKEDA　　Kazuo TANAKA

金沢大学　工学部　人間・機械工学科
Department of Human and Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University

Abstract : In this paper, we present a systematic synthesis approach to fuzzy control system designs. A fuzzy controller is designed by solving a minimization problem with a quadratic performance index. This approach realizes a fuzzy controller design satisfying a quadratic performance index without trial-and-error procedures. A design example, swing up and stabilization of an inverted pendulum system, shows the effect of the proposed design method.

1. はじめに

ファジィモデル[1] に基づく制御系設計が行われている。この基本的な制御系設計法[2)~7)]は、まずファジィ制御器を並列分散的補償により設計し、リアプノフ不等式を同時に満たす共通の解を求め安定解析を行うものである。また、LMIを用いて設計と安定解析を同時に行う設計法[8)]も提案されている。しかし、これらの設計法を用いると安定なファジィシステムが設計できるが、設計された制御系は必ずしも性能の良いものとは限らない。そのため、これらの設計法は制御系設計法として不十分なものである。

一般に、システムが安定化可能ならば安定化制御器は無数に存在する。したがって、これら無数の安定化制御器のクラスの中から性能の良いものを選ぶ必要がある。そこで、ある適当な制御指標を考えて、それに基づいて安定化制御器のクラスの中から選択することが考えられる。制御指標の例として、ロバスト安定性や2次形式評価関数などが挙げられる。ファジィ制御系のロバスト安定性については、文献9)において不確かさを有するファジィモデルに基づくロバストファジィ制御系設計法を提案した。本論文では、2次形式評価関数値をできるだけ小さくするファジィ制御系の設計法を提案する。また、提案したファジィ制御系設計法を倒立振子の安定化制御に適用しその有効性を示す。

2. ファジィモデルとファジィ制御器

本論文では、次のファジィモデルを考える。

$$\text{モデル規則 i : If } \cdots \text{ then } \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}_i\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_i\mathbf{x}(t) \end{cases}$$

ここで、…はIf-then規則の前件部である。このファジィモデルは以下のように数式表現ができる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \sum_{i=1}^{r} w_i(t)\{\mathbf{A}_i\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i\mathbf{u}(t)\} \\ \mathbf{y}(t) &= \sum_{i=1}^{r} w_i(t)\,\mathbf{C}_i\mathbf{x}(t) \end{aligned} \qquad (1)$$

ここで、$w_i(t)$ は

$$\sum_{i=1}^{r} w_i(t) = 1 \ , \ w_i(t) \geq 0 \ (\forall i) \qquad (2)$$

を満たし、モデル規則の前件部から決定される連続な関数である。この関数 $w_i(t)$ は、If-then規則の前件部変数が状態変数 $\mathbf{x}(t)$、出力変数 $\mathbf{y}(t)$、入力変数 $\mathbf{u}(t)$、その他の変数 $\mathbf{z}(t)$ に依存するならば、厳密には

$$w_i(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{z}(t)) \ , \ \forall i$$

と表記すべきだが、簡単のため $w_i(t)$ とする。このファジィモデルに関する詳しい説明は文献1) 2) に述べられている。

また、本論文ではファジィ制御器として次のようなものを考える。

制御規則 i :　If … then　$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_i\mathbf{x}(t)$

ここで、…はIf-then規則の前件部である。このファジィ制御器は以下のように数式表現ができる。

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{i=1}^{r} \hat{w}_i(t)\,\mathbf{K}_i\mathbf{x}(t) \qquad (3)$$

ここで、$\hat{w}_i(t)$は

$$\sum_{i=1}^{r} \hat{w}_i(t) = 1 \ , \ \hat{w}_i(t) \geq 0 \ (\forall i) \qquad (2')$$

を満たし、制御規則の前件部から決定される連続な関数である。

ファジィ制御器(3)式をファジィモデル(1)式に代入することにより、全体のシステムの式が次のように得られる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i(t)\hat{w}_j(t)\{\mathbf{A}_i+\mathbf{B}_i\mathbf{K}_j\}\mathbf{x}(t) \qquad (4)$$

このファジィシステム(4)式の安定条件はすでに以下のように導出されている。

≪ 定理1 ≫安定条件[2)]

次の条件を満たす共通の正定対称行列 $\mathbf{P}$ が存在するならば、(4)式で表現されるファジィシステムは大域的漸近安定である。

$$\begin{aligned} &\forall i,j \in \{1, 2, \cdots, r\} \\ &\{\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i\mathbf{K}_j\}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\{\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i\mathbf{K}_j\} < 0 \end{aligned} \qquad (5)$$

(証明)

付録の定理A.1から容易に導出できる。詳しくは文献2)参照。 ■

定理1は設計されたシステムが安定か否かの判定はできるが、ファジィモデルを安定にするファジィ制御器が存在するか否かの判定はできない。そのため、定理1に対して式変換を行いファジィモデルを安定にするファジィ制御器が存在するか否かの判定ができる安定化可能条件[8)]を導出した。この条件を解くと $\mathbf{K}_i$ が決定できることから、この条件の可解問題は安定化制御器の設計法でもある。以下にこ

の安定化可能条件を示す。

≪ 定理２≫安定化可能条件[8)]

次の条件を満たす共通の正定対称行列 $\mathbf{X}$ と $\mathbf{M}_1, \cdots, \mathbf{M}_r$ が存在するならば、(4)式で表現されるファジィシステムは大域的漸近安定である。

$$\forall i,j \in \{1, 2, \cdots, r\}$$
$$\mathbf{X}\mathbf{A}_i^T + \mathbf{A}_i\mathbf{X} + \mathbf{B}_i\mathbf{M}_j + \mathbf{M}_j^T\mathbf{B}_i^T < \mathbf{0}$$

このとき、ファジィモデルを安定にするファジィ制御器のゲインは

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{M}_i\mathbf{X}^{-1} \qquad (\forall i)$$

である。

（証明）定理１の条件に対して左右から $\mathbf{X}=\mathbf{P}^{-1}$ をかけて整理すると導出できる。 ■

（補足）

定理１、定理２の条件は、

$$w_i(t) = \hat{w}_i(t) \qquad (\forall i)$$

が成り立つとき、さらに緩めることができるが、本論文では省略する。詳細は文献8) 参照。

3. ２次形式評価関数に基づくファジィ制御系設計法

本論文では、ファジィ制御器 (3)式の $\mathbf{K}_i$ の設計法として、次のような２次形式評価関数をできるだけ小さくする設計法を提案する。

$$J \equiv \int_0^\infty \{ \mathbf{y}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{y}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t) \}dt \qquad (6)$$

ここで、$\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ は正定対称行列で制御仕様パラメータである。

3.1 ２次形式評価関数値の計算法

ファジィモデル (1) 式に対してファジィ制御器 (3) 式のゲイン $\mathbf{K}_i$ がなんらかの設計法により設計されているとする。このとき、ファジィシステム (4) 式の２次形式評価関数 (6) 式の値を計算する方法（正確には、評価関数値の上限値を求める方法）について以下に示す。

≪ 定理３≫２次形式評価関数値の計算法

次の条件が成り立つ正定対称行列 $\mathbf{P}$ が存在するならば、ファジィシステム (4) 式は大域的漸近安定である。

$$\forall i,j \in \{1, 2, \cdots, r\}$$

$$\begin{bmatrix} \{\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i\mathbf{K}_j\}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\{\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i\mathbf{K}_j\} & \mathbf{C}_i^T & \mathbf{K}_j^T \\ \mathbf{C}_i & -\mathbf{Q}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_j & \mathbf{0} & -\mathbf{R}^{-1} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \qquad (7)$$

また、このとき評価関数 J の値は次のようになる。

$$J < \mathbf{x}^T(0)\mathbf{P}\mathbf{x}(0) \qquad (8)$$

（証明）

次に示す変数を定義する。

$$\hat{\mathbf{y}}(t) \equiv \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i(t)\hat{w}_j(t)\begin{bmatrix} \mathbf{C}_i \\ \mathbf{K}_j \end{bmatrix}\mathbf{x}(t) \qquad (9)$$

この変数を用いてファジィシステム(4)式と２次形式評価関数 (6) 式を整理すると

$$J = \int_0^\infty \hat{\mathbf{y}}^T(t)\begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix}\hat{\mathbf{y}}(t)\,dt \qquad (10)$$

となる。(4)(9)(10) 式に対して付録の定理 A. 2 を適用することにより成り立つことが証明できる。 ■

（注意）

実際には、評価関数 (6) 式の値はファジィシステム (4) 式の $w_i(t), \hat{w}_i(t)$ に依存する。定理３の計算法は (2) , (2') 式を満たすすべての $w_i(t), \hat{w}_i(t)$ の組の中で最悪のケースに対する２次形式評価関数値を求める方法である。

（補足）

次の定理が成り立つ。

≪ 定理４≫

次の２つの命題は等価である。

(i) 条件 (5) を満たす正定対称行列 $\mathbf{P}$ が存在する。

(ii) 条件 (7) を満たす正定対称行列 $\mathbf{P}$ が存在する。

（証明）付録の定理 A3 より成り立つことが証明できる。 ■

この定理より、「定理１が成り立つならば、任意の正定対称行列 $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ に対して条件 (7)式が成り立つ正定対称行列 $\mathbf{P}$ が常に存在する。」ことがわかる。

3.2 ２次形式評価関数をできるだけ小さくするファジィ制御系設計法

本節では、ファジィモデル (1)式に対して２次形式評価関数 (6) 式をできるだけ小さくするファジィ制御器 (3) 式のゲイン $\mathbf{K}_i$ の設計法について述べる。この設計法は、つぎの LMI 条件を制約とする最小化問題を解くことである。

≪ ２次形式評価関数に基づくファジィ制御系設計法 ≫

下の LMI 条件を制約とする最小化問題の解から、ファジィモデルを安定にし、２次形式評価関数 (6)式をできるだけ小さくするファジィ制御器のゲイン $\mathbf{K}_i$ は次のように求めることができる。

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{M}_i\mathbf{X}^{-1} \qquad (\forall i) \qquad (11)$$

また、このときの評価関数 J の値は次のようになる。

$$J < \lambda \qquad (12)$$

< LMI 条件を制約とする最小化問題 >

$$\underset{\lambda, \mathbf{X}, \mathbf{M}_1, \cdots, \mathbf{M}_r}{\text{minimize}} \quad \lambda$$

subject to

$$\begin{bmatrix} \lambda & \mathbf{x}^T(0) \\ \mathbf{x}(0) & \mathbf{X} \end{bmatrix} > \mathbf{0} \qquad (13)$$

$$\forall i,j \in \{1, 2, \cdots, r\}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}\mathbf{A}_i^T + \mathbf{A}_i\mathbf{X} + \mathbf{B}_i\mathbf{M}_j + \mathbf{M}_j^T\mathbf{B}_i^T & \mathbf{X}\mathbf{C}_i^T & \mathbf{M}_j^T \\ \mathbf{C}_i\mathbf{X} & -\mathbf{Q}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_j & \mathbf{0} & -\mathbf{R}^{-1} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \qquad (14)$$

（証明）

条件 (7) 式に左右から

$$\text{block-diag}[\mathbf{X}\ \mathbf{I}\ \mathbf{I}]$$

をかけ、

$$\mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1} \quad , \quad \mathbf{M}_i = \mathbf{K}_i\mathbf{P}^{-1} \quad (\forall i) \qquad (15)$$

の変換を行い整理すると定理３と等価な次の定理が導出できる。

「条件 (14) 式が成り立つ正定対称行列 $\mathbf{P}$ が存在するならば、ファジィシステム (4) 式は大域的漸近安定である。

また、このとき評価関数値 J は

$$J < \mathbf{x}^T(0)\mathbf{X}^{-1}\mathbf{x}(0)$$

である。」

この定理から上のLMI条件を制約とする最小化問題が導出できる。 ■

上の条件は状態変数の初期値 $\mathbf{x}(0)$ に依存するが、設計問題によっては初期値 $\mathbf{x}(0)$ がわからない場合がある。そのような場合、いくつかの端点の凸結合で表現される集合に含まれる初期値を考えればよい。すなわち、次のような状態変数の初期値を考える。

$$\mathbf{x}(0)=\sum_{i=1}^{\ell}\rho_i\mathbf{x}_i(0)\ ,\ \left(\sum_{i=1}^{\ell}\rho_i=1\ ,\ \rho_i\geq 0\ ,\ \mathbf{x}_i(0)\in\mathbf{R}^n\right)$$

このような初期値に対しての設計法は、(13)式を以下に示す(13')式に変えて最小化問題を解けばよい。

$$\forall k\in\{1,2,\cdots,\ell\}$$

$$\begin{bmatrix}\lambda & \mathbf{x}_k^T(0)\\ \mathbf{x}_k(0) & \mathbf{X}\end{bmatrix}>0 \qquad (13')$$

(注意)

ここで提案した設計法によって設計されるファジィ制御器は、一般的には2次形式評価関数を最小とする最適な非線形制御器であるとは限らない。提案した設計法はファジィ制御器(3)式のクラスのなかで最適なゲインを見つける設計法である。

4. 設計例

本章では、本論文で提案した設計法を用いた設計例としてFig.1に示すような倒立振子[10]の安定化を考える。このシステムの力学的モデルは次のような非線形モデルとなる。

$$\frac{d^2}{dt^2}\begin{bmatrix}\theta_1(t)\\ \theta_2(t)\end{bmatrix}=\hat{\mathbf{J}}^{-1}\left\{\begin{bmatrix}R\sin\theta_1(t)\\ 0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}u(t)\right\} \qquad (16)$$

ただし、状態変数 $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$ はFig.1に示すとおりである。ここで、入力 $u(t)$ は点Xに作用するトルクである。このような状況のもとで、倒立振子を安定化する問題は状態変数 $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$ とその微分値をすべて0にするレギュレータ問題に帰着する。

4.1 ファジィモデル化

力学モデル(16)式は次のようにファジィモデル化できる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\sum_{i=1}^{2}w_i(t)\mathbf{A}_i\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}u(t)$$

となる。ここで、

$$\mathbf{x}(t)=[\theta_1(t)\ \theta_2(t)\ \dot{\theta}_1(t)\ \dot{\theta}_2(t)]^T$$

$$\mathbf{A}_1=\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{I}\\ \hat{\mathbf{J}}^{-1}\hat{\mathbf{R}} & \mathbf{0}\end{bmatrix},\ \mathbf{A}_2=\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{I}\\ \delta\hat{\mathbf{J}}^{-1}\hat{\mathbf{R}} & \mathbf{0}\end{bmatrix},\ \mathbf{B}=\begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ \hat{\mathbf{J}}^{-1}\mathbf{b}\end{bmatrix}$$

$$w_1(t)=\{\sin\theta_1(t)/\theta_1(t)-2/\pi\}/\{1-2/\pi\}$$
$$w_2(t)=\{1-\sin\theta_1(t)/\theta_1(t)\}/\{1-2/\pi\}$$

である。ただし、

$$\hat{\mathbf{R}}=\begin{bmatrix}R & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\ ,\ \mathbf{b}=\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}\ ,\ \delta=2/\pi$$

である。なお、このファジィモデルは

$$-\frac{\pi}{2}\leq\theta_1(t)\leq\frac{\pi}{2}$$

で(16)式を厳密に表現している。

4.2 ファジィ制御器の設計と制御結果

3.2節の設計法を用いて設計を行う。

制御対象のパラメータは

$$\hat{\mathbf{J}}=\begin{bmatrix}1.704 & 0.640\\ 0.640 & 0.640\end{bmatrix}\ ,\ R=-10.584$$

とする。また、制御量はすべての状態とする。すなわち、

$$\mathbf{C}_1=\mathbf{C}_2=\mathrm{diag}[\,1.0\quad 1.0\quad 1.0\quad 1.0\,]$$

とする。設計仕様である評価関数のパラメータ $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ は次のものを用いて設計する。

$$\mathbf{Q}=\mathrm{diag}[\,1.0\quad 1.0\quad 1.0\quad 1.0\,]\ ,\ \mathbf{R}=1.0$$

このとき、3.2節の設計法により次のようなファジィ制御器のゲイン $\mathbf{K}_i$ が設計できる。ただし、初期値 $\mathbf{x}(0)=[\,\pi/3,\ 0,\ 0,\ 0\,]$ を用いた。

$$\mathbf{K}_1=[47.140\quad 1.341\quad 18.722\quad 3.134]$$
$$\mathbf{K}_2=[47.326\quad 1.351\quad 18.808\quad 3.155]$$

次に設計されたファジィ制御系のシミュレーション結果をFig.2に示す。Fig.2からすべての状態変数が0に収束しており、倒立振子が安定化されていることがわかる。また、λ=395.7(設計で得られる値)、J=323.0(シミュレーションより得られる値)である。したがって、(12)式の関係を満たすことがわかる。

なお、設計仕様であるパラメータ $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ を変えることによって目的に応じた制御性能を実現できることを確認した。

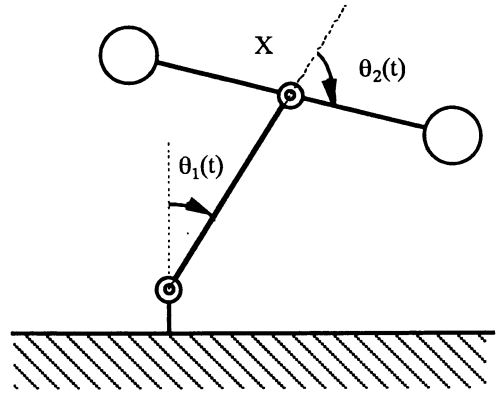


Fig.1 Inverted pendulum system

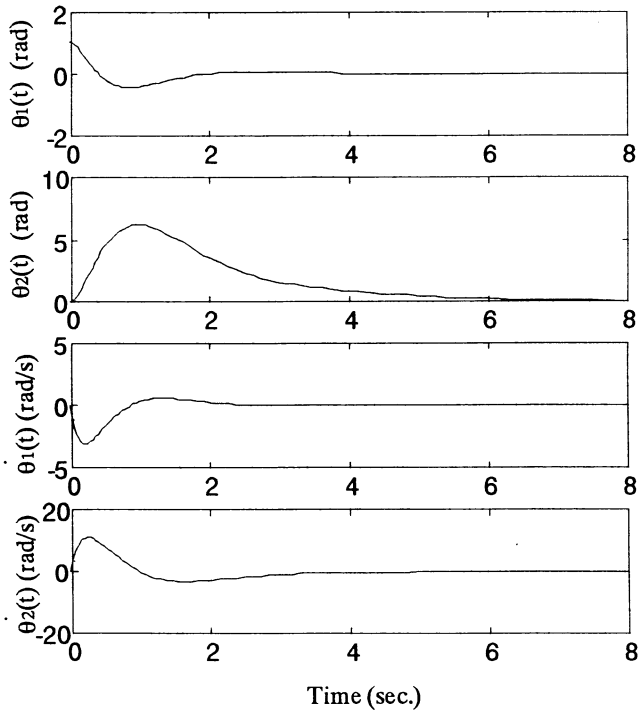


Fig.2 Simulation result

5. まとめ

本論文では、2次形式評価関数を考え、その評価関数をできるだけ小さくするようなファジィ制御器の設計法を提案した。また、この設計法を用いて倒立振子の安定化制御を実現し、シミュレーションによりその有効性を示した。なお、この設計法はLMI条件を制約とする最小化問題を解くことに帰着するので、文献9)で導出した不確かさを有するファジィモデルに基づくロバストファジィ制御系設計法と連立させて解くことが可能である。これについては別報にて報告する。

参考文献

1) T.Takagi and M.Sugeno : Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control, IEEE SMC-15, pp. 116-132 (1985)
2) 田中 :アドバンストファジィ制御 , 共立出版 (1994)
3) K. Tanaka and M. Sugeno : Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems, FUZZY SETS AND SYSTEMS, 45-2, 135-156 (1992)
4) H. Wang, K. Tanaka and M. Griffin : Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems via Takagi-Sugeno Fuzzy model, 4th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, 531-538 (1995)
5) 池田・田中 :ファジィモデルに基づくカオス系の安定化制御 , 第12回ファジィシステムシンポジウム、329-332 (1996)
6) 田中編 : インテリジェント制御、共立出版 (1996)
7) 田中・小嵜 : "並列分散的補償の概念を用いたトレーラ・トラックタイプロボットのファジィ後退制御," 計測自動制御学会論文集 , Vol. 32, No. 3, 363/368 (1996)
8) 池田・田中 : ファジィで意味付けされた非線形制御系の安定条件、システム情報関連合同シンポジウム、167/170 (1995)
9) 池田・田中 : ファジィ制御による非線形システムのロバスト安定化、第39回自動制御連合講演会、101-104 (1996)
10) 大須賀・岡・小野 : 腕を有する脚ロボットの非線形制御について,計測自動制御学会論文集, vol.31, No.10, 1695/1704 (1995)

付録

次に示すファジィシステムの安定条件を定理 A.1に示す。

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\sum_{i=1}^{r} w_i(t)\mathbf{A}_i\mathbf{x}(t) \quad , \quad \mathbf{y}(t)=\sum_{i=1}^{r} w_i(t)\mathbf{C}_i\mathbf{x}(t) \qquad (A.1)$$

$$\sum_{i=1}^{r} w_i(t) = 1 \quad , \quad w_i(t) \geq 0 \ (\forall i) \qquad (A.2)$$

≪ 定理A1 ≫ファジィシステム (A.1) 式の安定条件

次の条件を満たす共通の正定対称行列 **P** が存在するならば、(A.1) 式で表現されるファジィシステムは大域的漸近安定である。

$$\forall i \in \{1, 2, \cdots, r\}$$
$$\mathbf{A}_i^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_i < \mathbf{0} \qquad (A.3)$$

(証明) 文献 1) 参照。 ■

次にファジィシステム (A.1) 式に対して評価関数

$$J \equiv \int_0^\infty \mathbf{y}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{y}(t)\, dt \qquad (A.4)$$

の値の計算法を以下に示す。

≪ 定理A2 ≫

次の条件が成り立つ正定対称行列 **P** が存在するならば、ファジィシステム (A.1) 式は大域的漸近安定である。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_i^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_i & \mathbf{C}_i^T \\ \mathbf{C}_i & -\mathbf{Q}^{-1} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \qquad (A.5)$$

また、このとき評価関数J (A.4) 式は次のようになる

$$J < \mathbf{x}^T(0)\mathbf{P}\mathbf{x}(0)$$

(証明)

前半の証明 :

条件 (A.5) 式に対して Schur Complement を適用すれば (A.3) 式を満たす。したがって、大域的漸近安定である。

後半の証明 :

$\mathbf{x}^T(t)\mathbf{P}\mathbf{x}(t)$ の微分を考え、ファジィシステム (A.1) を代入する。すなわち

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}^T(t)\mathbf{P}\mathbf{x}(t) = \dot{\mathbf{x}}^T(t)\mathbf{P}\mathbf{x}(t) + \mathbf{x}^T(t)\mathbf{P}\dot{\mathbf{x}}(t)$$
$$= \sum_{i=1}^{r} w_i(t)\mathbf{x}^T(t)\{\mathbf{A}_i^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_i\}\mathbf{x}(t)$$

となる。さらに、条件

$$\sum_{i=1}^{r} w_i(t)\begin{bmatrix} \mathbf{A}_i^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_i & \mathbf{C}_i^T \\ \mathbf{C}_i & -\mathbf{Q}^{-1} \end{bmatrix} < \mathbf{0}$$

を用いると次のように整理できる。

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}^T(t)\mathbf{P}\mathbf{x}(t) < -\mathbf{x}^T(t)\{\sum_{i=1}^{r} w_i(t)\mathbf{C}_i\}^T\mathbf{Q}\{\sum_{i=1}^{r} w_i(t)\mathbf{C}_i\}\mathbf{x}(t)$$
$$= -\mathbf{y}^T(t)\,\mathbf{Q}\,\mathbf{y}(t)$$

上式の両辺を区間 $[0\ \infty)$ で積分すると

$$J = \int_0^\infty \mathbf{y}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{y}(t)\, dt < -\mathbf{x}^T(t)\mathbf{P}\mathbf{x}(t)\Big|_0^\infty$$

となる。ファジィシステムが大域的漸近安定 [$\mathbf{x}(t) \to 0$, $\mathbf{y}(t) \to 0$ ($t \to \infty$)] であるので、したがって、

$$J = \int_0^\infty \mathbf{y}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{y}(t)\, dt < \mathbf{x}^T(0)\mathbf{P}\mathbf{x}(0)$$

が成り立つ。 ■

≪ 定理A3 ≫

次の２つの命題は等価である。

(i) 条件 (A.3) を満たす正定対称行列 **P** が存在する。

(ii) 条件 (A.5) を満たす正定対称行列 **P** が存在する。

(証明)

(ii) → (i) は≪ 定理A2 ≫で示した。(i) → (ii) を示せばよい。(A.3) が成り立つならば、

$$\mathbf{C}_i^T\mathbf{Q}\mathbf{C}_i \geq \mathbf{0}$$

なので、次の条件を満たす正数 ε (ε>0) が存在する。

$$\mathbf{A}_i^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_i + \varepsilon\mathbf{C}_i^T\mathbf{Q}\mathbf{C}_i < \mathbf{0}$$

この条件は

$$\varepsilon\begin{bmatrix} \mathbf{A}_i^T(\mathbf{P}/\varepsilon) + (\mathbf{P}/\varepsilon)\mathbf{A}_i & \mathbf{C}_i^T \\ \mathbf{C}_i & -\mathbf{Q}^{-1} \end{bmatrix} < \mathbf{0}$$

の条件と等価なので、この条件において $\mathbf{P}/\varepsilon$ を新たな **P** と考えれば条件が成り立つ。 ■

連絡先 〒920 金沢市小立野2-40-20
金沢大学工学部人間・機械工学科
田中 一男
電話 &FAX : 0762-34-4736
電子メイル : ktanaka@t.kanazawa-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)
WEA2-3

未来の目標値を考慮した予見ファジィ制御方式の実システムへの適用

An Application of Predictive Fuzzy Control System which Considers Target Value in the Future to Real Systems

安信 誠二・殖栗 俊明
Seiji Yasunobu and Toshiaki Ueguri

筑波大学　構造工学系
Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba

Abstract: In the PID control method, there is a problem of conformity and the trade-off of the attenuation characteristic etc. and the parameters are set trying and erring based on a subjective judgement of the designer.

In this research, the predictive fuzzy control system which considers target value in the future is applied to two control objects that are no located process and the first delay location process and the effectiveness of proposed system is evaluated in the simulation and real systems.

1　はじめに

PID 制御方式では，目標値が変化する場合には，即応性，減衰特性などのトレードオフの問題もあり，パラメータの設定が，設計者の主観的な判断に基づいて，試行錯誤的に行われている．これらの原因は，現在時刻での目標値に対して制御指令を計算しているために，パラメータの調整が困難であるからである．

著者らは，PID 制御＆予見ファジィ制御方式を，無定位性プロセスの制御対象に適用し，一定の目標値に対して制御を行い，その有効性を示した[1]．

この方式は，将来の制御応答を予測，評価しながら，制御を行っている．したがって未来の目標値の変化に対応できる制御が行える．そこで，本研究では，PID 制御＆予見ファジィ制御方式を拡張した，未来の目標値を考慮した予見ファジィ制御方式[2]を，無定位性プロセスと一次遅れ定位性プロセスの異なる 2 つの制御対象に適用し，シミュレーション，及び実システムにより評価を行う．

2　未来の目標値を考慮した予見ファジィ制御方式の提案

PID 制御＆予見ファジィ制御方式[1]を，未来の目標値の変化に対しても対応できるものにするために，この方式の制御系の構成を図 1 のように拡張した．

拡張された制御方式では，未来の目標値の変化にも対応できるように，未来の目標値の計画が判断部に与えられ，その目標値を用いて判断部で制御周期ごとに最適な制御方策 K_p を決定し，その制御方策を用いて実行部で制御対象を制御している．

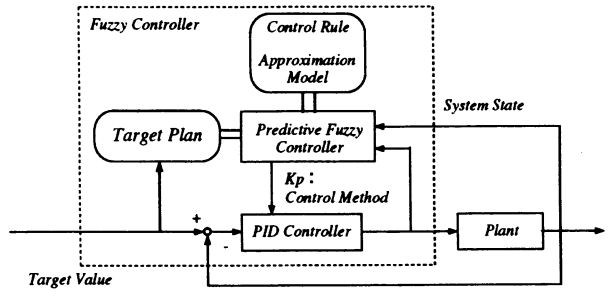


図 1 未来の目標値を考慮した予見ファジィ制御方式の制御系の構成

2.1　判断部

判断部では，実行部結果を予見・予測し，制御方策を評価し最適な制御方策 K_p を決定する．そこでどのような制御応答をするのかをシミュレーションによって予測し，さらにどのような制御応答が望まれるのかを，熟練者の知識にもとづいて考慮し，制御目的として表す．

制御対象の応答は，おのおので異なるために，基本となる制御目的は変わらないが，評価の対象となる時刻が，変化する．今回は，制御を行う対象として，無定位性プロセスである球体浮上装置と一次遅れ定位性プロセスである電球表面温度制御装置の 2 つを用いるため，各指標の時刻は，おのおのの節の中で設定することにする．

制御方策の選択を行うときに，コントローラ内で制御応答の予測をしている様子を図 2 に示す．

1. 判断部の制御目的のファジィ集合化
   ここでは，それぞれの制御対象への入力に対する応答を考慮して，制御目的に照らし合わせ評価する．

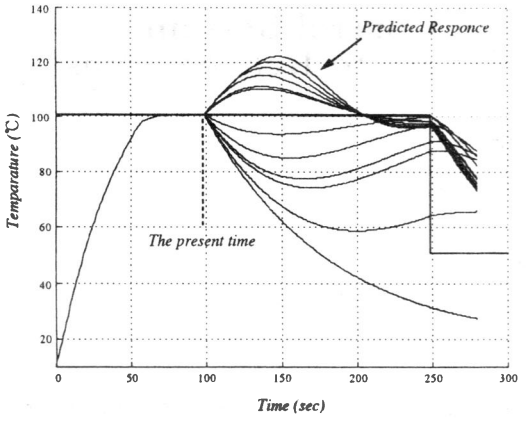


図 2 各制御方策による将来応答の予見線

(a) 相対時間後の目標値への収束 (E)
- 現在時刻から x 秒後には±5 %以内に収束する: Very Good
- 現在時刻から x 秒後には約±5 %以内に収束する: Good

(b) 立ち上がり量 (R)
- 現在時刻から y 秒後には目標値の±5 %以内に収束する: Very Good
- 現在時刻から y 秒後には目標値の約±5 %以内に収束する: Good

(c) オーバーシュート量及びアンダーシュート量 (OS,US)
- オーバーシュート量が±10 %以下: Very Good
- オーバーシュート量が約±10 %以下: Good
- アンダーシュート量が±10 %以下: Very Good
- アンダーシュート量が約±10 %以下: Good

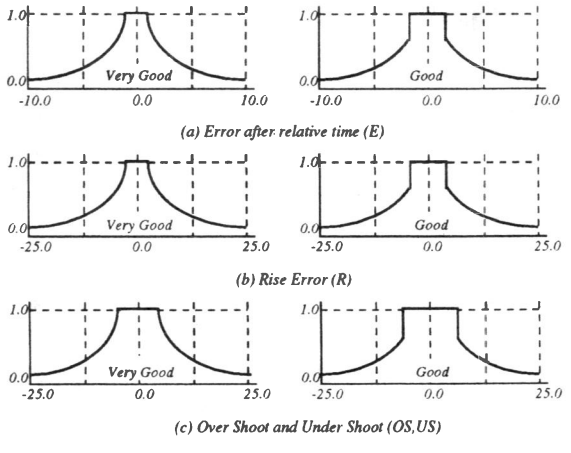


図 3 メンバーシップ関数

2. ファジィ制御則

制御方策としては，実行部で用いる PID 制御系の制御定数を決定する．ここでは，比例制御のゲインに対して評価する．比例制御のゲイン K_pを，0.1，0.3，0.5 を基本的仮定値とし，現在の比例制御のゲイン K_pに対して±10 %，±8 %，±6 %，±4 %，±2 %の値を候補 ($1.0\pm0.2\cdot n$, n=1,5) として制御目的を評価する．また，上記ファジィ制御則に基づき作成したファジィ判断則を以下に示す．ここで VG は Very Good を，GD は Good を表すこととする．

●ファジィ判断則

1. If (K_p is $*1.0$ ⇒ E is GD and R is GD and OS is GD and US is GD) then K_p is $*1.0$
2. If (K_p is 0.1 ⇒ E is GD and R is GD and OS is GD and US is GD) then K_p is 0.1
3. If (K_p is 0.3 ⇒ E is GD and R is GD and OS is GD and US is GD) then K_p is 0.3
4. If (K_p is 0.5 ⇒ E is GD and R is GD and OS is GD and US is GD) then K_p is 0.5

n. If (K_p is $*x$ ⇒ E is VG and R is VG and OS is VG and US is VG) then K_p is $*x$
(n=5,14, x=$1.0\pm0.2\cdot n$, n=1,5)

2.2 実行部

判断部によって与えられた制御方策 K_pに基づき，目標値と現在の観測値の偏差から PID 制御の計算を行う．

3 実システムへの適用

提案した制御方式の有効性を評価するために，シミュレーション，及び実機による実験を行う．本方式の評価の方法として，異なる 2 つの制御対象を考慮する．1 つは，無定位性プロセスである球体浮上装置，もう 1 つは，一次遅れ定位性プロセスである電球表面温度制御装置を用いる．

3.1 球体浮上装置への適用

3.1.1 判断部における時刻の設定

ここでは，球体浮上装置を制御対象に用いる場合の判断部における各指標の時刻の設定を行う．
“相対時間後の目標値への収束”の指標となる時刻として 0.8 秒後を，“立ち上がり量”の指標となる時刻として 3 秒後を設定する．

3.1.2 目標値の設定

ここでは，球体浮上装置を制御対象に用いる場合の目標値の設定を行う．条件設定としては，ステップ入力，ランプ入力に対する，本提案方式の有効性を確認するために，以下のように目標値設定を行った．

$$r(t) = \begin{cases} 0cm & (0 \leqq t < 1) \\ 60cm & (1 \leqq t < 6) \\ 30cm & (6 \leqq t < 11) \\ 10 \times (t-8)cm & (11 \leqq t < 16) \\ 80cm & (16 \leqq t < 21) \\ -10 \times (t-29)cm & (21 \leqq t < 26) \\ 30cm & (26 \leqq t \leqq 30) \end{cases}$$

(1) 実験装置の構成

ここでは無定位性の対象に対する提案方式の有効性を示すために，実験による検証を行う．実験装置の構成を図 4 に示す．実験の目的はアクリルチューブ内に入っているピンポン玉の高さをコンピュータ (PC-9821As2+DX4 100MHz) から与えられた目標高さに追従させることである．超音波距離計の分解能は $1cm$，制御系のサンプリング周期は $100msec$ である．

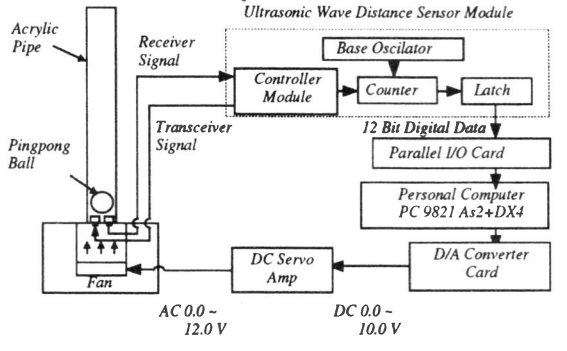


図 4 球体浮上装置

(2) 実験結果

ステップ応答法により実験装置の動特性の同定を行った結果，装置の伝達関数は $\frac{45.0}{s}e^{-0.50s}$ と表せることを確認した．

実際に装置を用いて PID 制御方式と，PID 制御＆予見ファジィ制御方式による制御を行なった．図 5 に比例ゲイン K_p=0.3 の場合の PID 制御の応答を，図 6 に比例制御ゲインを設定しながら制御を行う PID 制御＆予見ファジィ制御の応答を示す．

(3) 実験結果の考察

図 5，図 6 に示されるように，2 つの制御方式ともに，シミュレーション結果と類似した応答をすることを確認し，実機の伝達関数が近似されていることが分かった．また，PID 制御方式に比べて，提案した制御方式は制御目的を満たしており，制御目的の設定が実システムにおいても有効であることを確認した．

3.2 電球表面温度制御装置への適用

3.2.1 判断部における時刻の設定

ここでは，電球表面温度制御装置を制御対象に用いる場合の判断部における各指標の時刻の設定を行う．

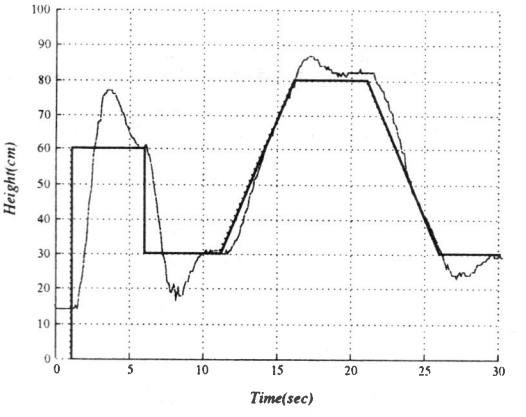


図 5 球体浮上装置による PID 制御方式の制御結果 (K_p=3.0)

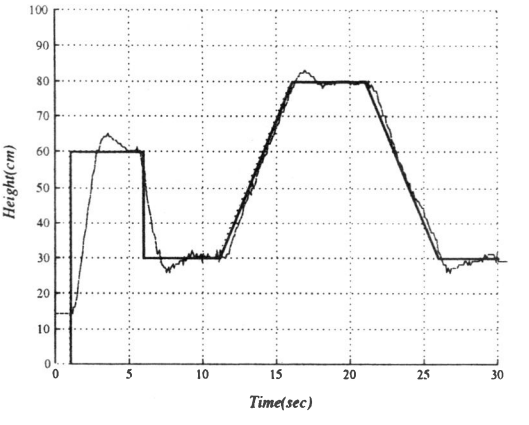


図 6 球体浮上装置による PID 制御＆予見ファジィ制御方式の制御結果

“相対時間後の目標値への収束”の指標となる時刻として 5 秒後を，“立ち上がり量”の指標となる時刻として 60 秒後を設定する．

3.2.2 目標値の設定

ここでは，球体浮上装置を制御対象に用いる場合の目標値を以下のように設定した．

$$r(t) = \begin{cases} 100°C & (0 \leqq t < 250) \\ 50°C & (250 \leqq t < 500) \\ 0.3(t-500)+50°C & (500 \leqq t < 750) \\ 125°C & (750 \leqq t < 1000) \\ -0.3(t-1000)+125°C & (1000 \leqq t < 1250) \\ 50°C & (1250 \leqq t \leqq 1500) \end{cases}$$

(1) 実験装置の構成

ここでは一次遅れの対象に対する提案方式の有効性を示すために，実験による検証を行う．実験装置の構成を図 7 に示す．実験の目的は電球の表面温度をコンピュータから与えら

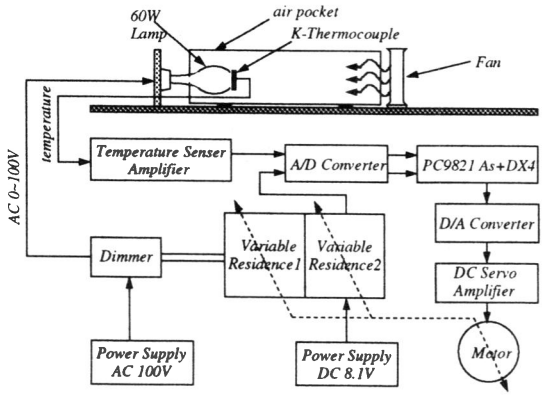


図 7 電球表面温度制御装置

れた目標値に追従させることである．制御系のサンプリング周期は $1sec$ である．

(2) 実験結果

ステップ応答法によって，実験装置の動特性の同定を行った結果，装置の伝達関数は，$\frac{K}{1+sT}$ と表せることを確認した．ゲイン，及び時定数は以下に示す．

$$\text{ゲイン } K(^\circ C/V) = \begin{cases} -9.359V_{in} + 41.77 & (0.8 \leqq V_{in} \leqq 1.8) \\ -1.135V_{in} + 26.20 & (1.8 \leqq V_{in} \leqq 8.1) \end{cases}$$

$$\text{時定数 } T(sec) = \begin{cases} -26.86V_{in} + 100.35 & (0.8 \leqq V_{in} \leqq 1.8) \\ -1.068V_{in} + 54.403 & (1.8 \leqq V_{in} \leqq 8.1) \end{cases}$$

実際に装置を用いて PID 制御方式と，PID 制御＆予見ファジィ制御方式による制御を行なった．まず 2 つの制御（目標値 100°C）を行った結果を図 8 に，提案した方式に基づくコントローラのパラメータの履歴を図 9 に示す．

(3) 実験結果の考察

提案した制御方式は，近似された内部モデルを用いて将来の制御応答の予測，及び評価を行いながら制御を行っている．また，図 9 のように制御目的を満たす比例ゲイン K_p を選択しながら制御をしているので，制御目的の設定により制御応答が目標値に上手く追従することを実システムにより確認した．

4 おわりに

本論文では，提案した制御方式の有効性を評価するために，シミュレーション，及び実機による実験を行った．本方式の評価の方法として，無定位性プロセスである球体浮上装置，一次遅れ定位性プロセスである電球表面温度制御装置の異なる 2 つの制御対象を考え，目標値が変化し，その目標値を考慮できる場合に対して制御を行った．

本方式では，ある程度伝達関数で近似できる制御対象であれば，その伝達関数を内部モデルとして用いることで実システムの将来応答を予測することができ，無定位性プロセス，一次遅れ定位性プロセスなど，特性に関係なく制御目的を設定でき，実システムにおいても有効であることを確認した．

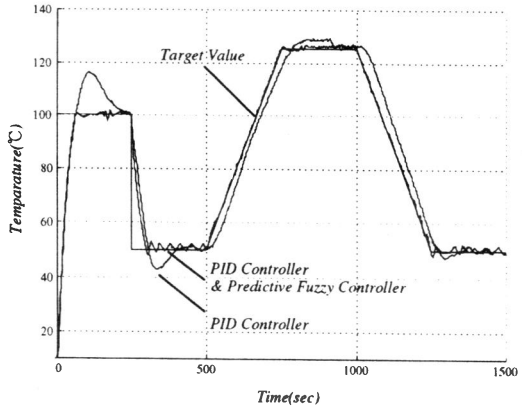


図 8 電球表面温度制御装置による制御結果

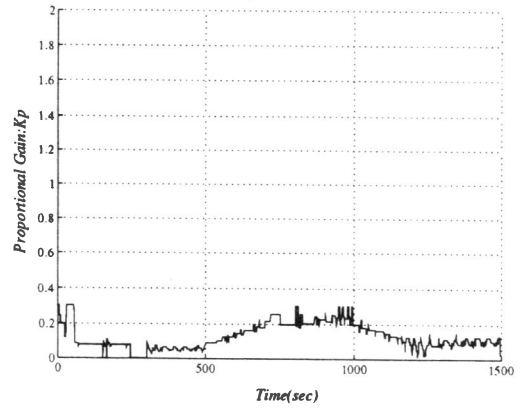


図 9 電球表面温度制御装置における提案方式の PID 制御部の比例ゲイン K_p の変化の様子

参考文献

[1] 安信，殖栗，“PID 制御＆予見ファジィ制御方式の構築と評価”，第 5 回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集，21/24, 1995.

[2] 安信，殖栗，“未来の目標値を考慮した予見ファジィ制御方式の提案”，第 1 2 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，577/580, 1996.

[3] 安信，“人間の制御戦略に基づく Fuzzy 制御方式の一提案”，計測自動制御学会論文集，Vol. 23, No. 9, pp. 969/975, 1987.

問い合わせ先

〒 305　茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学　構造工学系　安信研究室
殖栗　俊明
TEL 0298-53-6186 または 5019
FAX 0298-53-5207
E-mail:ueguri@esys.tsukuba.ac.jp

FUZZY ALGORITHMS FOR CASCADE CONTROL SYSTEMS

Anjel TZANEV and Gancho VACHKOV†

Dept. of Automation of Industry,
University of Chemical Technology and Metallurgy,
1756 Sofia, BULGARIA
E-mail: tzanev@hpap1.uctm.acad.bg

† Dept. of Chemical Systems Engineering, Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, 090 Kitami-Shi, JAPAN
E-mail: vachkov@betta.chem.kitami-it.ac.jp

Abstract. The problems of interpreting the cascade control algorithms (SIMO systems) for classical multiloop structures in the fuzzy set framework are considered. The abilities of introducing two autonomous fuzzy controllers in a multiloop structure are investigated. Mamdani's fuzzy inference with properties of classical PID and Sugeno's type fuzzy controller obtained by the ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) approach are used.

1. Introduction

The cascade control systems are multicontroller structures, featuring even in the simplest case as SIMO (Single Input-Multiple Output) systems. Main their specific is the availability of secondary inferential measurement(s), being affected simultaneously by the process input and some input disturbances. The aim of the control is decrea sing the influence of the input plant disturbances on the primary output (Fig. 1). Main attention in industrial applications is focused on two cascade structures :

s-s systems (serial plants - serial controllers);

s-p systems (parallel plants - serial controllers) - Fig. 1.

In the fuzzy set interpretation the control philosophy is concentrated on the performance of the primary output mainly, and the secondary one may produce arbitrary stable dynamic behaviour. For the *s-p* system and type "0" plants (output reaches a finite value for infinite time after step input change) the secondary loop always demonstrates steady-state error, no means if both controllers have or not integral action part:

$$y_2(\infty) = \frac{k_1}{k_2} \tag{1}$$

where k_1 and k_2 are the plant gains.

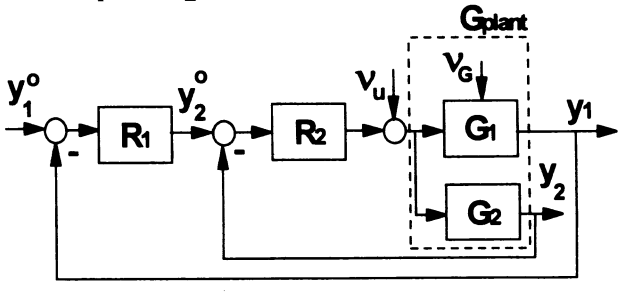


Fig. 1. Basic *s-p* cascade controller structure.

2. Fuzzy Control Basics

The fuzzy control algorithms generally use strategies, containing a set of conditional heuristic control rules for state evaluation.

Compound condition rules have the following format:
$IF \cdot A \cdot AND \cdot B \cdot THEN \cdot C$ with
$C = A \circ (B \circ R)$:

$$M_R(u,y) = \underset{u}{\wp^*}\left\{M_C(c) \circ \wp[M_A(u), M_Y(y)]\right\} \tag{2}$$

A, B are the fuzzy input/output sets respectively and *R* is the fuzzy relation membership matrix in the {*u, y*} domain. $M_{(*)}(x)$ presents the grade of membership in the fuzzy set and $\wp$ denotes the set of relational functions. Here the relation membership matrix *R* takes the form

$$R = A^* \times B^* \times C^*: \tag{3}$$
$$M_R(u_1,u_2,y) = \wp^*\left\{M_{C^*}(c) \circ \left\{\wp\left[M_{A^*}(u_1), M_{B^*}(u_2)\right], M_{C^*}(y)\right\}\right\}$$

A, B*, C** are the defining fuzzy sets, *R* contains a set of all fuzzy relations for calculating the output possibility vector given input possibility vector:

$$y_i = \underset{j}{\wp^*}\left\{\wp\left[u_j, R_{ji}\right]\right\} \tag{4}$$

Usually the functional sets contain the elements

$$\wp \subset \{\min, prod, ...\}; \quad \wp^* \subset \{\max, sum, probor, ...\} \tag{5}$$

Often the fuzzy controller implements some predefined properties, i.e. standard PID structure [3, 4]. Numerous forms of fuzzy PID control algorithms were intensively investigated. A general form is demonstrated in [1]:

$$IF \cdot e \cdot THEN \cdot IF \cdot de \cdot THEN \cdot IF \cdot Ie \cdot THEN \cdot u \tag{6}$$

Another fuzzy PID control algorithm is proposed in [4]:

$$IF \cdot e \cdot THEN \cdot \left[IF \cdot de \cdot THEN \cdot (IF \cdot Ie \cdot THEN \cdot u)\right] \tag{7}$$

Other modification takes the plant output in the control action via the integral part, thus increasing the speed of final settling [3]:

$$IF \cdot e \cdot THEN \cdot \left[IF \cdot de \cdot THEN \cdot (IF \cdot Iy \cdot THEN \cdot u)\right] \tag{8}$$

Here, the control law should be separated to a number of 2x2 tables, thus avoiding the bulk rules. By *e*, *de*, *Ie* and *u* the fuzzy sets *E*, *DE*, *IE* and *U* of output error, error

change, error integral and control are denoted so the fuzzy PID control statement (8) may be considered as a fuzzy implication, performing the fuzzy mapping [1]:

$$P: E \circ DE \circ IE \Rightarrow U \quad (9)$$

The Rule Matrix referring to control statement (6) is obtained in a three-dimensional form due to the number of conditional terms. Actually it is not very practical to derive such a numerous set of rules. Furthermore, adoption of more realistic approaches especially for including integral part is required [3].

3. Fuzzy Cascade Control

3.1. Fuzzy cascade control algorithms

We implement some design methods for cascade controllers, transformed in a fuzzy reasoning form. It is evident, that the primary controller conforms the usual fuzzy framework, but the secondary one contains the error $e_2 = u_1 - y_2$, depending on the defuzzified primary controller output. Two control approaches are examined:

(a) *Generalized fuzzy cascade control (FCC) algorithm*

$$IF \cdot e_1 \cdot THEN \cdot \{IF \cdot de_1 \cdot THEN \cdot [IF \cdot Ie_1 \cdot THEN \cdot \{IF \cdot e_2 \cdot THEN \cdot [IF \cdot de_2 \cdot THEN \cdot (IF \cdot Ie_2 \cdot THEN \cdot u_2)]\}]\} \quad (10)$$

This control law requires a fifth-order Rule matrix. It is possible to reduce the row of the matrix by introducing a series of second-order submatrices. Furthermore, the generalized control law could be simplified.

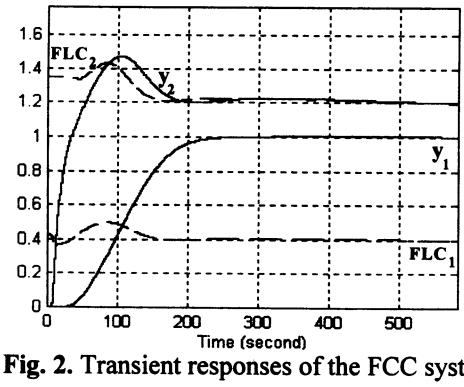


Fig. 2. Transient responses of the FCC system

(b) *Method of quasi-autonomous loops (QAL)*

This approach for design of classical cascade control systems is used when both plant channels possess considerably distinct dynamics, evaluated by the slowest time constants of both process models: $T_{prim}/T_{sec} \geq 4$. By this approach two separate fuzzy controllers can be incorporated in the cascade control algorithm. The controllers are connected by the defuzzified control action $u_1 \equiv y_{2set}$. The design procedure is separated in two steps:

(i) Tuning the secondary fuzzy logic controller FLC_2 by the secondary plant model only in an independent single-loop control framework.

(ii) Consequently, from the cascade structure it is evident that for the primary controller FLC_1 all other elements in the control loop are composing the "controlled object", including both plant channels and the secondary controller. They all form the "equivalent" plant, including the secondary fuzzy controller FLC_2 as well.

3.2. Application on Industrial Plant

The presented double-stage suboptimal algorithm is a basis for design of the controllers FLC_1 and FLC_2. Here Off-line tuning is implemented. The plant models of "0" type include pure time delay:

$$G_1(s) = \frac{2.48}{32^3 s^3 + 58^2 s^2 + 108s + 1} e^{-19s}$$
$$G_2(s) = \frac{3}{25s^2 + 14.23s + 1} e^{-5s} \quad (11)$$

On the first stage the secondary controller FLC_2 is tuned by aiming at a desired output performance. A damping ratio of ξ=1 was chosen and settling time of 110 sec for the response of the secondary output is obtained.

Here the following scaling parameters were specified to define the Universes of discourse for the input variables: $e \subset$[-8, 8], $de \subset$[-0.5, 0.5], $Ie \subset$[0, 100]. The controller output parameters span the interval [-1.05, 1.05]. All these parameters were treated as tuning parameters. Mamdani's fuzzy inference is adopted and the rule table for the single PID controller along with the linguistic values for the final FLC_1 and FLC_2 are shown in Table 1.

Table 1

E	LO	NE		OK		PO	HI
e_1	-8	-4		0		4	8
e_2	500	-1000		0		500	1000
dE		NB	NS	ZE	PS	PB	
de_1		-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	
de_2		-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	
IE				PM	PS	PB	PH
Ie_1				0	170	340	500
Ie_2				0	63	125	180
Out	NH	NB	NS	ZE	PS	PB	PH
O_1	-4.5	-3	-1.5	0	1.5	3	4.5
V_2	-2.43	-1.6	-0.81	0	0.81	1.6	2.43

The following notations for the discrete linguistic values are used: **LO** - Low; **NE** - Negative; **OK** - Normal position; **PO** - Positive; **HI** - High; **NB** - Negative Big; **NS** - Negative Small; **ZE** - Zero value; **PS** - Positive Small; **PB** - Positive Big; **PM** - Positive Medium; **PH** - Positive High; **NH** -Negative High.

In addition to Table 1 a compound rule is also included:

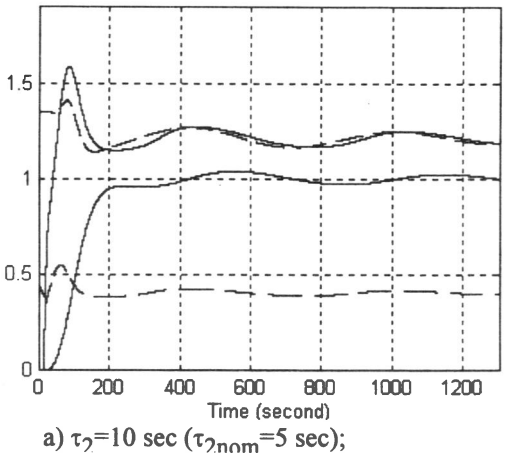
$$IF \cdot e \cdot IS \cdot OK \cdot and \cdot de \cdot IS \cdot ZE \cdot THEN \cdot valve \cdot IS \cdot ZE \quad (12)$$

The Rule bases are identical for both the FLC_1 and FLC_2 controllers, with distinct scaling factors. They are built up of 15 fuzzy relations.

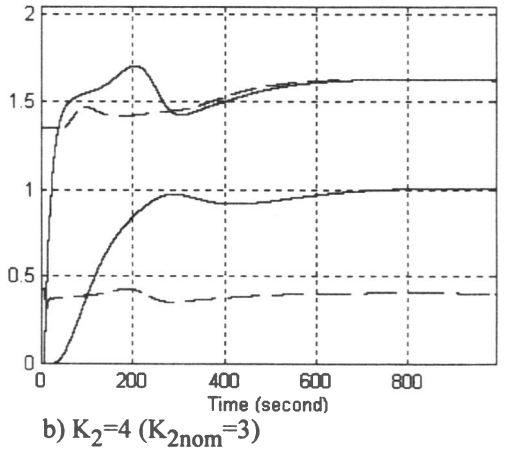
After setting FLC_2 further tuning of the parameters in FLC_1 is performed. Unfortunately, the procedure doesn't take into account the transient response of the equivalent plant, so additional retuning of the FLC_2 is needed. This

shortcoming follows directly by the interconnected entity of the cascade control systems [5]. In Fig. 3 the best transient responses of the *s-p* fuzzy cascade control system are shown using the following parameter spaces:

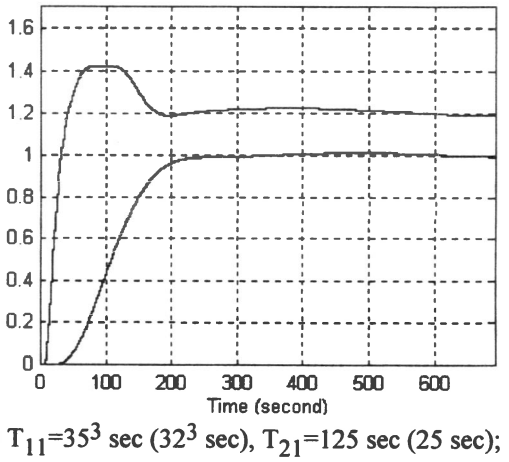
$e_2 \subset [-1000, 1000]$, $de_2 \subset [-0.5, 0.5]$, $Ie_2 \subset [0, 185]$, (13)
$e_1 \subset [-8, 8]$, $de_1 \subset [-0.5, 0.5]$, $Ie_1 \subset [0, 500]$;
$\mu_2 \subset [-2.7, 2.7]$, $u \subset [-5, 5]$. (14)



a) τ_2=10 sec (τ_{2nom}=5 sec);



b) K_2=4 (K_{2nom}=3)



c) T_{11}=35^3 sec (32^3 sec), T_{21}=125 sec (25 sec);

Fig. 3. Time responses and parameter variations. (*Continuous line*: Plant Outputs; *Dashed line*: Controller outputs)

The settings are precisely defined, what is inferring by the steady-state output values ($y_{1\infty}$=1 and $y_{2\infty}$=1.2) as it follows by Eqn. (1)). On both design stages the heuristic approach for parameter search was applied.

3.3. Examining Robust Properties

The main advantage of a fuzzy logic controller is projected when parameter variations of the plant are observed. In Fig. 3, one can see that nevertheless the large change in plant delay the outputs keep stable with acceptable oscillations (Fig. 3, a). Much less aggravating effects render the plant time constants (Fig. 3, c). The highest sensitivity is demonstrated for the process gains (Fig. 3, b). This fact is somewhat expectable and is due to the interconnected nature of the cascade control systems [5].

4. Tuning FCC via ANFIS

By ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) a Sugeno's type fuzzy inference system (FIS) is derived after training with experimental data sets using the backpropagation method [2]. The aim is to identify the parameters (the coefficients of output equations on each rule) at every training epoch. As a result the final trained membership function set is trying to follow the local features of the training data. In this work we propose to tune a FCC by using input/output data.

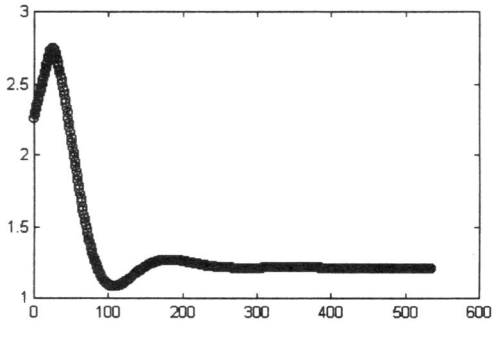


Fig. 4. Required R_1 control vs. predicted by FLC_1

4.1. Collecting Training Data

It is difficult to prepare training procedure about all possible signal combinations of the secondary controller R_2. So, it is more practical to adopt a classical structure for R_2 and tune it by assumptions of low-frequency disturbances ν_u. The primary controller R_1, however, accepts the setpoint change (usually known or constant) and the measured output. So the functioning of R_1 is more suitable for learning by example and implementation of a FLC. Our idea is that the training data set could be acquired by a cascade control system, properly tuned in advance for various working conditions. So, the channel for training $\varepsilon_1 \rightarrow \mu_1$ requires data for the input $\varepsilon_1 = y_{10} - y_1$, as well as the control action μ_1:

$$\mu_1 = f(y_{10}, y_1) \tag{15}$$

For control purposes Eqn. (15) must depend also on the time factor, otherwise it becomes a static relation:

$$\mu_1 = \psi(y_{10}, y_1, t) \tag{16}$$

This means that as an input parameter the series of time values of the process transient response of μ_1 is required. For globalization of the derived by ANFIS primary controller FLC_1 a collection of training data sets for various conditions should be used and variation of the scaling factors in the membership functions should be made. So the FLC acquires properties of an interpolative supervisory setter regarding the secondary controller.

4.2. ANFIS Learning of FCC

The parameters for learning a FIS by the ANFIS procedure are achieved on the basis of plant dynamics (the plant settling time defines the required minimal time interval and discretization step), or heuristically after some preliminary examinations (number of training epochs, number of used membership functions).
The deduced model for a master FCC in this case study incorporates 75 linear and 20 nonlinear parameters. The ANFIS settings were reduced by two inputs (ε_1, t_1) and a single output μ_1. For 5 membership functions 25 fuzzy rules are used. The training process utilizes 500 generated data pairs. The minimal training error achieved was $1{,}3.10^{-3}$ and lowers from $2{,}7.10^{-3}$ for 10 epochs. For the training data signal the FCC behaves excellently, as it is evident from the comparison in Fig. 4.
The transient responses of the *s-p* cascade control system with master FCC are shown in Fig. 5. The FCC control action (dotted line) outruns the y_7 output (dashed).

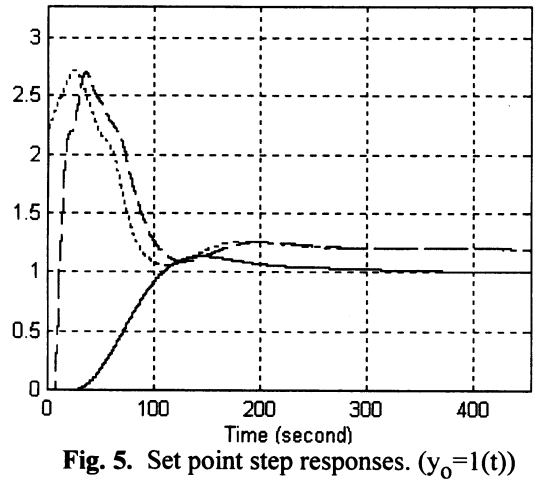


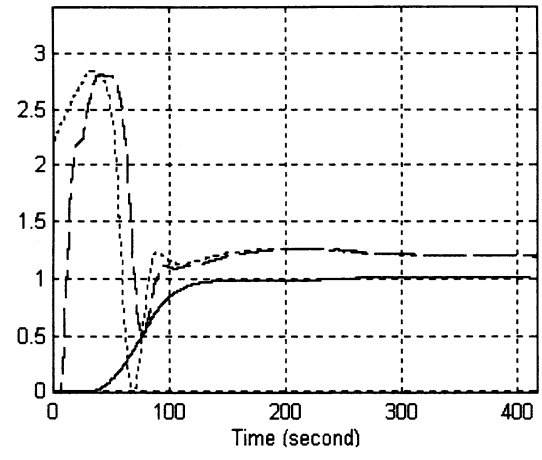
Fig. 5. Set point step responses. (y_0=1(t))

4.3. Examination of the Robust Properties

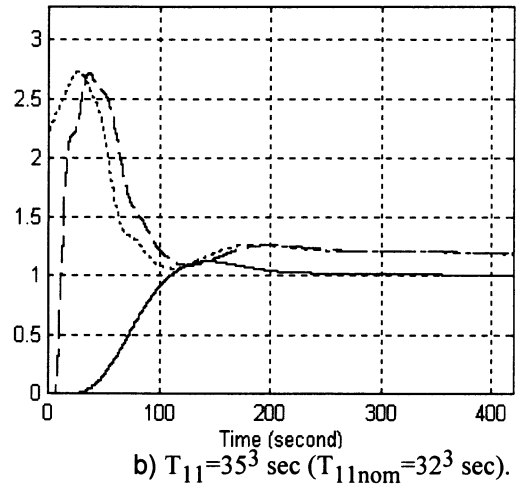
The robust properties of the designed mixed control system are illustrated on Fig. 6. For all cases the evident fact is stated, that no matter what parameters were changed, the performance of the y_1 output keeps almost unchanged. The y_2 output suffers considerable fluctuations, however, this is acceptable in the case of cascade control.

5. Conclusions

Fuzzy logic controllers are implemented in the cascade control framework. Two different design approaches for tuning of controllers were proposed and applied, based on the quazi-autonomous method: The derived by ANFIS controller is unstructured, so it incorporates integral and/or differential properties in the non-linear part. The primary plant output is controlled in the second case with better performance than the secondary one. This is the main distinction with the double FLC structure.



a) τ_1=25 sec (τ_{1nom}=19 sec);



b) $T_{11}=35^3$ sec ($T_{11nom}=32^3$ sec).

Fig. 6. Time responses and parameter variations.

References

[1]. Driankov, D., H. Hellendoorn, M. Reinfrank. An Introduction to Fuzzy Control. Springer-V. Berlin 1993.

[2]. Jang, J.-S. R. ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System. IEEE Trans. on Systems, Man, Cyber. Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, May 1993.

[3]. Kwok, D. P., P. Tam, C. K. Li, P. Wang. Linguistic PID Controllers. XIth IFAC World Congress, Vol. 7, Tallin'90. pp. 192-197. Tallin, Estonia,1990.

[4]. Morita Atsushi, Y. Iwai, A. Noda, M. Takegaki. Fuzzy Controller with Chained Structure. Int. Workshop on Fuzzy System Applications, IIZUKA'88, P.S. A8, pp. 83-84.

[5]. Tzanev, A.T. Multivariable Approach to Cascade Control System Design. Dycoman's Workshop, pp. 137-142. Prague, 1995.

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEA3-2

自走式倒立振子の階層的適応型ファジィ制御

Adaptive Hierarchical Fuzzy Control for Railless Inverted Pendulum System

小林貴生 Kobayashi Takao　西野順二 Nishino Junji　小高知宏 Odaka Tomohiro　小倉久和 Ogura Hisakazu

福井大学 工学部 情報工学科

Department of Information Science, Fukui University

Abstract : We study on controller for Railless Inverted Pendulum System (RIPS). This time, we observe a human control action to RIPS, and built a hierarchical fuzzy controller. The fuzzy control rules are organized by some simple rules. We propose hierarchical fuzzy controller system to control RIPS in any situation. At first, we consider a position control that like a human control to simplify the control rules. Then we make examination of a position control by hierarchical fuzzy controller on simulator. The higher controller estimates about RIPS and judges of control. The lower controller's actions are some basic controls for RIPS. Next time, we try more difficult situations. For example, control RISP on slope.

1　はじめに

我々はファジィ制御の有効性を検討するために, 不安定系である倒立振子を制御対象として, ファジィ制御システムの研究を行って来た [1]. 制御対象に倒立単振子を用いたファジィ制御の検討をするとき, 多くの場合, 制御対象はレールを敷くなどの制限を持たせてシミュレーションで扱えるような理想的なモデルに近づけることが多い. 不確実な要素が多くなるとモデル化することが困難になり, コントローラの作成も困難になるからである. これに対して, 本研究では, レールなどを敷かない自走式の倒立単振子を制御対象として用い, 不確実な, 自由度の高い制御対象に対するファジィ制御の有効性を検討を行ってきた.

今回は, 倒立振子に対する姿勢制御などの基本制御に加えて振子の状態, 振子への制御の状態などを評価し, それに基づいて基本制御を制御する上位制御を階層的に構成した. この階層的ファジィ制御モデル [2],[3] によるファジィ制御の検討を行なった. このように階層的知識制御の表現を行い, さらに台車の置かれている状況を拡張したときの制御についても検討する.

2　自走式倒立振子実験システム

本研究で用いる制御対象は自走式の倒立単振子である. 作成した自走式倒立振子を図 1に示す.

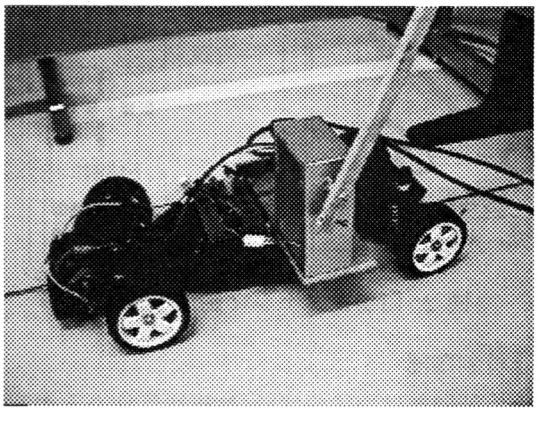


図 1: 作成した自走式倒立振子

台車はモータを駆動し, 自ら移動することができる. この台車は直線上を往復運動することができ, 台車上には振子が 1 本載っている. 今回の実験で制御対象とするのは台車, 振子を含んだ自走式の不安定系である. 振子は台車の進行方向軸を含む鉛直平面上を台車との接点を軸に回転することができる. また光センサにより台車の位置も検出することができる. 振子の角度の分解能は 0.08 度, 台車の位置の検出分解能は 2cm である. 台車を前後に動かすための動力には, 模型用の DC モータを使い,PWM でコントロールしている.

レールを敷き, 決められた軌道上を移動する倒立振子は制限が多いかわりに台車に対する不確定要素が少ないので, シミュレーションと同じような理想的な制御対象となる. しかし, 本研究で用いた制御対象にはレールが敷かれていない. そのために台車に対する不確定要素は数多く存在する. 一方, 制御対象として自走式倒立振子を用いることにより, 斜面上など様々な環境下での実験が可能である.

3 階層的ファジィ制御モデル

今回, 自走式倒立振子への制御に階層的ファジィ制御モデル [2],[3] を用いることを試みた. このような階層的制御は, 人間の制御行動の観察でも見ることができる. 例えば倒立振子を倒立させるとき, まず反射的な倒立させる行動をして, 次に倒立させる位置を微調整するような行動をとる. また制御を行いながら, その制御が上手く行っているかどうかの判断を行うこともある. このような経験を基に図 2のような階層的ファジィ制御モデルシステムを構成した. 階層的な制御部は上位制御部と下位制御部から構成されている.

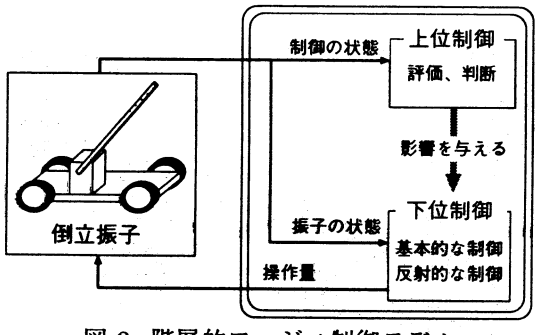


図 2: 階層的ファジィ制御モデル

- **上位制御部**
  上位制御部は振子の状態, 制御の状態などの評価を行い, その評価結果から下位制御に与えるべき影響を判断し, 影響を与える.
- **下位制御部**
  制御対象の状態を受け取って, 制御対象に対する基本的な安定を保つ制御を行う. 基本的な制御はシンプルな制御ルールにより構成した.

下位制御部での基本的な制御を上位制御部で切り替えることによって, 階層的な制御を行う.

前回までの報告 [4] で, 実機の自走式倒立振子の平面上に於いての単階層での倒立姿勢制御の有効性を確認できた. 今回, 階層的制御を実機の自走式倒立振子を用いる前に, ルールの有効性を検討するためシミュレータ上で階層的制御モデルを構成して予備実験を行った. シミュレータでの制御対象に於ける振子の角度分解能などのパラメータは実機と同様に設定した.

3.1 基本的な制御ルール (下位制御部)

倒立姿勢制御ルール まず振子を倒立させる基本的な制御ルールを構成した. 人間の制御行動の観察の結果として得られたルールで単純なルールになっている.

if	角度	P	then	操作量	P			
if	角度	N	then	操作量	N			
if	角度	ZO	and	角速度	P	then	操作量	P
if	角度	ZO	and	角速度	ZO	then	操作量	ZO
if	角度	ZO	and	角速度	N	then	操作量	N

表 1: 倒立姿勢制御ルール

「振子が倒れているならとりあえず倒立させ、倒立している状態では振子の動きを落ち着かせる」と言った意味のルール群で構成した. ファジィ推論は簡略化法を使用した. 平地シミュレータ上での試行結果を図 3に示す. 時間の経過につれて振子の角度が倒立状態に落ち着いており, 倒立姿勢制御は有効に機能していることが分かる. この倒立姿勢制御は制御対象の倒立振子に対して常に行なうものとした.

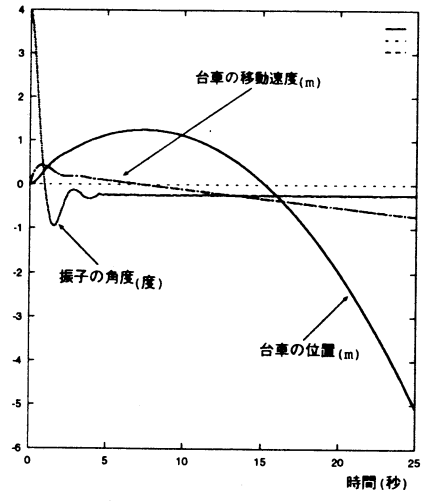


図 3: 倒立姿勢制御

速度制御ルール, 位置制御ルール 倒立姿勢制御のときと同様な考え方で, 単純なルールにより台車の速度を制御するルール群を構成した. 台車の速度を制御することは, 目標の速度になるような方向に振子を故意に傾ける (目標角度をシフトする) ことによって実現する. これらのルール群でファジィ推論を行うことにより台車の速度が制御される.

同様に台車の位置を移動させるルール群も構成した．速度抑制制御と同様に，台車を動かしたい方向に故意に振子を倒すことで位置制御を実現する．

if	速度	P	then	角度のシフト	P
if	速度	ZO	then	角度のシフト	ZO
if	速度	N	then	角度のシフト	N

表 2: 速度制御ルール

if	位置	P	then	角度のシフト	P
if	位置	ZO	then	角度のシフト	ZO
if	位置	N	then	角度のシフト	N

表 3: 位置制御ルール

今回これらの基本的な制御ルールを機動的にON/OFF して速度制御，位置制御を行った．つまり，上位制御部で制御対象の状態を評価して，その判断によって制御を切り替えることを考えた．当初，制御ルールを常に ON にしていたが，あまり良い結果は得られなかった．制御ルールを常に ON にして試行を行った結果を図 4，図 5に示す．図 4は目標速度が $2m/s$ の速度制御，図 5は目標位置が $1m$ 地点の位置制御を行った結果である．

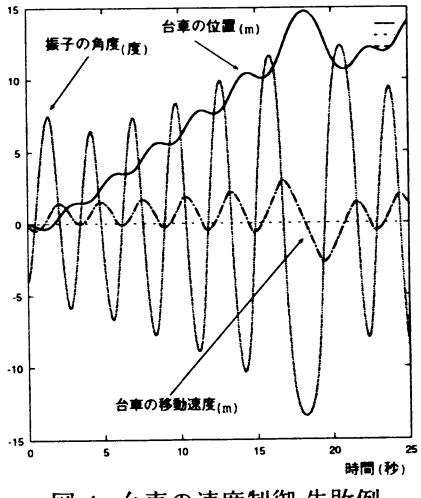


図 4: 台車の速度制御:失敗例

倒立姿勢制御と速度制御，位置制御が競合し，全体としては有効に機能しなかった．このように常に ON にしたままでは，どちらの制御も目的の状態にすることはできず，目的の制御がうまく行われていない．

3.2 評価ルール (上位制御部)

上位制御部では振子の状態の評価を行い，上位制御部によって下位制御部での基本制御の切り替えを行うことにした．切り替えの概念図を図 6に示す．

まず振子の姿勢の状態を評価する．状態が良くなければ倒立姿勢制御を行い振子の姿勢を良くする．振子

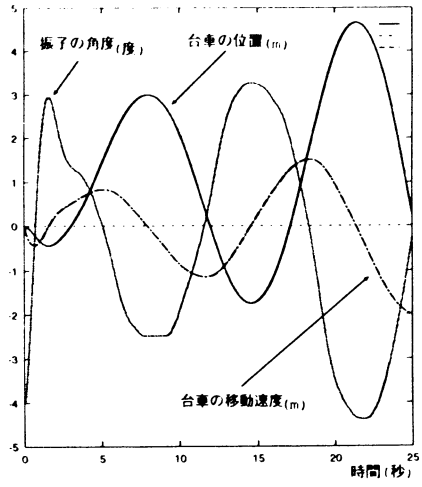


図 5: 台車の位置制御:失敗例

の姿勢が良いときは，速度制御を行う．さらに台車が一定位置に停滞しているときには，位置制御を行う．このような条件で制御の切り替えを行った．

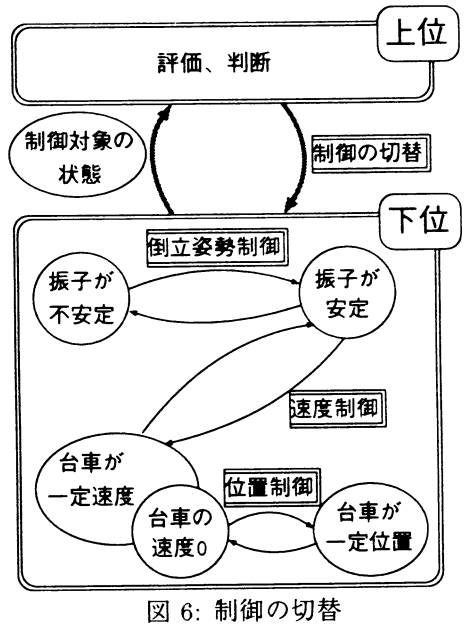


図 6: 制御の切替

制御対象の評価を行うため，いろいろな評価ルールを構成した．評価の一例として振子の姿勢の評価ルールを表 4に示す．外枠は振子の角度，角速度を表わし，内枠はその時の評価を表す．経験から得られたルールによって構成しており，振子が直立不動のときに振子の状態を良いとした．また，直立不動の状態から遠ざかるときの評価を悪いとした．

同様な考え方に基づいて，台車の速度を評価するルール群，台車の位置を評価するルール群も構成した．上

角度 \ 角速度	N	ZO	P
N	悪い	普通	普通
ZO	普通	良い	普通
P	普通	普通	悪い

表 4: 振子の状態評価ルール

位制御部ではこれらの評価を考慮して下位制御部で行う基本制御の切り替えを行った.

4 実験結果

前に述べた下位制御と上位制御で階層的制御モデルを構成しシミュレータ上で実験を行った. 上位制御部により振子の状態を評価し, 下位制御部の基本制御を切り替えている. 図 7は目標速度 $2m/s$ の速度制御を行ったもの, 図 8は目標位置 $1m$ 地点の位置制御を行ったものである. どちらの制御も時間の経過につれて制御対象の状態を目標の状態に落着かせることができた. このことから階層的制御を用いた速度制御, 位置制御はどちらも有効な制御が行われていることが分かる.

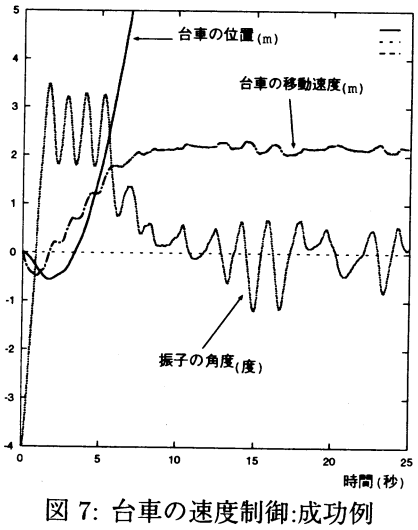


図 7: 台車の速度制御:成功例

5 考察

単純に速度制御, 位置制御を行ったときにうまく行かなかった制御が, 階層的ファジィ制御モデルを構成し, これを用いて制御を行った結果, 有効に機能することが分かった. 用いたルール群は比較的単純なものであるが, それらで構成された基本制御を, 上位制御の評価によって選択し適用する階層的ファジィ制御を用いることで, ルール同士が衝突しない, 全体としてまとまった制御ができたものと考える.

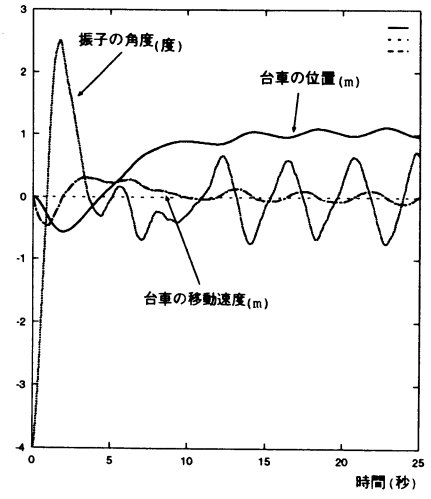


図 8: 台車の位置制御:成功例

いくつもの簡単な基本制御で下位制御部を構成することにより, 制御効率が悪くなっている恐れはあるが, 振子の状態に応じた制御を行うことにより, より広い範囲で自走式倒立振子に対して目的の制御を行うことが可能であると考察される. また階層的制御モデルの上位制御部で制御の状態の判断を行うことにより, 与えている制御自体の有効性も検討できるだろう.

6 今後の課題

- 実機での階層的ファジィ制御の有効性の検討
- 制御の状態を判断する評価ルールの作成
- 坂道を認識するルールの構成
- 坂道上での制御ルールの構成

参考文献

[1] 小林 貴生, 西野 順二, 小高 知宏, 小倉 久和 :「自走式倒立振子の階層的適応型ファジィ制御」, 第 54 回情報処理学会全国大会講演論文集 (2),pp.175–176(1997)

[2] 安信誠二 :「ファジィ工学」, 昭光堂 (1991)

[3] 田中一男:「アドバンストファジィ制御」, 共立出版 (1994)

[4] 小林 貴生, 西野 順二, 小高 知宏, 小倉 久和 :「自走式倒立振子のファジィ制御」, 第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.581–584(1996)

問い合わせ先 :

〒９１０ 福井市文京３－９－１

福井大学工学部情報工学科

小林貴生

kobayasi@rook.fuis.fukui-u.ac.jp

TEL: 0776-27-8968(ダイアルイン)

FAX: 0776-27-8751(事務室)

WEA3-3

ファジィコントローラを用いた二自由度位置制御システム

Two-Degree-of-Freedom Positioning System using Fuzzy Controller

福見淳二*, 鎌野琢也*, 鈴木茂行*, 安野卓*, 野口真児**
Junji Fukumi*, Takuya Kamano*, Takayuki Suzuki*, Takashi Yasuno*
and Shinji Noguchi**

*徳島大学, **タダノ
*The University of Tokushima, **Tadano Co.,LTD

Abstract

In this paper, we consider a two-degree-of-freedom system with a self-tuning fuzzy feedforward controller (STFFC) and fuzzy disturbance observer (FDO). The objective of STFFC is to improve the tracking performance, and the control rules of the STFFC are automatically adjusted. The FDO is used to restrain any disturbance and the rules are copied from the STFFC in every sampling period. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed system for positioning system with an aerial working platform.

1. まえがき

クレーンなどの建設機械では，性能および安全性の向上に加えて，機械の高機能化，操作の簡略化が求められている。しかしながら，一般には油圧アクチュエータが建設機械には用いられており，不感帯，摩擦等の強い非線形性を有している。それゆえ，従来用いられている固定ゲインコントローラによる制御では精度に限界がある。最近では，非線形性の強い油圧サーボシステムの制御法として外乱オブザーバ[1)]，ファジィ制御[2)]などを用いたシステムが提案されている。

本稿では，我々が既に提案している自己調整ファジィフィードフォワードコントローラ(STFFC)とファジィ外乱オブザーバ(FDO)を用いた二自由度制御システム[3)]を油圧サーボシステムに適用した場合について検討している。油圧サーボシステムとしては高所作業車を用い，実機による実測を行った。実測結果より，優れた追従特性を確認したので以下に報告する。

2. システム構成

提案するシステムを図1に示す。本システムではSTFFCとFDOからなる二自由度制御システムを構成している。制御対象には油圧アクチュエータ駆動の高所作業車を用いており，全体図を図2に示す。高所作業車はブームの伸縮，

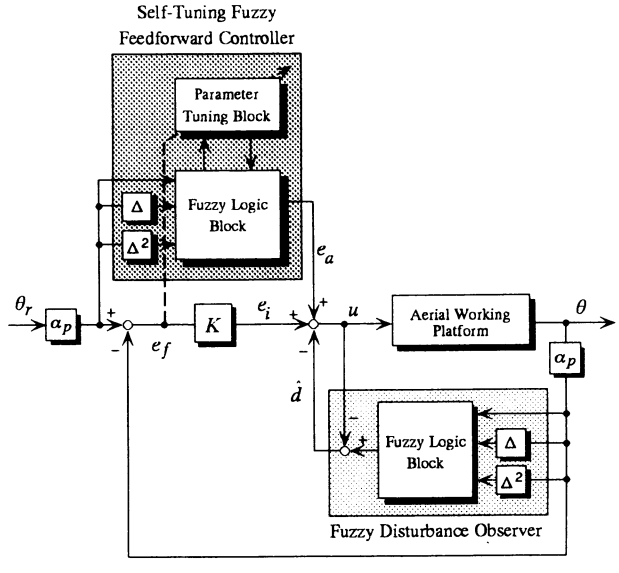


図1　システム構成図

起伏，旋回の3つの駆動軸を有している。図3には起伏角度を固定し，ブーム伸縮軸のみに振幅0.35[V]，周期40[s]の正弦波信号を入力した応答を示している。なおブームの初期位置は約700[cm]としている。同図より，不感帯やブームの摩擦，ヒステリシス，シリンダの非対称性などに起因する強い非線形特性が現れており，起伏角度によっても応答が大幅に異なっている。それゆえ，ここでは非線形な制御対象に対しても有効であるSTFFCをコントローラとして用いている。チューニング後にSTFFC内に構成

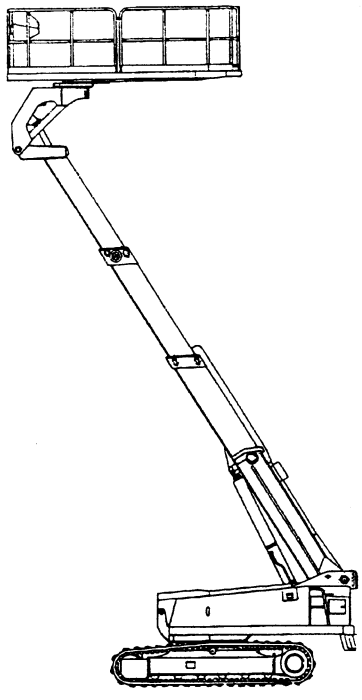


図2　高所作業車の全体図

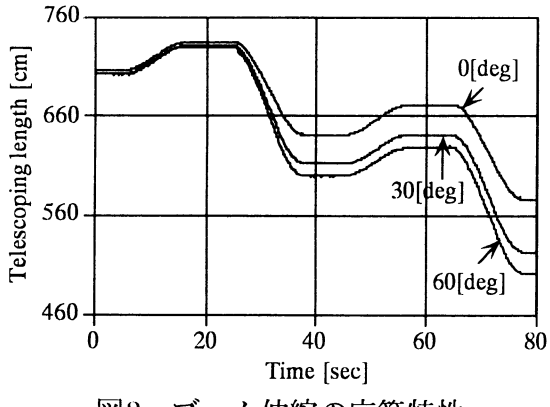


図3　ブーム伸縮の応答特性

された制御対象の等価的な逆システムを利用してFDOで外乱を推定する。また，固定ゲインコントローラはチューニング初期段階の応答特性の改善を図るために用いている。以下に，各コントローラの制御アルゴリズムを示す。

2-1. 自己調整ファジィフィードフォワードコントローラ

STFFCでは，ファジィ入力変数である規範位置信号 $\theta_r(n)$ と規範位置信号の差分 $\Delta\theta_r(n)$ および規範位置信号の2階差分 $\Delta^2\theta_r(n)$ を7つのラベルを持つ三角形のメンバシップ関数でファジィ化する。まず，3つの入力変数に対するグレードをそれぞれ $\mu_i(n)$，$\mu_j(n)$，$\mu_k(n)$ とすると，後件部変数 $W_{ijk}(n)$ のグレード $\mu_{ijk}(n)$ は次式で求められる。

$$\mu_{ijk}(n) = \mu_i(n)\mu_j(n)\mu_k(n) \qquad (1)$$

(1)式で求めた各後件部変数のグレード $\mu_{ijk}(n)$ と追従誤差信号 $e_f(n)$ を用いて，次の学習則により後件部変数をチューニングする。

$$W_{ijk}(n) = \gamma\, e_f(n)\mu_{ijk}(n) + W_{ijk}(n-1) \qquad (2)$$

ここで，$\gamma>0$ は学習ゲインであり，後件部変数はシングルトンの変数とし初期値を全て零に設定している。後件部変数は追従誤差を零収束するようにチューニングされ，追従誤差が零収束した段階でチューニングは終了し，後件部変数は一定値に収束する。

STFFCの出力 $e_a(n)$ は次式の荷重平均で求められる。

$$e_a(n) = \frac{\sum \mu_{ijk}(n) W_{ijk}(n)}{\sum \mu_{ijk}(n)} \qquad (3)$$

チューニング後においてSTFFC内に制御対象の等価的な逆システムが構成されるため，応答特性は著しく改善される。

2-2. ファジィ外乱オブザーバ

制御対象の入出力関係をPとすると，出力yは次式で求められる。

$$y = P(u + d) \qquad (4)$$

ここで，dは外乱入力，uは操作量である。これより，推定すべき外乱入力 $\hat{d}$ は次式となる。

$$\hat{d} = P^{-1}y - u \qquad (5)$$

しかしながら，線形システムでは比較的簡単に逆システムが得られるが，非線形システムにおいては逆システムを得ることが一般的に困難である。我々は既にSTFFCを提案しており，このコントローラを用いることで，非線形な場合においても対象システムの等価的な逆システムが制御ルールとして構成できることを確認している。そこで，本稿ではSTFFCにより得られた制御対象の等価的な逆システムを用いて外乱を推定するコントローラを提案する。

FDOの入力変数には出力位置 θ，出力位置の差分 $\Delta\theta$ および出力位置の2階差分 $\Delta^2\theta$ を用いて

いる。FDOではメンバシップ関数および後件部変数はSTFFCと同じものを用いており，ファジィ推論の手順も前述したSTFFCと同様である。

FDOは，チューニング後においてSTFFC内に構成される制御対象の等価的な逆システムを利用して外乱を推定する。FDOでは，制御対象のパラメータ変動を考慮して，サンプリング周期毎にSTFFCの後件部変数をFDOの後件部変数として用いて推論を行うため，FDO自身では後件部変数のチューニングを行わない。また，推論結果と1サンプリング前の操作量$u(n-1)$を比較し，その差をFDOからの出力として用い，この出力がFDOで推論した外乱に相当する。

制御対象への操作量$u(n)$はSTFFCからの出力$e_a(n)$，固定ゲインフィードバックコントローラからの出力$e_i(n)$およびFDOからの出力$\hat{d}(n)$から次式で求められる。

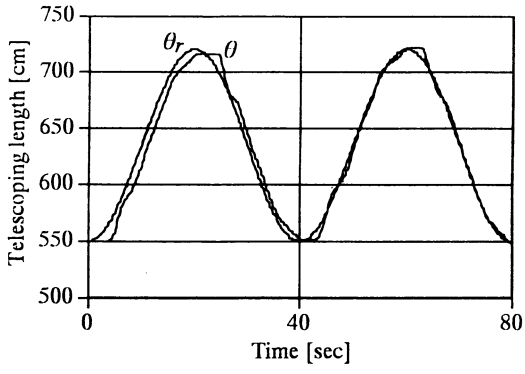
$$u(n) = e_a(n) + e_i(n) - \hat{d}(n) \qquad (6)$$

3. 実測結果

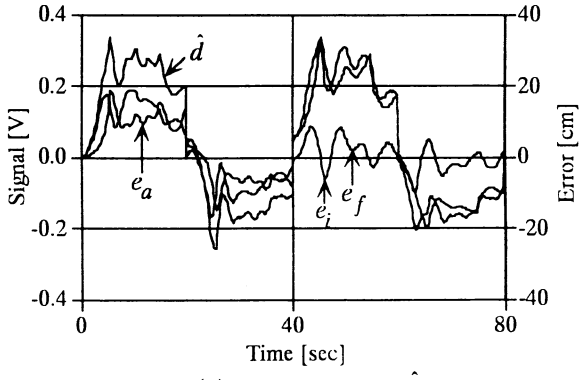
提案したシステムの有効性を確かめるために，高所作業車（タダノAC-125S：作業床の最大地上高12.5[m]）のブームの伸縮について実測を行った。なお，学習ゲインγは0.001に，フィードバックコントローラのゲインKを0.01に，サンプリング周期は100[msec]に設定し以下の実測を行った。

図4(a)(b)には，周期40[s]，振幅85[cm]の正弦波状規範位置入力に対するチューニング初期段階の応答特性を示す。ここで，ブームの起伏角度は0[deg]で固定し，以下の実験を行った。同図より，チューニング初期段階では，STFFCの出力が比較的小さく，制御の主体がSTFFCにはないため，規範位置入力と出力位置には誤差が生じている。これは，STFFCの後件部変数の初期値を全て零と設定しているためである。しかしながら，チューニングが進むにつれて，STFFCの出力が増加し誤差も減少している。

図5(a)(b)には，上述の規範位置入力に対するチューニング後の応答特性を示している。チューニング後には，規範位置入力と出力位置

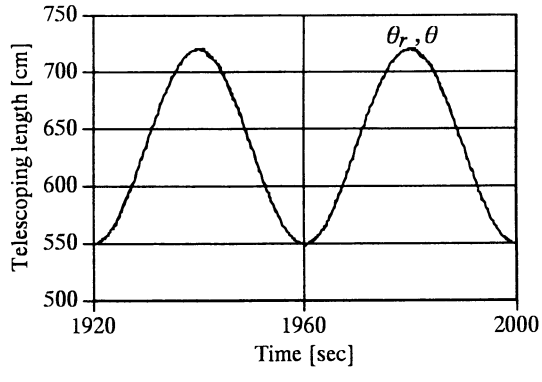


(a) θ_r， θ

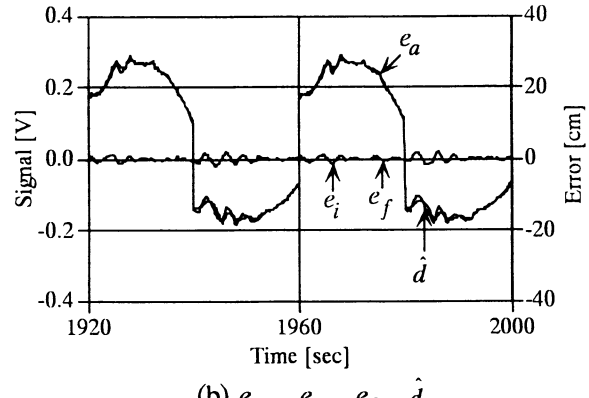


(b) e_a， e_i， e_f， $\hat{d}$

図4　チューニング初期段階の応答特性



(a) θ_r， θ



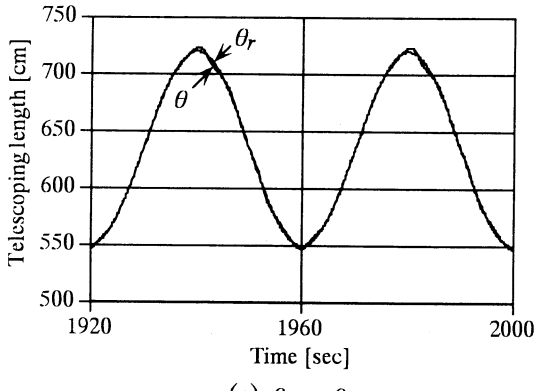
(b) e_a， e_i， e_f， $\hat{d}$

図5　チューニング後の応答特性

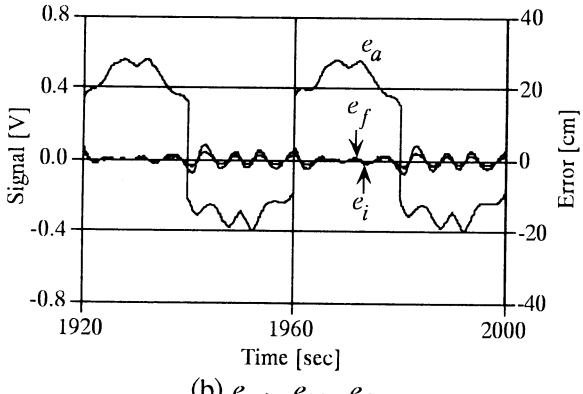
が良く追従しており，誤差はほぼ零になっている。また，比例フィードバックコントローラの出力もほぼ零となっており，チューニング後には主にSTFFCおよびFDOにより制御が行われている。

図6(a)(b)には，比較のためにSTFFCと比例フィードバックコントローラを用いた制御システムの同一規範入力に対する応答特性を示している。同図より，STFFCと比例フィードバックコントローラを用いたシステムでは，摩擦などの油圧アクチュエータの非線形性をSTFFCのみでは十分補償しきれていないため，チューニング後において誤差が生じている。これに対して，FDOを用いたシステムでは摩擦等を外乱と見なすことでFDOにより補償しているため追従特性は大幅に改善されている。

図8(a)(b)には，同一の規範位置入力に対するチューニング過程における二乗誤差を示している。同図には，FDOを用いたシステムと用いないシステムの両方の二乗誤差を示しているが，



(a) θ_r, θ



(b) e_a, e_i, e_f

図6　チューニング後の応答特性
(Without FDO)

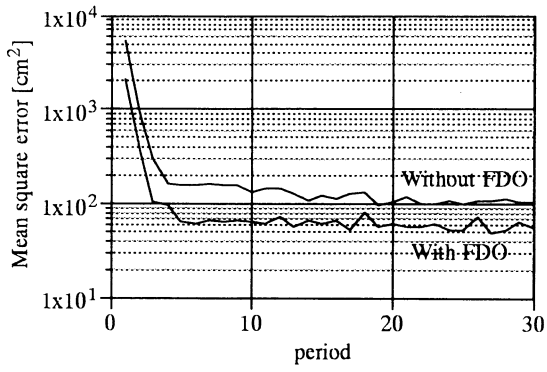


図7　チューニング過程における二乗誤差

FDOを用いたシステムは用いないシステムの約2分の1に二乗誤差が減少しており，FDOは応答特性の改善にも有効であることが分かる。なお，両システムとも約15周期でチューニングは終了している。

以上の結果から，提案したファジィ二自由度制御システムを用いることで，STFFCにより応答特性の改善が図られ，かつSTFFCのみでは補償が不十分であった摩擦等をFDOが補償することでさらなる応答特性の改善が図られることが確認された。それゆえ，提案するシステムは強い非線形性を有する制御対象に対しても良好な追従特性が得られることが確認された。

【参考文献】

1)小菅：外乱推定オブザーバを用いた油圧駆動式マニピュレータの制御，機械学会論文集(C)，Vol.59，No.563，pp.2152-2156，1993

2)野口他：High Performance Control of Construction Machine using Self-Tuning Fuzzy Technique, Japan/USA Symposium on Flexible Automation - 1996 -, Vol.1, pp.379-382, 1996

3)福見他：超音波モータを用いたファジィ二自由度制御システム，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.545-548，1996

連絡先

〒770　徳島市南常三島町2-1
徳島大学工学部電気電子工学科
鎌野琢也
TEL 0886-56-7455
FAX 0886-56-7455

WEA4-1

SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルの提案

A Proposal of SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model

湯場崎　直養*　　○易　建強*　　廣田　薫**
Naoyoshi YUBAZAKI　　Jianqiang YI　　Kaoru HIROTA
*マイコム株式会社　　**東京工業大学
Mycom, Inc.　　Tokyo Institute of Technology

Abstract: "SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model" is proposed for plural input fuzzy control. The model constructs single input rule module and defines a dynamic importance degree for each input item, and then obtains its output by summarizing the products of the dynamic importance degree and the fuzzy inference result of each module. Each dynamic importance degree consists of a basic value insuring the role of its input item at steady state, and a dynamic value changing with control situation. For first-order lag systems and second-order lag systems, the dynamic importance degrees can be determined by local information of the corresponding input items. Simulation results show that the reaching time can be largely reduced without any steady-state error, overshoot, or vibration.

1．はじめに

従来のif-then形式のファジィモデル[3]では、入力項目がすべて各ルールの前件部にセットされる。従って、入力項目数が多くなると、各ファジィルールの設定が難しくなり、またルールの数が爆発的に増加するなどの問題が生じる。それに対して、「単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル」[5,6]が提案され、ファジィルール数が大幅に削減できるだけではなく、ルールの設定作業も単純化できる。また、1次遅れ系と2次遅れ系について制御性能は従来のモデルよりも改善できることが示されている。

ここでは、動的重視度を導入し、一層制御に適した「SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル」を提案する。本モデルでは各入力項目にそれぞれ、対応の入力項目のみを前件部変数とするSIRM（Single Input Rule Module, 単一入力ルール群）を用意し、システムにおける重要さを表す動的重視度を与える。そして、各SIRMの推論結果の動的重視度付き総和を出力とする。1次遅れ系および2次遅れ系に対して、入力項目のローカルな情報に基づいてファジィ推論で動的重視度を簡単に求めることを明らかにし、オーバーシュートと定常誤差を起こさずに目標到達時間をさらに大幅に短縮できることを示す。

2．SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデル

以下では説明を簡単にするために、n入力1出力のシステムを用いることにするが、同様に多入力多出力システムにも拡張できる。

まず各入力項目についてそれぞれ1つのSIRMを構成し、その中に1入力1出力のファジィルールを定義する。ここでは、SIRM-i はシステムのi番目の入力項目に対応する単一入力ルール群で、R_j^i はSIRM-iの中のj番目のルールを表す。x_i はSIRM-iの唯一の前件部変数、u_i はそのSIRM-iの後件部変数である。A_j^i はSIRM-iの中のj番目のルールの前件部変数x_iのメンバーシップ関数、C_j^i はSIRM-iの中のj番目のルールの後件部変数u_iのメンバーシップ関数を意味する。また、ルール群の番号は$i=1,2,\cdots,n$、i番目のルール群SIRM-iの中のルール番号は$j=1,2,\cdots,m_i$としている。

$$\begin{aligned}
&\text{SIRM-1:} && \left\{R_j^1\text{: if } x_1 = A_j^1 \text{ then } u_1 = C_j^1\right\}_{j=1}^{m_1} \\
&\cdots\cdots && \cdots\cdots \\
&\text{SIRM-i:} && \left\{R_j^i\text{: if } x_i = A_j^i \text{ then } u_i = C_j^i\right\}_{j=1}^{m_i} \qquad (1) \\
&\cdots\cdots && \cdots\cdots \\
&\text{SIRM-n:} && \left\{R_j^n\text{: if } x_n = A_j^n \text{ then } u_n = C_j^n\right\}_{j=1}^{m_n}
\end{aligned}$$

各入力項目の観測値x_i^0に対し、SIRM-iのj番目のルールの前件部の適合度が$A_j^i(x_i^0)$になるので、そのルール群の推論結果u_i^0は合成重心法により式(2)で求められる。ただしここでは、⊗は前件部適合度と後件部メンバーシップ関数の演算を意味し、⊕はルール間の結合演算子を意味する。また、Uは出力項目の台集合を表す。

$$u_i^0 = \frac{\int_U \left[\bigoplus_{j=1}^{m_i} (A_j^i(x_i^0) \otimes C_j^i) \right] \cdot u \cdot du}{\int_U \left[\bigoplus_{j=1}^{m_i} (A_j^i(x_i^0) \otimes C_j^i) \right] \cdot du} \quad (2)$$

通常、システムの挙動に対して各入力項目の貢献度が異なると考えられる。貢献度の大きい入力項目もあれば、貢献度の小さい入力項目もある。貢献度の大きい入力項目の役割を強調し、逆に貢献度の小さい入力項目の効果を抑制することは我々の経験に合い、システムのパフォーマンスの向上につながると推測できる。そこで「単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル」[5,6]では、入力項目の役割の違いに注目し、各入力項目について（固定値）重視度を導入した。

しかし、制御において状況が刻々と変化するので、各重視度の値を固定しては変化する環境に柔軟に対応しきれない。1次遅れ系を例えれば、目標到達時間を短くするには偏差項目の重視度をある程度大きめに設定すればよいが、それ以上大きく設定すると目標到達時間が短縮される代わりにオーバーシュートが大きくなったり、ときには振動が起こることもあり得る。一方、制御開始時にその重視度を大きく設定し、目標に近づくにつれて重視度を徐々に減さしていけば、オーバーシュートと振動を起こさずに目標到達時間を短縮でき、優れた制御結果が期待できる。

そこで、各入力項目に動的重視度を定義し、「SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル」を次のように提案する。入力項目 i （$i = 1,2,\cdots,n$）の動的重視度 w_i^D を式(3)のように基本値 w_i^0 と変動値 $B_i \cdot \Delta w_i^0$ の和として与える。ただし、B_i は非負の実数で入力項目 i の重視度の変動幅を表し、Δw_i^0 は制御状況に応じて[0.0, 1.0]内にダイナミックに変化する変動量変数 Δw_i の推論値を表す。また、提案モデルの出力 u^0 は、式(4)のように各ルール群の推論結果の動的重視度付き総和として求められる。

$$w_i^D = w_i^0 + B_i \cdot \Delta w_i^0 \quad (3)$$

$$u^0 = \sum_{i=1}^{n} w_i^D \cdot u_i^0 \quad (4)$$

本モデルにおいて、基本値は対応する入力項目の定常状態時における最低必要な働きを保証し、変動値はその入力項目の影響の度合いを制御状況に応じて調整する役割を持つ。このようにすれば、制御開始時には関連する入力項目に大きな重視度を与え、目標に到達する手前から重視度を小さくするような操作が可能になる。

式(4)からわかるように、各重視度がモデルの出力に比例するので、重視度の大きい入力項目は大きく貢献し、重視度の小さい入力項目はあまり貢献しないことになる。また、重視度によって規定された入力項目間の相対関係はそのまま線形的に出力に写されるので、目的に合わせて重視度を操作すれば直感通りの結果を得ることも可能である。さらに、動的重視度を制御状況に応じて実時間で調整することで、制御結果が大幅に改善できるだけではなく、優れたロバスト性も得られると思われる。

なお、各重視度の変動幅 B_i を零に設定すれば、今回提案したモデルが実質上「単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル」に帰するので、「単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル」は本提案モデルの特別な場合と見なされる。

3．制御シミュレーション

ここではまずよく知られている典型的な1次遅れ＋むだ時間系、次に2次遅れ＋むだ時間系を制御対象として、提案手法と「単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル」の制御性能の比較を行うことにする。ただし、以下のシミュレーションにおいては、サンプリング周期を 0.1 秒に設定した。また、推論手法として簡略化ファジィ推論法[1]を用いた。

3.1　1次遅れ＋むだ時間系

1次遅れ＋むだ時間系の伝達関数が次のように表される。K、L、T はそれぞれプロセスゲイン、むだ時間、時定数を表す。

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{1 + T \cdot s} \quad (5)$$

1次遅れ系に対して、正規化後の偏差 x_1 と偏差の1階差分 x_2 を入力項目とする。各入力項目の台集合[-1.0, +1.0]上に等間隔に分布する三角形メンバーシップ NB、ZO、PB 関数を3つ定義する。そこで各入力項目をゼロに収束させるためには、各 SIRM-i (i=1,2) を表1のように構成することができる。ただし、後件

部変数Δu_iの推論結果の重視度付き総和は操作量の変化分を与えることとする。

表1　入力項目 i に対応する SIRM-i

前件部変数 x_i	後件部変数 Δu_i
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

一方、制御の立場から見れば、入力項目例えば偏差、1階差分などの値が大きいときには対応する重視度を大きくしてそれらを素早く抑え、逆にその値が小さいときは重視度を大きくすると不安定になる傾向があることから重視度を少し小さめにして速応性を損なわずに制御の安定性を維持することが望まれる。このことから直感的にわかるように、動的重視度を決めるのに対応する入力項目の現時刻の値の大きさだけを参照すればよい。つまり、表2のように、各入力項目x_iの現時刻の絶対値を前件部変数として変動量変数Δw_iを後件部変数とする1入力1出力のファジィルールを作って、ファジィ推論でΔw_i^0を実時間で求めることができる。ただしここでは、DS、DM、DBは台集合[0.0, 1.0]上に等間隔に分布する前件部変数の三角形メンバーシップ関数である。

表2　変動量変数Δw_iのファジィルール

前件部変数 $\lvert x_i \rvert$	後件部変数 Δw_i
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

ここでは目標値1に対して、系 (K=1, L=1, T=1)[1-6]について制御シミュレーションを行い、結果を図1に示す。記号S(1.000, 0.020, 0.100)の中の数字は順に偏差、偏差の1階差分、操作量の変化分のスケーリングファクタを意味する。W(0.467, 0.100)の中の数字は順に「単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル」の場合の各入力項目の重視度を表す。W0(0.100, 0.020) と WB(0.480, 0.080)の中の数字はそれぞれ順に動的重視度結合型モデルの場合の各入力項目の動的重視度の基本値、変動幅を表す。また、図において水平点線は目標値、上の曲線は制御対象の出力、下の曲線は操作量を表す。

図1から分かるように、「単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル」では重視度が固定されたため、立ち上がりから目標に近づいたときに速度がうまく対応できずオーバーシュートが少し生じた。一方、本提案モデルでは、立ち上がり時と目標接近時において異なる重視度が使われたため、オーバーシュートが発生せずに目標到達時間が約15%ほど短縮できた。

4.2 2次遅れ＋むだ時間系

2次遅れ系の伝達関数が一般に式(6)のように記述できる。ただし、A、B、C は係数であり、L はむだ時間である。ここでは具体的に A=0.231, B=0.0994, C=0.0064, L=1.0[2,5]として、目標値を 60 とする。

$$G(s) = \frac{A}{s^2 + B \cdot s + C} \cdot e^{-Ls} \qquad (6)$$

2次遅れ系を制御するのに、偏差x_1、偏差の1階差分x_2、偏差の2階差分x_3を入力項目とする。本提案モデルでは、ファジィ制御器は表1のように単一入力ルール群を3つ持つ他に、動的重視度を決める1入力1出力のファジィルールテーブルも表2のように3つ必要とする。

制御シミュレーションの結果を図2に示す。「単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル」では振動なしで目標値に達するまで約 17.5 秒かかったのに対して、提案モデルでは目標到達時間をさらに30%以上短縮できた。

4．おわりに

複数入力ファジィ制御システムに対して、入力項目の定常状態時の役割を保証する基本値と制御状況に応じてダイナミックに変化する変動値からなる動的重視度を導入し、「SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル」を提案した。

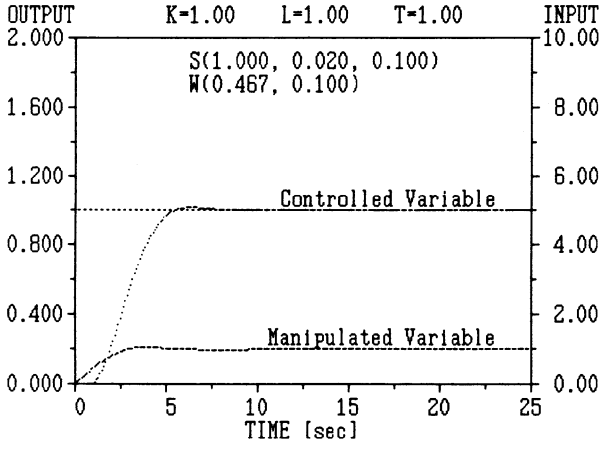
また、1次遅れ＋むだ時間系および2次遅れ＋むだ時間系に対して、動的重視度を、対応する入力項目の絶対値を前件部変数とする1入力1出力のファジィルールで簡単に求めることを明らかにした。さらに「単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル」に比べて、定常誤差なしでオーバーシュートと振動も発生せずに目標到達時間をさらに 15%～30%ほど短縮できることを示した。

参考文献

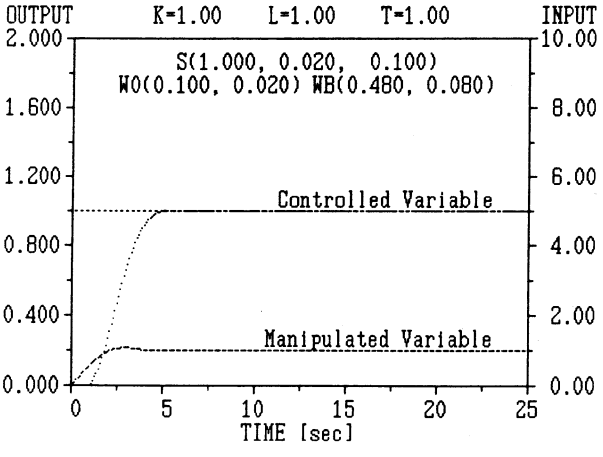
[1]前田幹夫、村上周太：ファジィ論理を用いた自動車

追従制御、第３回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.61-66(1987).
[2] 前田幹夫、村上周太、山崎久代：自己調整ファジィ制御装置の設計、第５回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.89-94(1989).
[3] E.H. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol.121, No.12, pp.1585-1588(1974).
[4] 大坪昭文、林健一郎、村上周太、前田幹夫：簡略推論法を適用した低次元分割におけるファジィ制御性能の改善、第１１回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.375-378(1995).
[5] 湯場崎直養、易建強、大谷正幸、廣田薫： 複数入力ファジィ制御のための単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデルの提案(投稿中).
[6] 湯場崎直養、易建強、大谷正幸、廣田薫： 単一入力ルール群重視度結合型ファジィ推論モデルの提案、SICE 関西支部創立３０周年記念シンポジウム、pp.83-86(1996).

[連絡先]
〒616　京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町１２
マイコム株式会社技術研究所
易　建強
TEL:　075-882-3601
FAX:　075-882-6531
E-mail:　yi@mycom-japan.co.jp

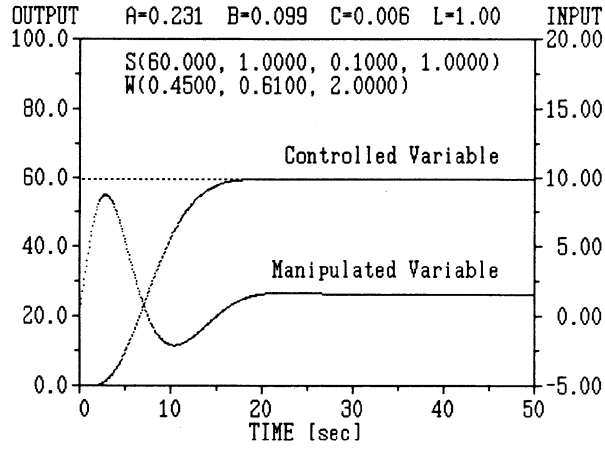


(a)　単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル

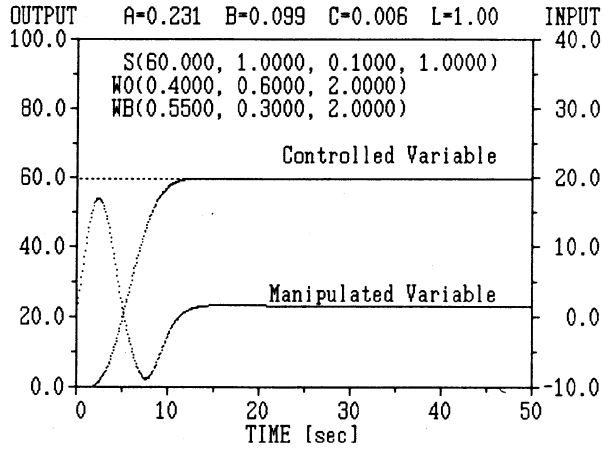


(b) SIRMs 動的重視度結合型モデル

図１　１次遅れ＋むだ時間系についての制御結果



(a)　単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデル



(b)　SIRMs 動的重視度結合型モデル

図２　２次遅れ＋むだ時間系についての制御結果

WEA4-2

SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを用いた未拘束物体の軌道追従制御

Trajectory Tracking Control of Unconstrained Body Using SIRMs Dynamically Connected Fuzzy Inference Model

湯場崎 直養* ○易 建強* 畝村 暢一* 廣田 薫**
Naoyoshi YUBAZAKI Jianqiang YI Nobuichi UNEMURA Kaoru HIROTA
*マイコム株式会社
Mycom, Inc.
**東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

Abstract: A trajectory tracking experiment system taking a table-tennis ball as its control object is constructed, and a fuzzy controller based on the SIRMs dynamically connected fuzzy inference model is designed. In order for the ball to smoothly approach and stably track a trajectory from arbitrary positions, asymptotic trajectory from its current position to the real trajectory is introduced. The fuzzy controller includes three SIRMs and defines an importance degree for each input item. Especially for the velocity item, its importance degree is permitted to change dynamically according to the moving condition. In more than 80% of the experiments on circle trajectories, the largest tracking error is less than 0.05m despite of different sizes and different kinds of trajectories.

1．はじめに

軌道追従制御に関する実験[1,5]がすでに多数報告されているが、そのほとんどはロボットのような拘束体を制御対象としている。一方、未拘束物体に関しては、2次元移動物体の把握[2]や、ボールの安定制御[3]や、ピンポン球の打ち返し制御[6]などが報告されているが、いずれにおいても軌道追従制御は行われていない。

本稿では、未拘束のピンポン球を制御対象として軌道追従制御システムを構築し、「SIRMs (Single Input Rule Modules) 動的重視度結合型ファジィ推論モデル」[7]でファジィ制御器を設計して、円軌道の追従制御実験を行う。

2．システムの全体構成図

図1のように本実験システムは、通常のピンポン球、有効範囲が0.44m×0.44mの正方形であるテーブル、CCD カメラ、画像処理装置、パソコン、コントローラ、およびモータギアセットから構成される。点線のようにテーブルの中心線を通る軸をX軸とY軸に想定し、テーブルの裏にX軸とY軸に沿ってそれぞれステッピングモータギアセットを取り付ける。両ステッピングモータは駆動回路を通して[PPC-2400]という4軸コントローラボードにつながる。[PPC-2400]コントローラはファジィ制御器から受けた操作量指令をパルス信号に変換して出力し、ステッピングモータを回転させる。

X軸のステッピングモータMotor Xが回転すれば、テーブルがX軸に対して回転し、その上のピンポン球をY方向に動かそうとする力が働く。同様にY軸のステッピングモータMotor Yが回転すれば、テーブルがY軸に対して回転し、ピンポン球をX方向に動かそうとする力が働く。ただし、テーブルが水平面に対してX方向とY方向に回転できる最大角度は共に±1.5°としている。

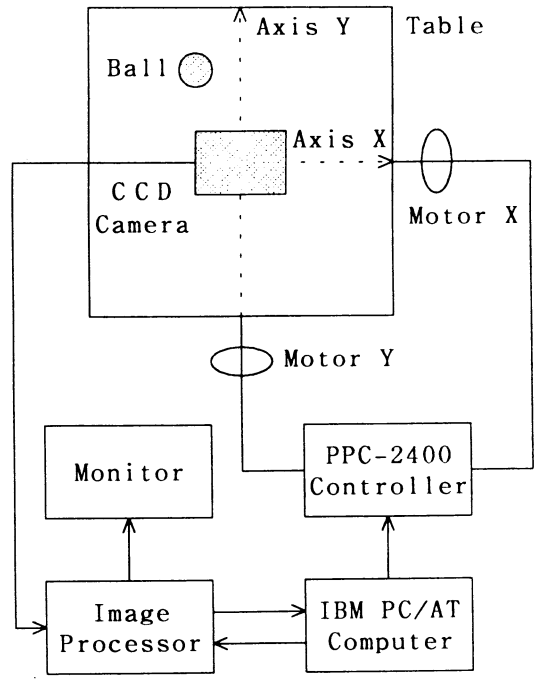


図1 システムの全体構成図

一方、CCD カメラはテーブルの中心の真上に固定し、テーブルと一緒に回転する仕組みになっている。各サンプリング時刻において、CCD カメラがテーブルを含めた大きさ 432pixel×432pixel の濃淡画像を取り込んで画像処理装置に送る。画像処理装置ではその濃淡画像を２値化処理することによってピンポン球の画像を抽出し、さらに重心処理でピンポン球の中心位置を検出する。実験で唯一測定可能な情報であるこの中心位置がコンピュータに入力される。

3．ファジィ制御システム

ピンポン球のX方向とY方向の運動が互いに独立であると考えられることから、以下ではX方向の制御についてのみ説明するが、Y方向についてもまったく同様のファジィ制御器が構築されている。

現在のサンプリング時刻をｉ、サンプリング周期をT、ピンポン球の現時刻のX方向の位置をx_1^iとする。このとき、X方向における速度x_2^iと加速度x_3^iがそれぞれ式(1)と(2)で近似的に計算できる。そして、現時刻から次の時刻になるまで加速度x_3^iが一定であると仮定し、次の時刻における球の予測位置$x_{1,E}^{i+1}$を式(3)で求める。次の時刻の目標位置を$x_{1,T}^{i+1}$とすると、予測誤差$x_{1,T}^{i+1} - x_{1,E}^{i+1}$が得られる。この予測誤差、速度、および加速度をファジィ制御器の入力項目として、操作量（テーブルのY軸に対する回転角）の変化分Δu^iを出力項目とする。

$$x_2^i = \frac{1}{T}(x_1^i - x_1^{i-1}) \quad (1)$$

$$x_3^i = \frac{1}{T}(x_2^i - x_2^{i-1}) \quad (2)$$

$$x_{1,E}^{i+1} = x_1^i + x_2^i \cdot T + x_3^i \cdot T^2 / 2 \quad (3)$$

ピンポン球のような束拘束体は、動いているときにテーブル表面との摩擦が小さいので、速度がなかなか減衰しにくい。そのため、移動速度が大きいとピンポン球が速度と同じ方向に一直線に移動し続け、途中で球の移動方向を円滑に変えることは極めて難しい。円、楕円のような目標軌道をうまく追従させるには、方向をたえずに変える必要があるので、球の速度を小さく抑えなければならない。そこで、各入力項目に対して単一入力ルール群を表１、２のように設定する。ここで、NB、NS などは、台集合[-1.0, +1.0]上に同間隔に分布するメンバーシップ関数を表す。また、簡略化推論法[4]を用いるため、後件部変数Δu_j^i (j=1,2,3)に等間隔分布の実数値がセットされる。

表１　予測誤差のファジィルール群

Input Item $x_{1,T}^{i+1} - x_{1,E}^{i+1}$	Output Item Δu_1^i
NB	1.0
NS	0.5
ZO	0.0
PS	-0.5
PB	-1.0

表２　速度または加速度のファジィルール群

Input Item x_j^i (j=2,3)	Output Item Δu_j^i (j=2,3)
NB	-1.0
NS	-0.5
ZO	0.0
PS	0.5
PB	1.0

予測誤差の重視度を大きくして誤差を１ステップで無くそうとすると、制御動作が必然的に大きくなり、速度も増大してしまう。また、速度と加速度の重視度を小さく設定すると、速度が小さいときには追従が滑らかに行われるが、何らかの原因で速度が大きくなった場合はその値を小さく抑えるのに時間がかかる。このことから、予測誤差の重視度を小さくし、速度と加速度の重視度を大きく設定するという基本制御戦略が立てられる。しかし、速度の重視度が大きい値に固定されると、速度が小さいときでも制御動作が大きくなるから逆にスムーズに追従できなくなる不都合も生じる。従って、速度が小さいときにはその重視度を小さくし低速度の移動を維持して、速度が大きくなるとその重視度を大きくし速度を速やかに抑えることが望ましい。

そこで、各入力項目の重視度の基本値をw_j^0 (j=1,2,3)とする。また速度項目の重視度の変動幅をB_2、サンプリング時刻ｉのときの変動量変数をΔw_2^iとすると、ｉ時刻における速度項目の動的重視度は$w_2^0 + B_2 \cdot \Delta w_2^i$となる。以上の分析から変動量変数$\Delta w_2^i$が表３のように現時刻の速度と加速度を入力項目とするファジィルールで決められる。ただし、各前件部変数のメンバーシップ関数を図２に示している。それで、「SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル」[7]によるファジィ制御器の出力$\Delta u^{i,0}$は式(4)で求められる。

$$\Delta u^{i,0} = \Delta u_1^{i,0} \cdot w_1^0 + \Delta u_3^{i,0} \cdot w_3^0 + \Delta u_2^{i,0} \cdot (w_2^0 + B_2 \cdot \Delta w_2^{i,0}) \quad (4)$$

表3　変動量変数のファジィルール

Output Item Δw_2^i		$\lvert x_3^i \rvert$	
		SZO	SPB
$\lvert x_2^i \rvert$	SZO	0.0	0.5
	SPB	0.5	1.0

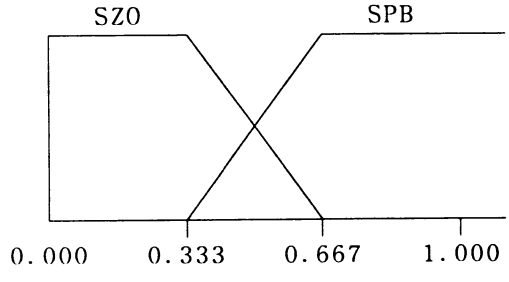


図2　表3の前件部変数のメンバーシップ関数

4．軌道追従制御実験

円と楕円を目標軌道とし、逆時計回りを追従方向として、ピンポン球の軌道追従制御実験を行った。簡単のため、目標軌道の中心をテーブルの中心（座標原点）に置き、楕円の場合は長軸と短軸をそれぞれテーブルのX軸とY軸に一致させた。また、画像処理の時間とアクチュエータの動作時間を考慮してサンプリング周期を0.13秒に設定した。

4.1 目標位置

ここでは目標軌道に円滑に追従できるため、制御対象のi時刻の位置(x_1^i, y_1^i)から次式に示すように螺旋状の漸近軌道を仮想的に構成する。a、bは目標軌道を決めるパラメータで、例えば円軌道の場合は共に半径、楕円軌道の場合は長軸と短軸の長さを表す。距離率r^iはi時刻の位置(x_1^i, y_1^i)から原点までの距離と、原点からi時刻の位置へ引いた直線が目標軌道と交差する点までの距離との比率を意味し、θ^iはX軸の正方向からその直線までの角度である。漸近率dは現在位置から1サンプリング周期で目標軌道にどれぐらい近づくかを意味し、[0, 1]の間の値を取る。ステップ角αは原点に対し制御対象が1サンプリング周期で目標軌道に沿って回転する角度の理想値を表す。なお、kは現在時刻iからカウントするサンプリングステップ数とする。

$$\begin{cases} x_{1,T}^{i+k} = a \cdot (1 + (r^i - 1) \cdot d) \cdot \cos(\theta^i + \alpha \cdot k) \\ y_{1,T}^{i+k} = b \cdot (1 + (r^i - 1) \cdot d) \cdot \sin(\theta^i + \alpha \cdot k) \end{cases} \quad (5)$$

実際には、各サンプリング時刻iでそのときの位置に合わせた式(5)の漸近軌道からk=1に対応する位置$(x_{1,T}^{i+1}, y_{1,T}^{i+1})$を目標位置とする。漸近率とステップ角が適切に設定されれば、制御対象がほぼ接線方向に漸近軌道、最終的には目標軌道に追従することになる。

4.2 実験結果

試行錯誤で予測誤差、速度、加速度のスケーリングファクターを0.02m、0.10m/s、0.10m/s^{2}に、各入力項目の重視度の基本値を0.2、0.4、0.4に設定した。また、速度の動的重視度の変動幅B_2を0.4にした。目標位置の設定パラメータとして、漸近率dを0.8、ステップ角αを3.0°に固定した。なお、すべての実験を、テーブルが水平に位置しかつピンポン球が静止している状態からスタートし、2400サンプリングステップまで行った。ただし、球の初期状態の影響を考慮して実験開始から最初の200サンプリングステップの軌跡を無視してそれ以後のものを評価することにした。

半径0.072m、0.110m、0.155mの円軌道に対して、それぞれ同じ初期状態で20回、100回、20回の実験を行い、その結果を表4にまとめる。また、図3、4、5にはそれぞれ実際の追跡軌道を一例ずつ示している。ここでは実際位置から原点までの距離と、そのとき原点から実際位置へ引いた直線が目標軌道と成す交点から原点までの距離の差を追従誤差とし、その中で最も大きいものを最大誤差としている。表4はその最大誤差がある指定範囲内に収まった場合の実験回数を示している。全体として安定で正確に目標軌道に追跡している様子が分かる。

表4　軌道追従結果

最大誤差(m)	0.072m	0.110m	0.155m
≦0.03	13	1	6
0.03～0.04	50	8	5
0.04～0.05	22	7	7
0.05～0.06	5	3	2
0.06≦	10	1	0

5．終わりに

「SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデル」をベースにして、未拘束物体の軌道追従制御システムを構築した。未拘束物体を目標軌道に追従させるときの特有の問題点を指摘し、任意位置からでも滑らかに目標軌道に追従できるため漸近軌道を設けて目標位置をダイナミックに設定する方法を示した。また、大きさの異なる３種類の円を目標軌道として、軌道追従制御実験を行った。80%以上の実験では円軌道の大きさによらずに最大誤差が 0.05m 以下に抑えられ、全体として良好な追従結果が得られることを示した。

参考文献：

[1] J. Gasos, M. C. Garcia-Alegre and R. Garcia: Fuzzy Strategies for the Navigation of Autonomous Mobile Robots, Proceedings of the IFES'91, Yokohama, Vol.2, pp.1024-1034(1991).

[2] 廣田薫、渡辺秀則：水平多関節型アームロボットを用いたファジィ制御による２次元移動物体の把握、第５回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.65-70(1989).

[3] 廣田薫、倪景慈：不安定ボールのファジィ制御、法政大学工学部研究集報、No.27、pp.41-50(1991).

[4] 前田幹夫、村上周太：ファジィ論理を用いた自動車追従制御、第３回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.61-66(1987).

[5] K. Song and L. Sheen: Fuzzy-neuro Control Design for Obstacle Avoidance of a Mobile Robot, Proceedings of the FUZZ-IEEE/IFES'95, Yokohama, Vol.1, pp.71-76(1995).

[6] 田中一男、神田大和：３次元簡易 Ping-Pong ロボット、第１１回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.607-610(1995).

[7] 湯場崎直養、易建強、廣田薫：SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルの提案、第１３回ファジィシステムシンポジウム(1997).

[連絡先]

〒616　京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町１２
マイコム株式会社技術研究所
易　建強
TEL:　075-882-3601
FAX:　075-882-6531
E-mail:　yi@mycom-japan.co.jp

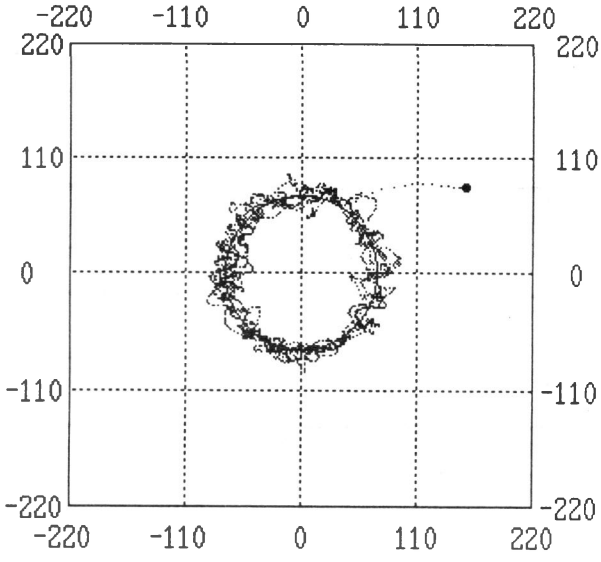


図３　半径 0.072m の円についての追従軌道

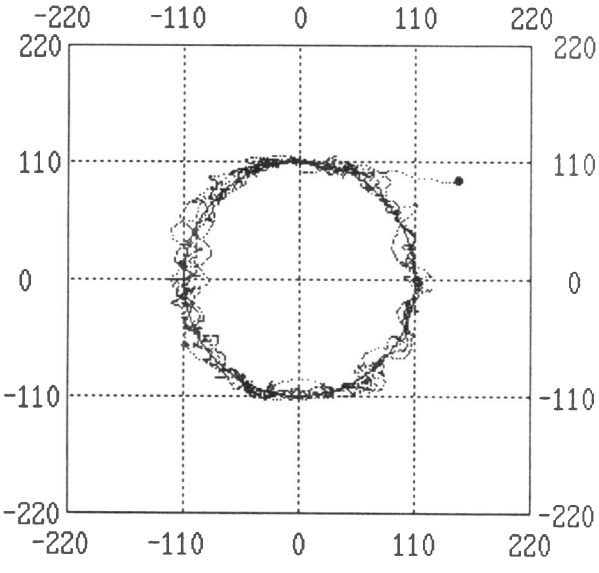


図４　半径 0.110m の円についての追従軌道

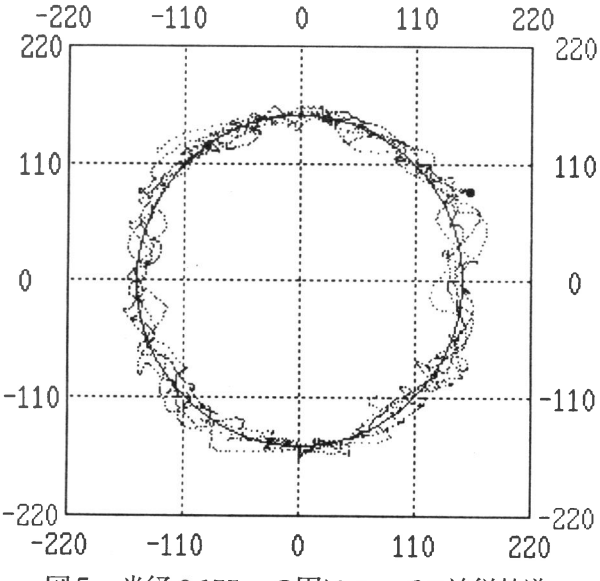


図５　半径 0.155m の円についての追従軌道

LMIによる3台のトレーラを有する移動ロボットのファジィ後退制御

An LMI-based Design of Fuzzy Control Systems of a Mobile Robot with Three Trailers

田中 一男 ○谷口 唯成 大岡 純
Kazuo TANAKA Tadanari TANIGUCHI Jun Ooka
金沢大学工学部 人間・機械工学科
Department of Human and Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University

Abstract This paper presents a backing control of a mobile robot with three trailers. A fuzzy controller is designed from the fuzzy model via parallel distributed compensation and LMI-based design procedures. Decay rate, constraints on the control input and output are considered in the LMI-based design. Experimental results show that the designed fuzzy controller effectively achieves the backing control.

1. 緒言

トレーラ・トラック型移動ロボットの後退制御は、非常に困難な非線形制御問題である。特に、ジャックナイフ現象を回避しなくてはならない。この問題に対して種々の解法[1,2]が提案されている。文献[1]では、厳密な線形化法を用いてシミュレーションで2台トレーラ問題まで、実機では1台トレーラ問題までの後退制御器の設計が報告されている。本研究では、ファジィ制御系に対するDecay rate、入力制限と出力制限を考慮したLMI（線形行列不等式）条件を導出し、これらを利用したファジィ制御器の設計法を提案する。この設計手法を3台トレーラを有する移動ロボットの後退制御の実験に適用し、本設計法の有効性を示す。特に、これらのLMI条件を考慮することで、速応性に優れ、ジャックナイフ現象や、ステアリング角の飽和防止に有効であることを示す。

2. ファジィモデル化

Fig.1に3台トレーラのモデルと座標系を示す。ここで、l(=0.087[m])はトラック、L(=0.130[m])はトレーラの長さである。制御目的は、ステアリング角$u(t)$のみを制御することによってすべての状態変数を0に収束させることである。3台トレーラの非線形モデル[3]は以下のファジィモデルで表現できる。

$$\mathbf{x}(t+1)=\frac{\sum_{i=1}^{2} w_i(p(t))\{\mathbf{A}_i\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^{2} w_i(p(t))} \qquad (1)$$

$$y_j(t)=\mathbf{C}_j\mathbf{x}(t) \qquad j=1,2,3$$

ここで、$\mathbf{x}(t)=[x_1(t)\ x_3(t)\ x_5(t)\ x_7(t)\ x_8(t)]^T$であり，$w_1(p(t)), w_2(p(t))$はファジィ集合のメンバーシップ値である。前件部変数$p(t)$はいくつかの状態変数を用いて定義された変数である。出力$y_i(t)$はトレーラ・トラック間の相対角度である。すなわち、$y_1(t)=x_1(t)$, $y_2(t)=x_3(t)$, $y_3(t)=x_5(t)$である。

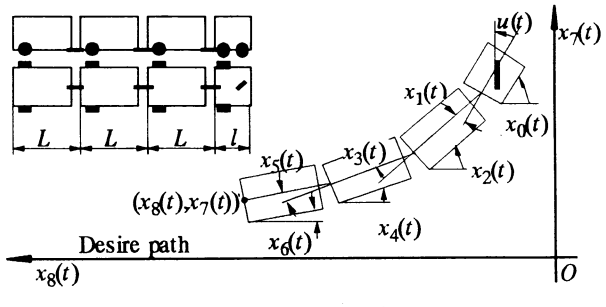


Fig.1 3台トレーラのモデルと座標系

3. ファジィ制御器の設計

並列分散的補償[4]によって(2)式のようなファジィ制御器を設計する。

$$u(t)=-\frac{\sum_{i=1}^{2} w_i(p(t))\mathbf{F}_i\mathbf{x}(t)}{\sum_{i=1}^{2} w_i(p(t))} \qquad (2)$$

(1)式と(2)式からなるファジィ制御系に対するDecay rate条件と入出力制限に関するLMI条件[5-7]は、それぞれ次のように表現される。これらのLMI条件とLMIに基づく解法によりDecay rate、入出力制限を満たすフィードバックゲインを求めることができる。

[Decay rate]

minimize β

subject to $\mathbf{X}>\mathbf{0}$, $0<\beta<1$

$$\begin{bmatrix} \beta\mathbf{X} & \mathbf{X}\mathbf{A}_i^T-\mathbf{M}_i^T\mathbf{B}_i^T \\ \mathbf{A}_i\mathbf{X}-\mathbf{B}_i\mathbf{M}_i & \mathbf{X} \end{bmatrix} > \mathbf{0} \qquad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \beta\mathbf{X} & \frac{1}{2}\{\mathbf{A}_i\mathbf{X}+\mathbf{A}_j\mathbf{X}-\mathbf{B}_i\mathbf{M}_j-\mathbf{B}_j\mathbf{M}_i\} \\ \frac{1}{2}\{\mathbf{A}_i\mathbf{X}+\mathbf{A}_j\mathbf{X}-\mathbf{B}_i\mathbf{M}_j-\mathbf{B}_j\mathbf{M}_i\}^T & \mathbf{X} \end{bmatrix} \geq \mathbf{0} \quad i<j \qquad (4)$$

ただし、$\mathbf{X}=\mathbf{P}^{-1}$, $\mathbf{M}_i=\mathbf{F}_i\mathbf{X}$である。

[入力制限]

$\|u(t)\|_2\leq\mu$ を満たす条件は$\mathbf{X}$と$\mathbf{M}_i$を用いて以下のLMIで記述できる。

$$\begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}^T(0) \\ \mathbf{x}(0) & \mathbf{X} \end{bmatrix} \geq \mathbf{0}, \quad \begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{M}_i^T \\ \mathbf{M}_i & \mu^2\mathbf{I} \end{bmatrix} \geq \mathbf{0} \qquad (5)$$

[出力制限]

$\|y_j(t)\|_2\leq\lambda$ を満たす条件は$\mathbf{X}$を用いて以下のLMIで記述できる。

$$\begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}^T(0) \\ \mathbf{x}(0) & \mathbf{X} \end{bmatrix} \geq \mathbf{0}, \quad \begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{X}\mathbf{C}_j^T \\ \mathbf{C}_j\mathbf{X} & \lambda^2\mathbf{I} \end{bmatrix} \geq \mathbf{0} \qquad (6)$$

以前の設計法[2]では、フィードバックゲインを決定した後、安定性や制御性能をチェックし、問題があればフィードバックゲインを再決定するという試行錯誤的な手法が取られていた。上記で示した(3)~(6)式を満たす最小のβを求めることで、速応性に優れ、しかも、あらかじめ定めた入力や出力の上限値を超えないフィードバックゲインが得られる。すなわち、

Decay rateで目標軌道に収束する速応性の向上、入力制限でステアリング角の角度の制限、出力制限でトレーラ・トラック間の相対角度を制限しジャックナイフ現象防止を実現できる。この(3)～(6)式のLMI条件において共通に成立する$\mathbf{X}, \mathbf{M}_i$と最小値βを求めることにより、フィードバックゲイン$\mathbf{F}_i=\mathbf{M}_i\mathbf{X}^{-1}$と安定条件[5,6,7]を満たす正定対称行列$\mathbf{P}=\mathbf{X}^{-1}$が得られる。ファジィ制御系の安定性は

$$-179.4270[\text{deg.}] < p(t) < 179.4270[\text{deg.}]$$

の範囲で保証される。

4. シミュレーション結果

出力制限をλ=90[deg.]で、初期位置$\mathbf{x}(0)=[\,0\ -0.175\ -0.175\ -0.37\ 0\,]^T$のとき、安定条件のみ、Decay rateのみ、Decay rateと出力制限のもとで設計した制御器に対するシミュレーションの比較をFig.2に示す。シミュレーション結果から、安定条件のみでは収束はするが速応性が低い、Decay rateのみでは速応性を高めるあまり極端なステアリング角度を切りジャックナイフ現象が生じてしまった。Decay rateと出力制限で設計したものは、トレーラ間の相対角度が大きくなることなく、ジャックナイフ現象を防止し、速応性に優れていることがわかる。

5. 実験結果

Fig.3に実験システムを示す。3台トレーラの位置座標$x_7(t), x_8(t)$とトレーラの角度$x_6(t)$は、CCDカメラから得られた画像を処理することによって測定される。角度差$x_1(t), x_3(t), x_5(t)$はポテンショメータからそれぞれ得られる。各測定結果を基にステアリング角$u(t)$を決定し、モータに指令を送る。Fig.4に実験結果、Fig.5に実験に使用したロボットを示す。

6. 結論

本研究は、並列分散的補償の概念とDecay rateと入出力制限を考慮してLMI条件に基づくファジィ安定化制御器の設計を行い、シミュレーションと実験にて本設計法の有効性を実証した。

参考文献

[1]M. Sampei, et al., "Arbitrary Path Tracking Control of Articulated Vehicles Using Nonlinear Control Theory," IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 3, no. 1, pp. 125-131, 1995

[2]田中・小嵜, "並列分散的補償の概念を用いたトレーラ・トラックタイプロボットのファジィ後退制御," 計測自動制御学会論文集, vol. 32, no. 3, pp.363-368,1996

[3]田中・小嵜, "N台トレーラ問題に対するファジィ安定化制御器の設計," 第12回ファジィシステムシンポジウム論文集, pp.251-254, 1996

[4]田中, "アドバンストファジィ制御," 共立出版, 1994

[5]H. Wang, K. Tanaka and M. Griffin, "An Analytical Framework of Fuzzy Modeling and Control of Nonlinear Systems," 1995 American Control Conference, vol. 3, pp. 2272-2276, 1995

[6]H. Wang and K. Tanaka, "An LMI-based Stable Fuzzy Control of Nonlinear Systems and its Application to Control of Chaos," 5th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp.1433-1438, 1996

[7]K. Tanaka and T. Ikeda, "Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers: Relaxed Stability Conditions and LMI Based Designs," IEEE Transactions on Fuzzy Systems (Submitted).

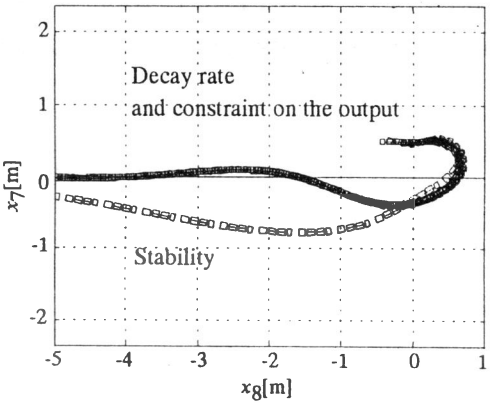


Fig.2 Simulation result

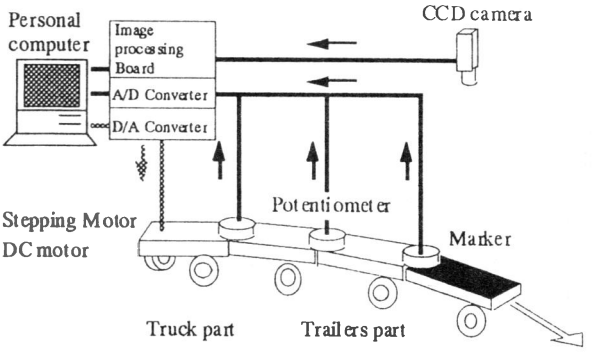


Fig.3 Experimental system

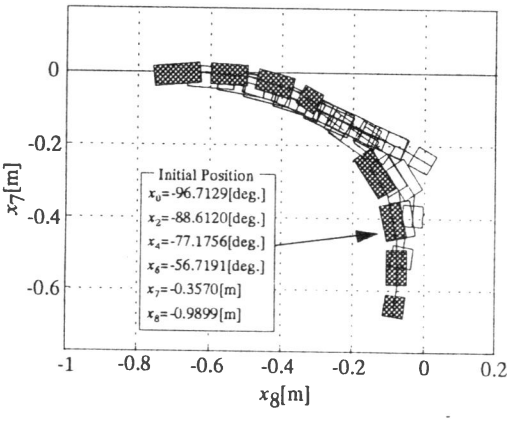


Fig.4 Experimental result

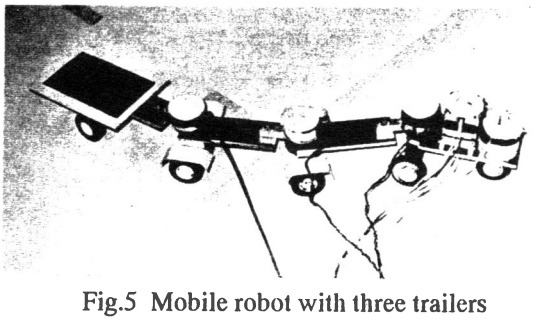


Fig.5 Mobile robot with three trailers

〒920　金沢市小立野2-40-20
金沢大学工学部人間・機械工学科　田中　一男
Tel & Fax 0762-34-4736
E-mail　ktanaka@t.kanazawa-u.ac.jp

WEB1-1

非対称なガウス型関数からなるファジィ規則の学習

Learning of Fuzzy Rules Consisting of Nonsymmetrical Gaussian-type Functions

成田雄彦*, 石 岩** 水本雅晴*
Yuhiko NARITA, Yan SHI, Masaharu MIZUMOTO

*大阪電気通信大学情報工学部
Division of Information and Computer Sciences
Osaka Electro-Communication University

**九州東海大学工学部
School of Engineering
Kyushu Tokai University

Abstract We proposed a neuro-fuzzy learning algorithm in which the number of membership functions does not increase quickly in the case of multiple inputs, the form of fuzzy rule table do not change even after the learning, and the case of weak-firing for fuzzy rules is avoided. As an extension of the work, this paper suggests a neuro-fuzzy learning algorithm in which the membership functions of fuzzy rules are nonsymmetrical Gaussian-type functions. We compare it with the conventional method treating with ordinary Gaussian-type membership function through identifying several nonlinear functions, and show that the suggested method is a useful tool for learning a fuzzy system model.

1 はじめに

近年、様々な分野においてファジィ推論が応用されており、特に、制御の分野においてその実用化が進展している。ファジィ推論の実用化が進むとともに、専門家の知識を獲得し、制御対象によりメンバーシップ関数や推論規則のチューニングなどのファジィ規則の生成が重要になっている。

著者らは最急降下法 [1] に基づき、多入力の場合でも各入力空間でのメンバーシップ関数が増加せずに、学習後でもファジィ規則表の形が崩れず、低発火現象を抑制できるというニューロ・ファジィ学習アルゴリズム [2] を提案している。

本論文では、著者らの方法を拡張し、左右非対称なメンバーシップ関数からなるファジィ規則に対するニューロファジィ学習アルゴリズムを提案する。この方法では、メンバーシップ関数を左右非対称にすることによって、より一般的なファジィモデルを構築することが可能となる。また、非線形関数の同定を行い、従来法との比較、検討をするとともに、提案した手法の有効性を示す。

2 ニューロ・ファジィ学習アルゴリズム

著者らは、ファジィ規則ごとに独立にメンバーシップ関数を設定せず、メンバーシップ関数をファジィ規則表に対応するように重複して設定することによって学習後でもファジィ規則表の形が崩れないニューロ・ファジィ学習アルゴリズム [2] を提案している。

入力を $x_1, x_2, \cdots, x_n$ とし、入力 x_i に対する k_i 個 (=k_i分割) のファジィ集合を

$$A_{i,1}, \cdots, A_{i,ji}, \cdots, A_{i,k_i} \quad (1)$$

とすると、各入力 $x_1, \cdots, x_n$ でのファジィ集合を組み合わせることにより、$k_1 \cdots k_n$ (=L) 個のファジィ規則を決定することができ、次のように表せる。

If x_1 is $A_{1,j1}$ and x_2 is $A_{2,j2} \cdots x_n$ is $A_{n,jn}$

Then y is $y_{(j1,j2,\cdots,jn)}$ (2)

ここで、$y_{(j1,j2,\cdots,jn)}(= y_m)$ は後件部実数値であり、m は規則番号で

$$m = (j1-1)\prod_{p=2}^{n} k_p + (j2-1)\prod_{p=3}^{n} k_p + \cdots + (ji-1)\prod_{p=i+1}^{n} k_p + \cdots + (jn-1)k_n + jn \quad (3)$$

と与えられる。推論結果 y は重心法により次のように求められる。

$$y = (\sum_{m=1}^{L} h_m y_m)/(\sum_{m=1}^{L} h_m) \quad (4)$$

ここで、前件部の適合度 $h_{(j1,j2,\cdots,jn)}(= h_m)$ は次のように求められる。

$$h_{(j1,j2,\cdots,jn)} = A_{1,j1}(x_1) \cdots A_{n,jn}(x_n) \quad (5)$$

ファジィ規則の前件部のメンバーシップ関数をガウス基底関数とする。すなわち

$$A_{ij}(x_i) = exp(-(x_i - a_{ij})^2/b_{ij}) \quad (6)$$

ここで、a_{ij} は中心、b_{ij} は幅を表す。

最急降下法により、式(2)のパラメータの $t+1$ 回目の学習アルゴリズムは次のように与えられる [2]。

$$y_m(t+1) = y_m(t) + \alpha(y^* - y)h_m/(\sum_{m=1}^{L} h_m) \quad (7)$$

$$a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) + \frac{2\beta(y^* - y)(x_j - a_{ij}(t)) * temp_{ij}}{b_{ij}(t)\sum_{m=1}^{L} h_m} \quad (8)$$

$$b_{ij}(t+1) = b_{ij}(t) + \frac{\gamma(y^* - y)(x_j - a_{ij}(t))^2 * temp_{ij}}{(b_{ij}(t))^2\sum_{m=1}^{L} h_m} \quad (9)$$

ただし、

$$temp_{ij} = \sum_{j1=1}^{k_1} \cdots \sum_{j(i-1)=1}^{k_{(i-1)}} \sum_{j(i+1)=1}^{k_{(i+1)}} \cdots \sum_{jn=1}^{k_n} A_{1,j1}(x_1) \cdots A_{n,jn}(x_n) A_{ij}(x_i)(y_m - y) \quad (10)$$

k_i :入力次元 i の分割数, L :規則数, m :規則番号, n :入力数, y^* :理想出力値, (α, β, γ) :学習係数

本手法は、ファジィ規則表の学習に適したニューロ・ファジィ学習アルゴリズムであり、前件部のメンバーシップ関数を重複的に使用できる。また、実際の問題 [3] に対して本手法の有効性を示した。しかしながら、この場合、メンバーシップ関数が左右対称であるため、学習の際の自由度が期待しているよりも小さく、所望の精度が得られない場合がある。次章では、従来法より自由度が広くなるように、左右非対称なガウス型メンバーシップ関数からなるファジィ規則に対するニューロ・ファジィ学習アルゴリズムを提案する。

3 非対称メンバーシップ関数の場合の学習アルゴリズム

新手法におけるファジィ規則の前件部のメンバーシップ関数は左右非対称なガウス基底関数であり次のように与えられる。

$$A_{ij}(x_i) = \begin{cases} exp(-(x_i - a_{ij})^2/bl_{ij}) & x_i < a_{ij} \\ 1 & x_i = a_{ij} \\ exp(-(x_i - a_{ij})^2/br_{ij}) & x_i > a_{ij} \end{cases} \quad (11)$$

ここで、bl_{ij} はメンバーシップ関数の左側の幅であり、br_{ij} は右側の幅を表す。

最急降下法により、式(2)のパラメータの $t+1$ 回目の学習アルゴリズムは次のように与えられる。

$$y_m(t+1) = y_m(t) + \alpha(y^* - y)h_m/(\sum_{m=1}^{L} h_m) \quad (12)$$

$$a_{ij}(t+1) = \begin{cases} a_{ij}(t) + 2\beta(y^* - y)(x_j - a_{ij}(t)) * temp_{ij}/(bl_{ij}(t)\sum_{m=1}^{L} h_m) & x_i < a_{ij} \\ a_{ij}(t) & x_i = a_{ij} \\ a_{ij}(t) + 2\beta(y^* - y)(x_j - a_{ij}(t)) * temp_{ij}/(br_{ij}(t)\sum_{m=1}^{L} h_m) & x_i > a_{ij} \end{cases} \quad (13)$$

$$bl_{ij}(t+1) = \begin{cases} bl_{ij}(t) + \gamma(y^* - y)(x_j - a_{ij}(t))^2 * temp_{ij}/\{(bl_{ij}(t))^2\sum_{m=1}^{L} h_m\} & x_i < a_{ij} \\ bl_{ij}(t) & x_i \geq a_{ij} \end{cases} \quad (14)$$

$$br_{ij}(t+1) = \begin{cases} br_{ij}(t) & x_i \leq a_{ij} \\ br_{ij}(t) + \gamma(y^* - y)(x_j - a_{ij}(t))^2 * temp_{ij}/\{(br_{ij}(t))^2\sum_{m=1}^{L} h_m\} & x_i > a_{ij} \end{cases} \quad (15)$$

次章では、関数の同定に対して、対称型ガウス関数を用いた従来法と比較することにより本手法の有効性と特徴を考察する。

4 関数同定による従来法との比較

3つの2入力1出力の非線形関数 [2] を同定することにより、提案手法の有効性を示す。

関数 (1):

$$y = sin\{10(x_1 - 1/2)^2 + 10(x_2 - 1/2)^2\}/2 + 0.5 \quad (16)$$

関数 (2):

$$y = \{(x_1 - 0.2)(x_1 - 0.8)(x_1 + 1)(x_2 - 0.2) * (x_2 - 0.8)(x_2 + 0.94)\} * 4.06 + 0.25 \quad (17)$$

関数 (3):

$$y = \{4sin(\pi x_1) + 2cos(\pi x_2)\}/12 + 0.5 \quad (18)$$

ここで $x_1, x_2 \in [-1, 1]$(関数 (2),(3) の場合),$x_1, x_2 \in [0, 1]$ (関数 (1) の場合) は入力変数で、$y \in [0, 1]$ は正規化された出力変数である。

次に、提案した学習アルゴリズムを用いて3つの関数の同定を行う。ただし、理想の入出力関係は図1-図3のようである。

学習の具体的な方法は、N 個の入出力データ $(x_{1_p}, x_{2_p}, \cdots, x_{n_p}, y_p^*), p = 1, 2, \cdots, N$, を繰り返し用いて、式 (12)-(15) よりパラメータの調整を行い、次式の $D(t)$ を求める。

$$D(t) = \{\sum_{p=1}^{N}(y_p^* - y_p)^2\}/N \qquad (19)$$

ただし、$D(t)$ は t 回目の学習後の平均二乗誤差で、y_p は p 番目の入力データに対するファジィ推論出力を表す。次式で表される推論誤差の変化量 $D(t)$ が、しきい値 θ 以下になった時、学習を終了する。

$$\Delta D(t) = |D(t) - D(t-1)| \qquad (20)$$

実際の学習には、200 個の学習データをランダムに選び、学習係数は

関数 (1) : $\alpha = 0.65, \beta = \gamma = 0.015$ 規則数 25(5×5)
関数 (2) : $\alpha = 0.65, \beta = \gamma = 0.015$ 規則数 9(3×3)
関数 (3) : $\alpha = 0.5, \beta = \gamma = 0.25$ 規則数 16(4×4)

とし、 $\theta = 0.5 \times 10^{-6}$ とした。また、x_1, x_2 の各入力空間を 50 分割して 2500 個のデータを評価用データとした。

以上の条件のもとにそれぞれシミュレーションを 5 回づつ行った場合の平均結果を表 1 に示す。ただし、回数 (=学習回数), 学平均二 (=学習データの平均二乗誤差), 評平均二 (=評価用データの平均二乗誤差), 評平均 (=評価用データの平均誤差), 評最大 (=評価用データの最大誤差) を表す。

図 1-図 3 において関数 (1),(2) は出力の変化量が一定でないような関数であり、逆に関数 (3) は出力の変化量がほとんど一定であるような関数である。

新手法では、メンバーシップ関数の中心が出力の変化の緩やかな所と激しい所の境目あたりにくることによって、メンバーシップ関数の幅が「変化量激⇒幅狭, 変化量緩⇒ 幅広」のような学習を行うので少ないファジィ規則数で所望の精度を満たしたファジィモデルを構築できる。これに対して従来法では、幅が左右同じであるのでファジィ規則どうしが影響し合って、平均的な推論結果になってしまうためにファジィ規則を増やさないと所望の精度を得られない。

以上のことと、表 1、図 4,5 より、新手法は出力の変化量が一定でないような非対称性の強い関数ほど効果があると考えられる。

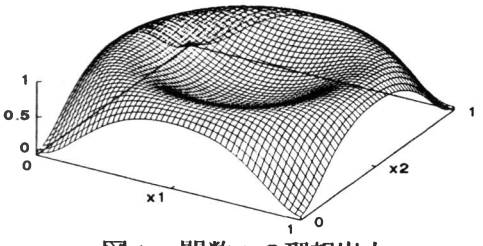


図.1　関数 1 の理想出力

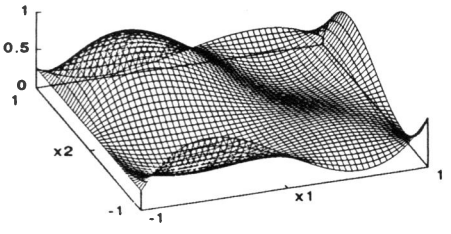


図.2　関数 2 の理想出力

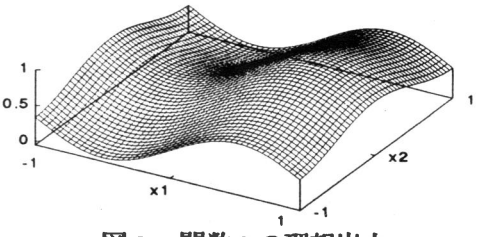


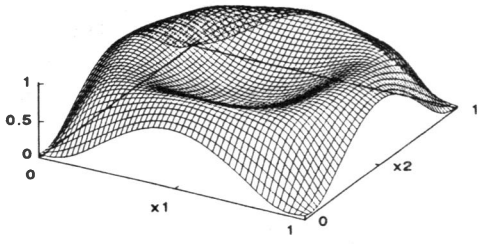
図.3　関数 3 の理想出力

表 1: シミュレーション結果

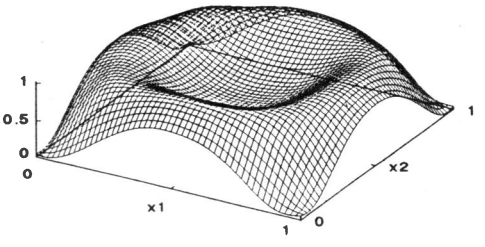
		対称	非対称
関数 (1)	回数	733.8	590.8
	学平均二	0.001521	0.000940
	評平均二	0.001927	0.001206
	評平均	0.033333	0.025014
	評最大	0.228567	0.196158
関数 (2)	回数	1078.8	635.6
	学平均二	0.002064	0.000502
	評平均二	0.001697	0.000470
	評平均	0.029865	0.016681
	評最大	0.206534	0.087435
関数 (3)	回数	53	56
	学平均二	0.000032	0.000030
	評平均二	0.000056	0.000054
	評平均	0.005356	0.005301
	評最大	0.042500	0.039944

5　おわりに

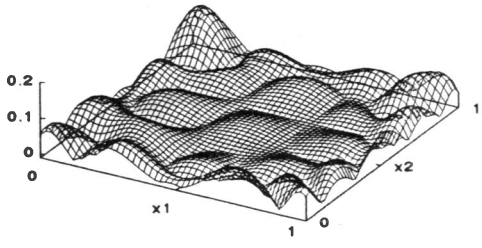
本論文では、前件部のガウス型メンバーシップ関数を左右非対称に拡張したニューロファジィ学習アルゴリズムを提案し、非線形関数の同定を行うことにより、本手法の有効性を示した。



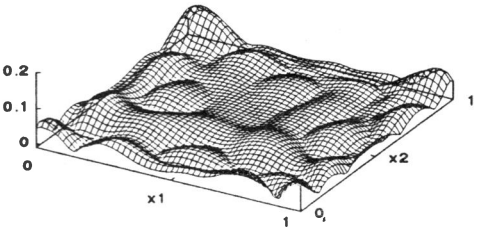
(a) 推論結果 (従来法)



(b) 推論結果 (新手法)

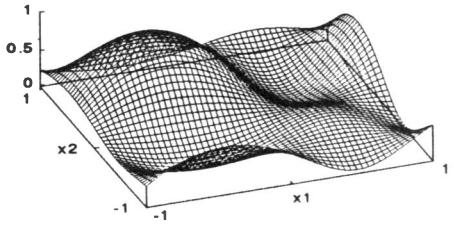


(c) 推論誤差 (従来法)

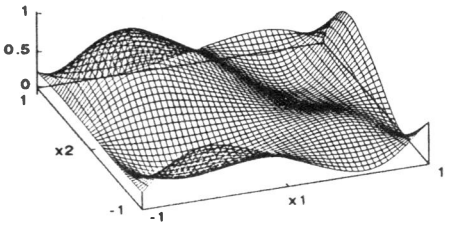


(d) 推論誤差 (新手法)

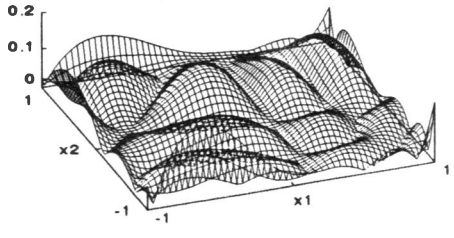
図.4　関数 1 に対する従来法（対称の場合）と新手法（非対称の場合）との比較



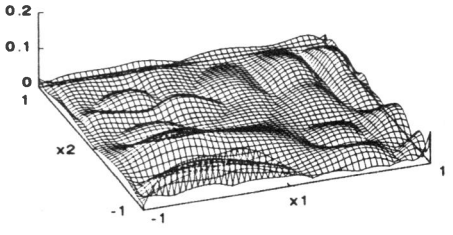
(a) 推論結果 (従来法)



(b) 推論結果 (新手法)



(c) 推論誤差 (従来法)



(d) 推論誤差 (新手法)

図.5　関数 2 に対する従来法（対称の場合）と新手法（非対称の場合）との比較

今後の課題としては、よりよいファジィ規則を獲得するために、前件部のスプライン関数への拡張や、最適なファジィ規則数の決定などが考えられる。

参考文献

[1] D. E. Rumelhart, J. L., McClelland and the PDP Research Group, **Parallel Distributed Processing**, MA: MIT Press, Cambridge, 1986.

[2] 石・水本・湯場崎・大谷, ニューロ・ファジィ学習アルゴリズムによるファジィ規則の一生成法, **日本ファジィ学会誌**, Vol.8, No.4, 695-705 (1996).

[3] 成田雄彦, ニューロ・ファジィ手法によるネガフィルムからの適正露光量決定に関する研究, **大阪電気通信大学卒業論文** (1996).

問い合わせ先：〒572　大阪府寝屋川市初町 18 番 8 号
大阪電気通信大学 大学院工学研究科 情報工学専攻
成田雄彦
Tel：0720-20-4569　Fax：0720-24-0014
E-mail：narita@mzlab.osakac.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEB1-2

時変非線形系のファジィ推論則の学習

Fuzzy Identification for the Time-variant Nonlinear System

小林俊一

Toshikazu Kobayashi

信州大学繊維学部

Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University

Abstructs:Until very recently,the neural network technique has been tried for the learning of nonlinear system. However,the learning time is very long and the convergence takes a long time also. In this report,the time variant nonlinear system is discussed for a theme of reserch. A new method is proposed to get fuzzy inference rules by the extraction of distinctive features and the movement of central value of membership function. The extraction of distinctive feature is done at every updated time. The movement of central value is one of the parameter tuning and is an adjustment of antecedent part. And new rules are generated at the point with the highest inference error. In order to prove the effectiveness of the proposed method,some numerical examples are reported.

1．はじめに

ファジィ制御器の設計法として，専門家や熟練オペレータの制御方法から得る入出力データを用いて，その操作をモデル化する方法がある．特にシステムが非線形な場合には，ファジィモデリングと呼ばれる．モデル化においては，メンバシップ関数の形状あるいはファジィ分割の決定方法といった問題がある[1]．これらの問題にはファジィニューラルネットワーク[2]，逐次型ファジィモデリング等がある[3,4]．ファジィニューラルネットワーク方法は，ルール数をあらかじめ予測し，メンバシップ関数はシグモイド関数で合成し，形状を決定するパラメータを結合荷重として誤差逆伝播学習方法により決定するものである．また，逐次型ファジィモデリングにおいては，簡略ファジィ推論モデルを用いてルール後件部の実数値を調整しながら，逐次的にルールを生成しつつ対象の同定に必要なルールを獲得するものである[3,4]．以上の方法は一般的にシステムが固定の場合であり，時変システムについては何ら考慮されていなかった．

時変系について扱われた研究としては，著者の知る限り制御結果の改善を目的とする文献[5],[6]がみられるにすぎない．[5]においてはルールの前件部を固定し，後件部に時間と共に変化する重みを考慮したいわゆる重み付き簡略化推論方法である．この方法では前件部のファジィ集合の修正，生成あるいは削除が行われないため，ルール数の増減は伴わない．このため，制御開始から終了の間に想定されるファジィ集合の全てを，制御開始時にあらかじめ設定しておく必要がある．このことから，ある時刻では不要なルールが多数存在するという不合理が生ずる．

本論文では時変システムにおけるルールのセルフチューニングを行うことを目的としている．ある時刻 t_i において設定された誤差規範を満たすルールが獲得されているものとする．次の時刻 t_{i+1} における学習に入る前に，時刻 t_i において得られたルールの特徴を抽出する．抽出したルールを t_{i+1} における初期ルールとしてルールの更新を行うものである．

パラメータの調整においては，得られた入出力データとファジィ推論の出力データの差，即ち推論誤差を評価基準としてsteepest descent法により求める．ルールの生成はその時点において得られているルールにおいて調整不可能な場合に，サンプル点の中で最大誤差の生ずる位置にルールを新たに加えることにより行う．

2．ファジィ推論ルールの生成方法

2.1 ファジィモデルとルールの特徴抽出

2.1.1 ファジィモデル

提案する手法では，後件部については実数値をとるものとし，入力をx_j(j=0,1,,,n-1)，出力をyとする．時変系の場合，時刻 t_i においてファジィ推論ルール R^p は，一般に次のように記述できる．

$$R^p: \text{IF } x_0 \text{ is } A_{0l}^{0}(t_i) \text{ and } x_1 \text{ is } A_{1l}^{1}(t_i) \text{ and } \cdots \text{ and } x_{n-1} \text{ is } A_{n-1l}^{n-1}(t_i) \text{ THEN } y \text{ is } w_p(t_i) \quad (1)$$

ここで$w_p(t_i)$ (p=0,1,,,N(t)-1)は後件部の実数値である．$A_{il}^{i}(t_i)$ (l^i=0,1,,,$m^i(t_i)$)は入力x_iについてのファジィ集合である．p，N，m^iはそれぞれルール番

号，ルール数およびx_iについてのファジィ分割数であり，時間と共に変化し，その数は文献[3]を参考にすると，時刻t_iにおいては次のようになる．

$$N(t_i) = \prod_{j=0}^{n-1}(m^j(t_i) + 1) \quad (2)$$

$$p(t_i) = \sum_{j=0}^{n-2} 1^j \prod_{q=j+1}^{n-1}(m^q(t_i) + 1) + 1^{n-1} \quad (3)$$

ここで各時刻ごとにN，p，mを決定しなければならないが，ここではてx_0についてのファジィ分割数のみを決定することとする．

またメンバシップ関数は，次に示すように三角型および台形型と仮定し，隣り合うメンバシップ関数は互いに0.5で交差するものとする．簡単化のために特に断らない限りt_iをtと記し，x_0のk番目のファジィ集合$A_{0k}(t_i)$を$A_k(t)$と書き，台形型の場合

$$A_k(t) = \begin{cases} \dfrac{x_0 - Cr_{k-1}(t)}{Cl_k(t) - Cr_{k-1}(t)} & x_0 \in [Cr_{k-1}(t), Cl_k(t)] \\ 1 & x_0 \in [Cl_k(t), Cr_k(t)] \\ 1 - \dfrac{x_0 - Cr_k(t)}{Cl_{k+1}(t) - Cr_k(t)} & x_0 \in [Cr_k(t), Cl_{k+1}(t)] \\ 0 & x_0 < Cr_{k-1}(t) \text{ or } Cl_{k+1} < x_0 \end{cases} \quad (4)$$

と表される．

ここで$Cl_k(t)$はファジィ集合$A_k(t)$における頂点が台形の場合は左頂点）のX座標であり，$Cr_k(t)$は右側頂点のX座標を表す．いずれも時間と共に変化する値である．時変系の場合，ファジィ集合$A_k(t)$を三角型とした時，$Cl_k(t)$，$Cl_{k+1}(t)$を時間の関数で，台形型の場合であるならば$Cr_k(t)$，$Cr_{k+1}(t)$も同様に同定する必要がある．

1次元の場合には前件部メンバシップ関数は1個であるので，ルールpの適合度μ_pは

$$\mu_p = A_p(X_s(t)) \quad (5)$$

と表される[3]．ここで$X_s(t)$における添字"s"はサンプリング点を意味する．$\sum_{p=0}^{N-1}\mu_p = 1$であることにより推論出力$y^*(t)$は次式(6)で表せる[3]．

$$y^*(t) = \sum_{k=0}^{N-1}\mu_k w_k(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A_k(X_s(t)) w_k(t) \quad (6)$$

なお，ここで考える推論は台数積を用いることとする．N個のルールのうち，実際に用いられるルールはメンバシップ関数の性質から1～2個である．

2.1.2 ファジィルールの特徴抽出

時刻tにおけるルールが学習によって得られたものと仮定する．システム$(x_0, x_1, , , x_{n-1}, y, t)$のt+δにおける学習に進む前に，tにおける$x_1=x_{10}$, $x_2=x_{20}$, …, $x_{n-1}=x_{n-10}$上の特徴抽出ならびに$\{x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{n-1j}; j=0, 1, 2, \cdots, m\}$におけるルール更新時にもこれを行う．ここではこの特徴抽出の方法を記述する．なお，$x_1, x_2, \cdots, x_{n-1}$は各軸ともm等分されているものとする．

取得したルールを構成する全てのファジィ集合について，一定の規則に従い各集合の中央値の代表値として順序付けを行う．例えば，集合の定義されている台集合が色の濃度であるならば，濃度の小さい順にファジィ集合を並べ替える．全ての集合の順序付けを行った後に，ルールの後件部を前件部順序付けに従って並べ替えを行う．このとき，後件部における集合の並びは一般的に単調な並びではない．この後件部の各集合の中央値の並びから極値をとる場合のルールは残すこととする．また，集合の連続性から抽出したルールにおけるファジィ集合の左右スプレッドの修正を行う．

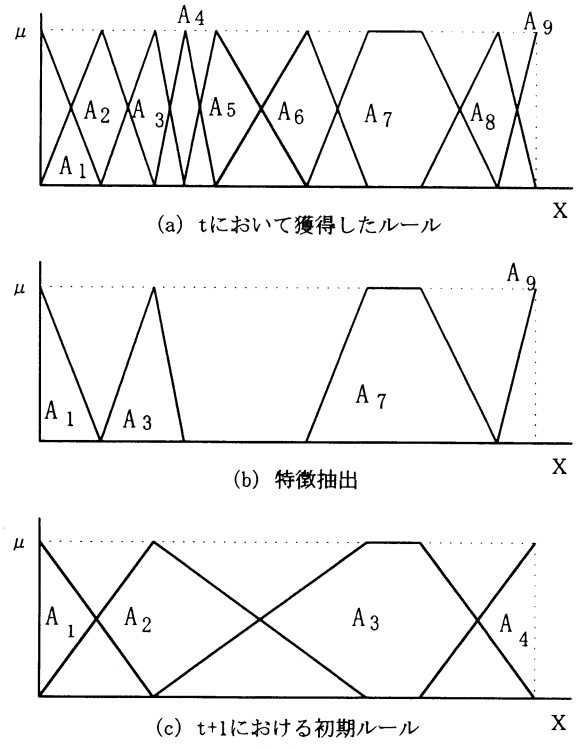


Fig. 1 特徴抽出の例

Fig. 1に特徴抽出の1例を示す．この図の場合は1次元非線形系のものであり，時刻tにおいて獲得したルールは9個であった．このときのルールを式(7)として示す．R3とR7において極値をもつことがわかる．R1とR9はメンバシップ関数の中で両翼に位置するものであり，残すことになる．この場合には4つのメンバシップ関数を抽出したことになる．

R1: If x(t) is A_1 Then y is 0.0
R2: If x(t) is A_2 Then y is -0.238
R3: If x(t) is A_3 Then y is -0.309

R4: If x(t) is A_4 Then y is −0.280
R5: If x(t) is A_5 Then y is −0.166 (7)
R6: If x(t) is A_6 Then y is 0.197
R7: If x(t) is A_7 Then y is 0.303
R8: If x(t) is A_8 Then y is 0.212
R9: If x(t) is A_9 Then y is 0.0

以上からスプレッドを調節し，ラベルをA_1〜A_4としてFig.1（c）のような初期ルールとなる．

2.2 ファジィモデルのパラメータの調整

次にパラメータの調整について記述する．一般にメンバシップ関数の同定は任意の初期ルールから出発する．時刻t_iにおいて成立するルールから抽出したルールの1部がFig.2に示されたとしよう．

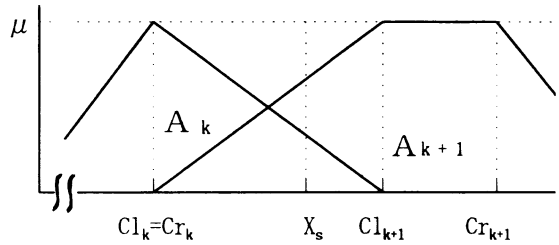


Fig.2 ファジィ集合

このとき時刻t_{i+1}におけるルールの誤差の最大誤差を示すサンプル点がX_sであり，誤差規範より大なる誤差であったと仮定する．この場合逐次型ルール生成法によると$A_k(t_i)$と$A_{k+1}(t_i)$の中間にルールを生成していた[3]．本論文では，そのような場合も勿論あるが，なるべくルールの増加を抑えかつ学習回数の低減をはかるために既存のルールの移動で対処するものとする．

そこで，$A_k(t_{i+1})$，$A_{k+1}(t_{i+1})$に対する後件部の数値がそれぞれ$w_k(t_{i+1})$，$w_{k+1}(t_{i+1})$とする．時刻t_{i+1}において$w_k(t_{i+1}) < w_{k+1}(t_{i+1})$であり，出力値$y(t_{i+1})$との関係が

$$w_k(t_{i+1}) < y(t_{i+1}) < w_{k+1}(t_{i+1}) \tag{8}$$

であったとする．この場合にはルールの増加ではなく，メンバシップ関数の移動で誤差規範以下にするものである．式で表すと(9)，(10)となる．

$$Cr_k^{new}(t_{i+1}) = Cr_k^{old}(t_{i+1}) + \varepsilon_1 \cdot (y^*(t_{i+1}) - y(t_{i+1})) \cdot \frac{Cl_{k+1}^{old}(t_{i+1}) - X_s}{Cl_{k+1}^{old}(t_{i+1}) - Cr_k^{old}(t_{i+1})} \tag{9}$$

$$Cl_{k+1}^{new}(t_{i+1}) = Cl_{k+1}^{old}(t_{i+1}) + \varepsilon_1 \cdot (y^*(t_{i+1}) - y(t_{i+1})) \cdot \frac{X_s - Cr_k^{old}(t_{i+1})}{Cl_{k+1}^{old}(t_{i+1}) - Cr_k^{old}(t_{i+1})} \tag{10}$$

ここでε_1は学習係数であり，できるだけ小さい値に設定しておく．(9)，(10)式の分数部分は式(9)においてはμ_kに，(10)の場合はμ_{k+1}と等価である．従って

$$Cr_k^{new}(t_{i+1}) = Cr_k^{old}(t_{i+1}) + \varepsilon_1 \cdot (y^*(t_{i+1}) - y(t_{i+1}))\, \mu_k \tag{11}$$

$$Cl_{k+1}^{new}(t_{i+1}) = Cl_{k+1}^{old}(t_{i+1}) + \varepsilon_1 \cdot (y^*(t_{i+1}) - y(t_{i+1}))\, \mu_{k+1} \tag{12}$$

と置換可能である．

次に後件部のパラメータの調節について述べる．後件部は実数値である．入出力データ$(x_0(t_{i+1}), x_{1j}, x_{2k}, \ldots, x_{n-1n}; y(t_{i+1}))$が得られるたびに$\mu_p$，$y^*$を式(5)，(6)により計算をする．min_xよりmax_xまでの全てのX_0につき計算後，最大誤差点を求める．その点(X_s)が前件部の中央値と一致するならば，次式により更新する[2〜4]．

$$w_p^{new}(t_{i+1}) = w_p^{old}(t_{i+1}) - \varepsilon_2 \cdot \mu_p \cdot (y^*(t_{i+1}) - y(t_{i+1})) \tag{13}$$

ただし，w_p^{old}，w_p^{new}はそれぞれ更新前後の後件部の値である．またε_2は学習係数である．

パラメータの調整は，X_0上のサンプル点数N_s個の繰り返しにより，平均推論誤差E_bがT_1より小さくなるまで行う[3,4]．

$$E_b = \frac{1}{N_S} \sum_{K=1}^{N_S} \left| y_k^*(t_{i+1}) - y_k(t_{i+1}) \right| \tag{14}$$

ただし，$y_p^*(t_{i+1})$，$y_p(t_{i+1})$はそれぞれ時刻t_{i+1}におけるp番目の推論値と出力データである．

2.3 ルールの生成方法

ルールの生成はサンプル点X_sが既存のメンバシップ関数に対し，どの位置にあるかによって異なる．

またパラメータの調整等を繰り返してもE_bがT_1より減少しなくなる場合が生ずる．この様な時にはE_bの変化量に注目し，この値がT_2以下になった場合にルールの生成を行う[3,4]．

$$\Delta E_b = |E_b - E_{b+1}| \tag{15}$$

一般にルールの増加が考えられのは

(a) $T_1 \leqq E_b$かつ$T_2 \leqq \Delta E_b$
(b) $w_k < w_{k+1}$(or $w_{k+1} < w_k$)かつ $y < w_k$(or $w_k < y$)または $w_{k+1} < y$(or $y < w_{k+1}$)
(c) 台形型メンバシップ関数を分割

のいずれかである．(a)の場合には最大誤差をもつ位置に，下記のような三角型のメンバシップ関数を作成する．

$$Cl_{k'} = Cr_{k'} = X_s \ ; \ w_{k'} = y$$

なお，増加した時点においてはk'=k+1となる．

また，(b)の場合については，サンプル点X_sの位置に同様な関数を作成する．次に(c)の場合については，三角型メンバシップ関数が2つまたは台形型と三角型

の2つになる．

2.4 同定の手順

2.3までの記述で，ルールの特徴抽出，パラメータ調整およびルールの生成方法を説明した．これらをもとにしてファジィ推論ルールの獲得手順をFig.3のフローチャートに示した．

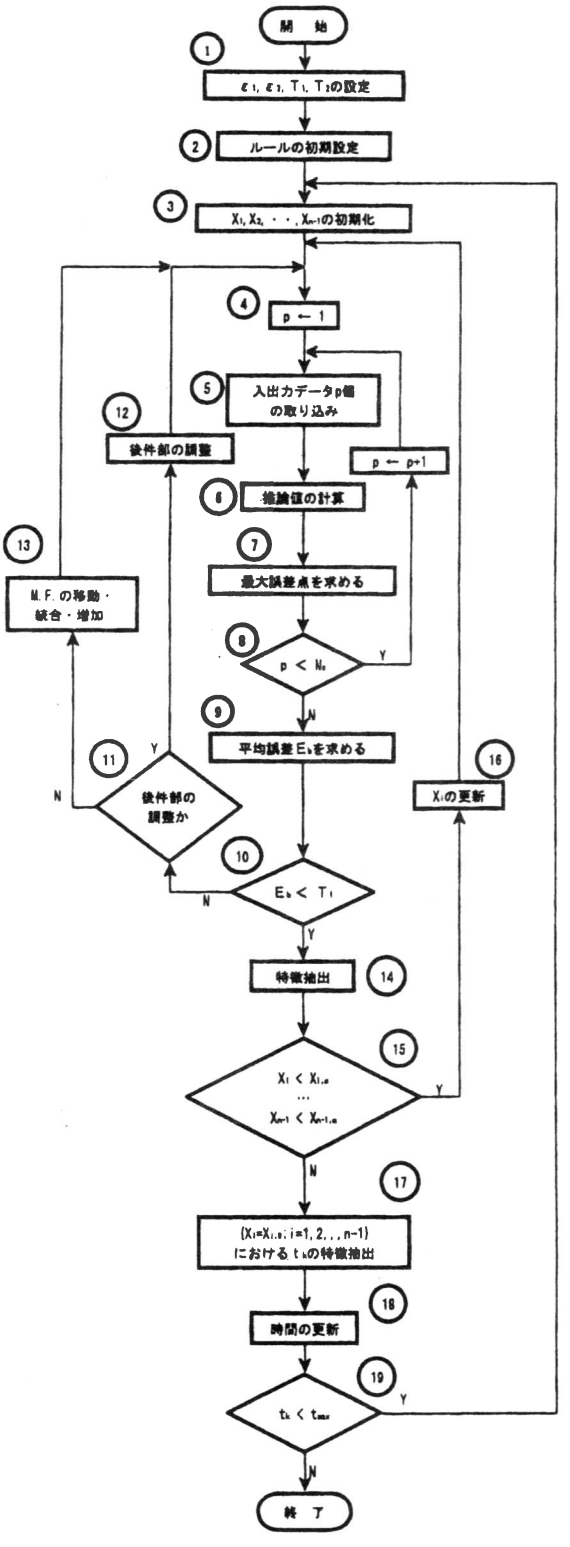


Fig.3　推論ルールの獲得手順

3.　シミュレーション実験

入力変数をX，Y出力変数をZとして，次の式で表される非線形系の入出力関係を同定することにより，提案手法の有効性を示す．なお，tは時間変数である

1)
$$Z = \begin{cases} -X & -1 \leqq X \leqq 0 \\ X^2 & 0 < X \leqq 1 \end{cases} \qquad (16)$$

2)
$$Z = \begin{cases} f(X,Y,t) & f(X,Y,t) < 2 \\ 2 & 2 \leqq f(X,Y,t) \end{cases} \qquad (17)$$

ただし，$f(X,Y,t)=\mathrm{Exp}(-X^3*t^2+3*X*Y^2)$

$-1 \leqq X,Y \leqq 1,\ 0 \leqq t \leqq 5$

3)
$$Z = |X^2 + Y*\mathrm{Cos}(2*\pi*t/5)|/2 \qquad (18)$$

$-1 \leqq X,Y \leqq 1,\ 0 \leqq t \leqq 5$

以上の3つの中で，式(16)は文献[3],[4]に用いられていたものである．またいずれの場合もT_1=0.01，T_2=0.005，ε_1=0.05，ε_2=0.05，Δt=0.25，ΔY=0.05で行った．また，X上のサンプル点数はN_s=81である．また，初期ルールは2個とした．

4.　結果

数値実験1)においては以下の表1の様になった．

表1　逐次法との比較

	逐次法	提案手法
T1	0.01	0.01
T2	0.001	0.005
学習係数（ε1）	—	0.05
学習係数（ε2）	0.05	0.05
学習回数	21	62
ルール数	5	6
平均推論誤差	0.0088	0.0054

この表から学習回数が逐次法と比較して約3倍になっているのは，一旦学習した後にルール数のチェック機能を付加しているためであり，それを省いた場合には42～43となる．またこの回数は初期ルール数の設定方法にもよる．

他の関数2)，3)については当日発表させていただく．

［問合わせ先］
〒386 長野県上田市常田 3-15-1
信州大学繊維学部機能機械学科
小林俊一;Tel. 0268(21)5436 ; Fax. 0268(21)5321
E-mail:vkoba00@giptc.shinshu-u.ac.jp

WEB1-3

非線形最適化手法を用いた倒立振子ファジィ制御規則の学習

Learning Fuzzy Control Rules for Inverted Pendulum by Simplex Method

阪井　節子　　高濱　徹行
Setsuko SAKAI　　Tetsuyuki TAKAHAMA
福井大学教育学部　　福井大学工学部
Fukui University

We learned fuzzy control rules for inverted pendulum by a nonlinear optimization method, simplex method. We used simplified fuzzy inference for fuzzy controller. We converted constraints for rules into penalty function and optimized an evaluation function. We showed that we can learn the rules for inverted pendulum by which we can achieve positioning control and angular control.

1　はじめに

ファジィ制御問題において、最適制御規則の獲得や規則のチューニングに関する研究がいくつか行われている。最適化の手法としては、教師信号を利用して、ニューラルネットワーク [1]、最急降下法 [2] を採用したもの、教師信号を利用せずに、遺伝的アルゴリズム [3]、ファジィクラシファイア [4]、強化学習法 [5] を採用したものがある。

本報告では、教師信号を利用せずに、非線形最適化問題の反復解法である Simplex 法 [6] を利用することにより、ファジィ制御問題に対する最適制御規則の獲得を試みる。制御対象としては、典型的不安定系である倒立振子を取り上げ、ここで提案した方法により制御規則の最適化を行った。なお、倒立振子の制御においては、振子を支える台車の位置制御と振子の鉛直方向からの揺らぎ角の角度制御を同時に行なう。

2　問題の定式化

2.1　倒立振子モデル

倒立振子とは、図 1のような左右方向にしか動かない台車と振子からなる非線形で不安定なシステムである。ここで、状態量は、θ_t(度: 振子の鉛直方向からの揺らぎ角), ω_t(度/s : 振子の角速度), x_t(m : 台車の中央からの位置), v_t(m/s : 台車の速度), 操作量は, F_t(N : 台車に与える力) である。

この時、時点 t における力学系は次の運動方程式 [5]

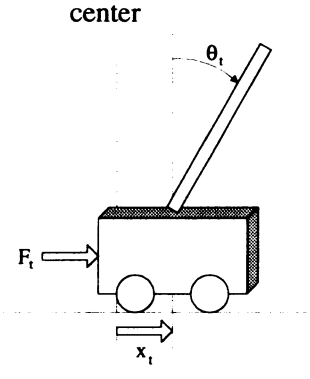


図 1: 倒立振子モデル

によって、表される。

$$\dot{\omega_t} = \frac{g\sin\theta_t + \cos\theta^2[\frac{-F_c - M_p l\dot{\theta_t}^2\sin\theta_t}{M_c+M_p}]}{l[4/3 - \frac{M_p\cos^2\theta}{M_c+M_p}]} \quad (1)$$

$$\dot{v_t} = \frac{F_t + M_p l[\dot{\theta_t}^2\sin\theta - \dot{\omega_t}\cos\theta_t]}{M_c+M_p} \quad (2)$$

ただし、M_c(kg) は 台車の重さ, M_p(kg) は振子の重さ, l(m) は振子の長さ, $g(9.8\ m/s^2)$ は 重力加速度, F_t(N) は時刻 t に台車に加える力, である。また、台車と台の接点の摩擦と台車と振子の接合部の摩擦はないものとする。

なお本報告では、これらの式を微小時間区分をΔt として、オイラー法によって離散化して用いる。

2.2　倒立振子最適制御問題の定式化

本報告で扱う倒立振子最適制御問題は、次のように定式化する。

$$
\text{(P0)}\begin{cases}
P(\sum_{t=0}^{T}|\theta_t|,\ \sum_{t=0}^{T}|x_t|) \to \min_{\{F_t\}_t} \\
\text{Subject to} \\
\quad |F_t| \le \overline{F} \\
\theta_t \text{と} x_t \text{の推移規則は、(1),(2) の離散化式と} \\
\theta_{t+1} = \begin{cases} \theta_t + \omega_t \Delta t, & |\theta_t| < \overline{\theta}, |\theta_t + \omega_t \Delta t| < \overline{\theta} \\ \overline{\theta}, & \text{otherwise} \end{cases} \\
x_{t+1} = \begin{cases} x_t + v_t \Delta t, & |x_t| < \overline{x}, |x_t + v_t \Delta t| < \overline{x} \\ \overline{x}, & \text{otherwise} \end{cases} \\
\quad \text{で与えられる。} \\
\overline{F}, \overline{\theta}, \overline{x}, F_0, \theta_0, \omega_0, x_0, v_0 \text{は所与。}
\end{cases}
$$

ここで、$P(x,\ y)$ は、x と yの単調増加関数である。

3 簡略ファジィ推論

本報告では、簡略ファジィ推論を参考にし、次のような 2 次元 if-then 型制御規則を用いる。

$$\text{if } \theta_t \text{ is } A_i^{\theta} \text{ and } \omega_t \text{ is } A_j^{\omega} \text{ then } F_t \text{ is } C_{ij}^{\theta\omega} \quad (3)$$

$$\text{if } x_t \text{ is } A_i^{x} \text{ and } v_t \text{ is } A_j^{v} \text{ then } F_t \text{ is } C_{ij}^{xv} \quad (4)$$

ここで、入力ファジィ変数 A_i^hは、NB, NS, ZO, PS, PB のファジィラベルで表現する。

この推論では後件部ファジィ変数の取り得る値が 1 つの実数値で、グレードは、前件部入力データ $(a_i^{\theta}, a_j^{\omega}, a_i^{x}, a_j^{v})$ が入力されると、規則 (3),(4) により次式で得られる。なお、本報告では and を代数積とする。

$$\mu_{ij}^{\theta\omega}(c_{ij}^{\theta\omega}) = \mu_{A_i^{\theta}}(a_i^{\theta}) \cdot \mu_{A_j^{\omega}}(a_j^{\omega}) \quad (5)$$

$$\mu_{ij}^{xv}(c_{ij}^{xv}) = \mu_{A_i^{x}}(a_i^{x}) \cdot \mu_{A_j^{v}}(a_j^{v}) \quad (6)$$

これら全てのファジィ規則から得られた推論結果から、出力変数値は、次式で与えられる。

$$c^0 = \frac{\sum \mu_i^{\theta\omega}(c_i^{\theta\omega}) \cdot c_{ij}^{\theta\omega} + \sum \mu_{ij}^{xv}(c_{ij}^{xv}) \cdot c_{ij}^{xv}}{\sum \mu_{ij}^{\theta\omega}(c_{ij}^{\theta\omega}) + \sum \mu_{ij}^{xv}(c_{ij}^{xv})} \quad (7)$$

4 Simplex 法

ここでは、Simplex 法の概略を説明する。Simplex 法は次のような R^n 上の実数値関数 fの制約なし最小化問題:

$$f(x) \to \min_{x \in R^n} \quad (8)$$

に対する最適化手法である。まず、R^n上の n 次元単体を張る $(n+1)$ 個の点, $x^i,\ i = 0, \cdots, n$ を選択し、これから点 x^h, x^s, x^l を求め, これをもとに以下に列挙した鏡映 (reflection), 拡張 (expansion), 収縮 (contraction), 縮小 (reduction) の各処理を行う。

$$x^h = \arg\max_i f(x^i) \quad (9)$$

$$x^s = \arg\max_{i \ne h} f(x^i) \quad (10)$$

$$x^l = \arg\min_i f(x^i) \quad (11)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i \ne h} x^i \quad (12)$$

$$\text{鏡映}: x^r = (1+\alpha)\bar{x} - \alpha x^h, \quad \alpha > 0 \quad (13)$$

$$\text{拡張}: x^e = \gamma x^r + (1-\gamma)\bar{x}, \quad \gamma > 1 \quad (14)$$

$$\text{収縮}: x^c = \beta x^h + (1-\beta)\bar{x}, \quad \beta \in (0,1) \quad (15)$$

$$\text{縮小}: x^i = \frac{1}{2}(x^l + x^i), \quad i = 0, \cdots, n \quad (16)$$

1 辺の長さ S の初期単体を張る (n+1) 点は、次式で生成する。

$$[x^0, x^1, x^2, \cdots, x^n] = \begin{bmatrix} 0 & \delta_1 & \delta_2 & \delta_2 & \cdots & \delta_2 \\ 0 & \delta_2 & \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \delta_2 & \delta_2 & \delta_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \delta_2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & \delta_2 \\ 0 & \delta_2 & \delta_2 & \cdots & \delta_2 & \delta_1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

ただし、

$$\delta_1 = \frac{1}{\sqrt{2}n}(\sqrt{n+1} + n - 1)S \quad (18)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{\sqrt{2}n}(\sqrt{n+1} - 1)S \quad (19)$$

Simplex 法のアルゴリズムを図 2に示す。

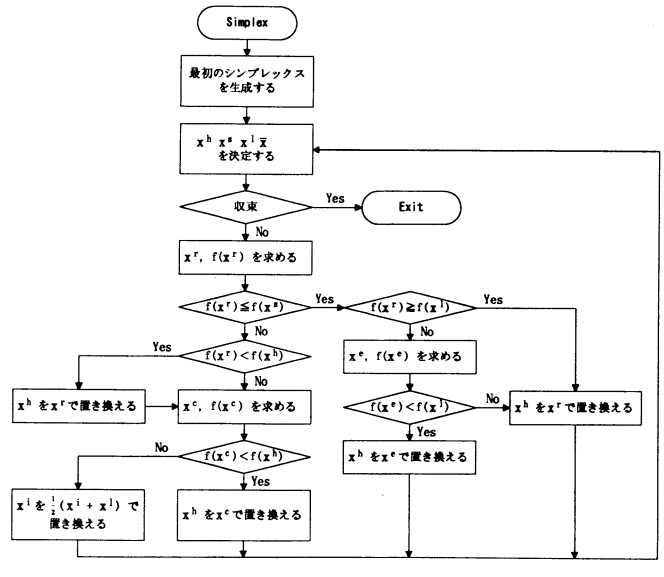


図 2: Simplex 法のアルゴリズム

5 ファジィ制御規則の最適化

5.1 規格化定数を固定した場合

ここでは、制御規則表として制御対象の対称性を利用して、次のようなθ/ω表とx/v表を用いる。探索空間は、

表 1: 制御規則表

θ/ω	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
NS	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
ZO	f_{11}	f_{12}	0.0	$-f_{12}$	$-f_{11}$
PS	$-f_{10}$	$-f_9$	$-f_8$	$-f_7$	$-f_6$
PB	$-f_5$	$-f_4$	$-f_3$	$-f_2$	$-f_1$

x/v	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	f_{13}	f_{14}	f_{15}	f_{16}	f_{17}
NS	f_{18}	f_{19}	f_{20}	f_{21}	f_{22}
ZO	f_{23}	f_{24}	0.0	$-f_{24}$	$-f_{23}$
PS	$-f_{22}$	$-f_{21}$	$-f_{20}$	$-f_{19}$	$-f_{18}$
PB	$-f_{17}$	$-f_{16}$	$-f_{15}$	$-f_{14}$	$-f_{13}$

この2表の各セルを成分とする24次元実数空間であり、式(17)により $X^i=(f_1,\cdots,f_{24}),\ i=0,\ \cdots 25$ なる単体の頂点を与える。また、各点X^iの評価関数$P(X^i)$は、X^iが表す規則表を用いて倒立振子を制御した制御結果と問題(P0)の制約条件$|F_t|\le\overline{F}$をX^iの各成分f_iが満たさない場合のペナルティの和である次式で定義する。

$$P(X^i) = \frac{1}{2T}\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{1}{\overline{\theta}}\sum_{t}^{T}|\theta_t^k| + \frac{1}{\overline{x}}\sum_{t}^{T}|x_t^k|\right) + r\sum_{i}\max\{|f_i|-\overline{F},\ 0\} \qquad (20)$$

Simplex法の各手続きにおける係数は、
$\alpha=1.0,\beta=0.5,\gamma=2.0,r=0.05,S=10*\overline{F}$ とし、
収束誤差は$\varepsilon=10^{-5}$とする。

この際、前件部のファジィ変数の値は$[-1,1]$に正規化された三角型メンバシップ関数とし、規格化定数の値を$g_\theta=15(=\bar{\theta}),g_x=3.0(=\bar{x}),g_\omega=120,g_v=3.0$と固定した。評価値を得る制御実験は、
$(\theta,\omega,x,v)=\{(\overline{\theta},0,0,0),(-\overline{\theta},0,\overline{x},0),(-\overline{\theta},0,1,0)\}$の異なる3個の初期値から行う(式(20)のn=3)。

以上の条件下で、Simplex法を用いて式(20)の$P(X^i)$を最小化した結果、表2の制御規則表が得られた。

この制御規則表を用いて、規則表の学習に用いたと同じ初期値から制御を行った様子を図3に示す。

この時、規則表の各要素ごとのグレード値の総和が表3で与えられる。表3には値が0のセルがあり、学習の対象とならなかった規則があることが分かる。このような規則は一般的には信頼できない。

なお、この規則においては、
$\theta=\{0,5,10,15\},x=\{0.5t|t=0,1,\cdots,6\}$の内、

表 2: 最適化された制御規則表

θ/ω	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	-1.7626	-2.1497	-10.0001	-10.0006	5.1619
NS	-5.0694	-9.9920	-7.7324	6.8521	-6.4512
ZO	-8.9654	-9.9895	0	9.9895	8.9654
PS	6.4512	-6.8521	7.7324	9.9920	5.0694
PB	-5.1619	10.0006	10.0001	2.1497	1.7626

x/v	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	-6.2681	-3.8795	-3.1739	-1.8932	3.5721
NS	6.8382	-5.1251	-2.3992	3.4934	-4.8445
ZO	-1.7008	-5.8076	0	5.8076	1.7008
PS	4.8445	-3.4934	2.3992	5.1251	-6.8382
PB	-3.5721	1.8932	3.1739	3.8795	6.2681

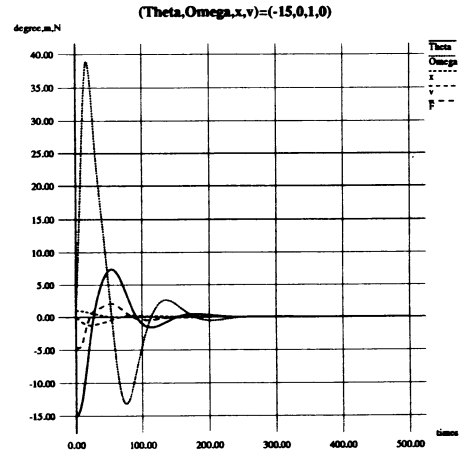


図 3: 制御結果 (1)

$(\theta,x)=\{(0,3),(5,3),(10,3),(15,3),(15,2.5)\}$
以外のすべて初期値からの収束に成功した。

5.2 規格化定数を学習した場合

ここでは、前節と同じ規則表θ/ωとx/vとさらにω,vの規格化定数g_ω,g_vを学習の対象とする。したがって、探索空間は、g_ω,g_vを加えた26次元実数空間となる。

初期単体は式(17)により与え、評価関数$P(X^i)$は、式(20)で定義する。Simplex法の各係数と収束誤差は前節と同じである。規格化定数の値g_θ,g_xは、前節と同様に固定する。

評価値を得るための制御実験は、$(\theta,\omega,x,v)=\{(-\overline{\theta},0,\overline{x},0),(-\overline{\theta},0,1,0)\}$の2個の初期値から行う(式(20)のn=2)。

以上の条件下で、Simplex法により式(20)の$P(X^i)$を最小化した結果制御規則表4が得られた。

この制御規則表を用いて、制御実験と同じ初期値から制御を行った様子を図4に示す。

この時、規則表の各要素ごとのグレード値の総和が表5で与えられる。なお、この規則においては、

表 3: グレードの総和

θ/ω	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	0	0.280	27.715	6.528	0
NS	0	4.749	47.299	17.252	0
ZO	0	15.183	1233.079	18.294	0
PS	0	12.718	100.252	6.448	0
PB	0	3.134	7.050	0.018	0

x/v	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	0	0	0	0	0
NS	0	0.061	9.643	0.061	0
ZO	0.021	71.17	1223.241	23.766	0
PS	2.075	64.341	61.645	7.376	0
PB	0.757	23.483	12.36	0	0

表 4: 最適化された制御規則表と規格化定数

g_ω=147.3163(度/s)、g_v=5.184062(m/s)

θ/ω	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	-9.6622	-3.4774	-9.9914	-9.9835	-8.3127
NS	-7.2611	-9.9258	-5.2010	2.7666	-5.9891
ZO	-7.2646	-9.9821	0	9.9821	7.2646
PS	5.9891	-2.7666	5.2010	9.9258	7.2611
PB	8.3127	9.9835	9.9914	3.4774	9.6622

x/v	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	-0.8963	-8.2704	-0.2828	-2.9720	-4.3410
NS	-3.9339	-3.7443	-1.3141	2.9374	-1.1561
ZO	-7.2989	-5.8711	0	5.8711	7.2989
PS	1.1561	-2.9374	1.3141	3.7443	3.9339
PB	4.3410	2.9720	0.2828	8.2704	0.8963

(θ,x)={(0,3),(5,3),(10,3),(15,3),(15,2.5),(10,2.5)}
以外のすべての初期値からの収束に成功した。

6 終わりに

Simplex 法を用い教師信号を用いずに、制御の良さを示す評価値とペナルティ関数により、ある程度のファジィ制御規則が獲得可能であることを示した。

今後は以下のような課題を解決する予定である。

- 本研究では、θ と x に関する制御の評価値を基準化してその和を最小化するという方法を採用したが、多目的最適化手法を用いることによりθと x を独立に最適化する。
- 規格化定数の値の大きさを適当な範囲に押える。
- 適切な制御実験の初期値を自動的に選択する。

参考文献

[1] 林勲, 野村博義, 若見昇 ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルールの獲得, 日本ファジィ学会誌, Vol.2, No.4, pp.133-145 (1990)

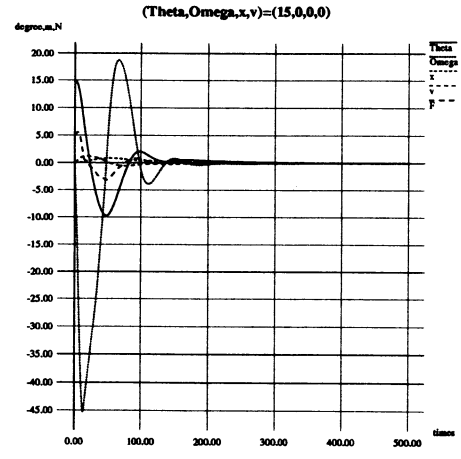


図 4: 制御結果 (2)

表 5: グレードの総和

θ/ω	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	0	0.215	13.738	2.760	0
NS	0	3.813	49.439	8.906	0
ZO	0	8.981	817.359	8.979	0
PS	0	6.480	67.868	1.389	0
PB	0	2.546	7.529	0	0

x/v	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	0	0	0	0	0
NS	0	0.002	1.597	0.002	0
ZO	0	26.419	802.265	11.953	0
PS	0	33.429	79.545	4.494	0
PB	0	14.467	25.826	0	0

[2] 市橋秀友, 渡辺俊彦: 簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御, 日本ファジィ学会誌, Vol.2, No.3, pp (1990)

[3] 高濱徹行, 宮本誠司, 小倉久和, 中村正郎: 遺伝アルゴリズムによるファジィ制御規則の学習, 第8回ファジィシンポジウム講演論文集, pp.241-244: (1992)

[4] 中岡兼, 古橋武, 内川嘉樹, 前田宏: ファジィクラシファイアシステムの報酬と信頼度割り当てに関する一提案, 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.1, pp.65-71 (1995)

[5] 高濱徹行, 阪井節子, 小倉久和, 中村正郎: 強化学習法による離散値制御のためのファジィ制御規則の学習, 日本ファジィ学会誌, Vol. 8, No. 1, pp. 115–122 (1996)

[6] 今野浩, 山下浩: 非線形計画法, 日科技連 (1978)

問合わせ先:
阪井 (高濱) 節子
〒910 福井市文京 3-9-1 福井大学教育学部
e-mail: setuko@edu100.f-edu.fukui-u.ac.jp

WEB2-1

遺伝的アルゴリズムによるファジィルールの生成と選択

Generation and Selection of Fuzzy Rules Using Genetic Algorithms

○富岡 重光, 村田 忠彦, 石渕 久生
○Shigemitsu Tomioka, Tadahiko Murata and Hisao Ishibuchi

大阪府立大学工学部
Department of Industrial Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract In this paper, we propose a method which generates and selects fuzzy rules to construct a fuzzy classification system. There are two phases in this method. In the first phase, our method adjusts the shape and determines the number of membership functions of fuzzy sets in fuzzy rules. In the second phase, our method selects a small number of fuzzy rules to construct a compact classification system. By computer simulations, we show that a fuzzy classification system constructed by our method have a good performance while the number of fuzzy rules in the system is not large.

1. はじめに

本研究では，遺伝的アルゴリズムによるファジィ識別システムの構成手法を提案する．関数近似問題に対して，Nomuraら[1]はGAによる入力空間のファジィ分割方法を提案している．そのアルゴリズムでは，入力空間が高次元になった場合に，生成されるルールの数が指数関数的に増大し，現実的に適用不可能であるという問題があった．また，適用可能な場合でも，生成されるルールの数が膨大になり，意思決定者が容易に理解できないファジィシステムが構築されるという問題もあった．本研究では，属性の数を縮小して，ルール生成を行い，さらに少数のルールを選択することにより，コンパクトなファジィ識別システムを構築する手法を提案する．提案手法は，二つの段階から構成される．第一段階では，属性の選択と条件部ファジィ集合のメンバーシップ関数の決定を行い，ファジィIf-Thenルールの集合を生成する．第二段階では，生成されたファジィIf-Thenルール集合から，重要なファジィIf-Thenルールの選択を行う．数値実験から，提案手法により高性能でコンパクトなファジィ識別システムが構成されることを示す．

2. GAによるファジィ識別システムの構築

提案手法では，n次元パターン識別問題に対して，次のようなファジィIf-Thenルールを生成する．

$$\text{Rule } R_j\text{: If } x_1 \text{ is } A_{j1} \text{ and} \ldots \text{ and } x_n \text{ is } A_{jn} \quad \text{then Class } C_j \text{ with } CF = CF_j \tag{1}$$

ここで，R_jはファジィIf-Thenルールのラベル，A_{ji}は区間[0,1]上の条件部ファジィ集合，C_jは結論部クラス，CF_jはルールの確信度である．次のようなコード化，評価，遺伝的操作を用いて，第一段階のルール集合の生成を行う．第二段階のルール選択は，第一段階の評価の手続きの際に行われる．

2.1. コード化

第一段階では，属性の選択と条件部ファジィ集合のメンバーシップ関数を決定する．まず，事前に定められた数（$N_d << n$）だけ属性をランダムに選択する．次に，選択された属性に対して，図1のように，学習用データからメンバーシップ関数の形状を決定する．まず，学習用データを選択された属性に射影し，N_p個毎に学習用データをサンプリングする．N_pは次のように決定される．

$$N_p = \frac{m}{r-1} \tag{2}$$

ここで，mは学習用データの数，rは各属性のファジィ集合の数である．図1は$m=16$，$r=6$のときの例である．図1からわかるように，サンプリングされた学習用データ（黒丸）の属性値のところでメンバーシップ値が1.0となるように，メンバーシップ関数の形状が決定される．図1の下方にあるような選択されたかどうかを示すビットとm個の学習用データに対応するビットを用いて，メンバーシップ関数の形状をコード化する．したがって，各個体は$n \times (m+1)$ビットで構成される文字列でコード化される．

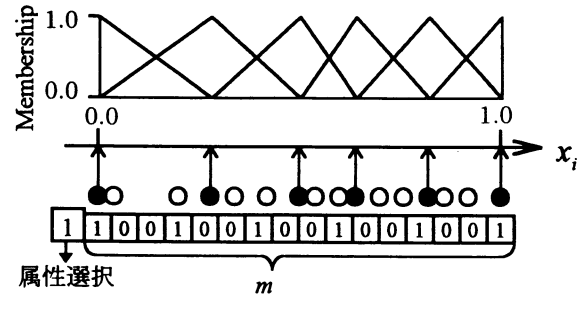


Fig. 1 メンバーシップ関数の生成法

2.2. 個体の評価

N_d 個の選択された属性に対して，それぞれ r 個のファジィ集合が定められているとすると，r^{N_d} 個のルールが生成される．r^{N_d} 個のファジィIf-Thenルールから，重要なルールを選択するため，文献[3]のルール選択手法を用いる．本研究では，正答数最大化とルール数最小化を目的として，ルール選択手法を適用する．このようにして構成された識別システムの正答数を遺伝的アルゴリズムの適応度とする．

2.3. 遺伝的操作

属性選択とメンバーシップ関数の形状を決定するため，次のような遺伝的操作を用いた．(1)属性交叉，(2)属性突然変異，(3)メンバーシップ関数突然変異，である．(1)，(2)は属性選択を表す文字列に対する操作である．(3)はメンバーシップ関数の形状を表す文字列に対する操作である．

2.4. エリート保存

正答数が最大の個体を保存しておき，次世代に継承する．このとき，ルール選択手法により選択されたルール集合も保存しておく．

2.5. アルゴリズム

全体のアルゴリズムを以下に示す．

Step 0 *(個体生成)*:
- Step 0.1 *(属性のコード化)*: 定められた数だけ属性を選択する．
- Step 0.2 *(メンバーシップ関数のコード化)*: メンバーシップ関数の形状を学習用データの値を用いて決定する．

Step 1 *(評価)*: ファジィ分割された入力空間の中から，ルール選択を行なう．

Step 2 *(選択)*: ルール選択後の正答数を適応度とし，個体を選択する．

Step 3 *(属性交叉)*: 1点交叉により，属性を交換する．

Step 4 *(属性突然変異)*: 属性を変異させる．

Step 5 *(メンバーシップ関数突然変異)*: メンバーシップ関数の形状を変異させる．

Step 6 *(エリート保存)*: 正答数最大の個体を保存．このとき，その個体がルール選択GAにより正答数最大となるルール集合も保存しておく．

3. 数値実験

4属性3クラスのアヤメの識別問題に対して，提案手法を適用した．GAの乱数の初期値を変えて5回行ったときの結果を表1に示す．表1より，アヤメに対しても，少数で優れたルールが選択されていることがわかる．図2に，選択された6個のルールにより構成される識別システムを示す．図2より，三つの属性により構成されるルールを用いて，99.3%(149個)の学習用パターンが正しく識別できることがわかる．

4. おわりに

本研究では，属性の数を減らしてファジィ分割を行い，さらに少数のルールを選択することにより，コンパクトなファジィ識別システムを構築する手法を提案した．今後の課題として，さらに高次元の問題に提案手法を適用し，その有効性について検討してゆく．

Table 1 アヤメに対する結果

試行番号	1	2	3	4	5	平均
正答数	149	149	149	149	149	149
ルール数	6	7	7	8	6	6.8
使用属性	4	4	3	4	3	3.6

No.	x_2	x_3	x_4	Class	*CF*	# of patterns
1				1	1.00	50
2				2	0.99	7
3				2	0.89	33
4				2	0.41	9
5				3	0.98	34
6				3	0.97	16

Fig. 2 ファジィ識別システムの例

参考文献

1) H.Nomura, I.Hayashi and N.Wakami: A Self-Tuning Method of Fuzzy Reasoning by Genetic Algorithm, *Proc. of the 1992 International Fuzzy Systems and Intelligent Control Conference*, Louisville, USA, pp.236-245 (1992).

2) 石渕久生,村田忠彦: 遺伝的アルゴリズムによるファジィ識別ルールの学習,電子情報通信学会論文誌A,Vol.J79-A, No.7, pp.1289-1297 (1993).

3) 石渕久生,村田忠彦,田中英夫: 遺伝的アルゴリズムによるファジィ識別システムの構築,日本ファジィ学会誌,Vol.7, No.5, pp.1022-1040 (1995).

問合せ先

住所: 〒593 大阪府堺市学園町1-1，大阪府立大学工学部経営工学科知的システム講座
氏名: 石渕 久生
TEL: 0722-52-1161 (内線 : 2377)
FAX: 0722-59-3340
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

WEB2-2

構造適応型 Reflective Neural Network によるファジィルールの抽出

Extraction Method of Fuzzy Rules from Reflective Neural Networks with Adaptive Module Structure

○松本　昇(*1), 市村　匠(*1), 田崎　栄一郎(*1), 吉田　勝美(*2)
○Noboru Matsumoto(*1), Takumi Ichimura(*1), Eiichiro Tazaki(*1) and Katsumi Yoshida(*2)

(*1)桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
(*2)聖マリアンナ医科大学公衆衛生学教室
(*1)Department of Control and Systems Engineering, Toin University of Yokohama
(*2)Department of Public Health, St.Mariannna University School of Medicine

Abstract:
Reflective Neural Network is a new architecture based on network module concept. This architecture can learn each subset of the complete set of training data by the network modules each of which has two kinds of feed-forward networks; a monitor network and a worker network. In this paper, to clear the relation between inputs and outputs, we try to extract fuzzy rules from Reflective Neural Network. To verify the validity of the proposed method, we develop a medical diagnostic system for hepatobiliary disorders and extract fuzzy rules from the generated network.

１．はじめに

Reflective Neural Network(RNN)はモジュール構造の概念に基づいたネットワークであり、複数のネットワークモジュールによって訓練事例に対する解の全空間を部分空間に分割して学習することができるため、通常のニューラルネットワークよりも高い推論精度を得ることができる[1]。また、このようなネットワークモジュールの数を訓練事例に応じて適応的に変化可能なモジュール構造適応型 RNN が提案されている[2]。しかしながら、RNN を構成する各ニューラルネットワークは隠れ層のニューロン数が固定されているため最適な構造とは言い難い。ここでは、学習が行われたネットワークを再構築するために、忘却付き構造学習を用いた構造適応型ニューラルネットワークによる学習法を提案し、これにより最適であると考えられる構造を得ることが可能になる。

さらに、このようなネットワーク構造からファジィルールを抽出することにより、RNN 内部における入出力間の情報の流れを明確にする。

なお、提案した方法の有効性を検証するために、肝胆道系疾患に対する医療診断支援システムを構築し、そこから抽出されるルールに対して検証を行う。

２．Reflective Neural Network

２．１．Reflective Neural Network の構造

RNN は、モジュール構造の概念に基づいており、データの分配を行うアロケーションモジュールと、事例に対し実際の計算を行うネットワークモジュールから構成されている。ネットワークモジュールは、分配されたデータに対して通常の推論を行うワーカーネットワークと、ワーカーネットワークの分類能力を評価するモニターネットワークという２種類の階層型ニューラルネットワークで構成されている。図 1 はこの RNN の概略図を示す。

RNN は、事例を複数個のネットワークモジュールに分配することで通常の単一階層型ニューラルネットワークよりも高い推論精度を得ることができる。さらに訓練事例に基づいてモジュールの数を適応的に変化させるモジュール構造適応型 RNN が提案されている。

２．２．モジュール構造適応型 Reflective Neural Network

２．２．１．モジュール生成アルゴリズム

ネットワークの分類能力が低下している場合、モジュール生成を行うことによりその分類能力を向上させることが可能である。この測度として、隠れ層ニューロンの重みベクトルの変分を表す Walking Distance(WD)を設定し、これを観察する。モニターネットワークにおいて出力誤差が大きいまま収束しており、ワーカーネットワークの WD の総和があらかじめ定められたしきい値より大きい場合、そのモジュールに分類に関して大きな負担がかかっているとみなし、新しいモジュールを生成する。

２．２．２．モジュール消去アルゴリズム

RNN に冗長なモジュールが存在した場合、そのモジュールを消去する。これは、以下の 2 つの場合に分類される。

case 1)モジュールに訓練データが分配されない場合。
case 2)各モニターネットワークの隠れ層ニューロンの活性値を観察し、そのネットワーク全体でその値が非常に小さくなった場合。

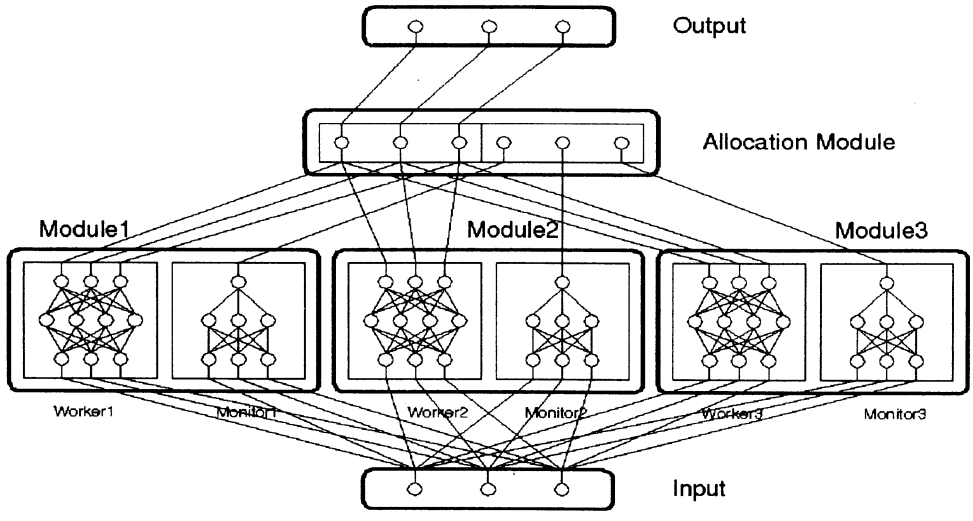


図１　３モジュール構造の Reflective Neural Network の概略図

これらの場合、そのモジュールはネットワーク全体において冗長な要素であるとみなされ、これを消去する。

以上のモジュール生成/消去のアルゴリズムを用いて最適なモジュール構造の RNN を構築する。

３．Hybrid Genetic Algorithm

RNN は複数個のネットワークから構成されるため、計算が非常に長くかかるという問題があり、これを解決するために複数のネットワークを同時に処理することが可能な並列仮想計算の概念を用いている。これは、LAN につながれた EWS を並列的に動作させるものである。これにより、各ネットワークを個別的に処理することが可能となる。さらに各ネットワークでの学習能力を向上させるためにここでは Hybrid GA による学習を行っている[3]。これは、GA と BP による学習のそれぞれの長所を活かした学習法であり、GA と BP を相互に繰り返し用いることにより、より良い解をより速く発見することが可能なアルゴリズムである。ここでは、前実験により良い結果を示した組み合わせとして、GA １回に対して BP30 回を行う方法を適用している。

４．学習後のネットワークの再構築

次に、構築された RNN からルール抽出を行う。

ここで、RNN における各ネットワークはニューロン数が固定されているために最適な構造であるとは言い難い。この問題に対して、石川らによって提案されている重みの分散に制限を加える忘却付き構造学習[4]を市村らによって提案されている構造適応型ニューラルネットワーク[5]に適用することにより、ネットワークを再構築する方法を提案する。

ここでは、ネットワーク再構築の方法として、入力重みベクトルの変化量 WD_j を観察する。この WD_j は収束過程において、ある値に近接した領域の間を振動していることが観察されている。この WD_j の変化を観察することにより重みベクトルの要素を次式に従い、部分的に消去する。

$$W_{ij} = W_{ij} - \mathrm{sgn}(W_{ij})\xi_{ij}\left\{1-\delta_{\xi_{ij}}(W_{ij})\right\} \tag{1}$$

ただし、$\delta_{\xi_{ij}}(W_{ij})$ は次式を満たす。

$$\begin{cases} W_{ij} \le \alpha \text{のとき} \quad \delta_{\xi_{ij}}(W_{ij}) = 1 \\ W_{ij} > \alpha \text{のとき} \quad \delta_{\xi_{ij}}(W_{ij}) = 0 \end{cases} \tag{2}$$

ξ_{ij} は $\xi_{ij} << WD_j$ を満たすものであり、これにより、W_{ij} に対して重みベクトルの変化よりも微少な振動が加わることになる。α は、重みの分布により定められた定数であり、再構築されるネットワークの重みの分散に制限を加える。また、$\mathrm{sgn}(W_{ij})$ は、W_{ij} が正の場合１、負の場合－1 をとる符号関数である。この方法によりネットワークの計算に微少な影響しか及ぼさない重みが消去され、相対的に大きな重みがより明確にされる。

さらに、ネットワークの各隠れ層ニューロンの活性値 VA_j を観察し、その値があらかじめ定められたしきい値 θ_A よりも小さい値をとった場合、そのニューロンはネットワークの動作に寄与していないものとみなし消去する。

このようなアルゴリズムを用いて、ネットワークの動作に寄与しない隠れ層ニューロンやネットワーク計算に微少な影響しか及ぼさない重みを消去することにより、入出力に関係する情報の流れを特定することが可能になる。

5．Reflective Neural Network からのファジィルール抽出

次に、再構築されたネットワークの結合重みからファジィルールを抽出する方法を提案する。

まず、再構築されたネットワークの重みを[0,1]区間に正規化する。この値を結合の強度を表わす数値的真理値として考え、表1に示されるような言語的真理値に変換する。

次に、最構築されたネットワークの入力層を前件部、隠れ層を後件部として次式のようなファジイプロダクションルールを与える。

$$If\ X_i\ Then\ Y_j\ . \tag{3}$$

X_iは、i番目の入力ニューロン、Y_jはj番目の隠れ層ニューロンを表す。Y_jは修飾詞 m によって $y_j\ is\ m\ True$ となり、(3)式は次式に変換される。

$$If\ x_i\ is\ True\ Then\ y_j\ is\ m\ True\ . \tag{4}$$

これは次のように変換される。

$$If\ x_i\ is\ True\ Then\ "y_j\ is\ True"\ is\ m\ . \tag{5}$$

ここで、mを(3)式との一致度を表す修飾詞として前件部へ移動し、次式を得る。

$$If\ x_i\ is\ m\ True\ Then\ y_j\ is\ True\ . \tag{6}$$

結果として、次のファジイプロダクションルールが得られる。

$$If\ x_i\ is\ m\ True\ Then\ Y_j\ . \tag{7}$$

隠れ層と出力層の間に対しても同様に考え次式を得る。

$$If\ Y_j\ Then\ z_k\ is\ m\ True\ . \tag{8}$$

最終的に、(7)式の前件部と(8)式の後件部を合成することによって、次の形のファジィプロダクションルールが得られる。

$$If\ x_i\ is\ m\ True\ Then\ z_k\ is\ n\ True\ . \tag{9}$$

6．医療診断システムへの適用

本論文では、提案した方法の有効性を検証するために肝胆道系疾患の生化学的実験データを用いた。このデータは、表2に示すように出力項目である4種類の疾患と、入力項目である性別と9種類の血液検査から成り立っている。入力データは、表3に示されるようなカットオフデータにより4つの段階に分けられる。本論文では、この1つの段階に対して1つのニューロンを割り当てた。

用いられたデータベースには、536個のデータが存在しており、その中から各疾患ごとに25個ずつ、計100個のデータを無作為に抽出し、これを訓練データとして用いた。

このようなデータを用いて、構造適応型RNNによる肝胆道系疾患に対する医療診断支援システムを構築した。各ネットワークモジュールは、40入力ニューロン、15隠れ層ニューロン、4出力ニューロンで構成されたワーカーネットワークと40入力ニューロン、20隠れ層ニューロン、1出力ニューロンで構成されたモニターネットワークで構成した。

表1　数値的真理値から言語的真理値への変換表

言語的真理値	数値的真理値
Very True	$0.900 < x \leq 1.000$
True	$0.775 < x \leq 0.900$
Rather True	$0.600 < x \leq 0.775$
Unknown	$0.400 < x \leq 0.600$
Rather False	$0.225 < x \leq 0.400$
False	$0.100 < x \leq 0.225$
Very False	$0.000 \leq x \leq 0.100$

表2　肝胆道系疾患の生化学的実験データの例

疾患名	SEX	GOT	GPT	LDH	GGT	BUN	MCV	MCH	TBIL	CRTNN
アルコール性肝疾患	男	108	114	344	176	11.8	99.7	33.1	0.6	0.9
原発性肝癌	男	354	104	1047	265	21.4	95.9	33.5	4.8	1.0
肝硬変	男	38	17	389	23	19.2	89.8	30.4	0.7	1.0
胆石	男	21	11	318	40	12.1	88.6	29.4	0.7	0.6

表3　カットオフ値

	GOT	GPT	LDH	GGT	BUN	MCV	MCH	TBIL	CRTNN
Cut-off value 1	40	40	350	60	13	85	30.0	1.0	0.8
Cut-off value 2	100	100	500	100	18	95	32.5	2.0	1.2
Cut-off value 3	200	200	700	300	25	105	35.0	3.0	1.5

表４　再構築後の各ネットワークにおける隠れ層ニューロンの数

	モジュール１	モジュール２	モジュール３	モジュール４
ワーカーネットワーク	8	8	9	9
モニターネットワーク	16	14	17	16

表５　Reflective Neural Network から抽出されたファジィプロダクションルールの例

Antecedent part	Consequent part
If “MCV” is True	Then “原発性肝癌” is True.
If “LDH” is Very True and “CRTNN” is Very False	Then “胆石” is Very False.
If “LDH” is False and “GGT” is Very True and “MCV” is True	Then “肝硬変” is Very True.
If “MCV” is Rather True and “MCH” is Rather True	Then “アルコール性肝疾患” is Rather True.

実験の結果、学習開始時に２モジュール構造であった RNN が、学習終了時には４モジュール構造となった。訓練データは、１つのネットワークモジュールにつき１つの疾患が分配され、全データに対しても同様の分配が行われた。

構築された RNN は、全データに対して 89.0%の推論精度を示した。これは、単一ネットワークの場合[6]と比較して大きく改善されている。

次に、この RNN の各ネットワークを再構築し、ファジィルールの抽出を行った。再構築後の各ネットワークの構造と抽出されたファジィルールの１部をそれぞれ表４と表５に示す。抽出されたファジィルールは、モニターネットワークから抽出されたものは４つの疾患に大きく分類され、ワーカーネットワークから抽出されたものは大別されたルールを補足するものとなった。また、これらのルールは専門医から矛盾のないルールであると判断された。

７．おわりに

本論文では、学習法に Hybrid GA を用いたモジュール構造適応型 RNN を用いて医療診断支援システムを構築し、その中の各ネットワークを再構築することでファジイルールを抽出し、ネットワークの内部構造を明確にする方法を提案した。

実験の結果、抽出されたファジィルールは医学的見地において矛盾の無いものであったことから、提案した方法は Reflective Neural Network の入出力の関係における情報の流れを明確にするための有効な方法であるといえる。

References

[1] T.Ichimura, N.Matsumoto and E.Tazaki “Computational View of Reflective Neural Networks in Neuro Computer System”, Proc. of 4th Intl. Conf. of Soft Computing (IIZUKA’96), Invited Session (1996)

[2] T.Ichimura and E.Tazaki, “Synthesis of Reflective Neural Networks with Adaptive Module Structure”, Proc. of IEEE Intl. Conf. on Neural Networks (ICNN’96), Special Sessions, pp.106-111(1996)

[3] T.Ichimura, T.Takano and E.Tazaki, “Learning of Neural Networks using Hybrid Genetic Algorithm”, Proc. of the 4th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing(EUFIT’96)(1996)

[4] M.Ishikawa, “Structural Learning with Forgetting”, Neural Networks, vol.9, no.3, pp.509-521(1996)

[5] T.Ichimura and E.Tazaki, “Learning and Extracting Method for Fuzzy Rules Using Neural Networks with Modified Structure Level Adaptation”, Proc. of the European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies (EUFIT’94), vol.3, pp.1237-1241(1994)

[6] T.Ichimura, E.Tazaki and K.Yoshida, “Extraction of Fuzzy Rules using Neural Networks with Structure Level Adaptation - verification to the diagnosis of hepatobiliary disorders”, Intl. Journal of Biomedical Computing, Vol.40, No.2, pp.139-146(1995)

連絡先
〒225
横浜市青葉区鉄町 1614
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
田崎　栄一郎
TEL: 045-974-5070　FAX: 045-978-1311
E-mail: tazaki@intlab.toin.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEB3-1

ファジィクラスタリングによる疫学データからのファジィルール抽出

Fuzzy rule extraction from epidemiological data using fuzzy clustering

佐藤 礼[1]　林 陽一[1]　吉田 勝美[2]

Rei Sato　Yoichi Hayashi　Katsumi Yoshida

1：明治大学 理工学部 情報科学科　2：聖マリアンナ医科大学 公衆衛生学教室

Dept of Computer Science　Dept of Public Health

Meiji University　St.Marianna University School of Medicine

Abstract: The knowledge acquisition is one of the major theme in the knowledge engineering. There are many studies for the methods of the knowledge acquisition, and fuzzy logic is applied in some of them; eg. fuzzy ID3, and the methods using fuzzy clustering. But there are few practical examples of the knowledge acquisition using fuzzy clustering. Therefore, we think that the verification of the validity is needed. This study aims to verify the validity of the knowledge acquisition using fuzzy clustering by applying this technique to the extraction of fuzzy rules from epidemiological data.

1. はじめに

知識工学において知識獲得は主要なテーマの一つである。これまで知識獲得の方法は様々に研究されており、ファジィ理論を応用した研究も行われている。例えば、ID3 を拡張したファジィ ID3 [1] やファジィクラスタリングを利用したもの [2] などがある。前者の ID3 タイプの方法は機械学習を基にした方法であり、後者のファジィクラスタリングを用いる方法はクラスタリングをおこなうことにより、データを特徴的なクラスに分類することにより知識を得る方法である。

しかし、ファジィクラスタリングを用いた実例はあまり見うけられず、その有効性の検証が必要であるように思える。そのため、今回我々は医療データからのルール抽出にファジィクラスタリングによる手法を適用し、その抽出されたルールの評価をおこなうことによりその有効性の検証をおこなうことを目的とする。

本稿では、2節で本研究で使用した疫学データについて説明し、3 節では本研究で使用したファジィクラスタリング手法 FCM*について説明し、4 節ではファジィ IF-THEN ルールの抽出法について述べ、5節でこれらの方法を用いて疫学データから高血圧症発症に関するファジィ IF-THEN ルール抽出実験を行いその評価を行うことにより、ファジィクラスタリングによるファジィルール抽出の有用性に関して評価を行っていく。

2．疫学データについて

本研究で使用した疫学データは、都内にある診療施設で 10 年間の診察の結果得られた高血圧症発症に関する疫学データである。

採取したデータ中の項目は、肥満度、年齢、喫煙度、飲酒度、拡張期血圧(SBP)、収縮期血圧(DBP)、総コレステロール(TC)、中性脂肪(TG)、空腹時血糖(FBG)、尿酸(UA)、発症までの期間の 11 項目である。

総データ数 2200 件中、高血圧症の発症が認められた 312 件のデータを用いて、ファジィクラスタリングを用い高血圧症発症に関するファジィ IF-THEN ルールの抽出をおこなう。

なお、以下ではこのデータを

入力データ群：$X=\{X_1,X_2,\cdots,X_n\}$

第 i データ：$Xi=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{im},y_i)$

x_{ij}：第 i データの第 j 属性の値,

y_i：第 i データの属性「発症までの期間」の値

また、これを正規化したものを

$$X' = \{X'_1, X'_2, \cdots, X'_n\}$$

$$X'_i = (x'_{i1}, x'_{i2}, \cdots, x'_{im}, y_i)$$

x'_{ij} ： x_{ij} を正規化したもの

で表す。

3．ファジィクラスタリング

従来のクラスタリング手法では、あるデータがどのクラスに属するかという事をクリスプに決定していたが、ファジィクラスタリングではこれに曖昧さを導入し、あるデータがクラスにどの程度属するのかという事を計算することによりクラスタリングを行うものである。

ファジィクラスタリング手法の代表的なものに Fuzzy C-Means 法があるが、この手法はあらかじめクラスタの数が分かっていないと適用できないなど、いくつかの欠点があった。そのため本研究では Fuzzy C-Means 法におけるいくつかの欠点を解消しようとする手法である FCM*法［3］を用いた。

FCM*法では、Fuzzy C-Means 法のクラスタ数が既知でなければならない、データ間の所属度の比較ができないという欠点を解消し、クラスタ統合を行うことよりクラスタ数の推定を行い、また距離に基づく所属度の導入によるデータ間の所属度の比較が可能となっている。

距離に基づく所属度とは、図 1 に示すようにクラスタ半径 r_i の地点で所属度 0.5、最遠距離データの地点で 0.0 となる釣鐘型関数の所属度である。

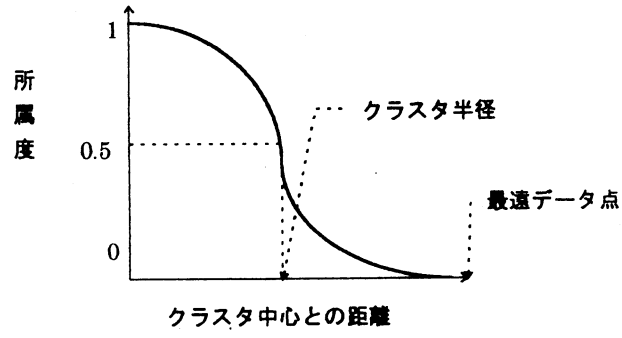


図１：距離に基づく所属度

以下に FCM*アルゴリズムの概要を示す。

(1) 初期クラスタ中心 $v_i^*(0)$、初期クラスタ半径 $r_i(0)$、及びクラスタ数 c を算出

(2) 初期クラスタ統合を行い、クラスタ数 c^*を計算。b=1 を設定。

(3) クラスタ中心ベクトル $v_i^*(b)$、クラスタ半径 $r_i(b)$を算出

(4) 帰属度行列 $U^*(b)$を計算

(5) クラスタ中心ベクトル $v_i^*(b+1)$、クラスタ半径 $r_i^*(b+1)$を算出

(6) 帰属度行列 $U^*(b+1)$を計算

(7) 収束判定

$\|U^*(b)-U^*(b+1)\|<\varepsilon$ を満たすなら $c=c^*$ とし（8）へ進む。満たさなければ $b=b+1$ とし（4）へ戻る

(8) クラスタ統合を行い、クラスタ数 c^*を計算

(9) クラスタ数の収束条件の判定

$c^*=c$ を満たせばクラスタリング終了。満たさなければ $c=c^*$ とし（3）へ戻る

以上により次が計算される。

クラスタ数：c

クラスタ中心ベクトル集合：$V=\{V_1,V_2,\cdots,V_c\}$

$$V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \cdots, V_{im})$$

距離に基づく所属度行列：$U=[u_{ij}]$

$$u_{ij}\in[0,1]$$

4．ファジィクラスタリングによるファジ

イ IF-THEN ルールの抽出

ファジィクラスタリングによりデータ空間の分割がされると、各々のクラスタに対しルールを生成していく。ここではファジィクラスタリングにより得られた、クラスタ数 c、距離に基づく所属度 u_{ij}、クラスタ中心ベクトル V_i、及びデータ集合 X を用いてファジィ IF-THEN ルールを生成する方法について述べる。

ここで生成するファジィ IF-THEN ルールの形式は次のようなものである。

IF 属性 1=$F_{i1}(x)$ and … and 属性 m=$F_{im}(x)$
THEN 発症（重み）

(1) クラスタ中心ベクトル V は正規化されているのでこれを元のスケールに戻す。これを $V' = \{V_1', V_2', \cdots, V_n'\}$ とする。

(2) 第 i ルールの第 j 条件部 $F_{ij}(x)$ を次のように計算する。

$$F_{ij}(x) = \exp(-(x - v_{ij}')^2 / 2 \cdot \sigma_{ij}^2)$$

ここで

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^{n} |x_{ki} - v_i'| \mu_{ij} \Big/ \sum_{k=1}^{n} \mu_{ij}$$

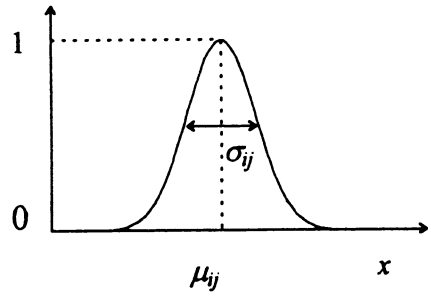


図 2：ルール条件部

(3) 第 i ルールの後件部重み w_i は次のように計算する。

$$w_i' = \sum_{k=1}^{n} \mu_{ik} \cdot y_j \Big/ \sum_{k=1}^{n} \mu_{ik}$$

$$w_i = w_i' \Big/ \sum_{j=1}^{n} w_j$$

5．実験・考察

本節では以上の方法を用いて疫学データからファジィ IF-THEN ルールを抽出し、その評価を行う。実験には発症が見とめられたデータを用いた。また、クラスタリングには上記 11 項目のうち発症までの期間を除いたものを用い、正規化を行ったものを使用した。

ルール抽出までの流れを次に示す。

(1) データの加工
　データの正規化など

(2) FCM*によるクラスタリング
　正規化データ X' を用いてクラスタリングを行う
　→クラスタ数 c、クラスタ中心ベクトル V、距離に基づく所属度 U の算出

(3) ルール生成
　V'、c、U を用いてルールを生成する

抽出したルールは、ルール数 16 であり、重みによりソートしたものを上位の一部を表 1 に載せた。各ルールの重みを除いた項目が上段が前述の v_{ij}' であり、下段が σ_{ij} である。また、重みの項目が w_i になる。

得られたルールの大部分は危険因子も含まれており、高血圧症発症ルールとして妥当なものと考えられる。また、中には問題となる症例の危険因子がないルールも抽出されていた。これは、データを採取した時点では問題となる症例の兆候がなかったデータが含まれているためだと考えられる。

このようなデータは今後基準データして考えていくことで、他のルールと比較を行い、相対的危険度の算出などに利用できるものと考えられる。

得られたルールは問題となる症例のルール以外にもルールとして抽出しており、対象データの主な構成を表しているものと考えられる。

6．まとめ

今回はファジィクラスタリングを用いたファジィルール生成を実データを用いることによりその有効

性の検証を行った。

今回使用した疫学データは数値属性から成るため、ファジィクラスタリングのようなあらかじめ数値属性を対象とした手法では、ID3 などの記号ベースの手法に比べ有効であることが分かる。

また、生成されたファジィルールの大部分は専門家から見て妥当なものであったが、なかには矛盾と考えられるルールも含まれていた。これは、データを症例発症以前に採取していることから、採取した時点では症例の兆候が現れていないものも含まれているためと考えられる。このようなルールは、今後基準データして考えていくことで利用できるものと思われる。

知識獲得ということでは、近年データから隠れたルールを抽出するというデータマイニングが研究されているが、本研究のようなFCMに基づいたクラスタリング手法では、データの分布の影響を受けることなどから、実験結果に見られたように必ずしも欲しいルールが得られるわけではなく、与えられたデータ群がどのようなものから構成されているのかというルールを抽出する傾向にある。つまり隠れたデータを得るというよりは、データベースの主な概要を得るといったことに関して有効であると思える。

今後の課題としては、今回の実験ではクラスタリングアルゴリズムにFCM*法を用いたが、これは距離に基づいたクラスタリングを行うが、これ以外にも様々な方法が提案されており[4]、それぞれ生成されるルールがどのように違いどれが有効なのかを確かめる必要があるように思える。

参考文献

[1] 馬野 元秀，岡本宏隆，鳩野逸生，田村担之，河内二三夫，梅津祐久，木下淳一 「ID3に基づくファジィ・ルール抽出とその推論法」，第9回ファジィシステムシンポジウム予稿集，pp859-890，1993

[2] 小澤 順 「ファジィクラスタリングとデータベースからの知識発見」，日本ファジィ学会誌，Vol8，No.3，pp.456-462，1996

[3] 亀井 且有 「ファジィクラスタリングの制御への応用」，日本ファジィ学会誌，Vol8，No.3，pp.448-455，1996

[4] 宮本 定明「ファジィクラスタリングあれこれ」，日本ファジィ学会誌，Vol8，No.3，pp.423-430，1996

[問い合わせ先]

〒214-71 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

明治大学 理工学部 情報科学科

林 陽一

TEL：044-934-7475

e-mail: hayashiy@cs.meiji.ac.jp

NO	肥満度	年齢	喫煙度	飲酒度	SBP	DBP	TC	TG	FBG	UA	重み
1	34.373	67.167	1	1	149.933	93.966	226.959	133.965	119.97	3.907	0.069
	10.528	8.584	0.212	0.218	25.539	11.383	31.022	34.794	22.145	1.343	
2	18.354	55.181	1	0.998	138.96	86.064	173.28	72.14	96.687	4.312	0.067
	4.515	6.834	0.218	0.208	18.141	6.878	25.063	36.403	5.541	1.002	
3	21.441	75.656	1	0.019	134.798	85.617	162.765	84.512	91.672	3.816	0.065
	2.323	13.73	0.396	0.349	14.482	7.24	32.983	31.287	5.43	1.235	
4	20.411	46.769	0.007	0.999	150.194	91.525	207.91	147.36	101.731	7.562	0.064
	2.605	13.196	0.156	0.32	25.935	7.905	20.623	49.26	7.073	2.07	
5	26.324	76.155	0.004	0.002	149.362	87.851	188.898	92.207	105.118	6.979	0.064
	3.437	13.108	0.083	0.221	22.7	5.933	22.566	28.397	10.534	1.991	
6	20.31	79.723	0.003	1	110.344	89.807	222.825	111.009	119.261	7.757	0.064
	2.622	17.808	0.153	0.327	13.35	7.381	27.18	30.081	21.831	2.251	
7	23.413	86.428	0.097	0.591	133.989	89.762	235.579	110.047	91.961	3.147	0.063
	1.862	22.843	0.145	0.312	12.367	7.381	33.754	31.525	5.998	1.772	
8	24.708	63.07	1	0.996	112.252	72.534	190.936	123.468	96.792	5.918	0.063
	2.329	6.694	0.189	0.204	10.997	8.747	20.675	33.136	5.97	0.984	

表1:抽出したファジィルールの一部

WEB3-2

ファジィクラスタリングとニューロ・ファジィ手法によるファジィ規則のチューニング

Tuning of Fuzzy Rules Based on Fuzzy Clustering and Neuro-fuzzy Methods

石　岩*
Yan SHI

水本　雅晴**
Masaharu MIZUMOTO

*九州東海大学工学部
School of Engineering
Kyushu Tokai University

**大阪電気通信大学情報工学部
Faculty of Engineering Informatics
Osaka Electro-Communication University

ABSTRACT Based on fuzzy clustering and neuro-fuzzy methods, we propose a new learning approach for tuning fuzzy rules. In this approach, before the learning of fuzzy rules, we extract typical data from training data by using fuzzy c-means clustering algorithm, in order to remove redundant data and resolve conflicts in data, and make them as practical training data. By these typical data, fuzzy rules will be tuned by using the neuro-fuzzy learning algorithm. Therefore, the learning time can be expected to be reduced and the fuzzy rules generated by the proposed approach are reasonable and suitable for the identified system.

1　はじめに

ニューロ・ファジィ学習アルゴリズムを用いてファジィモデルのチューニングを行う場合、トレーニングデータの与え方によって、その学習の収束時間が違うことや、生成されたファジィ規則は必ずしも妥当ではない場合があることが知られている。

より適切なファジィ規則を構築するためには、数多くのトレーニングデータを与える必要がある。しかし、数多くのトレーニングデータを与えた場合、データの分布によっては学習が難しくなることがある。例えば、一部にかたまったトレーニングデータを与えた場合、トレーニングデータ間に相殺性が生じ、すべてのデータにフィッティングするのに多くの学習時間がかかることが予想される。また、実際のシステムの特性から離れた極端なトレーニングデータを与えた場合、学習時間がかかるばかりでなく、その余分なデータの影響で生成されたファジィ規則は未知データに対して、評価誤差が大きくなることが考えられる。

本論文では、学習の対象となるファジィモデルに対して、与えられたトレーニングデータを、ファジィc-平均クラスタリングアルゴリズム [1] によってファジィ分割し、抽出されたクラスタセンターを新たなトレーニングデータとし、これよりニューロ・ファジィ学習アルゴリズム [2] によってファジィ規則をチューニングする方法を提案する。この手法では、余分なデータを取り除くことができるだけでなく、データ間の相殺性を緩和することができる。しかも実際に使用されるトレーニングデータは少なくなるため、学習時間の高速化が可能になるだけでなく、生成されたファジィ規則は実際のシステムに対してより合致することになる。また、非線形関数の同定を、従来法 [2] と比較することにより、本手法の有効性を示す。

2　ファジィクラスタリングとニューロ・ファジィ手法によるファジィ規則のチューニング

2.1　ニューロ・ファジィ学習アルゴリズム

まず、著者らの提案した「ファジィ規則表」の学習に適したニューロ・ファジィ学習アルゴリズムについて簡単に述べよう [2]。

2 入力 (x_1, x_2)、1 出力 y のファジィモデルに対して、簡略化ファジィ推論を用いたファジィ推論形式は次のように設定される。

$$\text{規則 } (i-1)k+j : A_{1i}, A_{2j} \Rightarrow y_{(i-1)k+j} \quad (1)$$

ここで、A_{1i}, A_{2j} $(i=1,2,\cdots,r; j=1,2,\cdots,k)$ はそれぞれ入力変数 x_1, x_2 に対応するメンバーシップ関数で、$y_{(i-1)k+j}$ は後件部の実数値である。

入力 x_1, x_2 が与えられた場合、ファジィ推論結果 y は重心法を用いて次のように求められる。

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{k} h_{(i-1)k+j} y_{(i-1)k+j}}{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{k} h_{(i-1)k+j}} \tag{2}$$

ここで、$h_{(i-1)k+j} = A_{1i}(x_1)A_{2j}(x_2)$ はファジィ規則の前件部 A_{1i}, A_{2j} $(i=1,2,\cdots,r; j=1,2,\cdots,k)$ の適合度である。

また、実際の入出力データ (x_1, x_2, y^*) が与えられた場合、学習は次の評価関数を用いる。

$$E = (y^* - y)^2/2 \tag{3}$$

ここで、y^* は理想出力値で、y はファジィ推論値である。

これより、式 (1) における前件部のメンバーシップ関数 A_{1i}, A_{2j} $(i=1,2,\cdots,r; j=1,2,\cdots,k)$ が次のようなガウス型関数

$$A_{1i}(x_1) = exp(-(x_1 - a_{1i})^2/2\sigma_{1i}^2) \tag{4}$$

$$A_{2j}(x_2) = exp(-(x_2 - a_{2j})^2/2\sigma_{2j}^2) \tag{5}$$

で与えられているとすると、その中心 a_{1i}, a_{2j} と偏差 σ_{1i}, σ_{2j} および後件部の実数値 $y_{(i-1)k+j}$ に対する第 $t+1$ 回目の自動チューニングアルゴリズムは、実測された入出力データから最急降下法によって、次のように与えられる [2]

$$a_{1i}(t+1) = a_{1i}(t) + \alpha(y^* - y)(x_1 - a_{1i}) \frac{\sum_{j=1}^{k} h_{(i-1)k+j}(y_{(i-1)k+j} - y)}{\sigma_{1i}^2 \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{k} h_{(i-1)k+j}} \tag{6}$$

$$\sigma_{1i}(t+1) = \sigma_{1i}(t) + \beta(y^* - y)(x_1 - a_{1i})^2 \frac{\sum_{j=1}^{k} h_{(i-1)k+j}(y_{(i-1)k+j} - y)}{\sigma_{1i}^3 \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{k} h_{(i-1)k+j}} \tag{7}$$

$$a_{2j}(t+1) = a_{2j}(t) + \alpha(y^* - y)(x_2 - a_{2j}) \frac{\sum_{i=1}^{r} h_{(i-1)k+j}(y_{(i-1)k+j} - y)}{\sigma_{2j}^2 \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{k} h_{(i-1)k+j}} \tag{8}$$

$$\sigma_{2j}(t+1) = \sigma_{2j}(t) + \beta(y^* - y)(x_2 - a_{2j})^2 \frac{\sum_{i=1}^{r} h_{(i-1)k+j}(y_{(i-1)k+j} - y)}{\sigma_{2j}^3 \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{k} h_{(i-1)k+j}} \tag{9}$$

$$y_{(i-1)k+j}(t+1) = y_{(i-1)k+j}(t) + \frac{\gamma(y^* - y)h_{(i-1)k+j}}{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{k} h_{(i-1)k+j}} \tag{10}$$

2.2 ファジィ c-平均クラスタリングアルゴリズム [1]

入出力データのファジィ分割行列を $U \in M_{n\times c}$ とする。ここで、n は与えられたトレーニングデータの数、c はクラスタの数である。また、第 d 番目のデータベクトル $\boldsymbol{x}_d = (x_1^d, x_2^d, y_d^*) \in R^3$ が第 h 番目のクラスタ $\boldsymbol{v}_h$ に属するメンバーシップ値を $\mu_{dh} \in U$ とし、次の条件を満たすものとする。

$$0 \le \mu_{dh} \le 1, \forall d, h \tag{11}$$

$$0 < \sum_{d=1}^{n} \mu_{dh} < n, \forall h \tag{12}$$

$$\sum_{h=1}^{c} \mu_{dh} = 1, \forall d \tag{13}$$

ファジィ c-平均クラスタリングアルゴリズム（FCM と呼ぶ）の代表的な規範は、クラスタ h の中心ベクトルを $\boldsymbol{v}_h \in R^3$ として

$$\boldsymbol{J}_s(U, \boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2, ..., \boldsymbol{v}_c) = \sum_{d=1}^{n}\sum_{h=1}^{c} (\mu_{dh})^s ||\boldsymbol{x}_d - \boldsymbol{v}_h||^2 \tag{14}$$

と定義されることが知られている [1]。ここで、$s(>1)$ はスムージング・パラメータであり、$\|\cdot\|$ は内積ノルムを示す。

J_s を最適化するために、そのアルゴリズムでは、まず分割行列 U を固定し、クラスタの中心ベクトル $\boldsymbol{v}_h$ $(h=1,2,...,c)$ を求め、次に v_h $(h=1,2,...,c)$ を用いて U を求める。以上の FCM 過程を分割行列 U が収束するまで繰り返す。

本論文では、FCM 過程を終了する条件として、

$$||U(t) - U(t+1)|| = \max_{d,\ h}\{|\mu_{dh}(t) - \mu_{dh}(t+1)|\} \tag{15}$$

を採用している。

したがって、与えられたトレーニングデータ (x_1^d, x_2^d, y_d^*) $(d=1,2,\cdots,n)$ に対して FCM 手法によってファジィ分割を行うことによって抽出されたクラスタセンターは余分なデータを取り除くことができ、データ間の相殺性を避けることができる。

また、クラスタセンターをトレーニングデータとしてニューロ・ファジィ学習アルゴリズムを用いてファジィ規則をチューニングする場合、データの数が少なくなるため、学習時間の高速化が可能になり、しかも余分なデータが取り除かれることにより学習

後生成されたファジィ規則がより実際のシステムに合致するものと期待される。すなわち、トレーニングデータ (x_1^d, x_2^d, y_d^*) $(d = 1, 2, \cdots, n)$ が与えられた場合、FCM によってクラスタセンター $\{v_h\} = \{(v_h^1, v_h^2, v_h^3)\}$ $(h = 1, 2, \cdots, c < n)$ を求め、それを学習則（式 (6)-(10)）を用いてファジィ規則のチューニングを行うものである。

次に、非線形関数の同定に関して、与えられたトレーニングデータを直接使用した場合と、クラスタリングアルゴリズムによって得られたクラスタセンターをトレーニングデータとした場合に対して、ニューロ・ファジィ学習アルゴリズムを適用し、ファジィ規則のチューニングを行った場合の結果を比較・検討し、クラスタリングアルゴリズムを用いた場合がより良好な結果を得ることを示す。

3 数値例

[例]

$$y = 0.3 + 0.9x/(1.2x^3 + x + 0.3) + \eta \qquad (16)$$

ここで、$x \in [0, 1]$ で、$\eta \in [0, 0.15]$ は一様分布をなす雑音とする。

まず、2.2 節の FCM において、$n = 30, c = 15, s = 2, \epsilon = 0.00002$ （FCM 過程を終了するための定数）とする。ここで、ランダムに与えられた 30 個の入力データに対する出力 y を実際の入出力データとする（表 1 参照）。

表 1 トレーニングデータ例

No.	x	y	*No.*	x	y
1	0.788	0.6499	16	0.435	0.7411
2	0.449	0.7907	17	0.750	0.7757
3	0.641	0.8309	18	0.322	0.7722
4	0.509	0.7451	19	0.243	0.6949
5	0.185	0.6920	20	0.600	0.7988
6	0.658	0.7121	21	0.955	0.6977
7	0.995	0.7185	22	0.055	0.4334
8	0.025	0.3062	23	0.118	0.5574
9	0.898	0.7030	24	0.209	0.7143
10	0.200	0.6727	25	0.014	0.3731
11	0.646	0.7430	26	0.774	0.7078
12	0.770	0.6908	27	0.652	0.8033
13	0.336	0.7302	28	0.458	0.7960
14	0.569	0.8448	29	0.775	0.6625
15	0.586	0.7723	30	0.285	0.7714

表 2 表 1 により抽出されたデータ

No.	v_1	v_2	*No.*	v_1	v_2
1	0.6121	0.8100	9	0.9789	0.7102
2	0.0507	0.4270	10	0.8992	0.7028
3	0.2997	0.7732	11	0.5090	0.7472
4	0.7487	0.7745	12	0.3369	0.7320
5	0.7765	0.6748	13	0.4524	0.7883
6	0.1936	0.6871	14	0.6499	0.7324
7	0.0221	0.3238	15	0.2376	0.6978
8	0.1180	0.5573			

表 3 初期ファジィ規則

No.	$a_{1i}(0)$	$b_{1i}(0)$	$y_i(0)$
1	0.0000	0.1062	0.5000
2	0.2500	0.1062	0.5000
3	0.5000	0.1062	0.5000
4	0.7500	0.1062	0.5000
5	1.0000	0.1062	0.5000

この入出力データに対して FCM を適用した場合、29 回の学習後、抽出された 15 個のクラスタセンターが表 2 のように与えられる。

次に、表 1 の 30 個のトレーニングデータを用いた場合と、表 2 の 15 個のクラスタセンターをトレーニングデータとして用いた場合に対して、学習アルゴリズム（式 (6)-(10)）によってファジィ規則のパラメータのチューニングを行った。ただし、ファジィ規則の初期設定は表 3 の値とし、学習係数は $\alpha = 0.01, \beta = 0.05, \gamma = 0.65$ とした。

クラスタセンターからの $n = 15$ 個のデータを用いた場合、225 回の学習後、評価関数 E（式 (3) 参照）は 0.001 に収束している。一方、元の 30 個のトレーニングデータを用いた場合、3422 回の学習後、E は 0.001 に収束している。これより、生成された 2 種類のファジィ規則は表 4 、表 5 のようになった。

表 4 表 2 によるファジィ規則表

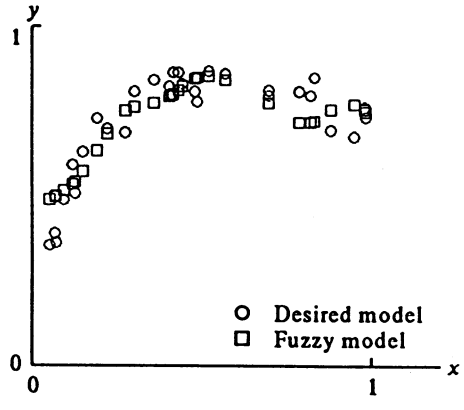
No.	a_{1i}	b_{1i}	y_i
1	-0.0310	0.0951	0.1329
2	0.2429	0.1855	0.6687
3	0.5019	0.1719	0.8420
4	0.7584	0.1463	0.6658
5	0.9962	0.1362	0.7118

表 5 表 1 によるファジィ規則表

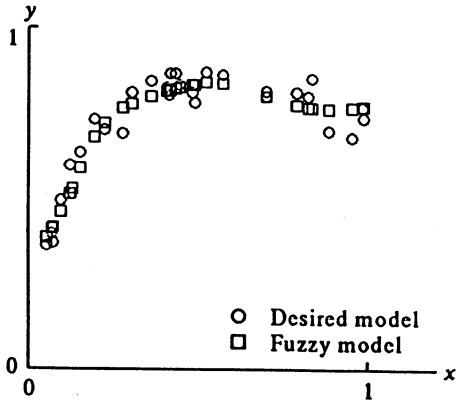
No.	a_{1i}	b_{1i}	y_i
1	-0.0467	0.1309	0.3481
2	0.3376	0.0538	0.6203
3	0.4695	0.1697	1.0084
4	0.6834	0.4756	0.5658
5	0.9169	0.0629	0.8259

表 6 従来法と新手法との比較表

Case	平均二乗誤差		最大絶対誤差	
	従来法	新手法	従来法	新手法
1	0.003291	0.002499	0.121532	0.098892
2	0.003008	0.002714	0.096834	0.102163
3	0.003297	0.002641	0.121413	0.110326
4	0.003119	0.001912	0.098054	0.092502
5	0.002178	0.002166	0.082210	0.084828
6	0.002743	0.002204	0.120275	0.108349
7	0.004881	0.002094	0.142082	0.089424
8	0.003802	0.002219	0.145719	0.092419
9	0.002969	0.001908	0.112820	0.079956
10	0.002137	0.002092	0.108612	0.073173



(a) 理想モデルと従来法によるファジィモデル



(b) 理想モデルと新手法によるファジィモデル

図 1 理想モデルとファジィモデル

表 6 は、本手法と従来法によって生成されたファジィ規則（表 4 と表 5）を用いることにより、30 個の評価用入力データに対して、式 (16) の理想出力値とファジィ推論値との評価誤差（平均二乗誤差）および最大絶対誤差を示したものである。ただし、評価用の 30 個の入力データはランダムに与え、これを 10 回行った。

一例として、図 1 (a), (b) は、それぞれ本手法と従来法の下で表 6 の 3 番目の評価用入力データを用いて、式 (16) の理想出力値とファジィ推論値を表示したものである。

表 6 と図 1 の結果からわかるように、ニューロ・ファジィ学習を行う前に、ファジィ c-平均クラスタリングアルゴリズムによってトレーニングデータの前処理を行うことによって、余分なデータを取り除き、データ間の相殺性を緩和することができるので、学習がうまく行え、生成されたファジィ規則は同定されるシステムモデルにより合致することが考えられる。従来法より良好な結果を得たことから、提案した手法は有効なファジィシステムモデリング化の一手法として使用することができる。

4 結論

本論文では、ニューロ・ファジィ学習手法を用いてファジィ規則のチューニングを行う場合、ファジィクラスタリングアルゴリズムによりトレーニングデータの前処理を行うことによって、そのファジィ規則の生成法を提案した。また、数値例による同定を行うことにより、提案した手法の有効性を検証した。

今後の研究課題として、既知な入出力データに対してその同定システムの特性により最適なクラスタセンターの数を決定し、よりよいファジィ規則を獲得するために、新しい学習アルゴリズムを考え出す必要があると思われる。

参考文献

[1] J.C.Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press, New York (1981)

[2] 石・水本・湯場崎・大谷, ニューロ・ファジィ学習アルゴリズムによるファジィ規則の一生成法, **日本ファジィ学会誌**, Vol.8, No.4, 695-705 (1996)

問い合わせ先

〒862 熊本市渡鹿 9-1-1
九州東海大学 工学部 情報システム工学科
石 岩 (Yan SHI)
Tel: 096-382-1141（代表） Fax: 096-381-7956
E-mail: shi@ktmail.ktokai-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEB3-3

ＫＴアルゴリズムを用いて正確なルールを抽出するための問題点及びその改善策に関する一考察

Problems for Extracting Accurate Rules Using K T Algorithm and a Study of its Improvement

仲光 廣晃　　林 陽一

Hiroaki Nakamitsu　Yoichi Hayashi

明治大学理工学部情報科学科

Department of Computer Science, Meiji University

Abstract : The KT algorithm is a superior algorithm for extracting rules backpropagation networks. But, the recognition rates of rules extracted using the KT algorithm from backpropagation networks are around 90 percent. In this paper , we describe practical problems of the KT algorithm and consider its improvement for increasing the recognition rate.

1　はじめに

バックプロパゲーション（以下、ＢＰ）ネットワークは、実際の医療診断、制御などの多分野で用いられているニューラルネットワークの代表的なものである。その構造はブラックボックスであり、今使用しているネットワークにおいて障害究明や、逆問題が生じた場合、その構造を解析する必要が出てくる。特に、航空関連や発電関連といった、安全性が重要視される分野におけるネットワークの動作原理説明は、必須と言える。

しかし、一般的な学習済みのニューラルネットワークにおいて、人間がそれを解析し、そこから知識を抽出しようとしても、その複雑な構造のため、困難なものになっている。そのためにＢＰネットワークから、自動的にルールを取り出すアルゴリズムが必要になるわけだが、元来のものは、非常に多数の、さらに複雑なルールを取り出し、人間が理解するにはわかりにくいものになっている。そのために簡潔で、そして理解しやすいルールを抽出するアルゴリズムが必要となっている。

以上のような問題点を解決するために考え出されたアルゴリズムがKT法[1]である。このアルゴリズムは、入出力が2値(0,1)という制約を受ける反面、それによって取り出されたルールは、

- IF-THEN 形式である。
- 前件部の命題数がK以下となる。

などの特徴があり、取り出されたルールは、人間に理解しやすいものとなっている。

2　KT アルゴリズムの概要

KT アルゴリズムは、BP ネットワークの重み及び閾値に注目し、その基本的な原理を利用してルールを作成する。つまり、ネットワーク上のあるユニットセルｊへの入力和が、連結しているセルの閾値を越えるかどうかによって、ルールが生成されるかどうかが決まる、というアルゴリズムである。抽出されるルールは、結論が肯定されるルール（もし～ならば～である）と、否定されるルール（もし～ならば～でない）の２種類になる。以下に示すアルゴリズムは肯定ルールの抽出方である。

2.1　ルール抽出

具体的な方法は、最初にｊと結合しているすべてのユニットについて、重みが正であれば“pos-att”、負であれば“neg-att”というように分け、それらの組合せを探索木を用いて以下のようにルールを抽出する。

1. まずｐ個の pos-att の組合せ Sp を考える。そして Sp に属さない pos-att の中で値の大きい順に K-p 個（K：ルールサイズ）だけ取り出す。その重みの合計と Sp の重みの合計が閾値を越えないならば、Sp を排除する。
2. 1で排除されなかった Sp に対し、Sp の重みの合計と、Sp と矛盾しないすべての neg-att の重みの合計の和が閾値を越えたならば、Sp を保存する。この Sp は、ルールの前件部となる。
3. 2で Sp が保存されなかった場合、1個の neg-att の組合せ Sq を考える。Sq に属さず Sp に矛盾し

ない neg-att の重みの合計と、Sp の重みの合計の和が閾値を越えたなら、Sp と Sq をひとまとまりにして保存する。この Sp と Sq もルールの前件部となる。

上記のアルゴリズムを行なって保存された Sp または、Sp と Sq は、結論が肯定されているルールの前件部である。否定された結論を持つルールを抽出するには、閾値における条件を逆にすれば良い。

2.2 ルール合成

ネットワークの構造が3層以上になる場合、ルールの合成が必要となってくる。これは、中間層と出力層、入力層と中間層のそれぞれでできたルールを、入力層から出力層のものへと置き換えることである。具体例をあげると、

中間層と出力層のルール：

IF C THEN D

入力層と中間層のルール：

IF A and B THEN C

であるとき、入力層から出力層へのルールは、

IF A and B THEN D

となる。この時、ルール合成をした結果、矛盾した前件部となるものは破棄する。

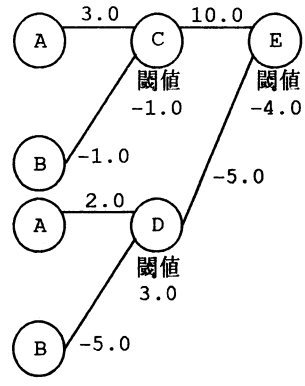
3 KT アルゴリズムの問題点

以上が、KT アルゴリズムの概要である。しかしながら、この手法で抽出されるルールは、ある場合において誤っていたり、また前件部が不完全で破棄しなければならないことがある。以下にこの、完全に誤ったルールの抽出例及び、前件部が不完全になるルールの抽出例を述べる。

3.1 完全に誤ったルールを抽出する例

BP ネットワークが学習した際において、その重みが偏る、つまり、あるいくつかの出力層セルと中間層セルの重み、同様にしていくつかの中間層セルと入力層セルの重みが、他の重みと比べて非常に大きくなった（または小さくなった）状態で、この BP ネットワークから KT を用いた時に、その重みが突出したものとなり、ネットワークの振舞いとは、全く異なった完全に誤ったルールを抽出する場合がある。

そのようなネットワーク構造を、説明のための簡単な具体例を挙げて述べる。



A	B	E
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

上記のネットワークは、単に AND 回路と同じ振舞いをするものである。しかしながら、出力層セルと中間層セルとの間に、正の値の重みの絶対値が、負の値の重みの絶対値の2倍という大きな格差が生まれたため、この出力層セル E で取り出されるルールは、

IF C THEN E

である。同様に、中間層セル C で抽出されるルールは、

IF A THEN C

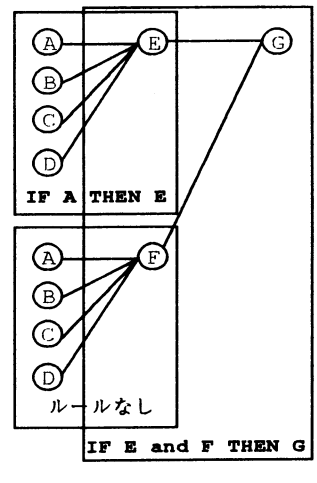
である。結果としてネットワーク全体のルールとしてこの2つのルールを合成すると、

IF A THEN E

という完全にネットワークの振舞いとは異なったルールが、抽出されることになる。

3.2 ルール前件部が不完全なものとなる例

ネットワーク構造が多層になった場合、ある中間層セルにおいて、必ずしもそのセル自体のルールが抽出されるわけではない。このとき、出力層セルのルールの前件部において、ルールのない中間層セルが命題としてある場合、不都合が生じる。



つまり、あるネットワールの振舞いが、

IF A and B THEN G

を満たしているとする。この時出力層セル G において

IF E and F THEN G

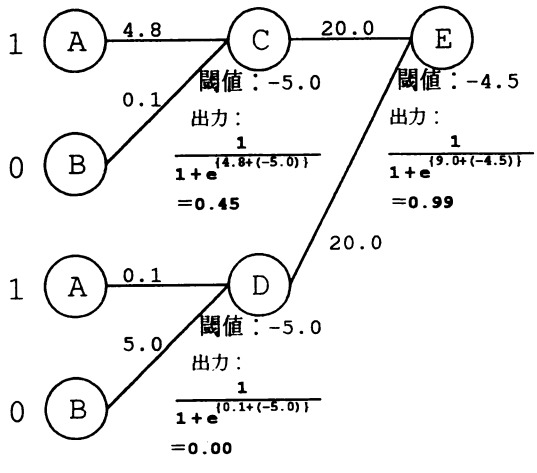
というルールが抽出されたとしよう。この時、中間層セルEには、

IF A THEN E

というルールが抽出されたが、Fにおいては、ルールが抽出されなかった。よって合成する際に、Fに対するルールがないためルールの前件部が不完全になり、間違ったものとして破棄しなければならない。このようなことが頻繁に起これば、ルールが多数破棄されることになり、それだけ識別率は低下することになる。

このルール前件部が不完全になるものの原因として、いくつかのことが考えられる。1つの要因として、最初に決められるルール前件部数“k”以内では、その中間層セルにおいてルールが抽出することができない、という場合である。

もう一つの要因として、ネットワークの構造によるものがある。以下がその例である。



上記のOR回路と同じ振舞いをするネットワーク構造の場合、

IF A THEN E

を満たしており、出力層セルEにおいても、

IF C THEN E

というルールが抽出される。しかしながら中間層セルCにおいて、いくらルール前件部数“k”の値を増やしても、重みの合計が閾値を越えることはないので、ルールは抽出されない。よって、このネットワークから、ルール合成によって、

IF A THEN E

というルールは抽出されない。

4 ルール前件部が不完全なものに対する改善策

以上、KTアルゴリズムの2つの問題点を述べたが、ここで、ルールの全件部が不完全なものに対する改善策を提案する。

このルール全件部が不完全になることは、対象となるネットワークの構造が、多層であればあるほど、また中間層セル数が多ければ多いほど起こりやすい。以上のようなことを踏まえると、大規模なBPネットワークから知識を抽出する際に、KTアルゴリズムをを適用するには、このようなルール前件部が不完全になるものに対する改善策が必須である。

4.1 具体的なアルゴリズム

このルール抽出の手段としてまず考えられるのが、例外的な前件部数“k”の増加が考えられる。しかしながらこの方法を用いた場合、先ほどのネットワーク構造により起こるルール全件部の不完全化を起こした中間層セルから、ルールを抽出することはできない。

このネットワーク構造により起こる前件部の不完全化は、中間層セルにおける重みが閾値の値を越えないことに問題がある。このルールが抽出されない中間層セルから中途半端でもうまくルールを抽出させれば、ルール合成を行なった際に,他のルールと補い合い、正しいルールとなり得ることが考えられる。であるから、他の手法として考えられるものとして、ルール抽出時におけるその対象となる中間層セルの閾値の例外的な一定値減少（または、増加）がある。以下がその具体的なアルゴリズムである。

1. ルールが抽出されない中間層セルと衝突
2. 与えられたネットワークの重み及び、閾値情報よりネットワークを再構築
3. 新たなルールを獲得するまでその中間層セルの閾値の一定値減少（または増加）
4. 抽出されたルールを用いて出力層とのルールを合成
5. 再構築したネットワークに合成されたルールを当てはめる。
   （この時、ルールと関係のない入力は0.5とする）
   ルール前件部が矛盾しておらず、また、出力結果が教師データと一致し、正しいルールとして判断された場合は終了。
   そうでない場合は3に戻る。

また、減少（増加）させた閾値の値が、もとの値の$\frac{1}{3}$以下（3倍以上）になった場合、強制的に終了し、その中間層セルを含んでいるルールは破棄する。

4.2 実験 I

今回、上記の手法の動作原理を確認するため、人間に解析可能な簡単な3層BPネットワーク（5 bit adder: 入力層5: 中間層8: 出力層3）に適応させた。

I_0	I_1	I_2	I_3	I_4	O_0	O_1	O_2
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	1	0	0	1	0
⋮				⋮			⋮
1	1	1	0	1	1	0	0
1	1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	1	1	1	0	1

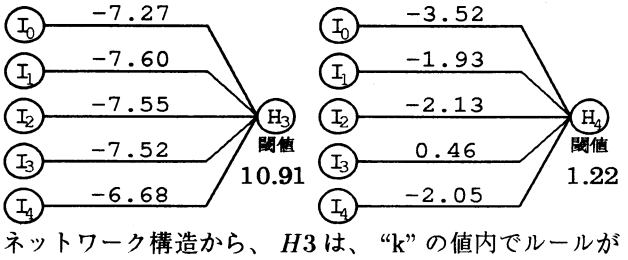
4.2.1 実験結果

"k" の値を各層間で 3 とした場合の実験の結果、中間層セルのいくつかでルールが抽出されなかった。このような状態で、ルール前件部が、不完全になるものの例として、出力層セル $O2$ において

IF $H3$ and $H4$ and not $H7$ THEN $O2$
IF $H3$ and not $H5$ and not $H7$ THEN $O2$

というルールが抽出された。この 2 つのルールにおいて前件部の中間層セル $H3$ 及び、$H4$ においてルールが抽出されなかった。

このまま、ルール合成を行なうと、$H3$、$H4$ でのルール前件部が不完全になり、これらのルールを破棄しなければならなくなる。そこで、先ほどのアルゴリズムが用いられ、$H3$、$H4$ のルール作成が試みられる。以下が、$H3$ と $H4$ の各入力層セルとの重みである。



ネットワーク構造から、$H3$ は、"k" の値内でルールが抽出されないもの、$H4$ は、重み合計値が閾値を越えないためにルールが抽出されないものとわかる。以上のネットワークから、$H3$、及び $H4$ において、閾値を 5% 毎増加して得られるルールの過程である。

< $H3$ >

増加率(%)	抽出されたルール	正誤
5	−	−
10	−	−
15	−	−
⋮	⋮	⋮
25	−	−
30	IF not I1 and not I2 and not I3 THEN H3	×
35	IF not I0 and not I1 and not I2 THEN H3	○

< $H4$ >

増加率(%)	抽出されたルール	正誤
5	−	−
10	−	−
15	−	−
⋮	⋮	⋮
285	−	−
290	IF I3 and not I0 and not I2 THEN H4	○

この結果、これらのルールを用いて以下のようなルールが合成される。

IF $I3$ and not $I0$ and not $I1$ and not $I2$ and not $I4$ THEN $O2$

4.3 実験 II

実際の現実問題である肝臓疾患データを学習した BP ネットワーク（入力層数 10: 中間層数 20: 出力層 4:）に、以上のアルゴリズムを適応させた。

その結果、5 つの中間層セルでルールが抽出されず、これらにおいて 4 つのセルでルールの抽出が必要となった。その中から 3 つのセルに対してルールの抽出に成功し、このことにより、ルールを 6 つ抽出した。

5 考察

ネットワーク構造により、ルールが取り出せない中間層セルから、ルールを得る際に、その閾値の最終的な減少率（増加率）は、非常に大きくなり、かなりの計算時間を必要とする。さらに、その上限をもとの値の $\frac{1}{3}$ 以下（3 倍以上）としているが、実験 II において、このアルゴリズムを用いてもルールを抽出できない原因は、この上限を越えなければルールが抽出されないためである。

このことを防ぐため、対象となるセルにおいて、最初に抽出されるルールを一意に求め、その後閾値を減少（増加）させるなどの改良が必要である。

参考文献

[1] LiMin Fu :"Rule Generation from NeuralNetworks", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND, CYBERNETICS.VOL.24,NO.8,pp.1114-1124 AUGUST 1994

連絡先

〒 214-71 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科
林 陽一
Tel.044-934-7475 Fax.044-934-7912
E-mail:hayashiy@cs.meiji.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEB4-1

中央値の移動とルール生成を含むファジィモデリング

A Fuzzy Modelling with a Movement of Central value and Generation of Fuzzy Inference Rules

太田幸宏　　正　小林俊一

Yukihiro Ohta　　Toshikazu Kobayashi

信州大学繊維学部

Faculty of Textile Science and Technology , Shinshu University

In this paper, a fuzzy modeling for identification of nonliner system is proposed. This method has two modes. One is an adjustment of consequent part, and another is an adjustment of antecedent part. In the first mode, the steepest descent method updates consequent real number with the inference error. In the second mode, it is composed of the movement of central value in membership function and the generation of fuzzy inference rules. Changing mode is depends on the decrease of inference error at the learning. The movement of central value and the generation of rule aim at the maximum error becoming smaller than the desired accuracy. In order to prove the effectiveness by the proposed method, some numerical examples are reported.

1．はじめに

我々の身の回りにあるもののほとんどは入出力関係が非線形なものであり，この非線形系の同定法の1手法としてファジィ推論が用いられる．これはファジィモデリングといい，非線形システムより得られる入出力データからファジィ推論ルールを用いて系をモデル化する方法である．この方法の一つに推論誤差を評価規範として最急降下法に基づきパラメータ調整する方法がある[1,2]．

本論文では，簡略化ファジィ推論を用いて，推論誤差から後件部実数値を調整しながら，メンバーシップ関数の中央値の移動または新たなルールを生成して，対象の同定に必要なルール数を持つファジィ推論ルールを自動的に獲得する手法を提案する．

以下，2 章で提案する同定法の説明を行い，3 章で数値例を用いて提案手法の有効性を示す．

2．同定手順

2－1 ファジィモデル

本手法では，後件部を実数値で記述する簡略化ファジィ推論を用いる．入力変数を $x_i\,(i=1,\cdots,n)$，出力を y とすると，ファジィ推論ルールは次のように記述できる．

R_k: IF x_1 is A_{1j}^1 and x_2 is A_{2j}^2 and $\cdots$ and x_n is A_{nj}^n THEN y is w_k

ただし，$A_{ij}^i\,(j^i=0,1,\cdots,m^i)$ は入力変数 x_i のファジィ集合，$w_k\,(k=0,1,\cdots,N-1)$ は後件部の実数値で，添字 k はルール番号，j^i は入力変数 x_i のファジィ集合に付けた番号で N はルールの総数である．

前件部メンバーシップ関数の形状は三角，台形型を用い，メンバーシップ関数 $A_{ij}^i(x_i)$ は台形型の場合式(1)で与えられる．

$$A_{ij}^i(x_i)=\begin{cases}\dfrac{x_i-b_{ij-1}^i}{a_{ij}^i-b_{ij-1}^i} & \left(b_{ij-1}^i<x_i<a_{ij}^i\right)\\ 1 & \left(a_{ij}^i\le x_i\le b_{ij}^i\right)\\ \dfrac{x_i-a_{ij+1}^i}{b_{ij}^i-a_{ij+1}^i} & \left(b_{ij}^i<x_i<a_{ij+1}^i\right)\\ 0 & \left(x_i<b_{ij-1}^i\,,\ a_{ij+1}^i<x_i\right)\end{cases}\qquad(1)$$

ただし，a_{ij}^i は左頂点，b_{ij}^i は右頂点を表しており，隣り合うメンバーシップ関数のメンバーシップ値の和は1となる．

k 番目のルール前件部の適合度を代数積を用いて式(2)で与える．

$$\mu_k=A_{1j}^1(x_1)\cdot A_{2j}^2(x_2)\cdot\cdots\cdot A_{nj}^n(x_n)\qquad(2)$$

前件部の適合度の総和 $\sum\mu_k=1$ となるので，ファジィ推論の出力 y_p^* は重心法を用いるので式(3)のよ

うになる.

$$y_p^* = \sum_{k=0}^{N-1} \mu_k \cdot w_k \qquad (3)$$

2－2 後件部の調整

推論誤差から最急降下法に基づき,式(4)により後件部実数値を更新する.

$$w_k^{new} = w_k^{old} - K_w \cdot \mu_k \cdot \left(y_p^* - y_p^r\right) \qquad (4)$$

ただし, w_k^{old}, w_k^{new} はそれぞれ更新前後の後件部の実数値, K_w は学習係数, μ_k は適合度, y_p^* はp番目の入力データに対するファジィ推論の出力で y_p^r はそのときの系の出力を表す. 後件部値の調整は式(5)で示す $E(t)$ が目標精度 T_1 を満たすまで行う.

$$E(t) = \frac{1}{Nd}\sum_{p=1}^{Nd}\left|y_p^* - y_p^r\right| \qquad (5)$$

ただし, Nd はサンプル点数, t は学習回数を表す. 後件部実数値の調整を繰り返しても推論誤差が減少しなくなった場合に, 中央値の移動, 新規ルール生成のモードに移行する. 具体的には式(6)で表される推論誤差の変化量が閾値 T_2 以下になった場合に移行する.

$$\Delta E(t) = \left|E(t) - E(t-1)\right| \qquad (6)$$

2－3 前件部の調整

前件部の調整の中には, メンバーシップ関数の中央値の移動と新規ファジィ推論ルールの生成の2つに大別できる.

2－3－1 中央値の移動

推論誤差が最大となる入力点(x_i)が, 隣り合うメンバーシップ関数を形成する領域にある場合(図1)に, 最大誤差点での推論誤差が減少する方向にメンバーシップ関数の中央値を移動させる. 移動する方向は最大誤差点における系の出力と領域を形成するメンバーシップ関数を持つルールの後件部の実数値から決定する. 中央値は式(7)～(8)に従って更新する.

$w_k < y_p < w_{k+1}$ の場合

$$b_{ij}^i(t+1) = b_{ij}^i(t) + K_a \cdot \left(y^* - y^r\right)\frac{a_{ij+1}^i - x_i}{a_{ij+1}^i - b_{ij}^i}$$

$$a_{ij+1}^i(t+1) = a_{ij+1}^i(t) + K_a \cdot \left(y^* - y^r\right)\frac{x_i - b_{ij}^i}{a_{ij+1}^i - b_{ij}^i} \qquad (7)$$

$w_{k+1} < y_p < w_k$ の場合

$$b_{ij}^i(t+1) = b_{ij}^i(t) + K_a \cdot \left(y^* - y^r\right)\frac{x_i - a_{ij+1}^i}{a_{ij+1}^i - b_{ij}^i}$$

$$a_{ij+1}^i(t+1) = a_{ij+1}^i(t) + K_a \cdot \left(y^* - y^r\right)\frac{b_{ij}^i - x_i}{a_{ij+1}^i - b_{ij}^i} \qquad (8)$$

ただし, K_a は学習係数である.

その他の場合

新しくルール生成を行う.

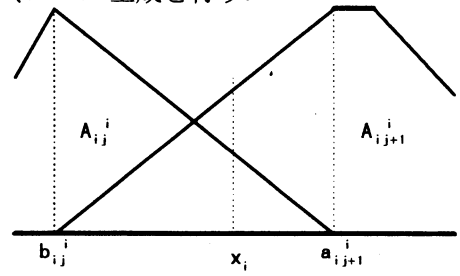


図1 最大誤差点 x_i 周辺のメンバーシップ関数

2－3－2 新規ファジィ推論ルールの生成

中央値の移動を繰り返し行っても, 推論誤差の減少率がある値以下になった場合, もしくは上記の条件以外の場合に新規ファジィ推論ルールの生成を行う. 新たに生成されるルールの前件部メンバーシップ関数は, 最大誤差点を頂点となるように設置され, 後件部の実数値には系の出力が設定される.

また中央値の移動によってメンバーシップ関数の形状が台形で, 適合度が1の区間で最大誤差を生じた場合は, メンバーシップ関数の分割を行う. 分割数は最大誤差点の位置によって異なる. 分割によって最大誤差点が中央値となるメンバーシップ関数を持つルールの後件部の実数値には, 系の出力が設定され, 他のルールの後件部には分割前の値が設定される.

メンバーシップ関数の形状が三角型で, 最大誤差点と中央値が重なった場合は, ルールの後件部の実数値をその点の系の出力に置き換える. このように後件部の実数値を系の出力に置き換えた場合には, 該当する推論ルールは記憶され, そのルールの前件部メンバーシップ関数の中央値の移動が起こらない

限り，後件部調整の対象としない．

以上の前件部調整と後件部調整によりファジィ推論ルールを獲得する手順を，**図２**のフロチャートに示す．

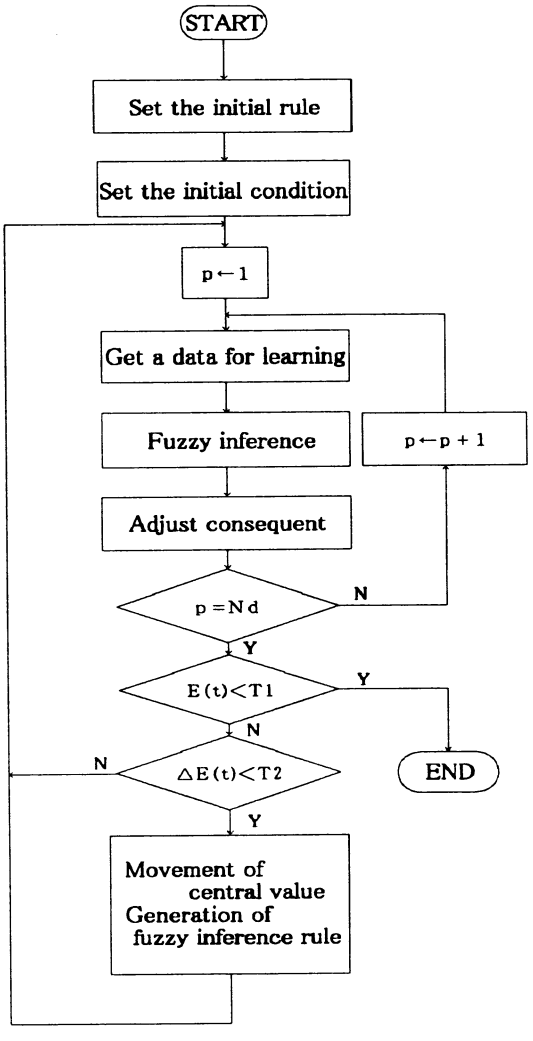


図２　フローチャート

３．数値例

入力をｘ，出力をｙとして次の数式で表される入出力関係を同定することにより，提案手法の有効性を示す．

$$\text{関数１}：y=\begin{cases}-x & -1\le x\le 0\\ x^2 & 0\le x\le 1\end{cases} \qquad (9)$$

$$\text{関数２}：\left|2^{-3/2}(1.27x+0.27)^2(1-(1.27x+0.27))^{3/2}\right| \quad -1\le x\le 1 \qquad (10)$$

$$\text{関数３}：y=\begin{cases}-x & -1\le x\le 0\\ 1.5x^2 & 0\le x\le 1\end{cases} \qquad (11)$$

ただし，関数３は値域を[0, 1]とする．

上記３関数の入出力関係を**図３**に示す．

また同定には，初期ルール数を２個としルールの後件部実数値を 0.0 として行い，目標精度は関数１と関数３は 0.005，関数２を 0.007 とする．

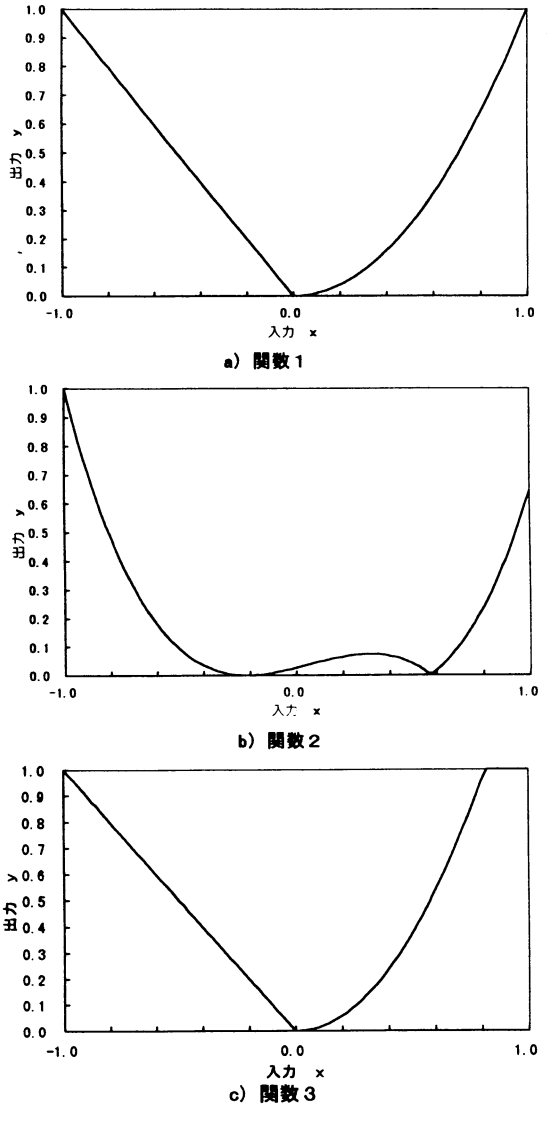


図３　同定対象の入出力関係

数値実験にサンプル点として 43 点，81 点を等間隔に取ったデータを使用する．結果を**表１～３**に示す．

表１　関数１の同定結果

手法	提案法		従来法	
Ｋａ	0.1		—	
Ｋｗ	0.1			
サンプル点	43	81	43	81
学習回数	14	13	30	23
ルール数	7	7	6	6
平均誤差	0.003857	0.004232	0.004296	0.004094
最大誤差	0.014171	0.015622	0.021210	0.018359

表２　関数２の同定結果

手法	提案法		従来法	
Ｋａ	0.05		—	
Ｋｗ	0.5			
サンプル点	43	81	43	81
学習回数	28	25	33	40
ルール数	13	13	16	16
平均誤差	0.006767	0.006239	0.007540	0.007318
最大誤差	0.017540	0.016745	0.043211	0.051147

表３　関数３の同定結果

手法	提案法		従来法	
Ｋａ	0.1		—	
Ｋｗ	0.1			
サンプル点	43	81	43	81
学習回数	26	19	40	36
ルール数	6	6	13	8
平均誤差	0.004604	0.004519	0.005550	0.004926
最大誤差	0.025116	0.028360	0.045230	0.021048

ただし，Ｋａ，Ｋｗは学習係数で，平均誤差，最大誤差は定義域を 150 点に当分割したデータで求めたものである．ここでの従来法とは，ARAKI らの文献[1]である．

表１～３を考察すると，提案法は学習回数，生成ルール数共に抑制されており，汎化能力も従来法にひけを取らないことが確認できる．関数１と３について提案法により獲得したメンバーシップ関数を図４に示す．系が１を示すところで提案法は台形型のメンバーシップ関数となり，関数１の生成ルール数に比べ関数３のルール数は１つ少なくなっているのが分かる．しかし，従来法は関数１の生成ルール数は６個と提案法に比べて少ないのに対して，関数３では関数１のルール数より多く生成しているのが確認できる．これはルール生成領域の中間点を中央値とするようにルール生成を行う手法は，対象関数がある程度の対称性を持っているものに対して有効であり，そうでないものに対しては効率よくルールを配置できていないことを示していると考える．この事は関数２の結果からも確認できる．

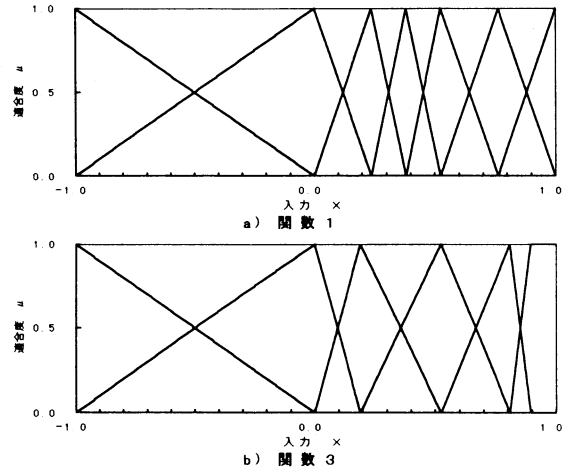


図４　獲得したメンバーシップ関数

４．結論

本論文では，中央値の移動とルール生成を含むファジィモデリングの一案を述べた．また，３つの関数の同定を行い，従来法と比較することで提案法の有効性を示した．

今後は，提案法の利点である学習回数が少ないことを利用して，時変系の制御器の設計に応用していきたい．

参考文献

1) Shoichi ARAKI, Hiroyoshi NOMURA, Isao HAYASHI: SELF-GENERATION METHOD OF FUZZY INFERENCE RULES, Fuzzy Engineering Toward Human Friendly Systems IFES'91 pp. 1047-1058

2) 石 岩, 水本雅晴, 湯場崎直養, 大谷正幸:ニューロ・ファジィ学習アルゴリズムによるファジィ規則の一生成法，日本ファジィ学会誌 Vol8, No4, pp. 695-705 (1996)

[問い合わせ先]
〒386　長野県上田市常田 3-15-1
信州大学繊維学部機能機械学科
電子機械学講座
太田 幸宏(YUKIHIRO Ohta)
TEL　:0268(21)5437
FAX　:0268(21)5321(共用)
E-mail　: f924007@giptc.shinshu-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEB4-2

ファジィモデリングにおけるメンバーシップ関数配置に関する一提案

A Proposal of Allocation of Membership Functions for Fuzzy Modeling

○橘 完太
Kanta Tachibana
名古屋大学
Nagoya University

長谷川 貴史
Takashi Hasegawa
名古屋大学
Nagoya University

古橋 武
Takeshi Furuhashi
名古屋大学
Nagoya University

内川 嘉樹
Yoshiki Uchikawa
名古屋大学
Nagoya University

藤目 葉子
Youko Fujime
ヤマハ発動機株式会社
Yamaha Motor Co., Ltd.

山口 昌志
Masashi Yamaguchi
ヤマハ発動機株式会社
Yamaha Motor Co., Ltd.

Abstract : Fuzzy modeling is a process to identify input-output relationship of object system. The main problems of fuzzy modeling are determination of number of membership functions for each input, and tuning of membership functions, and so on. This paper presents a method to allocate membership functions for each input. The membership functions are unevenly allocated on the universe of discourse by the proposed method. This method is to insert new membership functions in the subspace with the maximum error and to delete useless rules which just linearly interpolate neighboring rules. This method is applied to the simplified fuzzy inference which uses singletons in the consequent parts. Experiments are done to show the feasibility of the proposed method.

1 はじめに

ファジィモデリングは非線形対象の入出力関係をファジィルールにより記述する手法である。ファジィニューラルネットワーク (Fuzzy Neural Network: FNN) [1]はファジィモデルをニューラルネットワークの学習機能により自動獲得できる。FNN によるファジィモデリングが非線形対象のモデリング手法として優れている点は，非線形写像能力が高いことはもちろんであるが，モデルの再学習を入力空間の部分領域ごとに行うことができること，ルール間の補間を滑らかに行うことができることが挙げられる。FNN によるファジィモデリングの大きな課題に，メンバーシップ関数の設定手法の確立がある。これまでは，誤差の大きなところにラジアル基底関数を生成する手法 [2]，内点ペナルティ法により三角型メンバシップ関数の頂点を移動させる方法 [3]，遺伝的アルゴリズムにより探索する手法 [4, 5]が提案されている。しかし，文献 [2] の手法ではモデルの精度が追及され，ルール間の滑らかな補間は考慮されていない。文献 [3] では，メンバーシップ関数の不均等な配置を実現できるが，メンバーシップ関数の数は設計者が事前に与えなければならない。また，遺伝的アルゴリズムによる探索は時間がかかってしまう。

本論文ではルール間の補間を滑らかに行うことのできる FNN を用い，高速にメンバーシップ関数の増減を行う手法を提案する。本手法では，要求精度を満たすように FNN の学習がなされ，その過程においてメンバーシップ関数が対象の非線形性に応じて不均等に前件部台集合上に配置される。実験を行い本手法の有用性を示す。

2 提案手法

2.1 FNNによるファジィモデリングの問題点

FNNは，学習をはじめる前に入力空間の分割の仕方を決めなければならない。この分割の仕方が，学習の性能を大きく左右する。FNNは，メンバーシップ関数の形状を学習により調整する機能を有するが，メンバーシップ関数の位置を大きく推移させることは難しい。

このため，学習をはじめる前に，メンバーシップ関数の数と配置位置を試行錯誤により決めなければならないという問題があった。

2.2 メンバーシップ関数の増減手法

FNNの学習の過程に，メンバーシップ関数を生成・削除するステップを導入する。図1に，本手法の流れ図を示す。メンバーシップ関数増減を，評価基準により決定している。

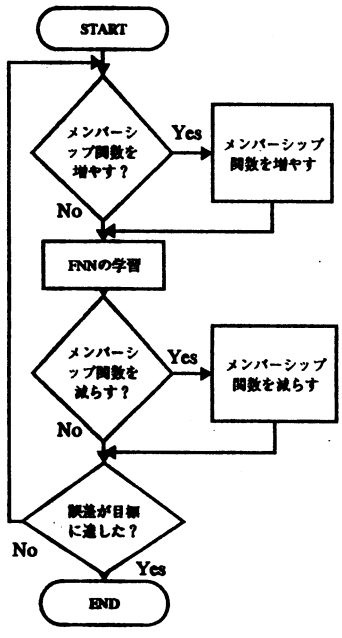


図 1: 流れ図

2.3 メンバーシップ関数の生成

2.3.1 メンバーシップ関数生成の判断基準

ルール数を増やすかどうかの判断基準は，学習が順調に進んでいるかどうかである。学習が順調に進んでいることは，対象の非線型性を吸収するためにメンバーシップ関数が充分に用意されていることを意味し，それ以上メンバーシップ関数を増やす必要はない。学習が順調に進んでいなければ，メンバーシップ関数の数が足りないと判断し，メンバーシップ関数を増やす。

具体的には次のように判断する。N個のデータを用いたt回目の学習において，平均誤差$E(t)$を次のように計算する。

$$E(t) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} e(n,t) \tag{1}$$

ここで，$e(n,t)$はn個目のデータに対する誤差である。もし，

$$E(t) < \alpha E(t-1) \tag{2}$$

であれば，学習が順調に進んでいると判断され，メンバーシップ関数の作成は行わない。ここで，αは$\alpha < 1$である実数値である。
一方，

$$E(t) \geq \alpha E(t-1) \tag{3}$$

である場合には，メンバーシップ関数追加の必要ありと判断する。

2.3.2 メンバーシップ関数の作成手法

メンバーシップ関数を増やすという判断がなされた時，新たなメンバーシップ関数は誤差が最大であるところに付け加える。メンバーシップ関数追加と判断された直前の学習において，誤差が最大であったデータの入力を各入力変数に投影し，そこにメンバーシップ関数がなければ，そこを頂点とするメンバーシップ関数を新たに加える。

誤差が最大になる点を各入力変数に投影した時，どの入力変数においても既にメンバーシップ関数があれば，2番目に誤差の大きなデータの入力を用いてメンバーシップ関数を追加する。2番目のデータでもメンバーシップ関数の追加が行なえなければ，3番目を用いる。

2.4 メンバーシップ関数の削除

メンバーシップ関数を削除するかどうかの判断基準は後件部の線形性を利用する。3つ以上のルールで線形補間がなされる時，真ん中のルールは不要である。最も単純な場合として入力変数が1つのときには次式によって判断する。

$$w_{f_k} - w^{\star}_{f_k} \leq \beta \tag{4}$$

ここで，w_{f_k}はk番目のルールの後件部シングルトンである。βは，後件部の値がとり得る範囲に対

して，充分に小さな実数である。また，$w^{\star}_{f_k}$ は両隣のルールの後件部によって線形補間した値であり，次式で表される。

$$w^{\star}_{f_k} = \frac{p(k)-p(k-1)}{p(k+1)-p(k-1)}\left(w_{f_{k+1}} - w_{f_{k-1}}\right) \tag{5}$$

ただし，$p(k)$ は k番目のルールに対応するメンバーシップ関数の中心位置であり，番号 kの大小関係は入力の大小関係に対応している。

入力変数が2つ以上で，あるメンバーシップ関数が複数のルールに対応している場合は，それらのすべてのルールが不必要と判断される場合に，メンバーシップ関数を削除する。

一例として，二つの入力変数 x_1, x_2があり，それぞれ L個，M個のメンバーシップ関数を持っている場合を考える。まず，x_1軸上の l番目のメンバーシップ関数に注目する。x_1軸上の l番目のメンバーシップ関数と x_2軸上の m 番目のメンバーシップ関数で表されるルールをルール lm と呼び，ルール lm の後件部の値を $w_{f_{l\cdot m}}$と書き表すことにすると，

$$w_{f_{l\cdot m}} - w^{\star}_{f_{l\cdot m}} \leq \beta \tag{6}$$

である場合に，ルール lm が不必要であると判断する。2入力の場合 $w^{\star}_{f_{l\cdot m}}$は次式で表される。

$$w^{\star}_{f_{l\cdot m}} = \frac{p(l)-p(l-1)}{p(l+1)-p(l-1)}\left(w_{f_{(l+1)\cdot m}} - w_{f_{(l-1)\cdot m}}\right) \tag{7}$$

ここで，$p(l)$ は x_1軸上の l番めのメンバーシップ関数の頂点の位置である。以上の計算をルール $l1$ からルール lMまで行ない，すべてのルールが不必要であると判断された場合に，x_1軸上の l番めのメンバーシップ関数を削除する。

この作業を x_1軸上の $L-2$ 個のメンバーシップ関数に対して行ない，さらに，x_2軸上の $M-2$ 個のメンバーシップ関数に対しても同様に計算し，不必要なメンバーシップ関数を取り除く。L 個 M 個とせずに $L-2$ 個，$M-2$ 個としたのは両端のメンバーシップ関数は削除されないからである。

3 基礎実験

本節では，提案した手法を用いて行なった実験の結果を示す。

3.1 実験1

まず，入力 x と出力 yの関係が次式で表される1入力1出力のデータ群を用いて，実験を行なった。

$$y = \begin{cases} \sin(\pi \cdot x) & (0 \leq x < 0.5 \text{ のとき}) \\ \frac{1}{2}\left(\sin(5\pi \cdot x)+1\right) & (0.5 \leq x \leq 1 \text{ のとき}) \end{cases} \tag{8}$$

x の値を乱数で与え，100個のデータを教師データとして得た。図2の (a) は教師データ，(b) は提案手法を用いて FNN の学習を行ない，得られたモデルの出力を示す。100個の平均の誤差が 0.025 よりも小さくなるまで学習を行ない，学習回数は717回であった。

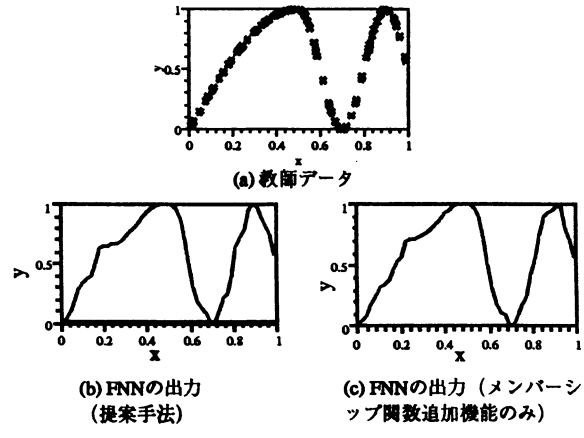


図 2: 実験結果

メンバーシップ関数削除の効果を確かめるために比較対照として，図2(c) に，メンバーシップ関数追加だけを行ない学習した結果を示す。こちらも平均の誤差が 0.025 よりも小さくなるまで学習を行ない，学習回数は919回であった。

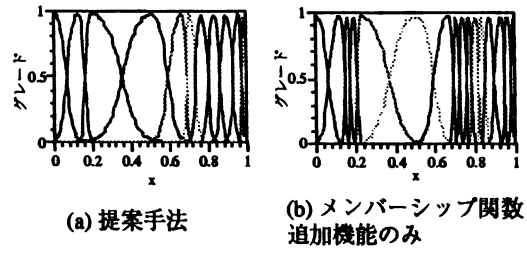


図 3: メンバーシップ関数の配置

図 3(a) に，提案手法により得られたメンバーシップ関数の配置結果を示す。$0 \leq x < 0.5$ の領域に比べて，$0.5 \leq x \leq 1$ の領域に多くのルールが生成されていることがわかる。最終的にルール数は11となった。図 3(b) に，メンバーシップ関数削除を行なわなかった場合のメンバーシップ関数の配置を示す。得られたモデルの出力がほぼ変わらないにも関わらず16個のメンバーシップ関数が生成された。

3.2 実験 2

次に，入力変数が2の場合について実験を行なった。入力 x，yと出力 zとの関係が次式で表されるデータを用いた。

$$z = \left(\max \left(x(1-x)(x+y), \frac{1}{2}(1-x)(1-y) \right) \right)^2 \tag{9}$$

$$0 \leq x \leq 1,\ 0 \leq y \leq 1$$

乱数で x と yを与えて得た300個のデータを用いて学習を行なった。図 4(a) は教師データ，(b) は獲得された入出力曲面を示す。図 4(c) は，メンバーシップ関数追加のみで学習を行なった後の入出力曲面である。

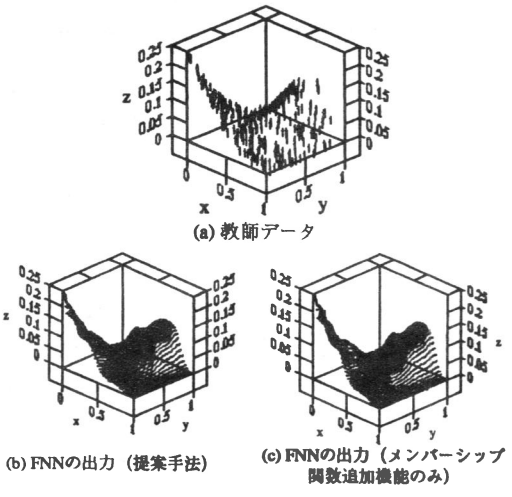


図 4: 実験結果（入出力曲面）

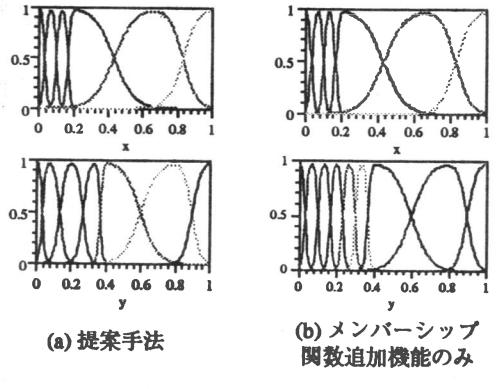


図 5: メンバーシップ関数の配置結果

図 5に，学習後のメンバーシップ関数の配置を示す。(a) はルール追加と削除の両方を行なったもの，(b) はルール追加のみを行なったものである。x 軸上のメンバーシップ関数の配置はどちらも変わりなく，6つのメンバーシップ関数が非線形性に応じて生成されている。y軸上のメンバーシップ関数の数は，本手法では7であるのに対し，メンバーシップ関数を削除しなかった場合では9であった。

4 まとめ

FNNによるファジィモデリングにおいて，メンバーシップ関数を生成・削除して，対象の非線形性に応じたメンバーシップ関数の配置手法を提案した。本手法が，FNNのメンバーシップ関数の配置決定に有効であることを，実験により示した。

参考文献

[1] 堀川，古橋，内川：ファジィニューラルネットワークの構成法と学習法，日本ファジィ学会誌，Vol.4，No.5，pp.906-928 (1992)

[2] 片山，鍬田，梶谷，西田：自己増殖型C∞級ファジィモデルとカオス時系列同定問題への応用，第8回ファジィシステムシンポジウム，pp.253-256 (1992)

[3] 梶谷，片山，西田：ペナルティ法を用いいたファジィ知識の自動獲得，第8回ファジィシステムシンポジウム，pp.257-260 (1992)

[4] 野村，荒木，林，若見：デルタルールによる学習型ファジィ推論 － 遺伝アルゴリズムによる前件部の構造同定 －，第1回 FAN シンポジウム，pp.25-30 (1991)

[5] T. Fukuda, H. Ishigami, T. Shibata, and F. Arai, "Structure Optimization of Fuzzy Neural Network by Genetic Algorithm", Proc. of IFSA'93, pp. 964-967 (1993)

問い合わせ先
〒 464-01 名古屋市千種区不老町
名古屋大学工学部電子情報学科
橘 完太
TEL (052)789-2793 FAX (052)789-3166
e-mail kanta@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEB4-3

A NEW METHOD FOR ESTABLISHING AND SAVING FUZZY MEMBERSHIP FUNCTIONS

Saeed BAGHERI SHOURAKI Nakaji HONDA
University of Electro-Communications,Chofu-Shi,Tokyo 182
e-mail: saeed@fs.cas.uec.ac.jp

Abstract

In this paper a new method for establishing and saving FUZZY membership functions for an unknown system will be introduced.The input identification will be done by using a heuristic FUZZY based method.The system behaviour will be defined according to each input first by using a FUZZY linear prediction coder.The convergence procedure of the linear prediction coder will specify the domain of the membership functions.Then a simple neural network will be used for calibrating the behaviour of the output in each domain and the obtained parameters by the net will be saved in the form of a difference equation.These parameters will also be used for scaling a linear scaled axis wich will define the membership functions.The inference rules will be extracted by observing the exactness of the obtained single input behaviours using a FUZZY method.

Key Words :FUZZY modeling,linear prediction coding,neural networks

1 Introduction

All of the modeling methods those have been invented by human being are similar in the major steps they use.These steps are recognizing the true or the most effective inputs,finding the numerical relationship between the inputs and the output,explaining the numerical relationship in some mathematical way,using the mathematical expressions to calculate the output for different amounts of the inputs,comparing the calculated output with the real output and modifying the mathematical expressions according to the error by using some mathematical criteria.Although these steps seems to be very similar to the human logical thinking,we usually forget the amount and the complexity of the mathematics we use which is most of the times difficult to understand even for educated pepole.Even common FUZZY modeling techniques [1], [2] suffer from the mentioned problem.

In this research we will try to search for a modeling technique which uses a very basic level of mathematics which can be implemented by biological neural networks.At the first steps we will not be interested in the accuracy of the model as we are interested in the simplicity of the algorithm and the mathematics we use.As a matter of fact our point of view will be a hardware point of view where the simplicity and the volume of the required hardware are the most important factors.In this work the words modeling and learning appears to be synonyms and we will ignore the technical differences between these two terms.Our major goal will be introducing a very simple algorithm for learning or modeling which avoids using complicated mathematics and it should have the property of increasing the accuracy and exactness unlimitedly by increasung the number of the times we run the algorithm.The processing hardware should be in the smallest possible form and the results should be saved in the most compact regeneratable form.We will not claim that the proposed algorithm comparing with the others [1], [2] is the best one in any of its features but its simplicity and similarity to human being learning procedure.

2 Modeling algorithm

2.1 properties

Our proposed algorithm for modeling ,or as we call it active learning is shown in figure 1.The most important point which led us to this algorithm is that we believe it is very difficult for human being to memorize the numbers but the general behaviour of the functions.In other words we believe human learning or modeling procedure forms by considering the behaviour of simple systems those are assumed to be single input single output systems first and then the effects of other inputs are considered as deviating effects those will also result in some kind of qualitative understanding of the general behaviour of the system.

From another point of view human learning forms by considering the numerical data those are located on continuous paths and not by considering the

randomly distributed points.generating the numerical outputs is an adaptive procedure which forms by calibrating the general behaviour at the final step.Usually only the general extracted system behaviours will be saved and numerical saving will be done only in special expert cases.

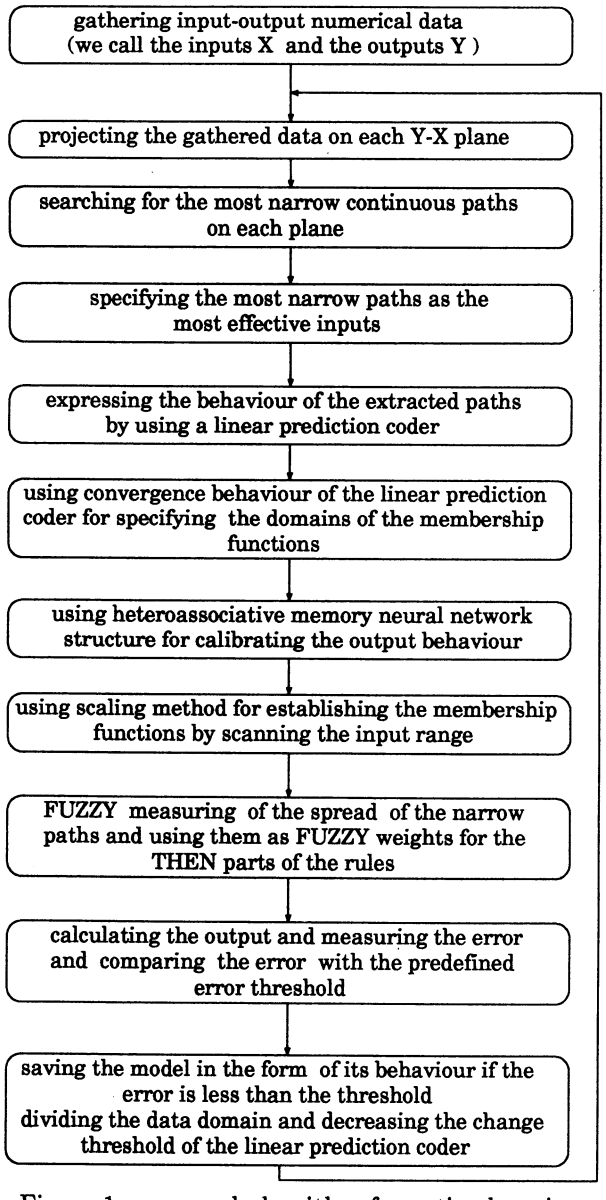


Figure 1: proposed algorithm for active learning

2.2 algorithm explanation

According to our point of view for specifying the most effective inputs we will try to recognize which of the inputs are able to provide the most narrow continuous path for the output parameter.For this purpose at the first step we project all of the measured data on the X-Y planes where X stands for each of the inputs and Y stands for the output.In other words we are trying to imagine that the system is a single input single output one.If the system was really a SISO one then the projected data would provide a narrow unique path.We relates the spread of the data on each plane to the effects of other inputs.

To clarify the first steps of the algorithm we will use the data used by Sugeno and Yasukawa [1] extracted from a two input single output nonlinear static system and two other dummy inputs.First we project all of the data on each X-Y plane.The results are shown in figures 2 to 5.In this step no obvious path can be recognized on any of the planes.

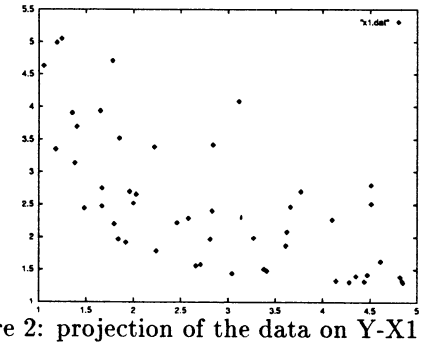


Figure 2: projection of the data on Y-X1 plane

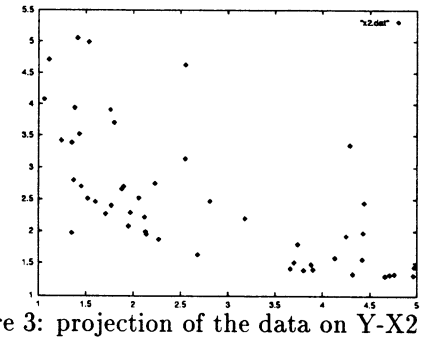


Figure 3: projection of the data on Y-X2 plane

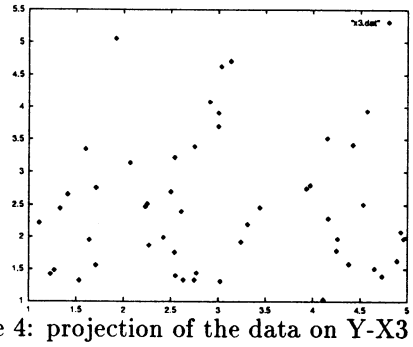


Figure 4: projection of the data on Y-X3 plane

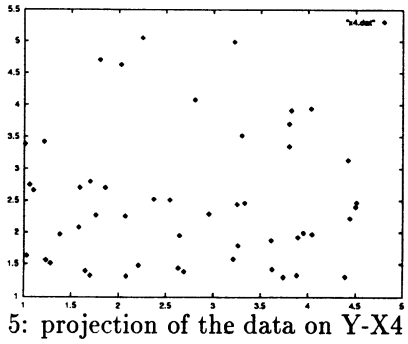


Figure 5: projection of the data on Y-X4 plane

Now we introduce a FUZZY algorithm which will be called as ink drop method to search for continuous possible paths those connect seperate data

points to each other.In this method we assume that each point is a light source which has a cone shape beam width.As the vertical distance from these light sources increases the beams will interfere forming new bright areas.The concept is illustrated in figure 6 where we have used pyramids instead of cones.The projection of the process on the plane is called the ink drop spread.We assume the pyramids as the FUZZY membership functions of the data points and new points.Then by applying the center of gravity method we extract the paths.Because of providing a visual sense of what happens we have connected the data points as is illustrated in figures 7 to 10.

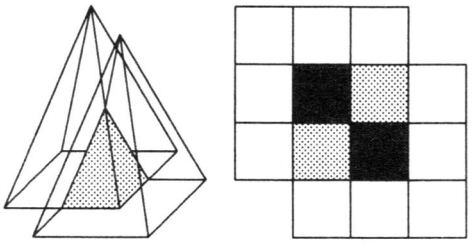


Figure 6: ink drop spread and FUZZY membership functions

It should be noticed that by this algorithm we are reducing the resolution.The criteria for choosing the narrow path is the rate of the variance of the membership degree of neighbor points which shows the first and the second input are the most effective ones.

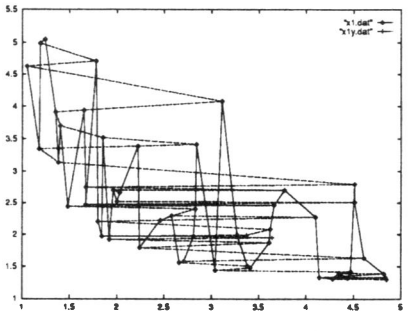


Figure 7: ink drop on Y-X1 plane

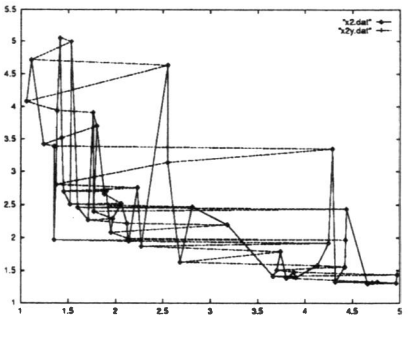


Figure 8: ink drop on Y-X2 plane

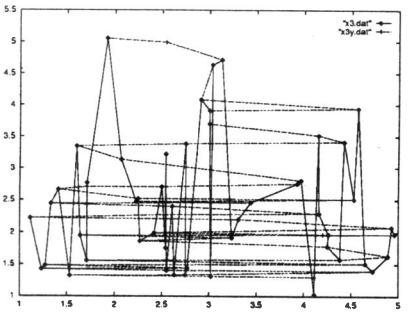


Figure 9: ink drop on Y-X3 plane

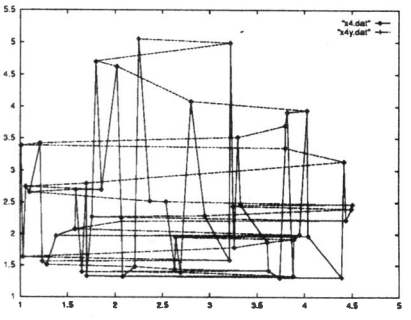


Figure 10: ink drop on Y-X4 plane

In this example which is cho sen to clarify the last step of the algorithm also,it seems that even now we can not express the behaviour of the output according to each input.Therefore at the last step of the algorithm it is decided to divide the data domain and going to the second step of the algorithm.We use two triangular membership functions for each input variable to divide its domain to small and big.The results of the second execution of the ink drop algorithm are shown in figures 11 to 14 those shows we only need two FUZZY rule at the first output calculation step for big values of X1 and big values of X2.In order to show the behaviour recognition procedure we will use the data used by Takagi and Sugeno [2].The result of the ink drop algorithm and the obtained most narrow path are shown in figures 15 and 16.A Cichoki network [3] will serve as the neural linear prediction coder.The convergence areas of the network are shown in figure 17 which specifies we will need at least tree seperate domain for defining membership functions by scaling method.Now the only remaining steps are saving the L.P.C coefficients in heteroassociative memory neural network structure and scaling triangular membership functions in the obtained domains by using the mentioned memory.Then the FUZZY rules will be as below:

if : X1 is A, and X2 is B, ...
then : Y is sU, or tV, ...

where s and t are FUZZY numbers expressing the variance of the membership degree of the neighbor points of the most narrow path.

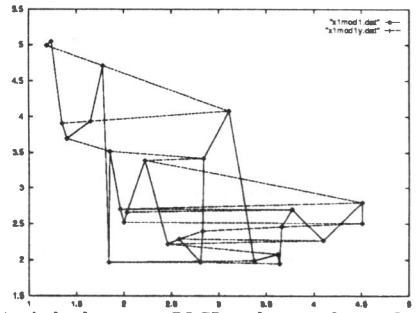


Figure 11: ink drop on Y-X1 plane when X2 is small

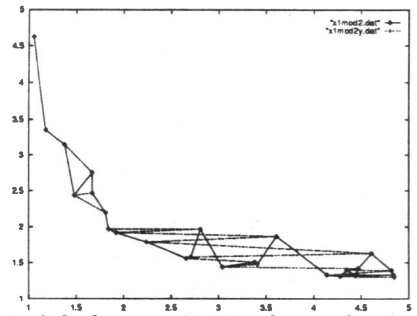


Figure 12: ink drop on Y-X1 plane when X2 is big

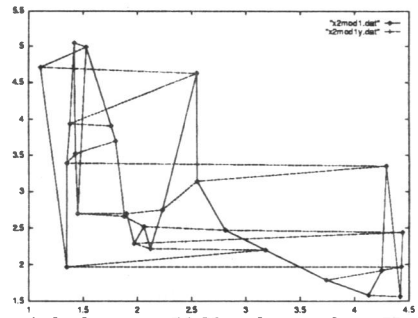


Figure 13: ink drop on Y-X2 plane when X1 is small

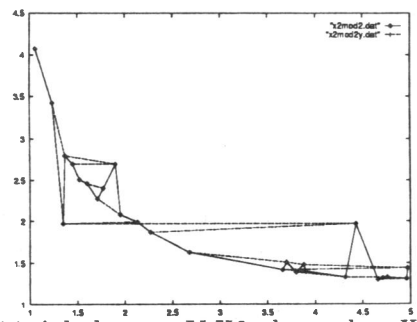


Figure 14: ink drop on Y-X2 plane when X1 is big

3 Conclusion

In this research we have introduced a FUZZY based learning algorithm which uses a very basic level of mathematics and can be implemented by biological neural networks.The main concept of the algorithm is learning the behaviour of SISO systems on the extracted paths and combining the effects of the inputs by using FUZZY rules.The algorithm has the capability of increasing the model accuracy by increasing the times it is run.The obtained results for two different data sets in the first run has been almost the same with the obtained results in [1] and [2].

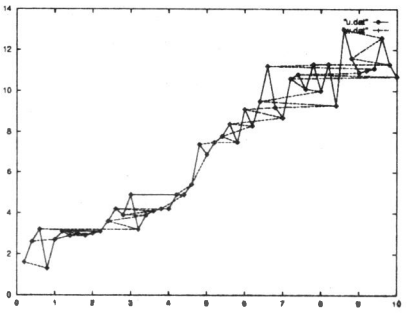


Figure 15: ink drop projection

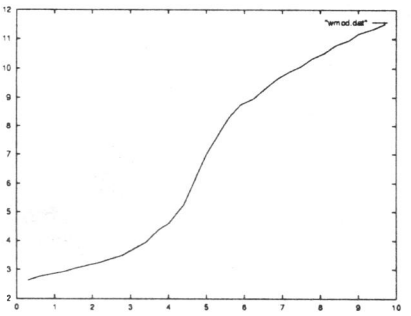


Figure 16: extracted most narrow path

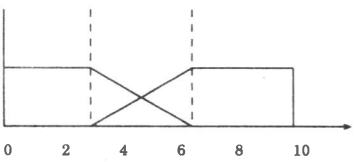


Figure 17: L.P.C convergence behaviour and membership functions domains

References

[1] Michio SUGENO, Takahiro YASUKAWA:
A Fuzzy-Logic Based Approach to Qualitative Modeling
IEEE transactions on fuzzy systems, Vol.1, No.1, February 1993

[2] Tomohiro TAKAGI, Michio SUGENO:
Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control
IEEE transactions on systems,man,and cybernetics, Vol.SMC-15, No.1, January/February 1985

[3] Andrzej CICHOCKI, Rolf UNBEHAUEN:
Neural Networks for Solving Systems of Linear Equations and Related Problems
IEEE transactions on circuits and systems: fundamental theory and applications, Vol.39, No.2, February 1992

WEC1-1

ファジィ特徴量による注視点フィードバックファジィ階層化車名認識

Car Name Identification System using FHPR/FF with Fuzzy Features

○関口　悟朗、荒井　良徳、　廣田　薫
Goro SEKIGUCHI, Yoshinori ARAI, Kaoru HIROTA
東京工芸大学、　東京工業大学
Tokyo Institute of Polytechnics, Tokyo Institute of Technology

abstract

The system that can identfy a car name from image data is proposed by using FHPR/FF (Fuzzy Hierarchical Pattern Recognition using Fixation Feedback) method with Fuzzy Features. The experiments that used image data of fifteen kinds of minicars taken from several directions are done to confirm the efficiency of the proposed method under the existance of insufficiant number of features.

1．はじめに

車の認識技術は多数研究されているが、未だに車名を推論するシステムは報告されていない。その理由として、慣れた人間の目では分かる個々の車の違いを計算機で識別する手法が確立されていないこと、同一の車名であっても車両毎に微妙な違いがあり、その区別にかなり高度な知識が必要なこと等があげられる。

これらの問題を考慮した場合、パターンマッチング法ではなくFuzzy推論を用いた注視点フィードバックファジィ階層化パターン認識: FHPR/FF (Fuzzy Hierarchical Pattern Recognition using Fixation Feedback)[1][2]が有効と考えられる。この方法を用いれば高度な画像処理技術を用いることなく、ある程度曖昧な情報が含まれた入力画像データでも、特徴量を無駄なく選択しながら効率良く車名を推論することができる。しかし、実際には抽出された特徴量のデータが必ずしも信頼できるとは限らなかった。そこでここでは、信頼を意味する情報を持たせ推論する際に考慮して、ある程度不正確な特徴量でも推論が行えるように改良を行う。

このファジィ特徴量を用いて車の向きに異存しない車名までも認識する、FHPR/FF車名認識システムを構築し、実験を行った結果について報告する。

2．システムの概要

本稿での車名を認識するシステムはSun SS5によって実現されている。このシステムの処理の流れを図1に示す。

まず、前処理では車の特徴を抽出しやすくするために簡単な画像処理を施し、2値化、背景除去等の処理を行う。

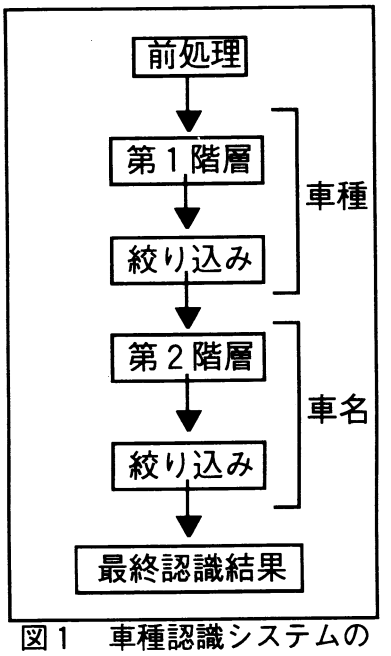


図1　車種認識システムの処理の流れ

本システムでは細かい特徴を必要とせず、大ざっぱな特徴部分を用いて認識を行う。そのために、精度の良い画像処理技術や、複雑な計算を用いる画像処理技術は必要ではない。また、本システムでは多方向でも認識が行えるような特徴量を用いた。実際にいかなる車にも存在する車のホイルベースの長さを基準にし、ホイルベースの長さとの比率を特徴量としている。例えば、屋根の長さ、ボンネットの長さ等はホイルベースの長さの比率を用いた。表1に、本システムで用意した全ての特徴量の一覧を示す。

第一段階では、5つの特徴量をファジィ特徴によるFHPR/FF（3章）手法を用いて車種認識を行う。ここで、車種とは概観により分類した、普通車、ハッチバック車などである。この段階では対象となる車が、どの部類の車種に属しているかを推論する。この推論に

表1　特徴量一覧

第1階層	第2階層	
ボンネットの長さ	ボンネットの長さ	前部分の厚み
トランクの長さ	トランクの長さ	後ろ部分の厚み
ホイルベースの長さ	ホイルベースの長さ	車幅
全高	屋根の長さ	車高
後ろガラスの角度	後のガラス角度	後ろガラスの大きさ
	後ろタイヤから最後部までの長さ	前ガラスの長さ
		前ガラス角度

よって車種が判別されるが正確に推論されていない場合がある。そのために、次の過程である絞り込みを行う。この絞り込みでは、対象となる車が複数の車種に属する場合、その車種の違いが分かる特徴部分を、より正確に特徴抽出する。抽出された特徴同士を比較の知識を用いて判別し、どの車種に属するのかを推論する。この推論結果から先に推論された車種判別結果に修正を加えて、最終的な車種判別結果とする。なお、知識については後（3－1）に述べる。

第二段階では、第一段階で判別された車種からどの車名に属するかを推論する。ここで車名とは、個々の名称で、例えば、セドリックやセリカ等である。この段階では第一段階の特徴量に8つの特徴量を加え計13の特徴量のうち、各車に必要な特徴量を用いて認識を行う。認識結果から、絞り込みを行いさらに正確な認識結果に修正を施す。

このように、階層化する事によって、簡単に階層化を拡張でき車種が増加しても安易に対応できる。又、必要最低限の特徴量を各階層で選択するため、無駄な特徴量を観察せずに推論が行えるシステムになっている。

3．注視点フィードバックによるファジィ階層型画像認識（FHPR/FF）

ファジィ特徴量を用いた注視点フィードバックによるファジィ階層型パターン認識の概念図を図2に示す。この方式は各階層において、大まかに観察された結果を、より厳密に識別するために必要な特徴、つまり注視点を選択し、その結果、絞り込みを行いより正確な認識を行う。これらの工程全体をFHPR/FFと呼び、以下に各階層での知識ならびに推論方法を説明する。

3－1　知識

まず、最初に認識対象群を階層化しておく。本システムでは第1階層目の対象を車の車種（クラスタ）とし、第2階層を車名（カテゴリ）とした。このように2階層構造となっている。そして、1階層目の知識も2階層目の知識も原理は同じである。

車種（クラスタ）、車名（カテゴリ）それぞれにおいて判別するために以下のような3種類の知識を各々用意する。

・各クラスタに関する一般的知識；
　If then ファジィルールで表現。
・各クラスタ間での似ている度合いの知識；
・各クラスタ間での特徴の違いによる比較知識；
　If then ファジィルールで表現。

また、上記クラスタに関する知識と同様に、次の階層であるカテゴリについても同様な3つの知識も用意する。

3－2　推論方法

大きくわけて4つのパートに分かれている。クラスタもカテゴリも原理は同じである。

(1)　大まかな推論

入力された画像データから、大まかにクラスタ／カテゴリの推論を行う。

(1-1) 確信度抽出

抽出した特徴量に信頼できるか否かの度合を算出する（3－3参照）。

(1-2) 粗い観測による推論

一般的知識を用いて、観測された特徴量及び確信度

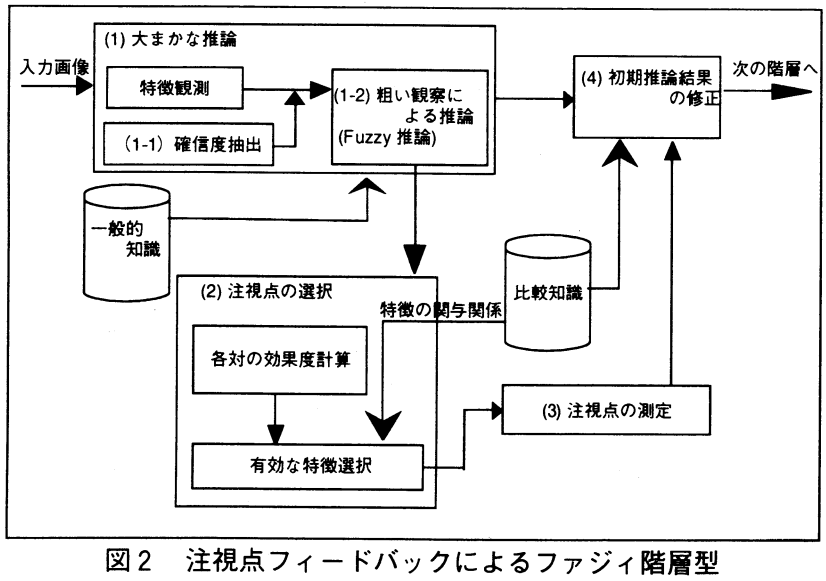


図2　注視点フィードバックによるファジィ階層型パターン認識の流れ図

からファジィ推論を行い各クラスタ／カテゴリの可能性を推論する。

(2) 注視点の選択

可能性の高いクラスタ／カテゴリ同士の比較知識から効果的であると思われる特徴(注視点)を見つける。

(3) 注視点の測定

効果的である思われる特徴（注視点）を測定する。

(4) 初期推論結果の修正

測定された注視点から、（1）の大まかな推論結果を修正し、結果をより精度の良い結果にする。

3－3　ファジィ特徴量

各特徴量を正確に抽出することは難しく、不正確な値を算出し、時には算出不可能な場合も考えられる。この原因にはノイズの影響や、背景除去による原画像の不正確な画像データ等の理由が挙げられる。

そこで、抽出した特徴値に、ある程度信頼度が低くても、大きく間違えずに推論できる必要がある。そこで、抽出した値に信頼度を加味した。この信頼度を表すために確信度という考え方を取り入れる。確信度は-1～+1までの値を取り、-1に近い程信頼できないこととした。逆に+1に近い程、信頼できる値を意味しているとした。0に近い値は信頼できるかどうかが不明確であることを意味している。この確信度をファジィ推論の入力データに反映させ、誤抽出した値でも、推論結果に重大な悪影響を及ぼさないようにした。この確信度は、各特徴量を抽出する際に必要である。



（1）　画像データ



（2）　特徴抽出画像

図3　セリカの場合

4．　実験方法及び結果

車の画像として15種類のミニカーを用意し、各々約6方向による約９０枚の画像を使用して認識実験を行った。この15種類の車（車名）は、「一般車（６車名)」、「ハッチバック車(４車名)」、「RV車(４車名)」、「１Ｂｏｘ車（１車名)」の４車種に分類されている。

例えば本来ハッチバック車である「セリカ」を用いた場合の原画像、特徴抽出画像を図３に示し、確信度を考慮しない場合の実験結果を図４に、確信度を考慮した場合を図５に示す。

図４では、第１階層の一般的知識を用いた推論ではハッチバック車の割合が高く、次にRV車となっている。そこで、注視点である車高と、後ろのガラスの長さを比較の知識を用いて検討し、推論された結果に修正を施す。すると、ハッチバック車の割合が更に高くなり、逆にRV車の割合が低くなった。第２階層においても同様に推論を行い、注視点を見つけ比較する。比較された結果を推論された結果に修正を施し、最終結果を算出する。この結果から「セリカ」であると推論された。

		一般車	ハッチバック車	RV車	１Ｂｏｘ車
第一階層	認識結果	0.2	0.8	0.5	0.1
	絞り込み		（ 車高、リアガラス角度 ）		
	修正された認識結果	0.2	1.0	0.3	0.1
		セリカ車	ＧＴＯ車	スープラ車	Ｚ車
第二階層	認識結果	0.7	0.6	0.4	0.2
	絞り込み		（ 屋根の長さ、車幅 ）		
	修正された認識結果	0.8	0.5	0.4	0.2

図4　セリカ車の認識結果
（確信度を用いない場合）

		一般車	ハッチバック車	RV車	１Ｂｏｘ車
第一階層	認識結果	0.2	0.8	0.4	0.1
	絞り込み		（ 車高、リアガラス角度 ）		
	修正された認識結果	0.2	1.0	0.2	0.1
		セリカ車	ＧＴＯ車	スープラ車	Ｚ車
第二階層	認識結果	0.7	0.6	0.4	0.1
	絞り込み		（ 屋根の長さ、車幅 ）		
	修正された認識結果	0.8	0.5	0.4	0.1

図5　セリカ車の認識結果
（確信度を用いた場合）

図５では図４と同様に推論されるが、特徴量を抽出する際に確信度を反映させている。

これらの結果から図４の確信度を考慮しない場合と図５の確信度を考慮した場合では、第１階層においてRV車の可能性が少なくなっており、より精度のよい認識が行えている。しかし、第２階層ではZ車の割合しか反映されておらず余り効果が見られていない。

ハッチバック車の４車名１５枚の車の画像のみを用いて実験を行った結果の一覧を表２に示す。

この表から、絞り込み後の認識率が向上しているのがわかる。よって、FHPR/FFを用いることにより、効率的に認識率を向上しており、その有効性が示された。

５．おわりに

注視点の概念を導入したFHPR/FFを用い、さらにここで使われているファジィ推論の入力をファジィ特徴量とすることにより、従来では困難だった車名のパターン認識が行えるようになった。仮に特徴量の抽出が不適切であっても、確信度により推論結果に悪影響を及ぼさない工夫が取り入れられている。

本稿では、代表的な国産車１５種類（４車種、１５車名）のミニカーを対象に、各々いくつかの方向から撮影して実験を行った。実験では、ハッチバック車（４車名）の１５枚の画像データをもとに車名を認識させ、最終的に８枚の画像に対して正しい認識が行えた。

誤認識された多くの画像データは、光の反射など撮影条件が必ずしも良くないものであり、特徴抽出において致命的なミスをおかしていた。よって画像処理における特徴抽出を、様々な状況で対処可能なように、より頑強にすることが今後の課題の１つである。また、より積極的にかつ正確な確信度を導入すること[3]も今後の課題の１つである。

さらに、車名認識の対象として、本稿ではミニカーを用いて実験したが、実車への適用も今後の大きな課題としてあげられる。しかし、先に述べた画像処理部分及び、膨大な知識の作成に関して十分な検討は必要と思われるが、ファジィ特徴を用いたFHPR/FFの枠組みで処理可能と考えている。

また、より実用に近づけるために、ファジィ特徴量によるFHPR/FFを用いて、知識をより複雑化し、さらに深い階層に拡張することによって複雑な形を持つ物体でも認識できると思われる。また、例えば知識の構築過程での見直しや、現在の２段階の階層を、さらに細かく３段階、４段階と深い階層にすることが考えられる。また、大きくわけて３つの知識で行なわれているFHPR/FFをさらに複数の知識を用いたり、２重のフィードバック等を施し精度を向上させる方法、動画処理により刻々と信頼度の高い情報を得ていく方法等も考えられる。

参考文献

[1]荒井，関口，廣田，「注視点フードバックによるファジィ階層型車種認識」，第12回ファジィシステムシンポジウム，pp. 79-82, 1996. 6

[2]Arai, Sekiguchi, Hirota, "Fuzzy Hierarchical Car-model Pattern Recognition System Using Fixation Feedback", Int. Conf. of KES' 97, May 1997

[3]荒井，廣田，「画像処理におけるファジィ観測値の検討」第13回ファジィシステムシンポジウム，1997. 6

連絡先

〒243-02　神奈川県厚木市飯山1583

東京工芸大学　情報システム研究室

関口　悟朗，荒井　良徳

TEL: 0462-42-9644

E-mail: {goro,arai}@t-kougei.ac.jp

表２　１５画像による実験結果一覧

原画像 (枚数)	第１階層 (車種)		第２階層 (車名)	
	一般的知識.	絞り込み後	一般的知識.	絞り込み後
Celica (x4)	50% (2/4)	75%(3/4)	67%(2/3)	67%(2/3)
GTO (x4)	50% (2/4)	75%(3/4)	67%(2/3)	67%(2/3)
Supra (x3)	67% (2/3)	67%(2/3)	50%(1/2)	100%(2/2)
Z (x4)	50% (2/4)	75%(3/4)	33%(1/3)	67%(2/3)
平均 (x15)	53% (8/15)	73% (11/15)	55%(6/11)	73% (8/11)

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEC1-2

画像処理におけるファジィ観測値の検討

A study on Fuzzy Observation in Image Processing

荒井 良徳、
Yoshinori ARAI,
東京工芸大学、
Tokyo Institute of Polytechnics,

廣田 薫
Kaoru HIROTA
東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

abstract **In case of using inappropriate data into Fuzzy Inference, of course, results will be wrong. At complex system such as feature extraction in image processing, it is hard to obtain collect data in whole cases. In this case, if it gets a degree of reliability (fuzzy observation), fuzzy-inference system can restrain ill-results. This paper argues about effectiveness of fuzzy observation and feasibility for image processing.**

1．はじめに

ファジィ推論は、制御／認識システムなどにおいて、有効に利用されてきている。大きな利点として、対象システムに関するモデル（ルール）を、人間の主観的観点から記述することができることなどがあげられる。しかし、実際にセンサなどから得られる観測値を元にファジィ推論を行う場合、観測データそのものにおけるあいまい性については十分に考慮されているわけではない。但し、ファジィ推論機構は推論規則の補完を行っていると捉えることができ、よって入力（観測）データにはそれほど敏感ではなく、それ故に観測データに含まれるあいまい性を許容しているように動作するので、十分な考慮は必要ではないとも考えられる。

ファジィ推論において、入力データのあいまい性を考慮し、メンバーシップ関数を用いることは、理論的にも全く問題なく、また実際にも用いられている場合もある。しかし、温度センサなどといった安定的に精度よく計測可能なセンサから得られる情報をファジィ化しても、実際には計測誤差を許容すると言った意味合いでのファジィ化でしかない。つまりこのような場合、入力データをシングルトンから、例えば一定比率による三角形や台形のメンバーシップ関数に変更（ファジィ化）するといった処理が通常施されるわけであるが、これはファジィルール側で使用されているラベルを調整（つまりルール自体に計測誤差があるものとしてルールのラベルを作ってしまう）しても同様な結果を得ることができる。

しかし、ソフト的に複雑な処理をした後に算出されたデータを入力データとして用いなければならないなどのような場合、これらのデータには誤差ではなく、情報そのものの信頼性を主としたあいまいさが含まれてしまう。よってこのような場合、例え間違えた観測結果を用いたとしても、信頼度が低ければ結果に及ぼす影響を抑える仕組みが必要となる。

本稿では、このようにファジィ推論の入力値として観測された情報に信頼性が関与してしまうような場合として、画像処理（認識）における観測データの信頼性を考慮したファジィ化の表現方法とその有効性について検討する。また、車種の画像認識システムを例に取り、具体的な方法についても検討する。

2．観測データのファジィ化の意味

推論などの入力となるデータを計測する場合、状況に応じた様々な方法が考えられる。例えば、温度センサを利用したり、更にそれらセンサからのデータを加工したりする場合がある。また、人間が直接データを提供することもある。更に画像処理（認識）のように、画像データからソフト的な処理によってデータを抽出する場合もあるし、多段推論などの場合においては、推論結果が次の推論の入力データになる場合などがある。

このように、入力として利用される観測データには次のような種類が存在する。（1）誤差は含まれるがほぼ確実に精度良く観測されるデータ、（2）主観性などの元々ファジィ性を持つものとして観測

されるデータ、（３）複雑な処理などを経て信頼性までも考慮に入れる必要がある抽出データ。

基礎的なファジィ推論は、ファジィラベルで記述された代表的な推論規則（ファジィルール）と入力データのマッチングにより、ルールの補完作用効果を持つ。よって、主観的な言語によって比較的簡単にルールを少なく記述できる反面、入力データには敏感ではなく、誤差が許容されたように挙動する。また、ファジィルールに用いるファジィラベル自体を観測誤差を考慮したものにしておくことも可能である。よって、（１）にたいしてファジィ推論機構は有効に働く。また、（２）の場合も、必ずしもうまく表現可能かは別として、うまく処理可能な能力は有している。

しかし、（３）の多段推論や、画像認識における処理の場合などのように、データを抽出すること自体が複雑な処理で対象も複雑な場合、万能なアルゴリズムを生み出すことは困難であるし、情報の不足などにより、ある程度予測を含んだ結果の情報しか得られず、必ずしも毎回完全な観測結果を抽出できるとは限らなく、それに対しファジィ推論機構に対処可能なように観測される入力データをファジィ化することは意味がある。

３．メンバーシップ関数における信頼性表現とその解釈

従来提案されてきたあいまい性の表現方法には、確率、主観的Bayes法[1]、ＣＦ値[2]、Dempster-Shafer理論[3]、ファジィ理論における通常のメンバーシップ関数、またType2[4]や確率集合論の拡張ファジィ表現[5]のようなウルトラファジィなどがあり、あいまい推論への適用も検討されている[6]。各々の表現手法は様々な哲学的観点から意味付け／解釈されている。しかし、信頼性の表現として厳密に定義されているものはないと思われる。もちろんこれら多くの表現において、信頼性を表現しうる能力は有している。

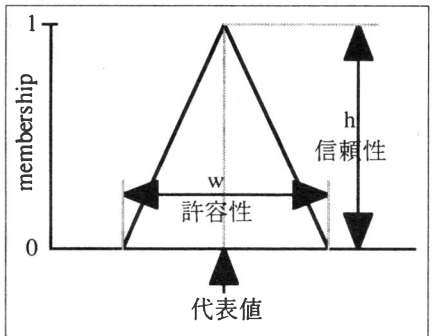


図１．信頼性の表現

信頼性を厳密に定義するという観点からは二次モーメントを有するウルトラファジィで表現するのがよいように思われる。しかし、実際には正確な信頼度を得ることは難しく、また計算が複雑になることを考慮すると、実用上メンバーシップ関数だけで表現できると考えられる。

そこでここでは、ファジィ理論のメンバーシップ関数を、信頼性を含んだ表現としてとらえることを考える。ファジィ推論の入力としてのメンバーシップ関数を考えた場合、一般的な台形型のメンバーシップ関数はその幅が許容性、高さが信頼性を表すものとして捉えることができる（図１参照）。但し、メンバーシップ関数が単純な単峰で凸状の、三角もしくは台形型などのメンバーシップ関数であり、ユニバースとしても連続である場合、またファジィ推論に用いることを前提とした場合のみについてである。

例えば、ファジィルールに用いられている「大きい」というファジィラベルは入力値とマッチングを取るが、入力値として幅の広いメンバーシップ関数を用いれば少しでも多くの場合マッチングされる（図２参照）し、また高さが高いメンバーシップ関数が入力値の場合、マッチング度が高く、そのルールの適応度合が高くなる（図３参照）。ファジィ推論の入力とする場合には、ルールに記述されているファジィラベルと入力ファジィデータのマッチングが行われるので、高さを低くすることにより結果的にマッチング度合は低くなるので、信頼性を表しているものと考えることができる。

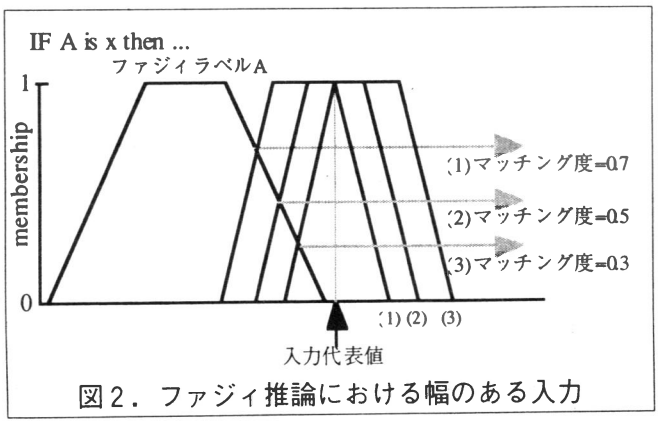


図２．ファジィ推論における幅のある入力

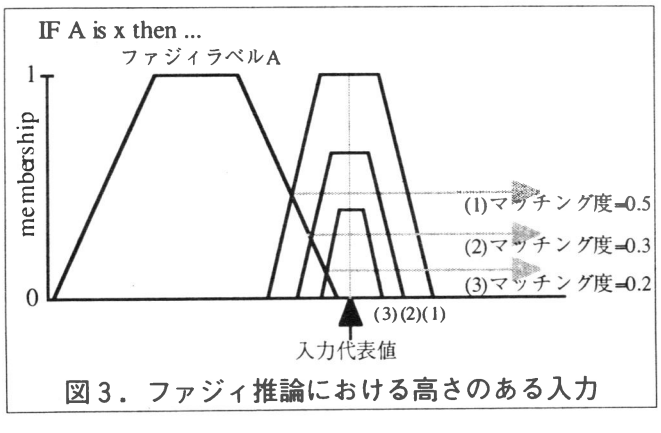


図３．ファジィ推論における高さのある入力

このようにファジィ推論の入力を確定値ではなくファジィ化することは、信頼性を考慮に入れた場合有効であることがわかる。

さてより厳密に信頼性について考えてみる。メンバーシップ関数の代表値における高さつまり信頼性の指標（信頼度）は、0～1までの値を取る。「1」に近いほど「信頼できる」ことを意味し、「0」に近いほど「信頼できない」ことを意味すると考える。

しかしこの「信頼できない（信頼度＝0）」には、多様な意味を含んでいると考える。いわゆる「Don't Know」と呼ばれる「わからない」といった意味や、積極的な否定の意味を含む「信頼できない（してはいけない）」といった意味も、全て「信頼度＝0」として考える。

本稿ではファジィ推論の入力データにおける信頼性についての議論を行っているが、この場合「わからない」もしくは「信頼できない」入力データはどちらも、ファジィ推論機構の上では、そのデータにがどのルールともマッチングしなければよいだけである。よって、信頼度つまりメンバーシップの高さが「0」であることで十分である。

ここでは、一次モーメントのみのメンバーシップ関数で信頼性を表現することを考えたが、もしにじモーメントを利用する場合は、ルールと入力とのマッチング度に信頼度との積演算によりマッチング度を減少させるという方法も考えられる。

4．信頼度の算出方法と合成

次に信頼度の算出について考えてみる。例えば同じ働きをするセンサや機構を複数用意してそれらの多数決を取る、また観測データが常識的に絶対に考えられない範囲を予め設定しておくなどの点から信頼度を得ることができると思われる。このように信頼度に関しては複数の面から観察／抽出することができる場合が多いが、実際にはどれも決め手となる信頼度を抽出することは難しい。

つまり、独立した各事象において観測された信頼度は、必ずしもそれらデータが正しいものではない可能性もあり、それを考慮して合成し、一つの信頼度として算出する必要がある。

各確信度は、次のような4つの観点から様々観測可能と思われる。

(1) 元データの状態

たとえば、画像処理の場合、データとなる画質自体がぼけていたりすれば、当然観測される特徴量は信頼性が低くなる。

(2) 対象ドメイン知識との比較

対象とするものが持つ特徴量に関して、特性／制約といった性質を持っている場合がある。例えば特徴量として撮影対象の長さを観測した場合、対象が車であれば、1mから長くても十数m以内程度に収まるはずであるし、もし対象が蟻であれば数mm程度のはずである。このようにあらかじめ対象の特性がわかっており、更に対象が何であるかが特定されている場合、観測された結果が大きくずれていれば信頼度は低い。

(3) アルゴリズムの複雑性などを起因とするアルゴリズム自体の精度／信頼性

画像処理などにおいては、対象およびアルゴリズムが複雑となり、万能な処理アルゴリズムを確立することは不可能に近い。アルゴリズムもしくは作成したプログラム上、ある程度性能を実験的／理論的に推定することが可能である。つまり、例えばあるサブルーチンを使用する場合は信頼性は高いが、あるサブルーチンは信頼性が低くなるとすることができる。

(4) 処理過程で判定できる信頼性

(3)のアルゴリズムやプログラム自体に起因するのではなく、それら処理上信頼性を換算しようとするものである。例えば、水平な直線を抽出しなければならない場合、一つの方法として隣接の画素を調べていく。この場合、必ずしも理想的に水平になっているわけではなく、若干ジグザグしたり途切れたりしている。画素を追い掛けていく上では、これらを吸収しながら弾力的に水平線を探索していくが、例えばジグザグ度合などをカウントしてそれらを一つの信頼性を示す指標と考えることができる。また、一般的画像で処理できる速度との差を利用することも考えられる。

さて実際にはこれらの複数の事象から観測されたによる信頼度を融合（合成）して一つの信頼度としなければいけない。ここでは、ある観点から信頼に値する度合いとして信頼度を定義している。よって、信頼度が0以上となる観測される事象が多いほど、合成結果としての信頼度は向上すべきである。そこで、例えば信頼度の合成演算方法を次のように考える。

ある各々の観点から観測された信頼度を、それぞれh1、h2、…としたとき、信頼度の合成結果hは、h＝1－（1－h1）＊（1－h2）＊…　とする。但し「＊」は算術積とする。

5．画像認識におけるファジィ観測値

本章では、実際にファジィ推論による画像認識を例に取り、適応可能性について検討する。つまりいくつかの特徴量を抽出し、それらを入力データとしてファジィ推論し対象を認識するものである。

画像処理による特徴観測では、例えば対象物の特定部分の長さなどの観測が用いられる。対象がある程度複雑化している場合、画像データの画素値を一つ一つ探索しながら観察をしていかなければならい。つまり、人間のようなマクロなレベルでの処理を直接行うことはできず、ミクロな処理を総合判断することになる。よって、観測された結果は必ずしも信頼のおけるデータとなるとは限らない場合が生じる。

実際に画像認識の例として車種認識を考え、どのように信頼度を抽出したら良いのかを考える。信頼度を算出する各事象は4章にリストアップした4つの観点から考えればよい。

例えば、ミニカーを撮影した原画像例（図4）では、それほど撮影条件は悪くはないが、特徴量を抽出した画像処理結果（図5）をみると、3つの高さ（前部、全高、後部）に関する特徴量が必ずしも正確には抽出されていない。実際にいくつかの簡単な観点から信頼度を算出／合成した。その結果、前部高さに関しての信頼度としてはおよそ0.5、全高は0.8、後部高さは0.7といった信頼度が算出された。

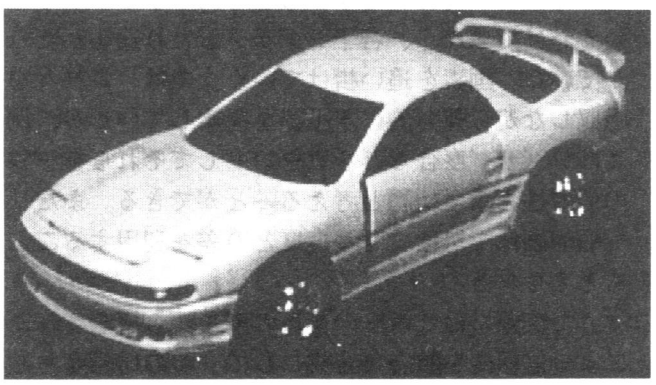


図4．ミニカーの原画像例

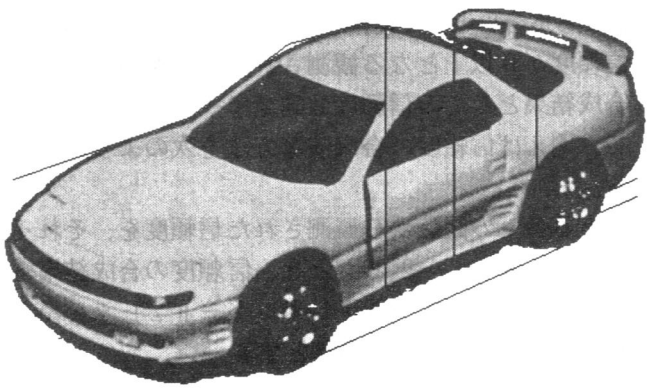


図5．特徴抽出処理画像例

6．おわりに

画像処理などの複雑化しているものにおいて、完璧な処理アルゴリズムを探求するのは非常に困難である。一方柔軟な処理が実現されているファジィ推論においても、入力データの信頼性については十分に検討されていない。

ここでは、ファジィ推論の入力値における信頼性の導入について検討した。ここでは信頼性の実用的な表現の一つとして、メンバーシップ関数の高さで表現するものとし、0の場合は「わからない」、および否定する意味での「信頼してはいけない」という意味も含んで「信頼できない」と解釈し、合成方法についても若干の検討を行った。その結果、ファジィ推論の入力値において信頼性を導入することは、十分に意義があり整備すべきであると考えられる。

しかし、まだ様々な制限や意味付け、演算方法などに問題が存在し、これらを取り払いつつ明確に整理／定義していく必要がある。また、例えば、否定的な意味での「信頼してはいけない」つまりここでは信頼度＝0（本来否定の場合$1-\mu$とすべき）を、より積極的に利用するということを考えることも今後の検討課題の一つである。つまりこれは、ファジィ推論機構そのものに全ての意味における信頼度が反映できるような仕組みを意味する。

参考文献

1) Duda, Hart, Nilsson: "Subjective Bayesian methods for rule-based inference systems", Nat. Computer Conf., 1976
2) Shortliffe: "Computer-Based Medical Consultations: MYCIN", American Elsevier, 1976
3) Shafer: "A Mathematical Theory of Evidence", Princeton Univ. Press, 1976
4) Zadeh: "The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning", Info. Sci., 8, pp199/249, 1975
5) Hirota: "Concepts of Probabilistic Sets", Fuzzy Sets and Sys., vol. 5, pp31/46, 1981
6) Prade: "A computational Approach to Approximate and Plausible Reasoning with Applications to Expert Systems", IEEE PAMI-7, No.3, 1985
7) 関口、荒井、廣田：「ファジィ特徴量による注視点フィードバックファジィ階層化車名認識」、第13回ファジィシステムシンポジウム、1997.6

連絡先；〒243-02　神奈川県厚木市飯山1583
東京工芸大学　情報処理教育研究センター
荒井 良徳　arai@t-kougei.ac.jp
Tel&Fax: 0462-42-9564

WEC1-3

FuMICS(Fuzzy Multimedia Intelligent Communication System) における動画像からの抽出情報を用いたファジィ知識ベース構築

Fuzzy Knowledge Base based on Dynamic Image in FuMICS (Fuzzy Multimedia Intelligent Communication System)

中川友紀子, 廣田薫
Yukiko NAKAGAWA, Kaoru HIROTA

東京工業大学大学院 総合理工学研究科
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

Abstract

A dynamic image knowledge representation in the fuzzy knowledge base of FuMICS (Fuzzy Multimedia Intelligent Communication System) is proposed with an experiment to describe a car in car race. In the fuzzy knowledge base, the information observed by a media includes private knowledge and common knowledge. The private knowledge is formed for each media source and the common knowledge is generated for plural media source.
In dynamic image information, color and object shape are treated as the private knowledge, location and action of objects are stored as the common knowledge. The color is indicated by coordinates in the Wundt color model. The object shape is expressed by label. The location is calculated by coordinates in image and area of the object. The action is the sequence of these information.

keywords: fuzzy, image, knowledge base, knowledge representation

1 はじめに

五感から得る情報に相当するマルチメディア入力情報を用いたヒューマンフレンドリコミュニケーションシステムの実現を目指して FuMICS(Fuzzy Multimedia Intelligent Communication System) の構想 [1] が提案されている。本稿では、画像情報がマルチメディア情報の一部であると言う観点に立ち、FuMICS におけるファジィ知識ベースの画像に関連する動画像の知識表現について述べる。FuMICS のファジィ知識ベースでは、マルチメディア情報を扱う知識を、各メディア毎に形成される固有知識と複数のメディアで共有する共有知識とに分けて考える。

本稿では、移動しない一つの光源がある 3 次元空間内を運動する一つの剛体 (移動物体) を撮影したものを動画像として扱う。また、動画像における移動物体がもつ情報のうち形状と色を固有知識に属する情報として扱い、物体の大きさと画像上の物体の重心位置 (以下重心位置) と観測された時刻を共有知識に属する情報として知識表現を行う。動画像の知識表現は、時間と空間に関係ない物体の属性と時間と空間によって相対的に変化する物体の運動に関する性質を記述する能力をもつとする。

提案した知識表現を用いる事で、マルチメディア情報の一つとしての動画像の撮影には制約を持たせなくても移動物体とその性質を記述できることを示すために、レース場を走る一台の車をカメラ移動／固定を交えて撮影した動画像から抽出した移動物体 (車) を提案した知識表現で記述した実験について述べる。

2 動画像に関連した固有知識と共有知識

FuMICS の画像に関連したファジィ知識ベースの一部である動画像の知識は、固有知識と共有知識に分けられる。動画像における固有知識は、時間や空間に関係なく存在する物体の属性 (形状と色) であり、共有知識は時間や空間に対して相対的に変化する物体の運動に関連するもの (大きさ、位置、時刻) である。本稿では、光源の位置が変化しない 3 次元空間内を運動する一つの剛体を撮影したものを動画像として扱う。

固有知識に関連した知識表現として、抽出された画像領域そのものにつけたラベル L で形状を表現し、19 世紀の Hering の反対色の概念を採り入れた Wundt の色立体 [2] 上の色座標 $C(h,l,s) 0 \leq h \leq 360$ 度 $,0 \leq l \leq 1, 0 \leq s \leq 1$ で色を記述する。ここで、Hering の反対色は、赤と緑、青と黄、白と黒が同時に活性を持たないという心理学実験から得られた色の概念である。Wundt の色立体は、彩度明度が他の色立体と同じで、色相が 90 度ずつ赤黄緑青と配置されたものであり Hering の色概念を表せる。Wundt の色立体における色相は、角度を 180 度回転させれば反対色がでて来るので人間の直観的に色を表すのに都合が良いものである。

共有知識に関連した知識表現として、画面内の物体の重心位置 G(x,y) 及び前後の画像での物体の大きさをそれぞれ a_1, a_2 として $F(a_1,a_2) = \frac{a_2}{a_1}$ で a_1 の物体と a_2 の物体が相似なら拡大縮小率で、相似でなければ言語表現で、カメラと物体の相対的な位置 (以下位置知識) を表し、前後の画像間の時間を絶対量 t で表す。ここで位置知識は、物体の位置をカメラと物体の相対的な位置として表すために連続する 3 枚の画像を用いて決定されるものとする。また、運動は、ある時間における位置知識の変化に着目したものであるので、動画像知識を生成する時は、時間は常に正の方向のみに流れるものとする。

複数の色を持つ物体のある時刻の知識 K は、全ての色を示す色座標 C の集合を S として、以下のよう

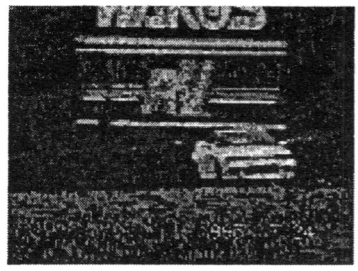


図 1: レース場の車を撮影した時刻 t_1 の映像

表 1: 6 枚目までの車の画像知識

時刻	t	L	F,G	c(h,l,s)
t_2	1-2	L	(-)(192,128)	c(0,1,0)
t_3	2-3	L	(大)(160,132)	c(0,0.9,0)
t_4	3-4	L	(小)(137,132)	c(0,1,0)
t_5	4-5	L	(大)(112,124)	c(0,1,0)
t_6	5-6	L	(大)(112,120)	c(0,1,0)

に表される。

$$K = \{L, S, G, F, t\} \tag{1}$$

位置知識が相対的であることによって 3 次元空間のどこの位置に物体があっても物体の運動を同じものとして表すことが可能となる。従って、動画像以外のメディアで得られる情報から 3 次元空間における位置が与えられるものとすれば、これまでシングルメディアの動画像を理解する時に必要であったカメラの設置場所の制約をなくすことができる。しかしながら、位置知識がカメラと物体の相対位置なので、運動を具体的に理解するためには、同じ画像内に存在する別の物体に関する動画像知識を利用するか他のメディアの情報を用いる必要がある。

3 動画像から抽出した物体の知識生成実験

レース場を走行する一台の車を撮影した動画像から抽出した移動物体 (車) を提案した知識表現で記述する実験について述べる。実験に用いた映像は、家庭用ビデオカメラで撮影され、320 × 240 画素／枚、15fps×5 秒間で、SparcStation10 で C 言語を用いて処理された。また、車とカメラの間について正確な距離は計られていない。記述する対象の移動物体は、前後の画像から差分を取り、移動領域として抽出した。画面内の座標は、画像左上隅を原点とし、原点から右を x, 下を y とした。紙面を省くため、実験を行った画像のうちカメラが横移動で撮影された時刻 $t_1 \sim t_5$ とカメラ固定で撮影された $t_5 \sim t_6$ についての実験結果だけを報告する。Wundt の色立体の明度 l がとる値を、計算機で扱うために $0 \leq l \leq 255$ とした。車の画像領域はさまざまな色領域を含むので、最大領域の色を代表色とした。

図 1は、t_1 の映像であり、表 1で、$t_1 \sim t_6$ における画像から生成された動画像知識を時間、ラベル、大きさの比、画面での座標、色の順に示した。

表 1に示された結果は、移動物体領域をラベル L で、移動物体の代表色を Wundt の色立体での座標 c(h,l,s) で、カメラと物体の相対的な位置を前後の移動物体の大きさの比の言語表現と画面内での物体の重心位置の座標で表わされている。

実験結果から得られた運動は、t_2, t_3 と t_5 で重心位置が大幅にずれ、大きさの比は大きくなっておりカメラと物体が急激に接近した運動、t_4 で大きさの比が小さくなっており、カメラと物体が遠ざかる運動、t_6 で画面内の重心が近傍にあり、大きさの比が大きくなって来ていることからスピードの遅い接近かカメラか物体のどちらかが固定された接近運動であると解釈できる。

4 おわりに

FuMICS のファジィ知識ベースの画像の知識表現に関連して、動画像中の移動物体の物体とその位置と運動を表す知識表現について述べた。動画像の固有知識に関して物体の形状と色について、共有知識に関して物体の大きさ、画面での位置と観測された時刻について知識表現を行った。

提案した知識表現では、形状を画像領域そのものについてラベルで表し、色を Wundt の色立体上の座標で、画面内の移動物体の重心位置と形状情報のうちのの大きさの比を用いてカメラと移動物体の相対的な位置を表し、前後の画像の時刻の間隔で時間を表した。物体知識をラベルと色座標と位置の記述を時系列に並べて時間情報を記述した。

カメラ移動／固定でレース場を走る一台の車を撮影した動画像から抽出した移動物体 (車) を提案した知識表現で記述した実験について報告した。実験結果から、提案した知識表現である時刻における移動物体の知識を記述でき、位置をカメラと物体の相対位置で表すことでカメラの移動状態にかかわらず明確ではないが運動を記述することができた。今回の実験では、動画像の知識を固有知識と共有知識を用いて表す事で、動画像の撮影に際してカメラに制約条件をつけずに物体とその位置と運動を記述する事ができることを示した。このことは、動画像に関連する共有知識が他のメディアで得られる知識と相互に関連することで移動物体の運動をより具体的に記述できるという見通しを与え、マルチメディア情報の一部としての動画像の知識の表現方法に指針を与えた。

連絡先

〒 226 横浜市緑区長津田町 4259
東京工業大学大学院　総合理工学研究科
知能システム科学専攻 廣田研究室
TEL:045(924)5682, FAX:045(924)5676
E-mail:yuki@hrt.dis.titech.ac.jp
中川　友紀子

参考文献

[1] Y.NAKAGAWA, K.HIROTA, W.PEDRYCZ, The Concept of Fuzzy Multimedia Intelligent Communication System(FuMICS), Proc. of 5th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ–IEEE'96), pp.1476/1480, 1996

[2] 川上, 色のお話し, 日本規格協会,p.50,1992

WEC2-1

イメージングプレートを用いた材料損傷評価のためのX線回折像の解析

Fractal Analysis of Diffraction Image Data for Material Damage Evalution Using Imaging Plate.

廣瀬幸雄　佐々木敏彦　（金沢大学自然科学研究科）
○森俊也　安川昇一　（金沢大学大学院）

By Yukio Hirose , Toshihiko Sasaki
Department of Materials Science and Engineering , Kanazawa University
Toshiya Mori , Shoichi Yasukawa
Graduate student of Kanazawa University

Fracral analysis was applied to two-dimensional diffraction rings detedted with Imaging Plate (IP) in order to evaluate fatigue damage of materials. The material used in the study was low alloy steel (A508-2). about one eighth image data in whole diffraction image data was analyzed to calculate fractal dimension.Four different parts of diffraction ring having different central angle were analyzed. It was found that fractal dimension shows a linear dependency on fatigue damage in case of sample to which plastic strain of 0.5% was applied.

1．まえがき

イメージングプレート(IP)[1),2)]は約１０年前に雨宮らによって開発された新しい二次元的X線検出器である．当初は医療用として開発されX線フィルムに対してX線被爆量の減少や画像処理などを特長としていたが，その後，高感度，ダイナミックレンジ，コンピュータ処理などの点から蛋白質の構造解析への利用が増加した．また，吉岡らによりX線応力測定および細束X線解析への応用が行われた[3),4)]．著者らによれば，二軸応力[5)]，応力勾配[6)]や微視的応力[7)]などの測定もＩＰにより高能率化が可能であることが判明している．

一方．回折環全体の強度分布や回折斑点の状態から副結晶粒寸法，misorientation，ひずみ，転位密度などを求める細束X線技術[8),9)]が発達しているが，この分野へのＩＰの適用の余地は大きいと思われる．そこで本研究では疲労損傷とＩＰ回折像データの関係[10),11)]について検討した．ＩＰの使用においては，回折像の入手は非常に簡単かつ短時間で行えるが，その後の回折像の定量化に関しては処理プログラムやアルゴリズムの面で今後の迫展を待たねはならない面が多く残されている．本研究では，回折像の二次元的変化を総合的に定最化する目的で，二次元フラクタル解析[12)]を適用し，フラクタル次元による疲労損傷評価の可能性を検討した．

2．フラクタル解析法[12)]

現在，一般的に考えられている「次元」は，例えば点はゼロ次元，直線は一次元，平面は二次元，空間は三次元というようにそれぞれの図形に存在する一点の座標を示す際の配列変数の数と一致する．この考え方は一見矛盾がないように思えるが，1890年に二次元である正方形上の任意の点を一つの直線で表すことが可能であるという問題が提起された．ペアノ曲線がそれである．ペアノ曲線のような図形を考えるとき，正方形上の任意の点を示そうとすると独立変数の数が１個，つまり一次元となる．これは前述の次元の概念と矛盾する．このような矛盾を避けるために，次元という概念が根本から考え直された結果，種々の新しい次元の概念が提案された．これら新しい次元のうち，フラクタルの持つ複雑さを定量的に表す量がフラクタル次元である．フラクタル次元の実用的な定義方法は各種存在する．ここて注意すべきことは，各種定義方法よって同一の対象に対して同一の次元値を示すわけではないということである．フラクタル次元を求める方法は，先に述べたように粗視化の度合いを変えて行うBox-Counting法など各種あるが，本研究では測定システムのアルゴリズムとして採用した方法は，スペクトルより求める方法である．ここでフラクタル図形として代表的なギャスケット図形を例としてその手法および手順について説明する．まず原画像に対して二次元高速フーリエ変換（ＦＦＴ）を行い周波数変換する．周波数に変換された画像はその濃淡．つまり輝度値によってスペクトルを表示している．次に周波数変換された画像について，その中心である原点から周波数ｆとスペクトルを一定角度θ毎に0～360degまで読み込む．ここで読み込んだ周波数ｆとスペクトルをそれぞれ横軸，縦軸にとり両対数線図上にプロットし．最小自乗近似より一次関数に近似する．この近似した直線の傾きをβとして(1)式を用いて次元Ｄを算出した．

$$D=\frac{5-(\beta+1)}{2} \qquad (1)$$

この次元を便宜上スペクトル次元と称する．求めたスペクトル次元Ｄを360degすべて表示したものがFig.１である．本研究では得られた回折環から抽出した画像の全体的な形状認識を行うため，周波数変換画像おける全方向のスペクトルを必要とした．従って算出したスペクトル次元Ｄの360度方向の平均をＤavgとして，本研究における回折図形の特徴量を表す指数とした．

3．供試材[1),11)]

供試材としては圧力容器川低合金鋼A508-2を用いた．本研究ではこれらの供試材から疲労試験片を作製し，中断疲労試験を実施することによって疲労損傷材を得た．（以下各試験片はシンボル名で記す）．

疲労試験は軸方向の引張圧縮による低サイクル疲労で，室温，大気中においてひずみ制御で三角波によって行った．試験では最初に試験片が破断する繰返し数Nfを求め，その後は破断寿命以下の適当な繰返し数で試験を中断し，それぞれ寿命比の異なる損傷材を作成した．

試験後の試験片からは平行部の中央より損傷材をファインカッターにて切り出し．その断面を #1500程度まで湿式研磨した後，目視で傷が見えなくなるまでアルミナペーストにてバフ研磨を行った．また，研磨による塑性加工層を除去するために試料表面を電解研磨により100μm以上除去して試料とした．

4．実験方法

4．1 回折像の計測

作成した試験片についてその断面からＸ線回折像を得た．回折環の撮影には理学電機株式会社製のＭＳＦ－２Ｍを使用し，ＩＰを格納するＩＰカセットジグを本装置に固定し，5inX5inのＩＰ上に記録した．Ｘ線回折条件についてTable １に示す．なお一つの試験片に対して試料表面の異なる場所を５点測定し，各点１

回測定を行った.
ＩＰ上に撮影された回折環データの読み取りには市販の装置を使用し，ワークステーションで制御を行った.本装置は回転ドラム上にＩＰを装着した状態で回転させながらレーザー光をあて，ＩＰから発生する蛍光を計測してコンピュータに読み込む方式のものである.本実験では読み取り分解能は100μmにて行った．このようにして得られた回折環データを1140×1140pixelの画素からなる画像データとしてワークステーション上に保存した.

Table 1 Conditons of X-ray analysis.

Characterdstdc X - ray	Cr - Kα
K β filter	Vfoil
Diffraction plane	α 211
Tube voltage	30kV
Tube current	10mA
Collimater	Φ 1 mm
Camera length	80mm
Exposure time	600sec

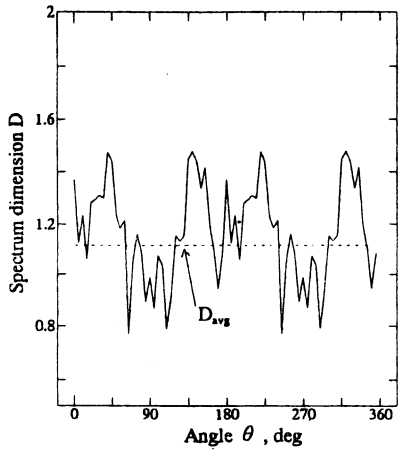


Fig. 1 Spectrum dimension.

4．2 回折像データ処理及びフラクタル解析

得られた回折環データをパソコン(PC—9821)を用いて解析を行うためにワークステーション上で回折環の一部を抽出した．抽出の際にはUNIX Cで作成したプログラムを用いて回折環円周上α=0,90,180,270degの点を原点として128×128pixelの画像データを抽出した.ここでパソコンにて解析を行う場合 128×128pixel以上の画像データを扱うにはメモリの都合上限界があるためこの領域とした.
抽出された画像データをフロッピーディスクに保存し，Micro-Soft Cで作成したプログラムを用いて，画像の読み込み及び周波数変換，周波数変換データのθ方向についての処理，フラクタル次元Ｄの算出の解析処理をPC—9821上で行った.

5．実験結果および考察

回折像は円周方向に関して若干の強度分布を有しているが，いずれも達続した回折環を構成している．これは低合金鋼の場合，熱処理の過程で結晶粒が微細化し，Ｘ線照射範囲内に回折条件を満たす結晶粒が多く存在するとともに．焼入れ処理によって結晶格子中に多数の転位が導入されているためであると考えられる.損傷量による回折像の変化としては．回折環の円周方向に関して見られる強度分布が損傷量の増加とともに平均化するように見えるか，その変化は明確ではない.びずみ範囲に関しても，全ひずみが0.5%の場合と1.0%の場合ではほとんど差は見られなかった.

$\Delta\varepsilon_t$=0.5%の試験片では，本研究の方法により求められたフラクタル次元は疲労寿命に対してほぼ線形の増加傾向を示した．また，その変化量は回折環の中心角を 90deg間隔づつ異なる回折環円弧においてそれぞれほぼ同様な傾向を示した．ただし，同一の回折環においても中心角αによってフラクタル次元が変化する傾向があるので，αの範囲が小さい場合ほどフラクタル次元と疲労寿命との相関は明確になるが，α範囲を広くするとそれは不明瞭となる傾向かある．すなわち本実験条件下において回折環全体のフラクタル次元を使用した場合には，フラクタル次元と疲労損傷との相関は不明確になると予想される．αを狭くすること（回折環の一部分のみを解析すること）は，デイフラクトメータによる回折プロフィルに近づくことを意味するので，従来の評価方法の妥当性が以上の結論として導かれることになる.

一方，$\Delta\varepsilon_t$=1.0%の試験片では，フラクタル次元は疲労寿命に対して変化せずほぼ一定値を示した．この原因には，フラクタル解析における画像データのフルスケールの設定に依存している可能性かある．本研究では，今回得られた全画像中の最大強度をフルスケールに設定し，すべて共通とした．$\Delta\varepsilon_t$=1.0%の試験片では塑性変形と共に回折像がブロード化しているため，回折強度か低下し，設定したフルスケールに対して比較的僅かな強度変化を示していることが，フラクタル次元の変化に影響している可能性が考えられる.
今後，解析における，フルスケールとともに，バックグラウンド強度の扱い，データ範囲（回折角の領域）などについて検討する必要があると考えられる.

6．まとめ

イメージングプレートで回折像を測定し，回折画像の二次元データのフラクタル次元を求める実験システムを製作し．疲労損傷の評価を検討した．本研究の結果をまとめると以下のようになる.
（1）$\Delta\varepsilon_t$=0.5%では疲労寿命に対してフラクタル次元がほぼ線形に増加する傾向を示した.
（2）$\Delta\varepsilon_t$=1.0%では疲労寿命に対してフラクタル次元はほぼ一定値を示した.
（3）本研究の解析条件では，二次元回折像のフラクタル解析は解析する領域が狭い方が疲労寿命の評価に有益である.

参考文献

1）雨宮，神谷，宮原，応用物理，55,957(1986).
2）Amemiya,Y.,Kamiya, N.and Satow, Y., Nucl.Instr. and Meth. A246,572(1986).
3）吉岡，大谷，新開，非破壊検査，39,8,666(1990).
4）吉岡，大谷，古川，第２９回Ｘ線材料強度評価に関するシンポジウム講演論文集，167(1993).
5）佐々本，廣瀬．日本機械学会論文集. 61,590,180(1995).
6）佐々本，廣瀬，日本非破壊検査協会平成７年度秋季大会講演概要集，447(1995).
7）廣瀬，佐々本，鷹合．第３２回Ｘ線材料強度に関するシンポシウム講演論文集，143(1996).
8）平，林．日本機械学会論文集，32,235.389(1966).
9）田中，秋庭，西沢，金多，材料，35-394,712(1986).
１０）遊佐，吉岡，第３２回Ｘ線材料強度に関する討論会講演文集，29(1995).
１１）遊佐，富士，吉岡，第１１４回Ｘ線材料強度部門委員会研究討論会資料，16(1995).
１２）黒瀬，津田，佐々木，廣瀬，吉岡，材料43-494,1489(1995).

連絡先 e-mail：mori@incl.or.jp

WEC2-2

近似分岐点を用いた画像合成実験II

A Study on Assembling of Subpictures with Approximate Junction -Part 2-

○守田　圭・黒須　顕二
Kiyoshi MORITA, Kenji KUROSU

近畿大学　九州工学部
Kinki University Department of Kyushu Engineering

Abstract : This paper treats the composition of plural pictures into one using matching of triangles made of junctions on each picture. we propose the ideas of approximate junction-position are computed roughly by fuzzy reasoning for speed-up processing, and control moving scope automatically by robot hand with integrating a set of several pictures into a mosaic picture.

1　はじめに

ファイバースコープによる検査画像や、神経細胞や眼底写真などの医用画像は視野が比較的狭く、人間が全体像を明白に把握することは困難なことが多い。そのため、対象物の全体像を人間が容易に把握できるようにするには、複数枚の部分画像を、そのオーバーラップ部分を利用して１枚の画像に合成することが必要となる。このとき、合成の対象となる画像間に量の不明な回転のずれや倍率のずれがある場合には合成が困難である。そのため、部分画像に含まれる線が交差する点（分岐点）を利用して画像の合成を行うアルゴリズム[1]が開発されている。しかし、この方法には、画像が複雑になり、含まれる分岐点の数が増加すると処理に要する時間が増大するという問題点がある。

本論文では、ファジィ推論による近似分岐点の概念を導入することで、処理時間を短縮するとともに、ロボットハンドを制御して、効率よく部分画像を入力して合成する実験を行い、顕微鏡写真に適用した結果について述べる。

2　近似分岐点を用いた画像合成

2.1　処理の概略

近似分岐点を用いた画像合成[2]は図１に示す手順で行われる。まず、細線化などの処理を行う前の２値画像から、分岐点が存在すると思われる部分を探索して近似分岐点とし、その数により合成に必要なだけの正確な分岐点を含む処理範囲を決定する。そして、処理範囲の内部のみを合成処理に用いることで処理時間を短縮するとともに、処理範囲が重複するようにカメラの位置を制御することで自動的に部分画像の入力を行うものである。しかし、近似分岐点探索にに誤差があると処理範囲を正しく決定できず、正確な分岐点を確認した後の処理範囲の再決定が必要になり、処理効率が低下する。そこで、近似分岐点探索法について改良を行った。

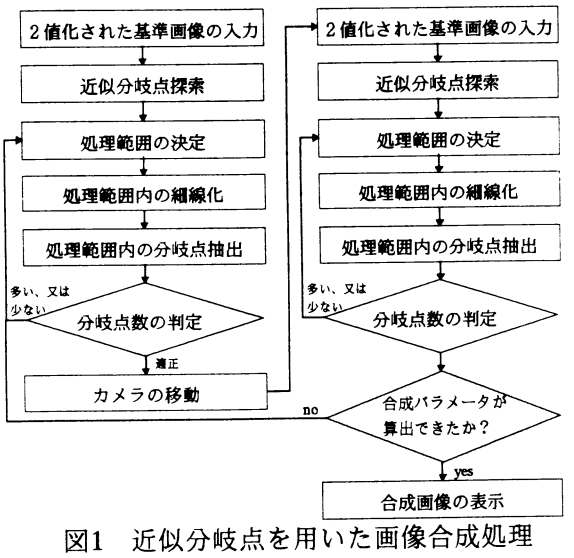


図1　近似分岐点を用いた画像合成処理

2.2　近似分岐点探索

近似分岐点の探索は、部分画像を小さなメッシュに分割し、メッシュ内の“１”の画素の数と“０”の領域の数を特徴量として「“１”の画素の数が多く、かつ、“０”の領域の数が大きいメッシュは、分岐点である確率が高い」というルールに基づくファジィ推論により行われる。しかし、図2の図形番号6,13,14,16,17,18,19および22のような分岐点ではないメッシュについても分岐点である確率が高くなり、誤った探索を行う場合がある。

これは、推論に用いているルールが不十分であることと、分岐点であるための条件が不足しているためと考えられ、以下のように変更を行った。

条件の追加　：分岐点であるメッシュ内の“１”の画素は１つにつながっている。
ルールの変更：“１”の画素数が多すぎる場合は分岐点である可能性は低くなる。

その結果、図２の図形番号6,13,16,19のような分岐点かどうか疑わしいものは分岐点の存在確率が低くなり、14,17,18,22のようにあきらかに分岐点でな

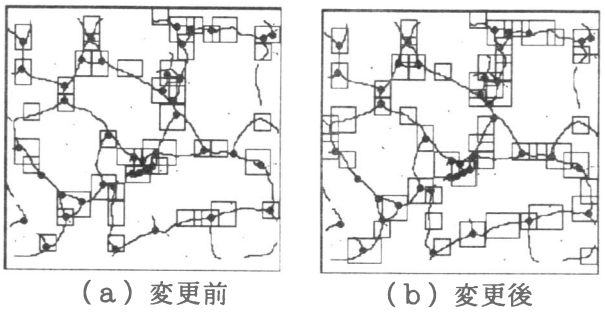
いものを判別できるようになった。しかし、10や23の様に、必要以上に分岐点存在確率が低くなる場合もあるので、これだけではまだ充分な探索が行われているとは言えない。分岐点の存在を出来るだけ正しく探索するためには他の特徴量の利用や推論法の改良が必要と考えられる。

メッシュ図形							
図形番号		0	1	2	3	4	5
分岐点存在確率	変更前：	0.00	0.00	0.43	0.00	0.26	0.25
	変更後：	0.00	0.12	0.45	0.07	0.51	0.47
メッシュ図形							
図形番号		6	7	8	9	10	11
分岐点存在確率	変更前：	0.75	0.38	0.57	0.66	0.75	0.25
		0.65	0.63	0.75	0.75	0.62	0.50
メッシュ図形							
図形番号		12	13	14	15	16	17
分岐点存在確率	変更前：	0.60	0.75	0.75	0.75	1.00	1.00
	変更後：	0.75	0.74	0.00	0.84	0.76	0.00
メッシュ図形							
図形番号		18	19	19	21	22	23
分岐点存在確率	変更前：	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.75
	変更後：	0.00	1.00	0.67	1.00	0.00	0.00

図2　メッシュ画像と分岐点存在確率

3　実験結果

変更前および変更後の探索法により近似分岐点探索を行った結果を図3に、合成結果を図4に示す。



（a）変更前　　（b）変更後

図3　近似分岐点探索結果

（□：近似分岐点、●：正確な分岐点）

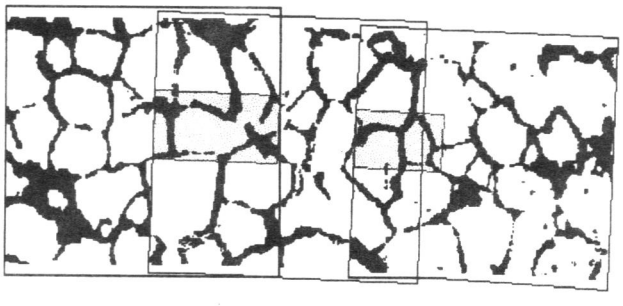


図4　合成結果（▩：処理範囲）

4　むすび

近似分岐点を用いた画像合成は、２値画像において合成に用いる処理範囲を部分画像内に決定することで、細線化やマッチングの処理時間を短縮するとともに、合成を行う画像を選択的に入力することが可能である。効率よく合成を行うための処理範囲を、短時間で決定するには近似分岐点探索の精度を向上することが必要であり、近似分岐点の情報のみで処理範囲を決定してカメラ位置を制御できるようにすることで、さらに効率よく合成画像を得ることが可能になると期待できる。

参考文献

[1] 西村：”目視検査のための画像合成に関する研究”、九州工業大学情報工学部制御システム工学科、平成４年度修士学位論文

[2] 守田、黒須：“近似分岐点を用いた画像合成実験”、第12回ファジィシステムシンポジウム論文集、pp.71-74、June 1996

連絡先

黒須　顕二
〒820　飯塚市柏の森11-6
近畿大学　九州工学部　経営工学科
電話:0948-22-5655　FAX :0948-23-0536
e-mail:kurosu@fuk.kindai.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEC2-3

絵画意味理解のための光学ファジィ・ニューロ・カオス・システム

― 2画像表示絵画の意味のカオス応答による表現 ―

Optical Fuzzy-Neural-Chaos System for Appreciating Meaning Represented by Picture

- Representation by Chaotic Response for Meaning of Image Depicted by Two Figures -

玉野和保
Kazuho TAMANO

広島工業大学　工学部　電子工学科
Dept. of Electronics, Hiroshima Institute of Technology

Abstract---The optical system, which is proposed in this paper, deals with images in parallel and high speed, and can recognize the meaning of the information depicted by the picture. This system forms recurrent Fuzzy-Neural Network and calculates the auto-correlation instantaneously among images in the basis of the incoherent optics. By this calculation, the light intensity of the partial image of concern in the inputted picture is intensified, and the reference image using for recognition changes autonomously. Thus the system outputs the light intensity changing chaotically. This signal displays the information on the meaning of picture. The paper shows this idea and the results of experiments on which two partial figures on the inputted picture are gazed autonomously.

1．はじめに

絵画は多値、多様、多義の情報を多次元表示でき、それを受信者へ一括伝達できる言語表現にない特徴を持っている[1 ~ 3]。 筆者はこのような特徴を持つ絵画の情報を処理する光学装置を開発しており、これを用いて絵画を非言語情報処理の媒体とする自律思考光学機械の開発を進めている[1,4 ~ 6]。 本論文ではインコヒーレント光学に基づくパターン認識計算を用いて、絵画の注視位置を自律的に変えながら絵画の意味を理解する光学思考機械の構成法について論述する。

この装置は入力絵画画像とその構成部分画像をそれぞれプロダクションルールの前件部と後件部に対応させている。 装置は推論結果を基に入力画像の部分画像の光強度を増強し、これにより部分画像の注視を模擬している。 さらにプロダクションルールの後件部である画像を注視動作に基づき変更することにより自律的に注視操作を変更できるようにしている。 この操作に基づく単一画素の注視実験では応答光強度はカオティックに変化する[5,6]。 本研究はこの単一の画素に対する操作法を絵画の自律的注視動作に発展させたもので、この論文では2個の部分画像に対する装置構成法を実験とシミュレーション結果により検証した結果を述べる。

2．絵画を用いた情報処理法

カオティックな光応答は絵画の注視位置を創造的に変化させる[7]。この応答の時系列変化は初期値である入力絵画画像に依存し、入力絵画画像固有の応答が期待できる。この応答は絵画の意味に対応させることができる。

絵画は先に述べたように多値、多様、多義の非常に多くの情報を空間の広がりの中で多次元表示できる豊かな表現特性を持っている。 したがって絵画はそれを幾何学的に分析的に説明するのではなく全体を一塊の情報として扱うとき、その有用性を最大に高めることができる[3]。本研究はこのような情報処理を光学装置により実現しようとするものである。

システムを絵画により記述する明確な方法はない。本研究では絵画を一塊の情報として、ファジィ推論システムと同様にプロダクションルールでシステムを記述することにした。

絵画を用いた言語による記述法は言語による記述法を拡張した表現法であり、システム記述法は目視や基本的に表現次元非言語である。これら多次元情報語表現法は目視や基本的に表現次元非言語である。これら多次元情報語表現法は目視や基本的に表現次元非言語である。これら多次元情報語表現

光強度はカオティックに変化する。このとき注視位置の変化は入力画像毎に異なる固有の時間変化を示す。本研究ではこれを入力画像の意味に対応する情報として考える。

4．2個の部分画像の認識に基づく光応答

4・1 光学実験

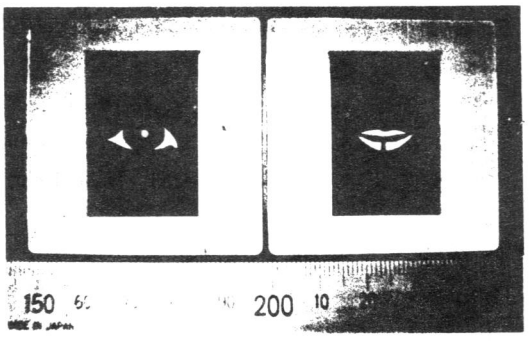
光学ファジィ・ニューロ・カオス・システムによる絵画の意味理解法を2個の部分画像に対する光学装置の構成により検証した。

実験では入力画像に目と口を強調した抽象画顔画像を用いた。この装置は図1の構成法に基づいて、入力された絵画の目と口画像の認識結果により、これらの注視位置を相反的に変更できるように構成した。図2に入力画像と参照画像をそれぞれ表示した透明フィルムを示す。

図3に実験装置の写真を示す。



(a)入力絵画を表示する透明フィルム



(b)部分画像を表示する透明フィルム

図2 実験に用いた画像

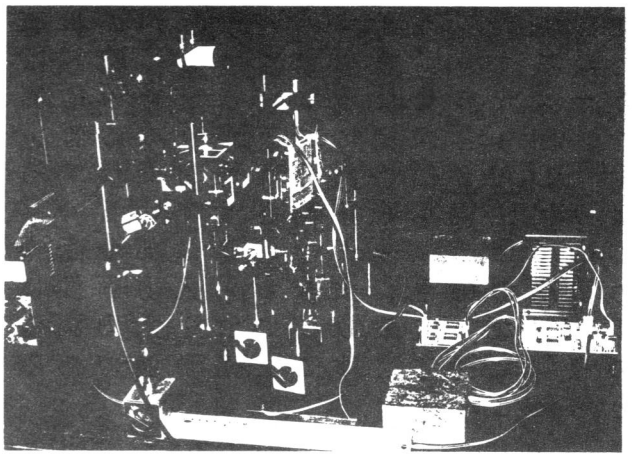


図3 実験装置

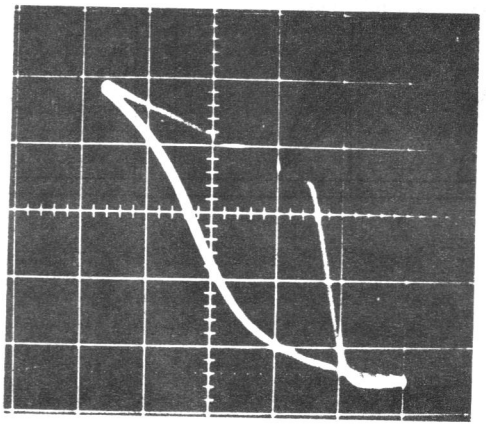


図4 目と口の認識に基づく応答光強度の変化

図4は本装置から出力された目と口のそれぞれの認識に対応する光強度を2次元表示した結果である。この実験では応答は周期解を示した。実験で得られた2次元表示の軌跡は右下がりのループ形状を示しており、システムが目と口の画像を交互に変えながら注視することが確認できた。

4・2 数値シミュレーション実験

前節で述べた装置構成をコンピュータでシミュレートしその応答の変化を数値で予測した。この実験では認識のための自己相関計算は除いて、入力絵画の変化に対する認識の強さを外部キーボードから入力した。図5はその応答の1例である。

数値実験から、部分画像の認識の強さとオープンループゲインの変化により、応答が安定平衡点、周期解、

準周期解、カオスのいずれかの状態になることが確認できた。　図５はカオス状態になっているときの応答で、図４と同様に右下がりの応答、すなわち２個の部分画像を交代するように注視点を移動させている。このカオティックな応答は部分画像の認識の強さ、すなわち入力画像により異なっており、これを入力画像の意味に対応さすことが可能であると考えている。

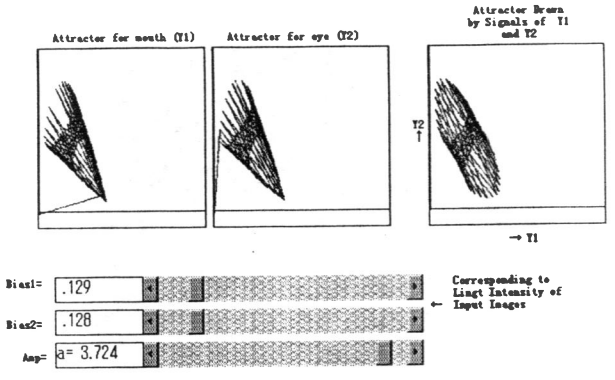


図５　数値シミュレーション実験結果

５．おわりに

絵画を理解する自律思考機械開発を目的とした２画像自律注視実験を行った。　これは自己相関光学計算法を用いた画像の認識法に基づくファジィ・ニューロシステムで、認識結果に基づいて部分画像の注視位置を自律的に変更できた。

本論文では２個の部分画像について注視させるよう構成したが、多数の画像についても同様の操作を実現できる。　このとき装置は自律的に部分画像を選択し注視するよう動作する。　今後このような複数画像の認識と注視位置の変更動作に基づいて問題解決を可能にする自律思考装置の開発を進めていく。

【参考文献】

［1］玉野和保：絵画による情報表現とその光学処理法、第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、FRA2-3、751-754 (1996)

［2］野口正一：高次コミュニケーション、電子情報通信学会誌、Vol.78(7)、711-714 (1995)

［3］向山弘樹、清水博：ホロニックコンピュータ、電子情報通信学会誌、Vol.79 (9)、901-905 (1996)

［4］Kazuho Tamano : Optical Method for Processing Information Depicted by Picture、Proc. of the 4th Int. Conf. on Soft Computing.、622-625 (1996)

［5］Kazuho Tamano : Massively Parallel Optical Fuzzy-Neuro-Chaos System for Processing Information Depicted by Picture、Proc. of 1996 Asian Fuzzy Systems Symposium、459-464 (1996)

［6］玉野和保：絵画を.理解する光学ファジィ・ニューロ・カオスシステムの開発、日本ファジィ学会中国四国支部第５回支部大会研究発表会概要集，13-16 (1996)

［7］関連として、奈良重俊、Peter Devis：カオスによるパターン発生とその適応制御、システム／制御／情報、Vol.37(11)、654-660 (1993)

［8］玉野和保：絵画による情報表現とその光学処理法,第９回多値論理とその応用研究会技術研究報告、MVL96-6, 39-46 (1996)

［9］玉野和保：光学画像を用いた推論法、第 10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、WB1-1、61-64 (1994)

［10］Kazuho Tamano : Optical Fuzzy-Neural Network System、Proc. of Int. Conf. on Neural Information Processing、1929-1931 (1994)

［11］Kazuho Tamano : Development of A Hyper-Prallel Optical Fuzzy-Neural Network Using Images, Proc. of IEEE Int. Symp. on Circuit and Systems,1160-1163 (1995)

［12］Kazuho Tamano : Hyper-Parallel Optical Fuzzy-Neural Network Using Images、Proc. of 6th Int. Fuzzy Systems Association World Cong.、679-681 (1995)

［13］申千雨、井口征士：人間の網膜特性持つ視覚センサー、計測自動制御学会論文集、Vol.31(11)、1817-1823 (1995)

《連絡先》　玉野　和保
〒 731-51 広島市佐伯区三宅２丁目 1-1
広島工業大学　工学部　電子工学科
Phone : 082-921-3121(ex.317) Fax : 082-923-2679
E-mail : tamano@cc.it-hiroshima.ac.jp
URL : http://tamanoac.cc.it-hiroshima.ac.jp

WEC3-1

ファジィデータ解析の動向
Trend of Researches on Fuzzy Data Analysis

和多田 淳三*
Junzo WATADA*

大阪工業大学*

Osaka Institute of Technology*

Abstract

In this note, the researches of fuzzy data analysis are reviewed relating to twelve fuzzy systems symposium till now. Since a fuzzy set have been proposed by L.A.Zadeh, a fuzzy clustering method was proposed by Bezdeck and Raspini. After then clustering methods are studied very widely. Various methods of data analysis have been proposed. Here we summarize the trend of researches of fuzzy data analysis.

1 はじめに

ここでは，これまでの１２回のファジィシステムシンポジウムでのファジィデータ解析の動向をまとめる．１９６５年のL.A.Zadeh のファジィ集合の提案後，早い時期にクラスタリング手法がBezdeck やRaspini によって提案され，パターン認識等が参加に行われた．以降，各種のデータ解析手法が提案されてきている．ここでは，ファジィシステムシンポジウムに限定してその動向をまとめる．

2 論文発表数

回	セッション	論文	データ解析	デモ
1	6	27	4	
2	13	35	3	
3	16	41	10	
4	18	60	9	
5	27	81	14	
6	39	124	5	11
7	56	168	15	
8	59	175	10	4
9	72	214	10	4
10	70	241	26	
11	72	255	23	
12	90	285	21	

表に示すように，研究論文数は飛躍的に伸びているが，データ解析の研究は，第3回(1987年)から第9回(1993年)まではほぼ１０件前後の一定数である．第１０回(1994年)以降は２０数件に伸びており2.5倍の伸びである．

3 研究の動向

また，手法別に分類すると，クラスタリングが２４，回帰分析が２６，判別分析が６，数量化分析が６，グラフが６，階層化・構造分析が１１，時系列分析が３，主成分分析が２，GMDHが５，多変量解析が４，ファジィ統計が１９，である．また関連として，分布が３，測度が３，効用・評価が１５，ソシオメトリが６，である．今までは，手法の開発が主であったが最近はこれらの手法を用いた応用研究も活発に成りつつある．このためにはファジィ多変量解析のパッケージの開発が望まれるところであるが，現在までのところパッケージは一件の発表があるのみである．

手法	論文数
クラスタリング	24
回帰分析	26
判別分析	6
数量化分析	6
グラフ	6
階層化・構造分析	11
時系列分析	3
主成分分析	2
GMDH	5
多変量解析	4
ファジィ統計	19
分布	3
測度	3
効用・評価	15
ソシオメトリ	6

4　むすび

研究の動向を，ファジィシステムシンポジウムの論文発表に限ってまとめた．セッションで言えば，ファジィＯＲの中で発表されていたものが最近は，ファジィクラスタリング，ファジィ多変量解析やファジィデータ解析のセッションが組まれるようになっている．さらに，関連セッションではファジィ評価や教育工学等でファジィデータ解析が応用されている．

参考文献

[1]　日本ファジィ学会第１回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，京都大学学友会館，１９８５年５月２８日・２９日

[2]　日本ファジィ学会第２回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，学習院大学百周年記念会館，１９８６年６月１６日－１８日

[3]　日本ファジィ学会第３回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，大阪電気通信大学図書館小ホール，１９８７年６月１日－３日

[4]　日本ファジィ学会第４回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，明治大学百周年記念大学会館，１９８８年５月３０日－３１日

[5]　日本ファジィ学会第５回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[6]　日本ファジィ学会第６回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，明治大学和泉校舎，１９９０年９月６日－８日

[7]　日本ファジィ学会第７回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，名古屋市中小企業振興会館，１９９１年６月１２日－１４日

[8]　日本ファジィ学会第８回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，広島国際会議場，１９９２年５月２６日－２８日

[9]　日本ファジィ学会第９回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，北海道大学学術交流会館，１９９３年５月１９日－２１日

[10]　日本ファジィ学会第１０回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

[11]　日本ファジィ学会第１１回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，琉球大学，1995年７月12日-14日

[12]　日本ファジィ学会第１２回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

主成分分析

[13]　山内 建二，藪内 賢之，和多田 淳三，中森 義輝，“ファジィデータの主成分分析法の構成”，第11回ファジィシステムシンポジウム，琉球大学，1995年７月12日-14日

[14]　杉本光公，安信誠二，“ファジィ主成分分析を用いた知的障害者の運動能力の総合評価”，第１２回ファジィシステムシンポジウム，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

判別分析

[15]　林勲，田中英夫，和多田淳三，“可能性判別分析”，第３回ファジィシステムシンポジウム，大阪電気通信大学図書館小ホール，１９８７年６月１日－３日

[16]　田中英夫，石渕久生，“区間線形モデルによる判別分析”，第４回ファジィシステムシンポジウム，明治大学百周年記念大学会館，１９８８年５月３０日－３１日

[17]　吉田光雄，“ファジィ・グループに対するファジィ判別分析”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[18]　石渕久生，田中英夫，“ファジィデータに対する判別分析”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[19]　石渕久生，田中英夫，岩本則子，“ファジィ判別モデルのガスセンサシステムへの応用”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[20]　田中 英夫，石渕 久夫，吉川 伸一，“指数型可能性判別分析”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

時系列・需要予測

[21]　甲斐沼 美紀子，松岡 譲，森田 恒幸，“エネルギー需要予測におけるあいまいさの取り扱いについて”，第９回ファジィシステムシンポジウム，北海道学術交流会館，1993年５月19日-21日

[22]　五十旗頭 正，菅家 正康，藤本 泰成，鈴木 新悟，“局所ファジィ再構成法によるカオス的振る舞いをする時系列データの短期予測”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

[23]　小澤和浩，渡邊匠，菅家正康，“統計モデルによるファジィ時系列の予測”，第１２回ファジィシステムシンポジウム，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

数量化理論

[24]　和多田淳三，田中英夫，“ファジィ数量化理論”，第１回ファジィシステムシンポジウム，京都大学学友会館，１９８５年５月２８日・２９日

[25]　森本正昭，和多田淳三，秋元武，吉岡雅人，“ファジィ数量化２類によるあいまい回答肢の研究”，第７回ファジィシステムシンポジウム，名古屋市中小企業振興会館，１９９１年６月１２日－１４日

[26]　高柳 浩，山ノ井 高洋，菅野 道夫，“不確かさを表す日本語形容詞の数量化分析による分類”，第９回ファジィシステムシンポジウム，北海道学術交流会館，1993年５月19日-21日

[27]　高柳 浩，山ノ井 高洋，菅野 道夫，“不確かさを表す日本語形容詞の数量化分析による分析”，第９回ファジィシステムシンポジウム，北海道学術交流会館，1993年５月19日-21日

[28]　田中 英夫，小山 研一，“可能性数量化二類”，第11回ファジィシステムシンポジウム，琉球大学，1995年７月12日-14日

回帰分析

[29]　田中英夫，和多田淳三，林勲，“ファジィ線形回帰分析における３つの定式化について”，第２回ファジィシステムシンポジウム，学習院大学百周年記念会館，１９８６年６月１６日－１８日

[30]　田中英夫，林勲，和多田淳三，“区間回帰分析”，第３回ファジィシステムシンポジウム，大阪電気通信大学図書館小ホール，１９８７年６月１日－３日

[31]　坂和正敏，矢野均，“ファジィ線形回帰モデルと大型小売店販売額予測問題への応用”，第４回ファジィシステムシンポジウム，明治大学百周年記念大学会館，１９８８年５月３０日－３１日

[32]　石渕久生，田中英夫，“区間回帰モデルとファジィ回帰モデルとの関係”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[33]　高萩栄一郎，“ファジィ回帰モデルによる連立同時方程式の係数推定”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[34]　坂和正敏，矢野均，菅野丘，“ファジィ入出力データに対するファジィ線形回帰分析”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[35]　田中英夫，石渕久生，“二次形式メンバーシップ関数による可能性線形システムの同定”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[36]　森本正昭，秋元武，和多田淳三，“可能性回帰分析の応用と評価”，第６回ファジィシステムシンポジウム，明治大学和泉校舎，１９９０年９月６日－８日

[37]　生駒哲一，廣田薫，“ファジィ関係を用いた関数近似による非線形自己回帰モデル”，第８回ファジィシステムシンポジウム，広島国際会議場，１９９２年５月２６日－２８日

[38]　生駒哲一，廣田薫，“メンバーシップ関数を用いたノンパラメトリック回帰モデル”，第８回ファジィシステムシンポジウム，広島国際会議場，１９９２年５月２６日－２８日

[39]　高萩 栄一郎，松下 倫子，“ファジィ測度を利用した回帰分析”，第９回ファジィシステムシンポジウム，北海道学術交流会館，1993年５月19日-21日

[40]　渡辺 則夫，今泉 忠，“あるファジィ回帰モデルについて”，第９回ファジィシステムシンポジウム，北海道学術交流会館，1993年５月19日-21日

[41]　高萩 栄一郎，松下 倫子，“ファジィ測度を利用した回帰分析 (2)”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

[42]　小西 幹彦，古殿 幸雄，奥田 徹示，浅居 喜代治，“ファジィ観測データからの回帰モデルと AIC”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

[43]　藪内 賢之，和多田 淳三，“超楕円関数を用いたロバストファジィ回帰モデル”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

[44]　水上 保，田中 英夫，石渕 久雄，“分散共分散行列を用いた可能性回帰分析”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

[45]　宮崎 秋弘，権奇澤，石渕 久生，田中 英夫，“ファジィニューラルネットワークによるファジィ回帰分析とその応用”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

[46]　竹村和久，呉俊彦，候徳字，“台湾における消費者の多属性態度研究 ―ファジィ評定データの可能性線形回帰分析”，第11回ファジィシステムシンポジウム，琉球大学,1995年７月12日－14日

[47]　永井栄一，奥田徹示，満田基温，“腰部疾患データに基づく意思決定への可能性線形回帰分析の応用”，第11回ファジィシステムシンポジウム，琉球大学,1995年７月12日－14日

[48]　三好哲也，中尾圭介，市橋秀友，長坂一徳，“ニューロ・ファジィ射影追跡による回帰と判別”，第１１回ファジィシステムシンポジウム，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

[49]　永井栄一，堀内敦司，奥田徹示，“可能性線形回帰分析と統計的線形回帰分析の比較”，第１２回ファジィシステムシンポジウム，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

[50]　小西幹彦，奥田徹示，古殿幸雄，浅居喜代治，“ＡＩＣによるファジィ区間データからの回帰モデルの選択”，第１２回ファジィシステムシンポジウム，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

[51]　田中英夫，水上保，李海寛，“可能性分布の同定法による可能性回帰分析”，第１２回ファジィシステムシンポジウム，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

[52]　田中英夫，小山研一，李海寛，“二次計画法による可能性回帰分析”，第１２回ファジィシステムシンポジウム，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

[53]　張新学，阿曽弘具，“学習ネットワークによるファジィ回帰分析”，第１２回ファジィシステムシンポジウム，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

[54]　藪内賢之，山内建二，和多田淳三，“ファジィスイッチングリグレッションモデルの構築”，第１２回ファジィシステムシンポジウム，早稲田大学国際会議場，１９９６年６月４日－７日

クラスタリング

[55]　大橋靖雄，“Fuzzy Clustering and Robust Estimation”，第１回ファジィシステムシンポジウム，京都大学学友会館，１９８５年５月２８日・２９日

[56]　廣田薫，岩間和也，国枝幸泰，“各種Ｆ－クラスタリング・アルゴリズムのテクスチャ解析への応用とその総合評価”，第１回ファジィシステムシンポジウム，京都大学学友会館，１９８５年５月２８日・２９日

[57]　勝又保雄，山下元，津田栄，“ファジィクラスタリングを応用した教材分析”，第４回ファジィシステムシンポジウム，明治大学百周年記念大学会館，１９８８年５月３０日－３１日

[58]　椎名乾平，“Tvberskyの類似性理論のファジィ集合による一般化とクラスター分析への応用”，第４回ファジィシステムシンポジウム，明治大学百周年記念大学会館，１９８８年５月３０日－３１日

[59]　宮本定明，“階層的クラスター分析における Wishart のKNN法とあるファジィグラフの連結成分との等価性について”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[60]　福山義幸，菅野道夫，“Fuzzy C-means 法における分割数の新しい選択法”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[61]　廣田薫，吉成有介，“ファジィクラスタリングを用いたファジィ制御規則の同定”，第５回ファジィシステムシンポジウム，流通科学大学，１９８９年６月２日－３日

[62]　宮本定明，“クラスター分析における類似度定義のためのファジィ集合モデルについて”，第７回ファジィシステムシンポジウム，名古屋市中小企業振興会館，１９９１年６月１２日－１４日

[63]　廣田豊彦，矢鳴虎夫，“投影面上における多重ファジィ集合とクラスタリング”，第７回ファジィシステムシンポジウム，名古屋市中小企業振興会館，１９９１年６月１２日－１４日

[64]　大西 真一，今井 英幸，伊達 淳，河口 至商，“ファジィデータのクラスタリングの一手法について”，第９回ファジィシステムシンポジウム，北海道学術交流会館，1993年５月19日-21日

[65]　佐藤 美佳，佐藤 義治，“ファジィクラスタリングモデルについて”，第９回ファジィシステムシンポジウム，北海道学術交流会館，1993年５月19日-21日

[66]　大西 真一，河口 致商，“ファジィ集合の代表点によるクラスタリングについて”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

[67]　領家 美奈，中森 義輝，“適応型ファジィクラスタリングと回帰分析”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-4日

[68] 佐藤 美佳, 佐藤 義治, "非対称な類似に対するファジィクラスタリングモデル", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[69] Rui-Ping Li and Masao Mukaidono, "Fuzzy Modeling and Clustering Neural Network", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[70] 宮本 定明, ユーディ・アグスタ, "L1 距離によるハードクラスタリングとファジィクラスタリングのアルゴリズム", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[71] 乾 誠貴, 亀井 且有, 井上 和夫, "クラスター数推定機能付き Fuzzy c-Means アルゴリズムの提案", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[72] 横家 美奈, 田辺 坦之, 中森 義輝, "ファジィモデリングのためのデータの分類と回帰の同時分析", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学, 1995年7月12日-14日

[73] 佐藤美加, 佐藤義治, "Affregation Operatorの性質とクラスタリング", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

[74] Rui-Ping Li and Masao Mukaidono, "Gausian Clustering and Its Application to Rock Classification", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

[75] 宮本定明, ユーディ・アウグスタ, "L1およびLp空間に基づくファジィc-meansアルゴリズムの効率化と停止性",

[76] 市橋秀友, 李九炯, 三好哲也, 長坂一朗, "内点法による K-means クラスタリング問題の連続緩和型解法", 第12回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

[77] 辻村泰寛, 玄光男, "遺伝的アルゴリズムによるファジィ・クラスタリング", 第12回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

グラフ

[78] 山下元, 勝又保雄, 増田栄, "ファジィグラフの近似システムと応用", 第3回ファジィシステムシンポジウム, 大阪電気通信大学図書館小ホール, 1987年6月1日-3日

[79] 勝又保雄, 増田栄, 山下元, "ファジィグラフを応用した教材分析法", 第6回ファジィシステムシンポジウム, 明治大学和泉校舎, 1990年9月6日-8日

[80] 大村一郎, "組織ネットワーク解析へのファジィグラフ理論の適用", 第7回ファジィシステムシンポジウム, 名古屋市中小企業振興会館, 1991年6月12日-14日

[81] 西村和子, 山下元, 伊藤良彦, 勝又保雄, 増田栄, "近似グラフを用いたファジィ評価構造分析", 第8回ファジィシステムシンポジウム, 広島国際会議場, 1992年5月26日-28日

[82] 西村 和子, 勝又 保雄, 増田 栄, 鶴内 美智子, 山下 元, "近似グラフを応用したファジィ評価構造分析 2", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[83] 勝又 保雄, 増田 栄, 清水 誠一, 滝沢 武信, 山下 元, 佐藤 章, "ファジィグラフを応用した教材構造分析 2", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[84] 山下元, 佐藤章, "ファジィグラフの近似表現と応用", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学,1995年7月12日-14日

GMDH

[85] 村澤, 田中英夫, 大野俊夫, 高木不折, "ファジィGMDHによるダム貯水池水温の解析と予測", 第2回ファジィシステムシンポジウム, 学習院大学百周年記念会館, 1986年6月16日-18日

[86] 市橋 秀友, 原田 尚彦, 長坂 一朗, "ニューロ・ファジィGMDHの階層数の選択", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[87] 松下 聖一, 里吉 明, 山岡 充昌, 古橋 武, 内川 嘉樹, "ファジィGMDHの階層数の選択", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[88] 松下聖一, 里吉明, 山岡充昌, 高木久弥, 古橋武, 内川嘉樹, "ファジィGMDHを用いた鉄系鋳付工程のファジィモデリング", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学,1995年7月12日-14日

[89] 乾口雅弘, 稲葉好, 坂和正敏, "距離に基づく区間・ファジィGMDH", 第12回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

階層化・構造分析

[90] 市橋秀友, 田中英夫, 黄永国, "階層化意思決定を用いた尺度構成法", 第3回ファジィシステムシンポジウム, 大阪電気通信大学図書館小ホール, 1987年6月1日-3日

[91] 飯田恭敬, 秋山孝正, 阿之言和幸, "ファジィ構造分析手法の交通圏分析への適用", 第3回ファジィシステムシンポジウム, 大阪電気通信大学図書館小ホール, 1987年6月1日-3日

[92] 長沢伸也, "ファジィ構造モデルにおける一対比較数の削減方法", 第7回ファジィシステムシンポジウム, 名古屋市中小企業振興会館, 1991年6月12日-14日

[93] 中村和男, "あいまいなカテゴリ反応データのファジィ構造化分析", 第8回ファジィシステムシンポジウム, 広島国際会議場, 1992年5月26日-28日

[94] 大里有生, 菅野道夫, "凸結合ファジィ関係式によるあいまいなシステムの同定", 第3回ファジィシステムシンポジウム, 大阪電気通信大学図書館小ホール, 1987年6月1日-3日

[95] 藤本 勝成, 室伏 俊明, 菅野 道夫, "CHoquet 積分による階層的評価モデル (2)", 第9回ファジィシステムシンポジウム, 北海道学術交流会館, 1993年5月19日-21日

[96] 宮武 直樹, 小沢 和浩, "ファジィ理論を用いた評価構造分析", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[97] 松居 辰則, 竹谷 誠, "ファジィ理論を用いたアンケートデータの構造分析法", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[98] 阿野大輔, 椎塚久雄, "ファジィ構造モデルを用いた快適な公園の分析について", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学,1995年7月12日-14日

[99] 吉原淳一, 松下裕, 神原浩, 羽根義, "室内空間の高さ感に対する評価プロセスのファジィ積分モデル—階層型モデルによる意識構造分析", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学,1995年7月12日-14日

[100] 岡田勇, 田島博之, "α-ファジィ測度を用いた階層的意思決定法", 第12回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

多変量解析

[101] 秋山孝正, 佐藤亮, 田名部博, "ファジィ多変量解析を用いた都市高速道路イメージの分析", 第8回ファジィシステムシンポジウム, 広島国際会議場, 1992年5月26日-28日

[102] 吉岡雅人, 秋元武, 森本正昭, "ファジィ多変量解析パッケージについて", 第6回ファジィシステムシンポジウム, 明治大学和泉校舎, 1990年9月6日-8日

[103] 田中 英夫, "可能性多変量解析とその応用", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学, 1995年7月12日-14日

[104] 長沢伸也, "多変量解析における選択数のファジィ決定", 第12回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

ファジィ統計

[105] 奥田徹示, "ファジィ観測によるデータ処理に対する補正について", 第1回ファジィシステムシンポジウム, 京都大学学友会館, 1985年5月28日・29日

[106] 奥田徹示, "ファジィ観測からのキュムラントの補正と最尤推定", 第3回ファジィシステムシンポジウム, 大阪電気通信大学図書館小ホール, 1987年6月1日-3日

[107] 古殿幸雄, 奥田徹示, 浅居喜代治, "2変量ファジィ観測に基づく統計的推測", 第4回ファジィシステムシンポジウム, 明治大学百周年記念大学会館, 1988年5月30日-31日

[108] 奥田徹示, 古殿幸雄, 浅居喜代治, "ファジィ観測に基づく統計的観測の情報量的評価", 第4回ファジィシステムシンポジウム, 明治大学百周年記念大学会館, 1988年5月30日-31日

[109] 古殿幸雄, 広沢博, 浅野知伸, 奥田徹示, 浅居喜代治, "ファジィデータ解析についての実験的考察", 第5回ファジィシステムシンポジウム, 流通科学大学, 1989年6月2日-3日

[110] 奥田徹示, 古殿幸雄, 前原恵二, 浅居喜代治, "ファジィ観測からの最尤推定法", 第6回ファジィシステムシンポジウム, 明治大学和泉校舎, 1990年9月6日-8日

[111] 古殿幸雄, 小西幹彦, 奥田徹示, 浅居喜代治, "2変量正規分布モデルに対するファジィ情報量基準", 第8回ファジィシステムシンポジウム, 広島国際会議場, 1992年5月26日-28日

[112] 渡辺則生, 菊池量志子, 今泉忠, "ファジィ確率変数による相関分析について", 第7回ファジィシステムシンポジウム, 名古屋市中小企業振興会館, 1991年6月12日-14日

[113] 小木元, "データによる統計的「知」のあいまいさへの一考察", 第7回ファジィシステムシンポジウム, 名古屋市中小企業振興会館, 1991年6月12日-14日

[114] 奥田徹示, 浅居喜代治, 広沢博, "ファジィ観測データに基づくキュムラントの補正と統計的仮説検定", 第7回ファジィシステムシンポジウム, 名古屋市中小企業振興会館, 1991年6月12日-14日

[115] 古殿幸雄, 奥田徹示, 浅居喜代治, "ファジィ観測データに基づく最尤推定判別関数", 第7回ファジィシステムシンポジウム, 名古屋市中小企業振興会館, 1991年6月12日-14日

[116] 古殿 幸雄, 奥田 徹示, 浅居 喜代治, "ファジィ統計量における重複区間関数の役割", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[117] 長沢 伸也, "メジアンポリッシュによるファジィデータの探索的解析", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[118] 椎塚 久雄, "POSデータのファジィ的取り扱いについて", 第10回ファジィシステムシンポジウム, 関西大学百周年記念会館, 1994年6月1日-4日

[119] 高萩栄一郎, "λ ファジィ測度とショケイ積分を利用した平均値・中央値の中間の評価", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学,1995年7月12日-14日

[120] 高萩栄一郎, "λ ファジィ測度とショケイ積分を利用した最大値・平均値・最小値の中間の評価", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学,1995年7月12日-14日第11回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

[121] 長沢伸也, "メジアンポリッシュによる多元ファジィデータの探索的解析", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

[122] 古殿幸雄, 浅居喜代治, 奥田徹示, 小西幹彦, "重複区間関数を用いるファジィ区間データの統計分布", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

[123] 古殿幸雄, 浅居喜代治, 小西幹彦, 奥田徹示, "ファジィ統計処理における重複観測データの概念", 第12回ファジィシステムシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, 1996年6月4日-7日

分布

[124] 田中英夫, 石渕久生, "正規可能性分布とその応用", 第7回ファジィシステムシンポジウム, 名古屋市中小企業振興会館, 1991年6月12日-14日

[125] 田中 英夫, 石渕 久夫, "指数型可能性分布による可能性分布", 第9回ファジィシステムシンポジウム, 北海道学術交流会館, 1993年5月19日-21日

[126] 吉川歩, 藤本大介, 西村武, "2種のメンバーシップ関数同定法について", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学,1995年7月12日-14日

測度

[127] 北垣郁雄, "意識調査に関わるデータ解析のためのρ-ファジィ測度とその応用 —ファジィ積分による評価", 第4回ファジィシステムシンポジウム, 明治大学百周年記念大学会館, 1988年5月30日-31日

[128] 森勉, 室伏俊明, "ファジィ測度・Choquet積分を用いた評価モデルの解析", 第5回ファジィシステムシンポジウム, 流通科学大学, 1989年6月2日-3日

[129] 宮武直樹, 古川修文, 島田道彦, 山田水城, "ファジィ積分によるアンケート調査の分析 —集落の滅失と再生について", 第11回ファジィシステムシンポジウム, 琉球大学,1995年7月12日-14日

効用・評価

[130] 中村和男, "2次元正準ファジィ数と選好判断におけるファジィ効用差", 第2回ファジィシステムシンポジウム, 学習院大学百周年記念会館, 1986年6月16日-18日

[131] 野口俊太郎, 永野幸一, 金安公造, "ファジィ多属性効用理論の水道評価への応用", 第3回ファジィシステムシンポジウム, 大阪電気通信大学図書館小ホール, 1987年6月1日-3日

[132] 北垣郁雄, 多賀谷敏夫, "尺度構成のファジィネスに基づいたファジィ評価システムの設計と開発",

[133] 立田ルミ, 三重野博司, "ソフトウェア技術者のための適正検査の評価", 第3回ファジィシステムシンポジウム, 大阪電気通信大学図書館小ホール, 1987年6月1日-3日

[134] 吉田光雄, "イメージ調査における項目および集団間の同一性の検討", 第3回ファジィシステムシンポジウム, 大阪電気通信大学図書館小ホール, 1987年6月1日-3日

[135] 田中和彦, 菅野道夫, "カラー印刷画像の主観評価について", 第4回ファジィシステムシンポジウム, 明治大学百周年記念大学会館, 1988年5月30日-31日

[136] 有田清三郎, 斉藤泰一, "ファジィ推論からみた多岐選択テスト —ファジィ・ルールの基礎的研究", 第4回ファジィシステムシンポジウム, 明治大学百周年記念大学会館, 1988年5月30日-31日

[137] 但馬文昭, 市川泉, 武藤隆, "教材用ソフトウェアの評価へのファジィ理論の適用", 第5回ファジィシステムシンポジウム, 流通科学大学, 1989年6月2日-3日

[138] 加藤裕一, 山口静馬, "変動騒音を入力とする心理応答システムの一評価手法", 第7回ファジィシステムシンポジウム, 名古屋市中小企業振興会館, 1991年6月12日-14日

[139] 宮武直樹，“ファジィ理論の教育評価への応用”，第7回ファジィシステムシンポジウム，名古屋市中小企業振興会館，１９９１年6月１２日－１４日

[140] 井上勝雄，安吉利典，“非加法的測度を用いたデザイン評価研究”，第7回ファジィシステムシンポジウム，名古屋市中小企業振興会館，１９９１年6月１２日－１４日

[141] 宮武直樹，清水誠一，安田隆人，“ファジィ理論を応用した授業分析とその評価”，第8回ファジィシステムシンポジウム，広島国際会議場，１９９２年5月２６日－２８日

[142] 清水 誠一，山下 元，“ファジィ推論を応用した教育評価法－書写の技術評価と感情評価－”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-４日

[143] 森田和元，並子仁一，岡田竹雄，伊藤紳一郎，“二輪自動車の被視認性の評価値に関するファジィ解析”，第8回ファジィシステムシンポジウム，広島国際会議場，１９９２年5月２６日－２８日

[144] 但馬文昭，市川泉，武藤隆，“教材用ソフトウェアの評価へのファジィ理論の適用”，第9回ファジィシステムシンポジウム，北海道大学学術交流会館，１９９３年5月１９日－２１日

ソシオメトリ

[145] 山下元，滝田栄，勝又保雄，“ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析”，第5回ファジィシステムシンポジウム，電通科学大学，１９８９年6月２日－３日

[146] 滝田栄，勝又保雄，山下元，“ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析２”，第6回ファジィシステムシンポジウム，明治大学和泉校舎，１９９０年9月６日－８日

[147] 山下元，清水誠一，西村和子，伊藤良彦，勝又保雄，滝田栄，“ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析３”，第７回ファジィシステムシンポジウム，名古屋市中小企業振興会館，１９９１年6月１２日－１４日

[148] 清水誠一，山下元，西村和子，伊藤良彦，滝田栄，勝又保雄，“ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析４”，第8回ファジィシステムシンポジウム，広島国際会議場，１９９２年5月２６日－２８日

[149] 宮地 功，“ソシオメトリックステストにおける間隔尺度法と列挙法の間の選好ファジィ関係”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-４日

[150] 清水 誠一，且又 保雄，滝田 栄，西村 和子，山下 元，“ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析５”，第10回ファジィシステムシンポジウム，関西大学百周年記念会館，1994年６月１日-４日

連絡先　〒５３５　大阪市旭区大宮５－１６－１
大阪工業大学　工学部
経営工学科
和多田淳三
TEL　06-954-4327
FAX　06-952-6197
e-mail watada@dim.oit.ac.jp

WEC3-2

遺伝的アルゴリズムによる学習用データからの知識獲得

Knowledge Acquisition from Training Samples Using a Genetic Algorithm

村田 忠彦*, 石渕 久生**
Tadahiko Murata and Hisao Ishibuchi

*足利工業大学工学部経営工学科, **大阪府立大学工学部経営工学科
*Department of Systems and Industrial Engineering, Ashikaga Institute of Technology
**Department of Industrial Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract: In this paper, we examine the performance of a GA-based multi-objective fuzzy rule selection method. The method can be applied to high-dimensional pattern classification problems with many continuous attributes. Our rule selection method has two objectives: to minimize the number of selected fuzzy if-then rules and to maximize the number of correctly classified patterns. We examine the search ability of our method to find compact rule sets with high classification performance for training patterns. We also examine the generalization ability of the obtained rule sets for test patterns.

1. はじめに

本研究では，ＧＡに基づくファジィルール選択手法[1,2]の性能評価を行う．文献[1,2]のルール選択手法は，識別システムに含まれるルール数の最小化と，識別システムによる正答数最大化の二つの目的を満たすようにルール選択を行っている．文献[1]の手法には，次元の数が増えるにしたがって，候補ルールの数が指数関数的に増大するという問題点があったため，高次元の識別問題に対して，現実的には適用不可能であった．文献[2]では，言語値を割り当てる次元の数を制限することにより，生成される候補ルールの数を少なくし，高次元の問題に対してルール選択手法の適用を可能にしている．また，ルールの前件部ファジィ集合が言語値に対応していることにより，意思決定者が容易に理解できるルールが獲得できる（図１参照）．

本研究では，多目的ファジィルール選択手法[2]により，少数のファジィルールで構成される理解しやすい識別システムが構築されることを示す．さらに，ルール選択手法により得られた識別システムの評価用データに対する汎化能力を調べる．

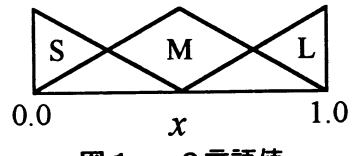


図１． ３言語値
(S: *small*, M: *medium*, and L: *large*).

2. 多目的ファジィルール選択手法

ＧＡに基づく多目的ファジィルール選択手法[2]では，n次元パターン識別問題に対して，次のような言語的識別ルールを生成する．

$$\text{Rule } R_j: \text{If } x_{p1} \text{ is } A_{j1} \text{ and } \ldots \text{ and } x_{pn} \text{ is } A_{jn} \text{ then Class } C_j \text{ with } CF = CF_j, \quad (1)$$

ここで，R_jはj番目のファジィルールのラベル，$A_{j1},\ldots,A_{jn}$は区間[0,1]上の前件部ファジィ集合，C_jは結論部クラス，CF_jはルールの確信度を表している．前件部ファジィ集合として図１の３つの言語値にDon't careを含めた４つのファジィ集合を用い，ファジィルールを生成する．全ての次元に対して，４つのファジィ集合を用いた場合，4^n個のファジィルールが生成される．したがって，次元の数が多くなるほど，指数関数的にルール数が増えることになる．文献[2]では，言語値を割り当てる次元の数を制限し，残りの次元にDon't careを割り当てることにより，生成されるルール数を削減している．例えば，$n=10$のとき，全ての次元を用いた場合，$4^{10} \cong 10^6$個のルールが生成されるが，言語値を割り当てる次元の数を２までに制限すると，生成されるルール数は436個となる．

取り扱いが可能な数に限定された候補ルールの集合をS_{ALL}とし，多目的ＧＡを用いてルールを選択し，高性能でコンパクトな識別システムを構築する．多目的ＧＡでは，ルール集合を個体（解）として扱う．目的関数は学習用データの正答数最大化と識別システムに含まれるルール数最小化の二つである．多目的ＧＡのアルゴリズムは，次のように書くことができる．

Step 0(初期化)：ランダムに初期個体群を生成する．個々のルールがルール集合に含まれるかどうかを{0,1}で表現する．ここで，0,1はそれぞれ，対応するルールを含まない，含むを意味する．

Step 1(評価)：二つの目的関数値を計算し，非劣解集合を更新する．

Step 2(選択)：二つの目的関数値を線形結合した適応度に基づいて，各ルール集合の選択を行う．

Step 3(遺伝的操作)：交叉操作と突然変異操作を適用する．

Step 4(エリート戦略)：アルゴリズム実行中に更新された非劣解集合からランダムに選ばれたルール集合をエリート個体として現在の世代に加える．

Step 5(終了判定)：終了基準を満たしている場合，アルゴリズムの実行を終了する．それ以外の場合，Step 1へ戻る．

3．数値実験

13 次元，３クラス問題であるワインデータ(UC Irvine Data Sets)に対して，次のようなパラメータを用いて，多目的ＧＡを実行した．

集団サイズ：20 個体
エリート個体の数：３
交叉確率：1.0
突然変異確率：$P_m(1\to 0)=0.1$，$P_m(0\to 1)=0.001$
終了基準：1000 世代

Corcoran と Sen[3]は，ＧＡにより得られた 60 個のクリスプなルールの性能として，次のような学習用データに対する正答率を報告している(10 回の試行に対する結果)．

最良：100%，平均：99.5%，最悪：98.3%

多目的ＧＡを適用することにより，表１のような８個の非劣解を得ることができた．例えば，次のような７つのルールは全ての学習用パターンを正しく識別することができる．

If x_{13} is L then Class 1 (1.00)
If x_7 is M & x_{13} is L then Class 1 (0.46)
If x_{10} is S then Class 2 (0.51)
If x_2 is S & x_{13} is S then Class 2 (0.77)
If x_4 is L & x_{10} is S then Class 2 (0.76)
If x_7 is S & x_{10} is M then Class 3 (0.69)
If x_{11} is S & x_{12} is S then Class 3 (0.93)

ここで，ルールの最後の括弧内の数字は，ルールの確信度を表している．これらのルールから，１３個の次元のうち，７個の次元で全ての学習用データを正しく識別できることがわかる．

表１より，少数のルールから構成される優れた識別システムが得られていることがわかる．また，条件部に言語値が用いられている次元の数が少ないことから，意思決定者が理解しやすい識別システムが得られていることがわかる．

さらに，識別システムの汎化能力を 10-CV 法を用いて調べた結果を表２に示す．表２において，ルール数が６個，７個，８個の識別システムは，それぞれ，１０種類の学習用データのうち，７種類，５種類，２種類の学習用データに対してしか得られなかったので，全ての学習用データをテストデータとして用いることができていないことに注意されたい．

表１．多目的ＧＡにより得られた非劣解集合

ルール数	0	1	2	3	4	5	6	7
正答数	0	71	125	171	174	175	177	178
正答率(%)	0.0	39.9	70.2	96.1	97.8	98.3	99.4	100
誤答数	0	74	52	6	4	3	1	0
誤答率(%)	0.0	41.6	29.2	3.4	2.2	1.7	0.6	0.0
拒否数	178	33	1	1	0	0	0	0
拒否率(%)	100	18.5	0.6	0.6	0.0	0.0.	0.0	0.0

表２．10-CV に対する結果

ルール数	0	1	2	3	4	5	6	7	8
正答数	0	71	126	171	173	173	122	88	35
正答率(%)	0.0	39.9	70.8	96.1	97.2	97.2	98.4	100	100
誤答数	0	79	52	7	5	5	2	0	0
誤答率(%)	0.0	44.4	29.2	3.9	2.8	2.8	1.6	0.0	0.0
拒否数	178	28	0	0	0	0	0	0	0
拒否率(%)	100	15.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表１と表２の比較から，評価用データに対しても，多目的ＧＡにより得られた識別システムは，高い識別能力を持っていることがわかる．また，少数のルールにより構成されているにも関わらず，識別拒否率がかなり低いことがわかる．これは，言語値を割り当てる次元の数を少なくすることにより，識別システムを構成するルールが，入力空間のかなり多くの部分を覆っていることに起因している．例えば，言語値が全ての次元に割り当てられている場合，一つのルールは入力空間の 0.51%を覆うことになるが，言語値が二つの次元にのみ割り当てられている場合，入力空間の 44.4%の部分を覆っていることになる．

4．おわりに

本研究では，ＧＡに基づくファジィルール選択手法の性能評価を行った．言語値を割り当てる次元の数を制限することにより，意思決定者に理解しやすいルールが得られることを示した．また，評価用データに対する数値実験により，ルール選択手法により得られた識別システムの汎化能力がかなり高いことを示した．これは各ルールの対応する入力空間が広いことに起因すると考えられる．以上の結果から，提案手法により得られた識別システムが，学習用データに対しても，評価用データに対しても，高い識別能力を持つことが実験的に確かめられた．

参考文献

[1] H.Ishibuchi, K.Nozaki, N.Yamamoto, and H.Tanaka, "Selecting fuzzy if-then rules for classification problems using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol.3, No.3, pp.260-270 (1995).

[2] H.Ishibuchi and T.Murata, "Minimizing the fuzzy rule base and its performance by a multi-objective genetic algorithm," *Proc. of The 6th FUZZ-IEEE* (Barcelona, Spain, July 1-5, 1997, to appear).

[3] A.L.Corcoran and S.Sen, "Using real-valued genetic algorithms to evolve rule sets for classification," *Proc. 1st ICEC* (1994) 120-124.

問い合わせ先

〒５９３　大阪府堺市学園町１－１
大阪府立大学工学部経営工学科　　石渕久生
Phone: 0722-52-1161　FAX: 0722-59-3340
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

WEC3-3

GAによるファジィ・プロトタイプ選択
Fuzzy Prototype Selection by a Genetic Algorithm

○中島 智晴　　石渕 久生
Tomoharu Nakashima and Hisao Ishibuchi
大阪府立大学工学部
College of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract—— In this paper, we propose a genetic-algorithm-based method for designing a fuzzy rule-based classification system. The task of the genetic algorithm is: to minimize the error rate, to minimize the rejection rate and to minimize the number of training patterns that are selected as prototypes. In the classification system, a fuzzy if-then rule is generated directly from each selected training pattern. By computer simulations on a high-dimensional pattern classification problem, we show that the proposed method performs well both for training data and for test data.

1. はじめに

パターン識別問題に対して，最もよく知られている識別手法に，最近傍決定則[1]がある．最近傍決定則では，未知パターンは，最も近い学習用パターンにより識別される．最近傍決定則は，学習用パターンが無限に存在するときには，誤識別率がベイズ識別の2倍よりも少ないなど，様々な性質が知られているが，一方で，学習用パターンの数が多い場合，未知パターンの近傍のパターンを見つけるために長い計算が必要となる，また，学習用パターンを記憶するために大きなメモリが必要となるといった問題点もある．このような問題点に対して，与えられた学習用パターンから，少数の学習用パターン(プロトタイプ)を選択し，それらを用いて識別器を構築することが考えられる．

また，ファジィ If-Then ルールを用いたパターン識別手法の研究も盛んに行なわれている(例えば，[2]など)．ファジィ If-Then ルールで構成されるファジィ識別システムは，ファジィ If-Then ルールを学習用パターンとみなせば，最近傍決定則を行なう識別器の一種とみなすことができる．

本研究では，与えられた学習用パターンの中から，プロトタイプとなるパターンを遺伝的アルゴリズムにより選択する手法を提案する．ファジィ If-Then ルールは，選択された学習用パターンから直接生成される．遺伝的アルゴリズムでは，ファジィ If-Then ルールの集合，すなわち，ファジィ識別システムを一つの個体として扱う．また，識別性能が高く，ルール数の少ない個体ほど高い適応度を割り当てる．数値実験により，提案手法の有効性を示す．

2. ファジィ識別システム

2. 1 ファジィ If-Then ルールの生成

いま，n 次元 c クラスパターン識別問題において，与えられた m 個の学習用パターンから，N 個がプロトタイプ $\mathbf{a}_j = (a_{j1}, \cdots, a_{jn})$, $j = 1, \cdots, N$ として選択されているとする．本研究で扱うファジィ識別システムでは，プロトタイプから，次の形式のファジィ If-Then ルールが生成される．

$$\text{Rule } R_j: \text{If } \mathbf{x} \text{ is } \mathbf{A}_j \text{ then Class } C_j \text{ with } CF_j,\ j = 1, \cdots, N \quad (1)$$

ここで，R_j はルールのラベル，$\mathbf{x}$ は n 次元ベクトル，$\mathbf{A}_j$ は条件部ファジィ集合，C_j は結論部クラス，CF_j は確信度である．$\mathbf{A}_j$ として，本研究では，次式の円錐型ファジィ集合を用いる(図1参照)．

$$\mu_j(\mathbf{x}) = \max\{0, 1 - \frac{d(\mathbf{a}_j, \mathbf{x})}{r_j}\} \quad (2)$$

ここで，$\mathbf{a}_j$ は $\mathbf{A}_j$ の中心ベクトル，r_j は半径である．

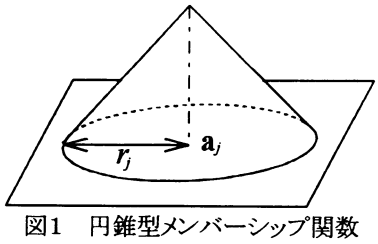


図1　円錐型メンバーシップ関数

条件部ファジィ集合 $\mathbf{A}_j$ の半径 r_j は，以下の式により決定される．

$$r_j = \min\{\alpha \cdot d(\mathbf{a}_j, \mathbf{a}_k) | k = 1, \cdots, N; k \neq j\} \quad (3)$$

ここで，α は，正の定数である．数値実験では，$\alpha = 2$ とした．

ルール R_j の結論部 C_j は，プロトタイプ $\mathbf{a}_j$ の属するクラスとする．確信度 CF_j は，以下の手続きにより決定される．まず，クラスごとに，与えられた学習パターンの R_j への適合度の和 $\beta_{\text{Class}\,h}$ を求める．

$$\beta_{\text{Class}\,h} = \sum_{\mathbf{x}_p \in \text{Class}\,h} \mu_j(\mathbf{x}_p),\ h = 1, \cdots, c \quad (4)$$

次に，確信度 CF_j を計算する．

$$CF_j = (\beta_{\text{Class}\,C_j} - \bar{\beta}) / \sum_{h=1}^{c} \beta_{\text{Class}\,h} \quad (5)$$

$$\bar{\beta} = \sum_{h \neq C_j} \beta_{\text{Class}\,C_j} / (c - 1) \quad (6)$$

ただし，CF_j が負の値をとるとき，そのファジィ If-Then ルールを生成せず，対応するプロトタイプ $\mathbf{a}_j$ を選択された学習用パターンから消去する．この場合，すべての選択された学習用パターンについて，ファジィ If-

Then ルールの再生成を行なう.

2. 2 パターン識別

前節で述べたファジィIf-Thenルールの生成法により, プロトタイプと同じ数のファジィ If-Then ルールが生成される. 生成されたファジィIf-Thenルールの集合(すなわちファジィ識別システム)をSで表すことにする. Sによる未知パターン$\mathbf{x}^{\text{new}}$の識別は,

以下のように行なわれる. まず, 各ファジィ If-Then ルールに対して, 未知パターンのと適合度と確信度の積α_jを計算する.

$$\alpha_j = \mu_j(\mathbf{x}^{\text{new}}) \cdot CF_j, \quad j = 1, \cdots, N \tag{7}$$

次に, 最大のα_jを持つルール$R_{\hat{j}}$を求める. 未知パターンは, ルール$R_{\hat{j}}$の結論部クラス$C_{\hat{j}}$と識別される.

3. プロトタイプ選択

本章では, 少数のプロトタイプを選択して高性能なファジィ識別システムを構築するために, 遺伝的アルゴリズムを用いる手法を述べる. すなわち, 遺伝的アルゴリズムの目的は, 誤識別率や識別拒否率の小さな識別システムSを, できるだけ少ないプロトタイプを用いて構築することである. この問題は, 以下のコスト関数の最小化問題と等価である.

$$C(S) = W_{\text{error}} \cdot \text{NMP}(S) + W_{\text{reject}} \cdot \text{NRP}(S) + W_{\text{rule}} \cdot |S| \tag{8}$$

ここで, NMP(S)は誤識別された学習用パターンの数, NRP(S)は識別拒否された学習用パターンの数, $|S|$はSを構成するファジィ If-Then ルールの数, W_{error}, W_{reject}, W_{rule}は正の定数である.

遺伝的アルゴリズムをこの問題に適用可能とするために, Sを 0 と 1 の2値を用いた文字列によりコード化する.

$$S = s_1 s_2 \cdots s_m \tag{9}$$

ここで, $s_p = 1$は, p 番目の学習用パターン$\mathbf{x}_p$がSに含まれていることを表し, $s_p = 0$は, $\mathbf{x}_p$がSに含まれていないことを表す. 以下に, 遺伝的アルゴリズムによるプロトタイプ選択の手順を示す.

Step 1: (**初期世代の生成**)各ビット(s_p)に 0 または 1 を割り当てることにより, N_{pop} 個の個体を生成する.

Step 2: (**個体の評価**)文字列Sの評価を行なう. 評価は, S からなるファジィ識別システムを用いて学習用パターンを識別し, 式(8)のコスト関数$C(S)$を求めることにより行なわれる.

Step 3: (**遺伝的操作**)コスト関数$C(S)$に応じた確率で親となる個体を選択し, 一様交叉により新しい個体を生成する. 新しく生成された個体の各ビットに対して突然変異操作を適用する. 突然変異では, ある確率でビットの値(0 または 1)を入れ替える.

Step 4: (**終了判定**)本研究では, 終了基準として, 世代数を用いることにする. 終了基準が満たされていなければ, Step 2 へ戻り, アルゴリズムを続行する.

4. 数値実験

4. 1 学習用データに対する性能

提案手法の有効性を調べるために, ワインデータを用いて数値実験を行なった. ワインデータは, 13 次元 3 クラスのパターン識別問題であり, 178 個の学習用データから構成されている. 個体数 20, 初期世代生成において, ビットの値が 1 となる確率 0.1, 交叉確率 0.9, 突然変異確率 $P_{\text{m}}(0 \to 1) = 0.01$, $P_{\text{m}}(1 \to 0) = 0.1$, 重み $(W_{\text{error}}, W_{\text{reject}}, W_{\text{rule}}) = (4,2,1)$, 終了基準 1,000 世代 というパラメータ設定を用いた. すべての学習用データを用いた数値実験により, 以下の結果が得られた. 表1は 25 回の数値実験の平均である.

表1 学習用データに対する数値実験結果

誤識別率	0.4%
識別拒否率	0.0%
ルール数	8.7

4. 2 評価用データに対する性能

次に, 4.1 節と同じパラメータ設定を用いて評価用データに対する性能を調べた. 評価用データに対する性能の評価方法として, leaving-one-out 法を用いた. 数値実験により, 以下の結果が得られた.

表2 評価用データに対する数値実験結果

誤識別率	6.2%
識別拒否率	0.0%
ルール数	8.5

5. おわりに

本研究では, 遺伝的アルゴリズムを用いて, 高性能でルール数の少ないファジィ識別システムを構築する手法を提案した. 提案手法では, プロトタイプの集合が一つの個体として扱われた. また, 識別器の構築において, 学習用パターンから選択されたプロトタイプを用いて, 直接ファジィ If-Then ルールを生成した. 数値実験により, 提案手法の有効性を示した.

参考文献

[1] T.M. Cover and P.E. Hart, "Nearest neighbor pattern classification," *IEEE Trans. on Information Theory* Vol. 13, pp.21-27, 1967.

[2] 石渕 久生, 野崎 賢, 田中 英夫, "ファジィルールを用いたパターン識別", 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.1, pp.74-84, 1993.

問い合わせ先:
〒593 大阪府堺市学園町1－1
大阪府立大学 工学部 経営工学科
石渕 久生
TEL: 0722-52-1161(Ext. 2377)
FAX: 0722-59-3340
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

エントロピー正則化法によるファジィクラスタリング
FUZZY c-MEANS USING REGULARIZATION BY ENTROPY

宮本 定明, 向殿 政男*

Sadaaki Miyamoto and Masao Mukaidono*

筑波大学電子・情報工学系, 筑波大学先端学際領域研究センター

Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba

Center for Tsukuba Advanced Research Alliance, University of Tsukuba

* 明治大学理工学部

* Department of Computer Science, Meiji University

Abstract

A maximum entropy method has been proposed by one of the authors as a variation of the fuzzy c - means. In this paper this method and the standard fuzzy c-means are regarded as *regularizations* of the crisp k - means. Further variations of the regularization are developed that are parallel to the corresponding methods of the ordinary fuzzy c - means. Moreover, the fuzzy k - nearest neighbor classification rule which has been derived from the standard fuzzy c - means is transformed into the corresponding method within the framework of regularization.

1 はじめに

ファジィc-平均法 [1] は最も良く知られたファジィクラスタリングの方法であるが、最近、李と向殿 [3] は最大エントロピー法を提案した。また、宮本 [4] は、ファジィc-平均法は一種の正則化であると主張している。

この報告では、正則化の観点を進めることによって、ファジィクラスタリングに新しい方法が見いだされることを示す。従来のファジィc-平均法のアルゴリズムにおけるメンバーシップの計算式が、対数変換によって最大エントロピー法と同一の形式をもつこと、ファジィc-多様体など他の方法においても正則化によるアルゴリズムが開発できること、ファジィk-最近隣法などのファジィ分類法で従来のものと異なる方法が得られることなどがわかる。

2 ファジィc-平均法と正則化

ファジィc-平均法を簡単に復習しよう。個体 $X = \{x_1, ..., x_n\}$ はユークリッド空間の点であるとする。最適化すべき目的関数を

$$J_m(U, v) = \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^m d(x_k, v_i)$$

$(m \geq 1)$ とする。ここで、$U = (u_{ik})$ は x_k がクラスター i に属するメンバーシップで、

$$M = \{(u_{ik}) | \sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1, u_{ik} \in [0,1], k = 1, ..., n\}.$$

に値をとる。また、$d(x_k, v_i) = \|x_k - v_i\|_2^2$ であり、$\|\cdot\|_2$ はユークリッドノルムとする。このとき、次のアルゴリズム CM1–CM4 [1] が標準的である。

CM1. Set initial values for $\bar{U}$ and $\bar{v}$.

CM2. Minimize $J_m(U, \bar{v})$ with respect to $U \in M$ and let the optimal solution be $\bar{U}$.

CM3. Minimize $J_m(\bar{U}, v)$ with respect to v and let the optimal solution be $\bar{v}$.

CM4. Check the stopping criterion. If the criterion is not satisfied, go to **CM2.**

目的関数において、$m > 1$ のとき、ファジィ解 U が得られるが、$m = 1$ のときは、解はクリスプとなり、ファジィクラスタリングとはならない。

李と向殿 [3] はエントロピー関数の最大化に問題を置き換えて $m = 1$ の場合を扱っている。この方法では、乗数 m を考慮する必要がない代わりに、元の目的関数にパラメータを与えて制約条件に取

り入れている。このとき現れるパラメータが先の乗数 m とどのような関係にあるかが問題となる。

この点を考察するには、正則化の概念が便利である。正則化とは、もとの問題が適切でない場合、問題を近似的な問題に変化させて解くことを意味する。典型的な正則化では、もとの目的関数 J に対し、正則化関数 K と正則化パラメータ α ($\alpha > 0$) を導入し、$J_\alpha = J + \alpha K$ の最小化を考える。

正則化によって最大エントロピー法を考察してみよう。$J = J_1$, $K = \sum_k \sum_i u_{ik} \log u_{ik}$, $\lambda = \alpha^{-1}$ として、CM2 では次の最適化を考える。

$$minimize \quad J_1(U,v) + \lambda^{-1} \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} u_{ik} \log u_{ik}$$

$$subject\ to \quad \sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1$$

最適解が次式で与えられることは容易にわかる。

$$u_{ik} = \frac{e^{-\lambda d_{ik}}}{\sum_{j=1}^{c} e^{-\lambda d_{jk}}}. \tag{1}$$

J_m を $U \in M$ で最適化した場合の従来の解

$$\bar{u}_{ik} = [\sum_{j=1}^{c} (\frac{d(x_k, \bar{v}_i)}{d(x_k, \bar{v}_j)})^{\frac{1}{m-1}}]^{-1}, \tag{2}$$

は (1) と密接な関係がある。(2) で $\bar{d}_{ik} = d(x_k, \bar{v}_i)$ $\beta = \frac{1}{m-1} > 0$ とおけば、$a^z = e^{z \log a}$ より、

$$\bar{u}_{ik} = [\sum_{j=1}^{c} (\frac{\bar{d}_{ik}}{\bar{d}_{jk}})^{\beta}]^{-1} \tag{3}$$

$$= [\sum_{j=1}^{c} e^{\beta(\log \bar{d}_{ik} - \log \bar{d}_{jk})}]^{-1} \tag{4}$$

$$= \frac{e^{-\beta \log \bar{d}_{ik}}}{\sum_{j=1}^{c} e^{-\beta \log \bar{d}_{jk}}}. \tag{5}$$

すなわち、(1) と (5) は、$\lambda = \beta$, $d_{jk} = \log \bar{d}_{jk}$ と対応させることにより、同一の形式となる。

3 正則化によるいくつかの方法

ここで報告した正則化の概念から、従来試みられた研究に並行して、次の考察が可能であることがわかる。

(I) Bezdek らが行ったように、ファジィ c-多様体やファジィ c-回帰などの考察をエントロピー正則化によって行うことができる。

(II) エントロピー正則化の概念は、ユークリッド空間以外の空間、たとえば、L_1 空間におけるファジィ c-平均などにおいても有用である。

(III) さらに、ファジィ k-最近隣法やファジィプロトタイプ法 [2] などのファジィ分類の方法が、新たにエントロピー正則化から得られる。

このうち、(III) についてだけ、簡単に記そう。すなわち、$y_i, ..., y_\ell$ のファジィ分類がわかっていることと、ファジィクラスのプロトタイプが $z_1, ..., z_c$ であることを仮定すると、正則化から得られるファジィ分類法として、次式が得られる。

(a) ファジィ k-最近隣法

$$u_j(x) = \frac{\sum_{i=1}^{k} u_{ji} e^{-\lambda d(x, y_i)}}{\sum_{\ell=1}^{k} e^{-\lambda d(x, y_\ell)}}. \tag{6}$$

(観測 x を k-最近隣対象 $y_1, ..., y_k$ を用いて分類する。)

(b) ファジィプロトタイプ法

$$u_j(x) = \frac{e^{-\lambda d(x, z_j)}}{\sum_{\ell=1}^{c} e^{-\lambda d(x, z_\ell)}}. \tag{7}$$

このように、エントロピーによる正則化法は有望であると考えられる。今後、様々な数値例について、有効性を確かめていきたい。なお、本研究は、筑波大学 TARA センター (Tsukuba Advanced Research Alliance) におけるプロジェクト研究の一部である。

参考文献

[1] J. C. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum, 1981.

[2] J. M. Keller, M. R. Gray, and J. A. Givens, Jr., *IEEE Trans., on Syst., Man, and Cybern.*, 15, 580–585, 1985.

[3] R.-P. Li and M. Mukaidono, *Proc. of the 4th IEEE Intern. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE/IFES'95)*, Yokohama, Japan, March 20-24, 1995, 2227–2232.

[4] S. Miyamoto, *Journal of the Japan Society of Fuzzy Theory and Systems*, 8, 423–430, 1996 (in Japanese).

連絡先: 〒305 つくば市天王台 1-1-1
筑波大学電子・情報工学系　宮本　定明
tel:0298-53-5346　fax:0298-53-6471
email:miyamoto@is.tsukuba.ac.jp

3-wayデータに対するクラスタリングモデル

Clustering Model for 3-way Data

佐藤 美佳*, 佐藤 義治**
Mika SATO, Yoshiharu SATO

* 北海道武蔵女子短期大学
Hokkaido Musashi Women's Junior College
** 北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract– This paper proposes a method of classification for longitudinal asymmetric 3-way data which is composed of objects and times. In the case of 2-way data, the clustering of objects are usually based on the values of similarities or dissimilarities between a pair of objects. However, for 3-way data, a clustering of objects is not always coincident for all times, because the values of similarities vary with each time. Therefore, the clustering problem for 3-way data can be regarded as a multicriteria optimization problem. We show that a multicriteria fuzzy clustering, which is an extension of this hard clustering problem, has merit to obtain Pareto efficient clusters.

1. はじめに

与えられる類似性データが非対称構造をもち, かつ経時的に変化する場合におけるクラスタリングモデルを提案する. このモデルでは, 各時点に依存しない個体の分類を得ると同時に得られたクラスターの経時的性質を表現する.

著者らはこれまでに, ファジィ理論の概念を導入したファジィクラスタリングモデルを提案している. [5] このモデルにおいては, パラメーター（クラスター数）の推定値の安定性を考慮するならば, 少数のクラスターで類似性の構造が説明可能となる. さらに, 類似度構造の多様性に応じ得るモデルとして Aggregation Operator を用いることにより一般化したモデルを提案している. [4] また, 非対称な類似度データに関して新たに非対称 Aggregation Operator を提案し解析を行なっている. このモデルにおいては, 個体間の非対称構造が類似したクラスターを抽出することを目的としている. [6]

さらに, 与えられる非対称類似性データが経時的に得られているとき, これらを個体 × 個体 × 時点からなる 2 相 3 元データとして扱い, 時点を考慮したモデルを提案する. ここで時点が 1 時点からなり時点のクラスターに関する重みが 1 であるとき, このモデルは上述のモデル [6] に帰着する.

2. 一般化非対称ファジィクラスタリングモデル

ファジィクラスタリングモデルにおいては, クラスターを“ある性質を共有するものの集まり”と定義し, 二つの個体間の類似度は個体がクラスターに共通に属す度合に依存するものと定義する. 個体がクラスターに共通に属す度合を共通帰属度γとし, 個体iとjの共通帰属度を$\gamma_{ij}(\gamma_{ij} \neq \gamma_{ji})$で表現したとき, 一般化非対称ファジィクラスタリングモデルをつぎのように定義する.

$$s_{ij} = \varphi(\gamma_{ij}) + \varepsilon_{ij}. \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}\gamma_{ij} = \ & (\gamma(u_{i1}, u_{j1}), \cdots, \gamma(u_{i1}, u_{jK}), \\ & \gamma(u_{i2}, u_{j1}), \cdots, \gamma(u_{i2}, u_{jK}), \cdots, \\ & \gamma(u_{iK}, u_{j1}), \cdots, \gamma(u_{iK}, u_{jK})).\end{aligned}$$

ここにs_{ij}は個体iとj間の類似度を示し, $s_{ij} \neq s_{ji}$とする. ε_{ij}は観測された類似度とモデルとの誤差であり, u_{ik}は個体iがクラスターkに属すファジィグレード（帰属度）で一般に分割行列として$U = (u_{ik})$と表される. また以下の条件を仮定する.

$$u_{ik} \geq 0, \ \sum_{k=1}^{K} u_{ik} = 1. \tag{2.2}$$

すなわちs_{ij}は個体iとjが各クラスターに属す共通帰属度の関数φとして表されるものとする. 個体iとjが, ともにクラスターkに属す度合が類似度に対してクラスターごと独立に寄与するものと仮定し, さらにそれが加法的であるとの仮定の下でここでは (2.1) をつぎのように表す.

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^{K} \gamma(u_{ik}, u_{jk}) + \varepsilon_{ij}. \tag{2.3}$$

(2.3) において非対称 Aggregation Operator $\gamma(u_{ik}, u_{jk})$ を以下のように定義する.

$$\gamma(x, y) = f^{[-1]}(f(x) + \phi(x)f(y)),$$

$$f^{[-1]}(z) = \begin{cases} f^{-1}(z), & z \in [0, f(0)) \\ 0, & z \in [f(0), \infty] \end{cases} \tag{2.4}$$

ここに, fは $[0,1]$ を定義域とし $[0,\infty]$ を値域とする T-norm の生成関数であり, これは $f(1) = 0$ の条件を満足する連続単調減少関数である. $\phi(x)$ は, $\phi(1) = 1$ を満たす $[0,1]$ から $[0,\infty]$ への任意の連続単調減少関数で, $f^{[-1]}$は関数 fの擬逆関数であり, f^{-1}は通常の逆関数を表す.

3. 多基準最適化問題

2-way データの場合, 個体のクラスタリングは通常個体間の類似性の値に基づいて行なわれる. しかし, 3-way データの場合, 類似性の値は各観測時点で変化するため, 個体のクラスタリングはすべての観測時点で同一とは限らない. そのため, 3-way データに対するクラスタリング問題は, 多基準最適化問題 (Feligoj et al. [2]) とみなすことができる. 多基準最適化問題における実行可能解はパレート最適解として知られている. 通常の多基準クラスタリングにおいては, パレート最適解を求めるためには組合せ問題を解かなければならず, それ自体困難な問題である. しかし, この問題を多基準ファジィクラスタリングとして扱うことにより, パレート最適クラスターは比較的容易に求められる.

多基準問題 $(\Phi, F_1, \cdots, F_T)$ のパレート最適解は次のような重み付き積和 $P(w)$ を最小にする解と密接な関係があることが知られている.

$$P(w) : \sum_{t=1}^{T} w_t F_t(\boldsymbol{x}), \ (w_t \geq 0).$$

定理 1. (Da Cunha et al. [3]): $\boldsymbol{x}^* \in \Phi$ が $w_t > 0$ に対する $P(w)$ の最適解であれば, $\boldsymbol{x}^*$ は多基準問題 $(\Phi, F_1, \cdots, F_T)$ のパレート最適解である.

定理 2. (Da Cunha et al. [3]): $F_t(\boldsymbol{x}), \ (t = 1, 2, \cdots, T)$ を凸関数と仮定する. このとき, $\boldsymbol{x}^* \in \Phi$ が多基準問題 $(\Phi, F_1, \cdots, F_T)$ のパレート最適解であれば, $\boldsymbol{x}^*$ は $w_t \geq 0$ に対する $P(w)$ の最適解である.

4. 経時的データに対する非対称一般化ファジィクラスタリングモデル

T時点について, n 個の個体に関する類似度の値が観測されているデータをつぎのように表す.

$$S^{(t)} = (s_{ij}^{(t)}). \quad \left(\begin{array}{lll} i & = & 1, \cdots, n; \ j = 1, \cdots, n \\ t & = & 1, \cdots, T. \end{array} \right) \tag{4.1}$$

クラスタリングの目的は, n 個の個体 $O = \{o_1, o_2, \cdots, o_n\}$ をファジィ部分集合で示される K個のファジィクラスター $C_1, \cdots, C_K$ に分類することである. t 時点におけるクラスタリングモデルを以下のように定義する.

$$s_{ij}^{(t)} = \frac{1}{KT} \sum_{k=1}^{K} w_k^{(t)} \gamma(u_{ik}, u_{jk}) + \varepsilon_{ij}. \tag{4.2}$$

ここに $w_k^{(t)}$は, 時点 t におけるクラスター kの顕著さを示す重みのパラメーターであり $0 \leq w_k^{(t)} \leq 1$ の条件を満足するものとする.

t 時点におけるクラスタリングの基準関数は次のような平方二乗誤差として与えられるものとする.

$$F^{(t)}(U, \boldsymbol{w}^{(t)}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} (s_{ij}^{(t)} - \frac{1}{KT} \sum_{k=1}^{K} w_k^{(t)} \gamma(u_{ik}, u_{jk}))^2. \tag{4.3}$$

クラスタリングの目的は各時点 t において $F^{(t)}(U, \boldsymbol{w}^{(t)})$ を最小にする個体のファジィクラスターを求めることである. したがって定理 1, 定理 2 より,

$$F(U, \boldsymbol{w}) = \sum_{t=1}^{T} F^{(t)}(U, \boldsymbol{w}^{(t)}) \tag{4.4}$$

を最小にする解としてパレート最適クラスターが得られる.

5. おわりに

3-way データに対するハードクラスタリングは次のような二つの立場から議論されてきた. 一つは, INDCLUS (Arabie et al. [1]) の手法によって 3-way の類似性配列を分割するという立場であり, 他方は多基準最適化問題におけるパレート最適解としてのクラスターを求めるという立場である (Ferligoj et al. [2]).

本報告においては, 後者の立場からファジィクラスタリングを提案し, 3-way データに対するクラスタリング問題は多基準最適化問題として定式化できることを示した. また, 多基準ハードクラスタリング問題では重み係数法を用いても組合せ最適化を避けられなが, 多基準ファジィクラスタリング問題では重み係数法を使うことによって, 通常の非線形最適化問題とみなすことができ, 基準関数の連続性からパレート解が容易に求められることを示した.

参考文献

[1] P. Arabie, J.D. Carroll and W.S. DeSarbo, Three-way scaling and clustering. Newbury Park, CA. Sage, 1987.

[2] A. Ferligoj and V. Batagelj, Direct Multicriteria Clustering Algorithms, *J. Class.*, Vol. 9, pp. 43-61, 1992.

[3] N.C. Da Cunha and E. Polak, Constrained Minimization under Vector valued Criteria in Finite-Dimensional Space, *J. Math. Anal. and Appl.*, Vol. 19, No.1, pp. 103-124, 1967.

[4] M. Sato and Y. Sato, A General Fuzzy Clustering Model Based On Aggregation Operators, *Behaviormetrika*, Vol. 22, No. 2, pp. 115-128, 1995.

[5] 佐藤美佳, 佐藤義治, 加法的ファジィクラスタリングモデル, 日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.2, pp.319-332, 1994.

[6] 佐藤美佳, 佐藤義治, クラスタリングモデルにおける非対称性および自己類似性の考察, 平成 8 年度科学研究費基盤研究 (A)「多変量解析の理論と応用の研究」研究集会資料, pp. 17-24, 1996.

[連絡先] 〒060 札幌市北区北 22 条西 13 丁目
北海道武蔵女子短期大学
佐藤美佳
TEL 011-726-3141
FAX 011-726-3144

WEC4-3

ファジィクラスタリング －N次元をみるために－

Fuzzy Clustering – To See N-Dimensional Spaces –

馬屋原 一孝　　中森 義輝
Kazutaka Umayahara　　Yoshiteru Nakamori

甲南大学 理学部 応用数学科
Department of Applied Mathematics, Konan University

Abstract: In the past decade, a lot of studies on fuzzy clustering have been done. One of the latest interests in this field is to yield simultaneous estimates of the parameters of linear models, together with the fuzzy partitioning of the data. Often used objective functions, however, consider one type of linear varieties only, which cannot detect linear varieties with different dimensionalities at one try. This paper proposes a new objective function to improve existing approaches, and an efficient algorithm for detecting clusters with different dimensionalities. In addition, the paper proposes a new type of fuzzy modeling using a hyper-elliptic membership function.

1. はじめに

データが次元の異なる複数の線形多様体上に分布しているととらえ，データの分割と線形モデルの構築を同時に行う問題を考える。これに対する手法として超楕円体法[1]があるが，より簡単なアルゴリズムのファジィクラスタリングによる手法を考える。

ファジィクラスタリングは，Fuzzy c-Means法[2]を応用したAdaptive Fuzzy c-Elliptotypes法[3]等が提案されている。しかし，今までの手法では次元の異なったクラスタを発見できない。この問題に対し，新たな評価規範を用いたクラスタリング[4]，およびその結果を用いたファジィモデルを提案する。

2. 線形多様体発見クラスタリング法

変数 x_i $(i = 1,2,\cdots,m)$ の k 番目の標準化データを x_{ik} $(k = 1,2,\cdots,n)$ とし，$\boldsymbol{w}_k$ を k 番目のデータユニット（列ベクトル）とする。n 個のデータセットからなる集合 $S = \{\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2, \cdots, \boldsymbol{w}_n\}$ が与えられ，S を c 個のクラスタにファジィクラスタリングするとする。u_{ik} を第 k データユニットの第 i クラスタへのメンバシップ値とし，以下の条件を満たすものとする。

(i)　$0 \le u_{ik} \le 1, \quad i = 1,2,\cdots,c, \quad k = 1,2,\cdots,n$

(ii)　$\displaystyle\sum_{k=1}^{n} u_{ik} > 0, \quad i = 1,2,\cdots,c$

(iii)　$\displaystyle\sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1, \quad k = 1,2,\cdots,n$

この条件を満たすようにメンバシップ行列 $U = (u_{ik})$ とクラスタの重心 $V = \{\boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2, \cdots, \boldsymbol{v}_c\}$ を以下の各クラスタリンク法の評価規範を最小化するように決定する。

Fuzzy c-Means (FCM) 法[2]では，

$$J_{fcm}(U,V) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} (u_{ik})^q \; d_{ik}(\boldsymbol{v}_i) \qquad (1)$$

という評価規範を用いる。ただし，

$$d_{ik}(\boldsymbol{v}_i) = \|\boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i\|^2 \qquad (2)$$

また，q はスムージング・パラメータで，1 より大きい実数である。

Fuzzy c-Varieties (FCV) 法[5]では，クラスタ i として $\boldsymbol{R}^m$ における r 次元 $(0 \leq r < m)$ の線形多様体

$$V_i^r = \left\{ \boldsymbol{z} \in \boldsymbol{R}^m \mid \boldsymbol{z} = \boldsymbol{v}_i + \sum_{j=1}^{r} t_{ij}\, \boldsymbol{p}_{ij},\ t_{ij} \in \boldsymbol{R} \right\} \quad (3)$$

を考える。$\boldsymbol{p}_{ij}$ $(j = 1, 2, \cdots, r)$ はファジィ散布行列

$$S_i = \sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^q\ (\boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i)(\boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i)^\top \quad (4)$$

の固有値 $\lambda_{i1} \geq \lambda_{i2} \geq \cdots \geq \lambda_{im}$ に対応する固有ベクトル $\{\boldsymbol{e}_{ij}\}$ の最初の r 個を正規化したものである。このとき，評価規範として

$$J_{fcv}^r(U, V) = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} (u_{ik})^q\ D_{ik}^r(\boldsymbol{v}_i) \quad (5)$$

$$D_{ik}^r(\boldsymbol{v}_i) = \|\boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i\|^2 - \sum_{j=1}^{r} |< \boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i,\ \boldsymbol{p}_{ij} >|^2 \quad (6)$$

を用いる。ここで $< \cdot, \cdot >$ は内積をあらわす。

さらに Adaptive Fuzzy c-Elliptotypes (AFC) 法[3]では，$d_{ik}(\boldsymbol{v}_i)$ と $D_{ik}^r(\boldsymbol{v}_i)$ を以下のように α_i で加重平均した評価規範を用いる。

$$J_{afc}^r(U, V) = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} (u_{ik})^q \left[(1 - \alpha_i) d_{ik}(\boldsymbol{v}_i) + \alpha_i D_{ik}^r(\boldsymbol{v}_i) \right] \quad (7)$$

$$\alpha_i = 1 - \frac{\lambda_{im}}{\lambda_{i1}}, \qquad i = 1, 2, \cdots, c \quad (8)$$

これによりAFCは r 次元の異なった形状のクラスタを発見することができる。

3. 次元の異なる線形多様体発見法

FCVでは1つの線形多様体との距離を考えた。そしてAFCでは1つの線形多様体との距離と，重心(0次元の線形多様体)との距離をデータの分布に従って加重した距離を考えた。ここでは，この考え方をさらに推し進め，すべての次元の線形多様体との距離をデータの分布に従い加重平均した距離を考える。以下のような最小化すべき評価規範を考える。

$$J_{fvd}(U, V) = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} (u_{ik})^q\ E_{ik}(\boldsymbol{v}_i) \quad (9)$$

ただし，

(a) $E_{ik}(\boldsymbol{v}_i) = \beta_i^0\ \dfrac{G_{ik}^0(\boldsymbol{v}_i)}{m} + \displaystyle\sum_{r=1}^{m-1} \beta_i^r\ \frac{G_{ik}^r(\boldsymbol{v}_i)}{m - r}$

(b) $G_{ik}^r(\boldsymbol{v}_i) = \|\boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i\|^2 - \displaystyle\sum_{j=1}^{r} |< \boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i, \boldsymbol{e}_{ij} >|^2$

$(r = 0$ のときは，$G_{ik}^r(\boldsymbol{v}_i) = \|\boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i\|^2)$

(c) $\beta_i^r = \dfrac{\gamma_i^r}{\displaystyle\sum_{r=0}^{m-1} \gamma_i^r}$

(d) $\gamma_i^r = \begin{cases} (\lambda_{im})^l, & r = 0 \\ (\lambda_{ir} - \lambda_{i,r+1})^l, & r > 0 \end{cases}$

l は線形度パラメータで，0以上の実数である。ここで $G_{ik}^0 (= d_{ik})$ と $G_{ik}^r (= D_{ik}^r)$ との2つだけでなくすべての次元の線形多様体 $V_i^j (j = 0, 1, \cdots, m-1)$ を考え，データ $\boldsymbol{w}_k$ と V_i^j との2乗距離 G_{ik}^j に $1/(m - j)$ の重み付けを行い，さらにクラスタの形状に応じた重み β_i^j を付けて加算する。これにより，各クラスタの形状に応じ必要な次元の線形多様体の形状が採用される。

G_{ik}^j は m 次元空間の部分空間における j 次元の線形多様体 V_i^j の直交補空間上の2乗距離であるから，点と点との距離，点と直線との距離，点と平面との距離等を同じ重みで比較するため，その空間の次元数で割っている。このとき，この空間の次元数は m から線形多様体の次元数 j を引いたものである。

$\boldsymbol{w}_k$ と V_i^j との距離の重み β_i^j の比率は第 j 固有値と第 $j+1$ 固有値の差で定義される。この値が大きいとき，1 ～ j 番目までの固有値にある程度の値があり，j 番目以降の固有値がその値よりかなり小さいことを意味している。つまりそのクラスタとして j 次元の線形多様体を他の次元の線形多様体よりもより大きな重みで採用してよいことを意味している。ただし β_i^0 については最小固有値で定義される。これは，他の β_i^j と比較するためである。

クラスタリングはパラメータ c, q, l を与え，評価規範を最小化するように U, V を決定していくプロセスである。この2種類のパラメータを同時に決定することは困難であるから，他のパラメータが与えられたとき，残りのパラメータを最適性の必要条件から決定する。

4. クラスタリング・アルゴリズム

Step 1. $t=0$ とし，パラメータ c, q, l, ε を定める。メンバーシップ値の初期値 $U^{(0)}=(u_{ik}^{(0)})$ を定める。

Step 2. クラスタ i $(1 \le i \le c)$ の中心を計算する。

$$\boldsymbol{v}_i^{(t)} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \left(u_{ik}^{(t)}\right)^q \boldsymbol{w}_k}{\sum_{k=1}^{n} \left(u_{ik}^{(t)}\right)^q}$$

Step 3. クラスタ i $(1 \le i \le c)$ のファジィ散布行列

$$S_i^{(t)} = \sum_{k=1}^{n} \left(u_{ik}^{(t)}\right)^q \left(\boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i^{(t)}\right)\left(\boldsymbol{w}_k - \boldsymbol{v}_i^{(t)}\right)^{\top}$$

の固有値 $\left\{\lambda_{ij}^{(t)}\right\}$ 固有ベクトル $\left\{\boldsymbol{e}_{ij}^{(t)}\right\}$ を計算する。

Step 4. 次式により $\boldsymbol{w}_k$ $(1 \le k \le n)$ のクラスタ i $(1 \le i \le c)$ へのメンバーシップ値を更新する。

$$u_{ik}^{(t+1)} = \left[\sum_{j=1}^{c} \left(\frac{E_{ik}^{(t)}}{E_{jk}^{(t)}}\right)^{\frac{1}{q-1}}\right]^{-1}$$

ただし，$E_{ik}^{(t)}=0$ となる i が存在する場合は次式による。 $\#\{\cdot\}$ は集合の要素数を表す。

$$u_{ik}^{(t+1)} = \begin{cases} \dfrac{1}{\#\{j \mid E_{jk}^{(t)}=0\}}, & E_{ik}^{(t)}=0 \\ 0, & E_{ik}^{(t)}>0 \end{cases}$$

Step 5. 収束判定条件

$$\max_{i,k}\left\{\left|u_{ik}^{(t+1)} - u_{ik}^{(t)}\right|\right\} < \varepsilon$$

を満たせば終了。そうでなければ，$t=t+1$ として **Step 2** へ戻る。

5. 超楕円体型ファジィモデル

以上の方法によりクラスタリングを行うと，クラスタリング結果と同時にクラスタの重心，固有値，固有ベクトルという情報が得られる。これらの情報は，データ S がどこにどのように分布しているかを表わしており，これを部分モデルとしてとらえたファジィモデルを考える。

高木・菅野型のファジィモデル[6]は次のような if〜then ルールの集合である。

$$\text{ルール } R^k \begin{cases} \text{if } x_i \text{ is } A_i^k, & x_i \in X, \\ \text{then } y_i = c_0^k + \sum_i c_i^k \cdot x_i, & y_i \in Y \end{cases}$$

各ルールは前件部がファジィ命題，後件部が回帰モデルから構成されている。この前件部に超楕円体型メンバシップを用いたファジィモデル[7]が提案されているが，さらに後件部の線形式もメンバシップに含めた，超楕円体型ファジィモデルを提案する。まずルール i の多次元メンバシップ関数をクラスタの形状より，

$$f_i(\boldsymbol{z}) = \prod_{j=1}^{m} \mu_{ij}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{v}_i, \lambda_{ij}) \tag{10}$$

$$\mu_{ij}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{v}_i, \lambda_{ij}) = \exp\left\{-\frac{1}{2\lambda_{ij}}\left[(\boldsymbol{z}-\boldsymbol{v}_i)^{\top}\boldsymbol{p}_{ij}\right]^2\right\} \tag{11}$$

と定める。ただし，$\boldsymbol{z}$ は $\boldsymbol{R}^m$ 上の座標である。この関数は，クラスタの重心座標で 1 になり，クラスタの形状に従ったガウス型分布をしている。つまり，m 次元空間のファジィ部分集合 F_i のメンバシップ関数で，$\boldsymbol{z}$ がそのクラスタにどの程度属しているかを表わしている。

さらに入力のない（予測したい）変数 x_j 軸上のファジィ部分集合 F_{ij} を，メンバシップ $f_i(\boldsymbol{z})$ を用いて定義することで，後件部の回帰式に代わってファジィ出力をすることができる。このとき，入力変数は前件部変数のように固定ではなく，全変数中の任意の変数を用いることができる。

いま，実際の入力値のある変数の集合を X，その入力ベクトルを $\boldsymbol{x}^*$，入力のない変数の集合を Y，Y の要素数を N_Y とする。このとき変数 $x_j \in Y$ のファジィ集合 $F_{ij}(\boldsymbol{x}^*)$ のメンバシップ関数を

$$f_{ij}(\boldsymbol{x}^*, x_j) = \sup_{\boldsymbol{a} \in \boldsymbol{R}^{N_Y-1}} f_i(\boldsymbol{x}^*, x_j, \boldsymbol{a}) \tag{12}$$

と定めると，$F_{ij}(\boldsymbol{x}^*)$ は入力 $\boldsymbol{x}^*$ に対するルール i の変数 x_j 軸上へのファジィ出力と考えることができる。ただし，$\boldsymbol{a}$ は x_j 以外の Y に含まれる変数からなるベクトルである。これは，x_j 以外の Y の各変数軸に $f_i(\boldsymbol{z})$ の最大値を写像した関数であり，任意の x_j の値に対し入力 $\boldsymbol{x}^*$ での最大のメンバシップ値を返す。

部分モデルの出力はファジィ出力であるが，モデル全体の出力 $\hat{x}_j(\boldsymbol{x}^*)$ は各モデルのファジィ出力の中心

$\hat{x}_{ij}(\boldsymbol{x}^*)$ にその中心部分のメンバシップ値 $W_{ij}(\boldsymbol{x}^*)$ の重み付きの平均で行う。

$$\hat{x}_{ij}(\boldsymbol{x}^*) = \arg\sup_{x_j} f_{ij}(\boldsymbol{x}^*, x_j) \tag{13}$$

$$w_{ij}(\boldsymbol{x}^*) = \sup_{x_j} f_{ij}(\boldsymbol{x}^*, x_j) \tag{14}$$

$$\hat{x}_j(\boldsymbol{x}^*) = \frac{\sum_{i=1}^{c} w_{ij}(\boldsymbol{x}^*) \cdot \hat{x}_{ij}(\boldsymbol{x}^*)}{\sum_{i=1}^{c} w_{ij}(\boldsymbol{x}^*)} \tag{15}$$

このモデルでは，各ルールに前件部と後件部の区別がなく，回帰式も用いないため，前件部変数や後件部変数の選択を行う必要がない。また入力変数，出力変数という概念もなく，各変数間の関係を示すモデルとなっている。そのため，必要に応じていくつでも入力値を指定でき，その時々に応じた出力が得られる。すなわち，入力から出力の予測を行う以外に，出力の最適化問題も同様に行うことができる。さらにメンバシップがデータの分布を表わしているので，条件変数同士が相関を持っていても，間違った部分モデルが採用されにくい。

問題点としては，ルールがメンバシップによって定義されるため，前件部・後件部と分離されているファジィモデルより，理解しにくいという面がある。これはモデルが今までのものより，より現実に近いたためである。これに対し，「ファジィを用いて簡単に表現する」という観点から見ると，退化しているという意見もある。しかし各部分モデルを線形多様体ととらえており，部分モデルごとにみると理解できないほど複雑なものではないと考えている。

6. おわりに

提案したクラスタリング手法の問題点としてパラメータの設定がある。評価関数がかなり複雑で，メンバシップ値の更新を同時に行うため評価規範が悪くなることもあり，これにはパラメータも影響している。また各次元の線形多様体との距離を考慮しているが，データの分布状態によりその係数が 0 に近くなり，考慮されなくなることもある。

超楕円体型ファジィモデルは，FVD 法によって分割された部分モデルを用い，データの存在している分布を示すモデルであり，全体のモデルの出力を近似するタイプのモデルではない。これらの手法により，得られた対象データを多次元的に表現し，対象への認識をより深めることができるものと期待できる。

参考文献

[1] Y. Nakamori and M. Ryoke: Identification of fuzzy prediction models through hyperellipsoidal clustering. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 24, No. 8, pp. 1153-1173, 1994.

[2] J. C. Bezdek: *Fuzzy Mathematics in Pattern Classification.* PhD Thesis, Cornell University, 1973.

[3] R. N. Dave: An adaptive fuzzy c-elliptotype clustering algorithm. Proc. of NAFIPS 90: Quarter Century of Fuzziness, Vol. I, pp. 9-12, 1990.

[4] 馬屋原・中森: 異なる次元のデータ構造の発見手法. 日本ファジィ学会ノンエンジニアリング・ファジィ研究会第 7 回ワークショップ講演論文集, pp.64-67, 1997.

[5] J. C. Bezdek et al.: Detection and characterization of cluster substructure II. fuzzy c-varieties and convex combinations thereof. *SIAM J. Appl. Math.*, Vol. 40, No. 2, pp. 358-372, 1981.

[6] T. Takagi and M. Sugeno: Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 15, No. 1, pp. 116-132, 1985.

[7] M. Ryoke, H.Tamura and Y.Nakamori: Fuzzy Rule Generation by Hyperellipsoidal Clustering. Proc. of IIZUKA'96, pp.86-89, 1996.

連絡先： 〒658 神戸市 東灘区 岡本 8-9-1
甲南大学 理学部 応用数学科 中森義輝
Tel. 078-435-2533 / Fax. 078-452-5507
E-mail : nakamori@center.konan-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WED1-1

距離型ファジィ推論法 Part4
——ファジィ集合間の距離計算法について——

A Distance -type Fuzzy Reasoning , Part 4,
—— On the computing of Distance Between Fuzzy Sets——

王 碩玉
Shuoyu WANG
高知工科大学 工学部
Faculty of Engineering, Kochi University of Technology

土谷 武士
Takeshi TSUCHIYA
北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract : In the previous papers, we proposed a new fuzzy reasoning method based on newly defined " distance between two fuzzy sets " to overcome the difficulties which arise in the existed fuzzy reasoning method. This fuzzy reasoning method called a distance-type fuzzy reasoning method. In this paper, three computing methods of distance between fuzzy sets are proposed for distance-type fuzzy reasoning method.

1．はじめに

適合度を基本とするファジィ推論法[1][2]の問題点を解決するために，著者らはファジィ集合間の距離に基づく距離型ファジィ推論法を提案している[15][16][17]. Part 4 の本論文では，ファジィ集合間の距離の計算法を重点において，具体的な計算式を与える.

ここでは与えられた事実とルールの前件部との共通集合を表わすメンバーシップ関数の最大値に基づくファジィ推論法を適合度型ファジィ推論法と呼ぶ. したがって適合度型ファジィ推論法は直接法中の一種類であると考えられる[3]～[6]. 現在ファジィ制御ではよく使われている適合度型ファジィ推論法としては簡略型ファジィ推論法[7][8]，関数型ファジィ推論法[9]，代数-加法-重心型ファジィ推論法[10]がある. ファジィモデリング分野では関数型ファジィ推論以外，後件部が可能性分布で与えられるファジィ予測モデルが提案されている[11]. 著者らは，もしこれらのファジィ推論法に凸性，漸近性，分離性という三つの重要な性質を整備することができれば，ファジィ推論法の特徴をもっと生かせるのではないかと考え，凸性・漸近性・分離性を持つ適合度型ファジィ推論法を提案している[13]. また文献[11]の計算量を減らすファジィ推論法も提案している[14].

適合度型ファジィ推論では，前件部と与えられた事実との共通集合の高さを，前件部と事実がどの程度一致しているかを示す適合度としているので，Mamdaniの推論法の持っているような固有な問題点を根本的に克服することができない. したがって文献[15][16][17]では適合度型ファジィ推論法の固有な問題点を解決するために，従来のファジィ推論の仕組とは異なる出発点から議論することが必要[12]という立場から，ファジィ集合間の距離に基づく距離型ファジィ推論法を提案している. 距離型ファジィ推論法により推論を行うとき，如何にファジィ集合間の距離を計算するかは重要なポイントであるので，本論文はファジィ集合間の距離の計算法を重点において，幾つかの具体的な計算式を与える.

2．凸ファジィ集合間の距離

本章では，まず凸ファジィ集合を検討対象としてファジィ集合間の距離を定義する. 次にアプリケーションの立場を考慮して，定義した距離関数に基づいて典型なファジィ集合間の距離の計算式を説明する.

実数全体の集合をRで表わす. Rを全体集合とし，Rにおけるファジィ集合の全体を$F(R)$とする. 有界凸なファジィ集合の全体を$\overline{F}(R)$で表わす. また，$\overline{F}_n(R)$で$\overline{F}(R)$における正規なファジィ集合の全体を表わす. 明らかに，$\overline{F}_n(R) \subseteq \overline{F}(R) \subseteq F(R)$という関係がある.

定義 1: ある台集合上に定義された任意のファジィ集合A, Bに実数$d(A, B)$が対応し，次の三つの条件を満足するとき，dをその台集合上の距離関数という. ただし，Cは同台集合における任意のファジィ集合である.

$$d(A, B) \geq 0;\ d(A, B) = 0 \Leftrightarrow A = B \tag{1}$$

$$d(A, B) = d(B, A) \tag{2}$$

$$d(A, B) \leq d(A, C) + d(C, B) \tag{3}$$

定義 1 はあくまでファジィ集合間の距離についての公理であり，dの具体的な計算法を与えていない. したがって，実際の問題においては，いろいろな計算法を定義することができるが，この公理を満たさなければならない. 現在ファジィクラスタリング分野によく使われているファジィ集合間の距離計算法[18]は離散的メンバーシップ関数値を持つファジィ集合に適用するものである. 連続なメンバーシップ関数を持つファジィ集合間の距離計算法[19][20]があるが，正規なファジィ集合にしか使えない. 最近文献[21]はHausdorff距離に基づいて新しい距離の計算法を提案し，ファジィ写像とファジィ制御系の解析に適用している. この新しい距離はαレベルごとにファジィ集合の差異を定量的に観ることができるが，Hausdorff距離によるものであるので，ファジィ集合が台集合を移動するということは無

視されることがある．また，文献[22]では真理値空間において逆真理値限定で求めた言語的真理値を利用してファジィ集合間の距離の一計算法を提案しているが，二つのファジィ集合の共通集合が空集合である場合，つまりかけ離れている場合には適切な距離を計算できない．したがって，本章では任意の連続な凸ファジィ集合を対象として以下のように一つの簡単な計算法を提案する．

定義 2：任意のファジィ集合$A, B \subset \overline{F}(R)$に対して(4)式で定義される実数関数$d(A, B)$を$\overline{F}(R)$上の距離関数という．

$$d(A,B) := \left[\int_0^1 \left| infA_{M\alpha} - infB_{M\alpha} \right|^p d\alpha\right]^{1/p} + \left[\int_0^1 \left| supA_{M\alpha} - supB_{M\alpha} \right|^p d\alpha\right]^{1/p} + \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left| \left(\frac{1}{M_A} - 1\right)\mu_A(x) - \left(\frac{1}{M_B} - 1\right)\mu_B(x) \right|^p dx\right]^{1/p} \quad (4)$$

ただし，$1 \le p \le \infty$, $|\cdot|$は絶対値を表わす．A_MはAのメンバーシップ関数の最大値M_Aで正規化されたファジィ集合を表わす．$supA_{M\alpha}$と$infA_{M\alpha}$はそれぞれファジィ集合A_Mのα-レベル集合$A_{M\alpha}$の上限と下限を表わす．B_Mについても同様である．

(4)で定義された関数は定義１中の三つの条件を満足していることは容易に証明できる．

つづいて距離関数(4)式において$p=2$とし，最もよく使われている典型的なファジィ集合間の距離計算公式を与える．

(a) 三角型ファジィ集合の場合

$\overline{F}(R)$中にある任意の二つの三角型ファジィ集合A，Bを$T_A(a_1, a_2, a_3, a)$と$T_B(b_1, b_2, b_3, b)$に書くことにする．ただし，$a_1(b_1)$と$a_3(b_3)$がそれぞれ０－レベル集合の下限と上限，$a(b)$が三角形の高さ，$a_2(b_2)$が高さ$a(b)$を取る座標を表す．AとBとの距離計算式が(5)式になる．

$$d(A,B) = \frac{1}{\sqrt{3}}\sum_{i=1}^{2}\left[\sum_{j=i}^{i+1}(a_j-b_j)^2 + \prod_{j=i}^{i+1}(a_j-b_j)\right]^{1/2} + \frac{1}{\sqrt{3}}\left[(1-a)(a_3-a_1)^{1/2} + (1-b)(b_3-b_1)^{1/2}\right] \quad (5)$$

(b) 台形型ファジィ集合の場合

台形型のファジィ集合$A, B \subset \overline{F}(R)$を$T_A(a_1, a_2, a_3, a_4, a)$, $T_B(b_1, b_2, b_3, b_4, b)$で表す．ただし，$a_1(b_1)$と$a_4(b_4)$がそれぞれ０－レベル集合の下限と上限，$a(b)$が台形の高さ，$a_2(b_2)$と$a_3(b_3)$がそれぞれ高さ$a(b)$を取る座標の最小値と最大値を表す．$A$と$B$との距離計算式が(6)式になる．

$$d(A,B) = \frac{1}{\sqrt{3}}\sum_{i=1,3}\left[\sum_{j=i}^{i+1}(a_j-b_j)^2 + \prod_{j=i}^{i+1}(a_j-b_j)\right]^{1/2} + \frac{1}{\sqrt{3}}(1-a)\left[a_4+2(a_3-a_2)-a_1\right]^{1/2} + \frac{1}{\sqrt{3}}(1-b)\left[b_4+2(b_3-b_2)-b_1\right]^{1/2} \quad (6)$$

(c) π型ファジィ集合の場合

$\overline{F}(R)$中にある任意の二つの非対称なπ型ファジィ集合A，Bを$\pi_A(a_1, a_2, a_3, K_a)$, $\pi_B(b_1, b_2, b_3, K_b)$で表す．ただし，$a_1(b_1)$と$a_3(b_3)$がそれぞれ０－レベル集合の下限と上限，$K_a(K_b)$が$\pi$型ファジィ集合の高さ，$a_2(b_2)$が高さ$K_a(K_b)$を取る座標を表す．$A$と$B$との距離計算式が(7)式になる．

$$d(A,B) = \sum_{i=1}^{2}\left[\frac{7}{24}\sum_{j=i}^{i+1}(a_j-b_j)^2 + \frac{5}{12}\prod_{j=i}^{i+1}(a_j-b_j)\right]^{1/2} + (1-K_a)\left[\sum_{i=1}^{2}\frac{23}{60}(a_{i+1}-a_i)\right]^{1/2} + (1-K_b)\left[\sum_{i=1}^{2}\frac{23}{60}(b_{i+1}-b_i)\right]^{1/2} \quad (7)$$

(d)三角型ファジィ集合とシングルトンの場合

ファジィ制御などの場合，制御ルールにおける前件部と後件部を表わすファジィ集合として三角型ファジィ集合がよく使われている．また事実はファジィ集合ではなく通常は電圧，位置，速度などのようなセンサからの実数値である．このとき，三角型ファジィ集合AとシングルトンBとの距離計算式は(8)式で与えられる．ただし，bはメンバーシップ関数値１を取る座標である．三角型ファジィ集合Aのパラメータの意味は(a)と同様である．

$$d(A,B) = \frac{1}{\sqrt{3}}\sum_{i=1}^{2}\left[\sum_{j=i}^{i+1}(a_j-b)^2 + \prod_{j=i}^{i+1}(a_j-b)\right]^{1/2} + \frac{1}{\sqrt{3}}\left[(1-a)(a_3-a_1)^{1/2}\right] \quad (8)$$

(e) シングルトンとシングルトンとの場合

シングルトンAとBとの距離を計算する式は(9)式になる．ここでaとbはそれぞれA，Bのメンバーシップ関数値が1であるときの座標を表す．

$$d(A, B) = |a - b| \tag{9}$$

3．同型ファジィ集合間の距離

本章では，まず同型ファジィ集合の概念を説明する．次に同型ファジィ集合を検討対象として距離の計算式を定義する．次にアプリケーションの立場を考慮して，定義した距離関数に基づいて典型な同型ファジィ集合間の距離の計算式を与える．

ある台集合上に定義されたファジィ集合はメンバーシップ関数によって特性付けられる．メンバーシップ関数を用いて描いたファジィ集合のグラフを見て，三角型ファジィ集合か台形型ファジィ集合かなど，それとも何とも言えない形をしているファジィ集合かについて認識できる．三角型ファジィ集合や台形型ファジィ集合などのようなファジィ集合が有限個独立なパラメータで且つそのときに限り完全に表現される．すなわち，このようなファジィ集合とパラメータは一対一の関係にある．たとえば，三角型ファジィ集合が四つ，台形型ファジィ集合は五つのパラメータにより完全表現される．しかもそれ以上のパラメータは要らない．これらのパラメータを特性パラメータと呼ぶ．四つの独立なパラメータの値によっていろいろな三角型ファジィ集合が作られるが，全て三角の形をする．このように形が同じという意味で同型ファジィ集合を呼ぶことにする．また，互いに独立な特性パラメータで構成された直交空間を同型ファジィ集合の特性空間と言う．同型ファジィ集合が一定なメンバーシップ関数を持つ集合であるが，自分の特性空間における一点に写像される．つまり，同型ファジィ集合と特性空間中の点が一対一である．そして特性空間においては解析などによる結果は全く同型ファジィ集合を等価反映することになるので，問題によって同型ファジィ集合そのものを直接に研究するより便利な場合がある．たとえば，特性空間で点の収束性や連続性を議論することは同型ファジィ集合より非常に簡単である．以下では，特性空間において同型ファジィ集合間の距離を定義する．

$F_S(p_1, p_2, \cdots, p_{n_1};\ x_1, x_2, \cdots, x_{n_2})$を用いてある同型ファジィ集合の全体を表わす．ただし，$p_1, p_2, \cdots, p_{n_1}$は特性パラメータであり，$x_1, x_2, \cdots, x_{n_2}$は同型ファジィ集合を定義した台集合である．$n_1$は特性パラメータの数，$n_2$は台集合の自変数の数を表わす．以下では簡単に$F_S$と書くこともある．

定義3：任意の$A, B \in F_S(p_1, p_2, \cdots, p_{n_1};\ x_1, x_2, \cdots, x_{n_2})$に対して，特性空間において次の距離関数を定義する．

$$d(A, B) = \left[\sum_{i=1}^{n_1} |p_{ai} - p_{bi}|^P\right]^{\frac{1}{P}} \tag{10}$$

ただし，$1 \le P \le \infty$，$p_{a1}, p_{a2}, \cdots, p_{an_1}$と$p_{b1}, p_{b2}, \cdots, p_{bn_1}$は$A(p_{a1}, p_{a2}, \cdots, p_{an_1})$，$B(p_{b1}, p_{b2}, \cdots, p_{bn_1})$の特性パラメータである．

(10)式はファジィ集合間の距離公理の定義1を満たしていることが簡単に証明できる．この距離関数は非凸，非正規，非有界なファジィ集合にも適用できることに注意されたい．三角型ファジィ集合や台形型ファジィ集合には限らず，有限個の独立パラメータで表現できるファジィ集合であれば適切な距離計算ができる．また，計算量は2章に述べた手法より少ない．例えば，$P=2$とし，三角型ファジィ集合の場合(11)式で，台形型ファジィ集合の場合(12)式で計算することになる．

$$d(A, B) = \left[(a - b)^2 + \sum_{i=1}^{3} (a_i - b_i)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

$$d(A, B) = \left[(a - b)^2 + \sum_{i=1}^{4} (a_i - b_i)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{12}$$

もし，$P=1$とすれば，三角型ファジィ集合の場合(13)式で，台形型ファジィ集合の場合(14)式で更に簡単に計算できる．

$$d(A, B) = |a - b| + \sum_{i=1}^{3} |a_i - b_i| \tag{13}$$

$$d(A, B) = |a - b| + \sum_{i=1}^{4} |a_i - b_i| \tag{14}$$

(11)，(13)式を(5)と，また(12)，(14)式を(6)と比較すると，本章の距離計算法は一層簡単になることが分かる．

また，もし，A, Bは正規分布を持つファジィ集合であれば，(15)式あるいは(16)式により距離を求めることができる．

$$d(A, B) = \left[(c_a - c_b)^2 + (\sigma_a - \sigma_b)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{15}$$

$$d(A, B) = |c_a - c_b| + |\sigma_a - \sigma_b| \tag{16}$$

ここで，$c_a(c_b)$と$\sigma_a(\sigma_b)$はそれぞれファジィ集合$A(B)$のメンバーシップ関数の中心と分散を表わす．

4．指定範囲内の距離計算法

2，3章で述べた距離計算法により計算された距離の値は有界でない．しかし，計算された距離の値が指定された範囲内に収まることが望まれる場合がある．本章はファジィ集合間の距離値を[0, 1]区間に写像する方法について説明する．

任意のファジィ集合A, Bに対して，上に述べた計算法により計算された距離を$d(A, B)$で表わす．(17)式または(18)式により計算された$d'(A, B)$もまた距離となり，つまりファジィ

集合間の距離公理を満たしている．この二つの式から $d'(A, B)$の値が区間[0, 1]にあることが分かる．

$$d'(A, B) = \frac{d(A, B)}{1 + d(A, B)} \tag{17}$$

$$d'(A, B) = \frac{1 - e^{-d(A, B)}}{1 + e^{-d(A, B)}} \tag{18}$$

5. 重み付の合成距離計算法

文献[15][16][17]では，推論を行うとき，合成距離を計算するステップがある．適用対象によって各前件部の重要さが異なる場合がある．このとき，重みをつけることにより重視する程度を反映することができる．本章でもこの考え方を利用する．具体的には$d(A_i, B_i)$はファジィ集合A_iとB_iとの距離を表わし，重み付の合成距離は(19)式で計算する．

$$D = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i d(A_i, B_{i1}) \tag{19}$$

ただし，m：前件部の個数．

$\alpha_i \geq 0$：重み．

6. まとめ

本論文は，ファジィ集合間の距離に基づく距離型ファジィ推論法[15][16][17]のために，ファジィ集合間の距離計算法について論じた．合わせて5種類の距離計算法を提案した．どれが最適なのかについては一般のガイドラインが存在しない．しかし，実際の問題や適用するシステムの性質，またコストなどの面において総合的に考えた上で選んだほうが賢明ではないかと考えている．ただし，どの距離を使ってもその位相特性は保証されていることが証明できる．

参 考 文 献

[1] L. A. Zadeh: Calculus of Fuzzy Restriction, Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes, Academic Press, pp.1-39(1975)

[2] E. H. Mamdani: Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588(1974)

[3] 水本：ファジィ推論(1)，日本ファジィ学会誌，Vol.4, No.2, pp.256-264 (1992)

[4] 水本：ファジィ推論(2)，日本ファジィ学会誌，Vol.4, No.3, pp.433- 444 (1992)

[5] 塚本：ファジィ推論(3)，日本ファジィ学会誌，Vol.4, No.4, pp.676-684 (1992)

[6] 村上：ファジィ制御のためのファジィ推論，日本ファジィ学会編講座5ファジィ制御第2章，日刊新聞出版社(1993)

[7] 前田，村上：自己調整ファジィコントローラ，計測自動制御学会論文集，Vol.24, No.2, pp.191-197(1988)

[8] 市橋，渡辺：簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御，日本ファジィ学会誌，Vol.2, No.3, pp.429-437(1990)

[9] T. Takagi and M. Sugeno: Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Transaction on SMC, Vol.15, No.1, pp.116-132(1985)

[10] 水本：代数-加算-重心法＝ファジィシングルトン型ファジィ推論法＝簡略化推論法，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.305-308(1996)

[11] 中森：ファジィモデリング，オーム社(1994)

[12] 中島：特集ファジィ数学＿ファジィ数学概説，日本ファジィ学会誌，Vol.6, No.6, pp.1048-1056 (1994)

[13] 王，土谷：凸性・漸近性・分離性を持つ適合型ファジィ推論法の提案，第6回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集，pp.352-355(1996)

[14] 王，土谷：Mamdaniのファジィ推論を関数型ファジィ推論に統合した適合度型ファジィ推論法，第6回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集，pp.356-359(1996)

[15] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 1 -距離型ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.9-12(1996)

[16] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 2 -命題の真理値を考慮した距離型ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集pp.13-16(1996)

[17] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 3 -距離型多重多段ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.17-20(1996)

[18] 坂和：ファジィ理論の基礎と応用，森北出版株式会社 (1992)

[19] 田中（監訳），松岡（訳）：ファジィ数理と応用 (1992)

[20] S. Heilpern: Fuzzy Mappings and Fixed Point Theorem, J. Math. Anal. Appl., Vol.83, pp.566- 569(1981)

[21] K. Horiuchi and Y. Endo: A Fluctuation Theory of Syetems by Fuzzy Mapping Concept and Its Application, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E77-A, No.11, pp.1728-1735(1994)

[22] 川瀬，柳原：多段ファジィ推論におけるファジィネス，信学論(A), Vol. J 77-A,No.7, pp.1006- 1014 (1994)

連絡先：〒782 高知県土佐山田町宮ノ口185番地
高知工科大学知能機械システム工学科王碩玉
TEL: 08875-7-2306
FAX: 08875-7-2320
Email: wang@mech. kochi-tech. ac. jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WED1-2

距離型ファジィ推論法 Part 5
——パラメータ空間における距離型ファジィ推論法——

A Distance -type Fuzzy Reasoning , Part 5,
——Distance-type Fuzzy Reasoning Method in Parameteral Space ——

王 碩玉
Shuoyu WANG
高知工科大学 工学部
Faculty of Engineering, Kochi University of Technology

土谷 武士
Takeshi TSUCHIYA
北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract : In This paper, a simple algorithm for the distance-type fuzzy reasoning method on the basis of characteristics of the fuzzy sets is proposed. The advantages are: (1) All characteristics of original distance-type fuzzy reasoning method has been kept. (2) The reasoning algorithm is very simple becaus it is not necessary to use the compound theorem; (3) It can be applied to nonconvex fuzzy sets.

1．はじめに

著者らは従来のファジィ推論とは異なる観点に立ちすなわちファジィ集合間の距離に基づいて距離型ファジィ推論法を提案している[16][17][18]. Part 5 の本論文では，同型ファジィ集合[19]の後件部を持つルールを検討の対象として特性パラメータ空間における距離型ファジィ推論法を提案する．結果的に本推論法は次の三つの特徴が得られる．（1）既に提案している距離型ファジィ推論法の特徴をすべて継承している．（2）合成定理を使う必要がなくなるので，より計算量の低減が期待できる．（3）非凸なファジィ集合を持つルールにも適用できる．

現在ファジィ制御でよく使われている直接推論法としてはMamdaniのファジィ推論法[1]，簡略型ファジィ推論法[2][3]，関数型ファジィ推論法[4]，代数-加法-重心型ファジィ推論法[5]がある．またファジィモデリング分野では関数型ファジィ推論以外，後件部が可能性分布で与えられるファジィ予測モデル[6]が提案されている．著者らは，もしこれらのファジィ推論法に凸性，漸近性，分離性という三つの重要な性質を整備することができれば，実際のシステムにおいてファジィ推論法の特徴を一層生かせるのではないかと考え，凸性・漸近性・分離性を持つ適合度型ファジィ推論法を提案している[14]. また文献[6]の計算量を減らすファジィ推論法も提案している[15]. しかし，これらの適合度型ファジィ推論では，前件部と与えられた事実との共通集合の高さを，前件部と事実がどの程度一致しているかを示す適合度としているので，Mamdaniの推論法の持っているような固有な問題点を克服することができない．例えば，複数個のファジィルールにおける前件部が疎である場合つまり前件部集合は隣接したもの同士が互いに空の共通部分をもつ場合，事実がこの空集合に入力される時は，Mamdaniの推論法も含めて全ての適合度型ファジィ推論法では推論の結論を求めることができない．この問題に対して文献[7][8]では，線形補間型推論法を提案している．実際のシステムでは，ルールの前件部，後件部及び事実が凸なファジィ集合である場合，その推論法による結論も凸なファジィ集合になることが望まれる．しかし，Koczyらの推論法では凸な前後件部及び事実に対して，結論は必ずしも凸なファジィ集合にはならないことが指摘されている[9][10]. また文献[11]は結論としてのファジィ集合の凸性を保つための四つの条件を与えている．これらの条件によれば設計された推論ルールに対して，事実のクラスが制限されてしまう．または与えられた事実に対して推論ルールが制限されてしまう．すなわち推論ルールと事実が互いに厳しすぎる制約関係にある．また，ルールの個数は偶数個でなければならないという制限が付け加えられている．更にこの推論法は前件部が互いに疎でないルールには適用できなくなる．したがって，この推論法の適用できる範囲がかなり制限されると予測されている．

著者らは適合度型ファジィ推論法の固有な問題点を根本的に解決するために，従来のファジィ推論の仕組とは異なる出発点から議論することが必要[12][13]という立場から，ファジィ集合間の距離に基づいて距離型ファジィ推論法を提案している[16][17][18]. 文献[16]は距離型ファジィ推論法の基本的なアルゴリズムを述べるものであり，文献[17][18]はそれぞれ真理値を考慮した距離型ファジィ推論法と距離型多重多段ファジィ推論法につて論じている．本論文では特性パラメータという概念に基づいて，特性パラメータ空間[19]における距離型ファジィ推論法を提案する．パラメータでファジィ数を表現する考え方はよく知られているものであり，すでにファジィ数の演算に使われている[20][21]. 実は離散的ファジィ集合もメンバーシップ関数値をパラメータとする表現手法の一種と考えられる[22]. 最近適合度型ファジィ推

論の枠組の中においては，この考え方を用いて推論を行う研究も報告されている[23]．　本論文で提案する推論法は一段ルール直接法の距離型ファジィ推論の枠組に所属している．

2．特性パラメータ空間における距離型ファジィ推論法

本章では，特性パラメータ空間における距離型ファジィ推論法を説明する．以下では実数全体の集合をRで表わす．Rを全体集合とし，Rにおけるファジィ集合の全体を$F(R)$とする．有界凸なファジィ集合の全体を$\overline{F}(R)$で表わす．$\overline{F}_n(R)$で$\overline{F}(R)$における正規なファジィ集合の全体を表わす．また台集合Rに定義された同型ファジィ集合の全体は$F_S(p_1, p_2, \cdots, p_{n_1}; R)$で表わす．$p_1, p_2, \cdots, p_{n_1}$は同型ファジィ集合を表現する互いに独立な$n_1$個の特性パラメータである．混乱を招かない限りでは$F_S(P_{n_1}; R)$と書くこともある．明らかに，$\overline{F}_n(R) \subseteq \overline{F}(R) \subseteq F(R)$及び$F_S(P_{n_1}; R) \subseteq F(R)$という関係がある．

本論文では，図１に示すようなm入力１出力のファジィ推論を検討対象とする．

$$
\begin{array}{lllll}
R^1: & x_1=A^{11}, & x_2=A^{12}, \cdots, & x_m=A^{1m} & \Rightarrow y=B^1 \\
R^2: & x_1=A^{21}, & x_2=A^{22}, \cdots, & x_m=A^{2m} & \Rightarrow y=B^2 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^i: & x_1=A^{i1}, & x_2=A^{i2}, \cdots, & x_m=A^{im} & \Rightarrow y=B^i \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^n: & x_1=A^{n1}, & x_2=A^{n2}, \cdots, & x_m=A^{nm} & \Rightarrow y=B^n \\
 & x_1=A^1, & x_2=A^2, \cdots, & x_m=A^m & \\
\hline
 & & & & y=B
\end{array}
$$

図１　m入力nルールのファジィ推論

ただし，$i=1, 2, \cdots, n$，$j=1, 2, \cdots, m$．A^{ij}，B^i，A^j，Bはそれぞれ前件部，後件部，与えられた事実および推論結果を表わし，$A^{ij}, A^j, B^i \subset F(R)$とする．また，次の二つの仮定のもとで推論を行う．

(a)ルール$R^1 \sim R^n$において，前件部が全く同一のルールは存在しない．$\forall q_1, q_2 \in \{1, 2, \cdots, n\}$，$q_1 \neq q_2$であれば，$\sum_{l=1}^{m} d(A^{q_1 l}, A^{q_2 l}) \neq 0$　とする．

(b)後件部が同型ファジィ集合とする．つまり，n_Bで同型ファジィ集合の後件部を表現する特性パラメータの個数を表わし，$B^i \in F(p_1, \cdots, p_{n_B}; R)$を満たす．ここで$p_1, \cdots, p_{n_B}$は特性パラメータ変数であり，値を代入することにより具体的なファジィ集合を表わすことになる．

本推論法は三つのステップから構成する．

STEP１：(1)式または(2)式により距離$d(A^{ij}, A^j)$を計算する．$i=1, 2, \cdots, n$．$j=1, 2, \cdots, m$．

もし，前件部と事実とも同型ファジィ集合であれば，すなわち，$A^{ij}, A^j \in F_S(p_1, p_2, \cdots, p_{n_j}; R)$の場合，距離は次の式を用いて計算する．だたし，$n_j$は$A^{ij}$を表現する特性パラメータの個数，$p_{Aijq}$は$A^{ij}$の$q$番目の特性パラメータである．$A^j_M$についても同様である．

$$
d(A^{ij}, A^j) = \left[\sum_{q=1}^{n_j} \left| p_{Aijq} - p_{Ajq} \right|^p \right]^{\frac{1}{p}} \tag{1}
$$

もし，前件部と事実とも同型ファジィ集合ではなく，凸ファジィ集合であれば，(2)式で距離を計算する．ただし，$1 \leq p \leq \infty$，$|\cdot|$は絶対値を表わす．A^{ij}_MはA^{ij}のメンバーシップ関数の最大値M_{Aij}で正規化されたファジィ集合を表わす．$supA^{ij}_{M\alpha}$と$infA^{ij}_{M\alpha}$はそれぞれファジィ集合A^{ij}_Mのα-レベル集合$A^{ij}_{M\alpha}$の上限と下限を表わす．A^j_Mについても同様である．

$$
\begin{aligned}
d(A^{ij}, A^j) := & \left[\int_0^1 \left| infA^{ij}_{M\alpha} - infA^j_{M\alpha} \right|^p d\alpha \right]^{1/p} \\
& + \left[\int_0^1 \left| supA^{ij}_{M\alpha} - supA^j_{M\alpha} \right|^p d\alpha \right]^{1/p} \\
& + \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left| \left(\frac{1}{M_{Aij}} - 1 \right) \mu_{Aij}(x_j) - \left(\frac{1}{M_{Aj}} - 1 \right) \mu_{Aj}(x_j) \right|^p dx \right]^{1/p}
\end{aligned} \tag{2}
$$

(1)式または(2)式で計算した距離はファジィ集合間の距離の公理を満たしていることが容易に証明できる[19]．

STEP２：STEP1で計算した$d(A^{ij}, A^j)$を用いて，(3)式により$d_1 \sim d_n$を計算する．

$$
d_k = \frac{\prod_{i=1, i \neq k}^{n} \sum_{j=1}^{m} d(A^{ij}, A^j)}{\sum_{s=1}^{n} \prod_{i=1, i \neq s}^{n} \sum_{j=1}^{m} d(A^{ij}, A^j)} \tag{3}
$$

ただし，$k=1,2,\cdots,n$.

STEP 3：(4)式により推論結果B を完全表現する特性パラメータベクトルP^0を求める．

$$P^0 = PD \tag{4}$$

ただし，T ： 転置．

n： ルールの数．

n_B： 特性パラメータの個数．

$i=1,2,\cdots,n$.　$q=1,2,\cdots,n_B$.

$$P^0=\left(p_1^0,\ p_2^0,\ \cdots,\ p_{n_B}^0\right)^T.$$

$$D=\left(d_1,\ d_2,\ \cdots,\ d_n\right)^T.$$

$$P=\begin{bmatrix} p_1^1, p_1^2, \cdots, p_1^n \\ p_2^1, p_2^2, \cdots, p_2^n \\ \cdots\cdots\cdots \\ p_{n_B}^1,\ p_{n_B}^2, \cdots, p_{n_B}^n \end{bmatrix}=\left[p_q^i\right].$$

p_q^iはi 番目の後件部B'を表現する特性パラメータベクトルにおけるq 番目の要素である．これからP'で特性パラメータ行列Pにおけるi番目の列ベクトルを表わすことにする．このように推論結果B を表現する特性パラメータベクトルP^0を求められれば，同型ファジィ集合と特性パラメータとの等価関係[19]より推論結果B を求めたことになる．

3．距離型ファジィ推論法の特徴

本章では2章で提案した距離型ファジィ推論法の特徴について述べる．ただし，これらの特徴についての証明は省略する．

定理 1：本ファジィ推論法による推論結果Bを表わす特性パラメータが有界である．具体的には，

$\forall q\in\{1,2,\cdots,n_B\}$に対して，$p_{qmin}:=min\{p_q^1, p_q^2, \cdots, p_q^n\}$，$p_{qmax}:=max\{p_q^1, p_q^2, \cdots, p_q^n\}$とすれば，(5)式が成立する．

$$p_{qmin} \le p_q^0 \le p_{qmax} \tag{5}$$

定理 2：もし，後件部B^1～B^nがすべて正規な同型ファジィ集合であれば，本推論法により推論された結果Bも正規な同型ファジィ集合となる．

定理 3：もし，$\exists k\in\{1,2,\cdots,n\}$，$\forall j\in\{1,2,\cdots,m\}$に対して$A^j=A^{kj}$であれば，$\forall q\in\{1,2,\cdots,n_B\}$に対して等式$p_q^0=p_q^k$が成り立つ．すなわち，推論結果について$B=B^k$となり，分離規則を満たしている．

定理 4：もし，後件部B^1～B^nがすべて凸な同型ファジィ集合であれば，本推論法により推論された結果Bも凸な同型ファジィ集合となる．

定理 5：推論結果について，$\exists k\in\{1,2,\cdots,n\}$，$B=B^k$である場合，もし列ベクトル$(P^1\text{-}P^k)$，$(P^2\text{-}P^k)$，…，$(P^{k-1}\text{-}P^k)$，$(P^{k+1}\text{-}P^k)$，…，$(P^n\text{-}P^k)$が線形独立であれば，$\forall j\in\{1,2,\cdots,m\}$ に対して与えられた事実について$A^j=A^{kj}$でなければならない．

定理5によりある条件さえ満たされれば，本推論法による推論の逆問題が成り立つことが分かる．

4．例題

本章では二つの例題を用いて2章の推論法による推論結果を示す．次の1入力2ルールの場合を考える．

R^1： $if\ \ x=A^1\ \ then\ \ y=B^1$

R^2： $if\ \ x=A^2\ \ then\ \ y=B^2$

$x=A,\ A',\ A'',\ A^1,\ A^2$

$y=?$

図2　1入力2ルールのファジィ推論

例題1では前件部（A^1，A^2）と後件部（B^1，B^2）はそれぞれ図3の(a)，(b)に実線で示す三角型ファジィ集合とする．例題2の前件部（A^1，A^2）は図4(a)に実線で示す七つのパラメータで表現した非凸なファジィ集合，後件部（B^1，B^2）は図4(b)に実線で示す円型の上半身とする．二つの例題において与えられた事実はそれぞれA，A'，A''，A^1，A^2であるとして，各事実に対応する推論結果はB，B'，B''，$B^{1\prime}$，$B^{2\prime}$で表す．二つの推論結果により，本推論法は3章に述べた特徴を持っていることが分かる．

5．まとめ

本論文は，特性パラメータ空間と同型ファジィ集合との関係を利用して，パラメータ空間における距離型ファジィ推論法を提案し，最後に具体的な例題により本推論法の特徴を示した．ここでは言及していないが，距離型関数推論法及び簡略化推論法本推論法[16]～[18]は本論文の推論法の特例として取り扱える．また，離散的メンバーシップ関数を持つファジィ集合の場合，そのメンバーシップ関数値を特性パラメータとすれば，本推論法はそのまま適用できる．

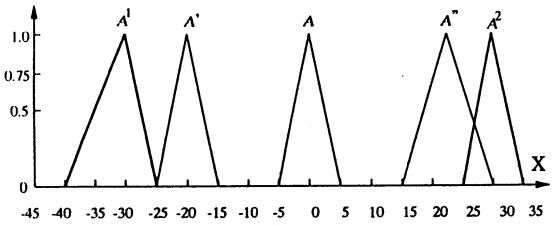


図 3 (a)　前件部と事実

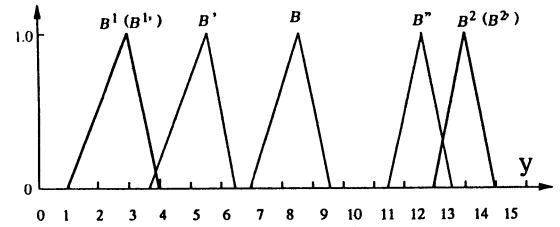


図 3 (b)　後件部と推論結果

図 3　本推論法による例題 1 の推論結果

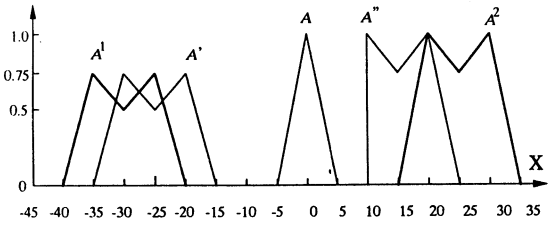


図 4 (a)　前件部と事実

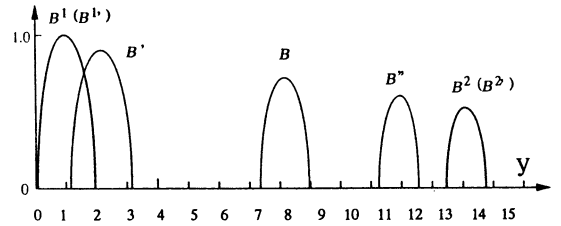


図 4 (b)　後件部と推論結果

図 4　本推論法による例題 2 の推論結果

参 考 文 献

[1] E. H. Mamdani : Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588(1974)

[2] 前田，村上：自己調整ファジィコントローラ，計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.2, pp.191-197(1988)

[3] 市橋，渡辺：簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御，日本ファジィ学会誌, Vol.2, No.3, pp.429-437(1990)

[4] T. Takagi and M. Sugeno : Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Transaction on SMC, Vol.15, No.1, pp.116-132(1985)

[5] 水本：代数-加算-重心法＝ファジィシングルトン型ファジィ推論法＝簡略化推論法，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.305-308(1996)

[6] 中森：ファジィモデリング，オーム社(1994)

[7] L. T. Koczy and K. Hirota : Interpolative Reasoning with Insufficient Evidence in Sparse Fuzzy Rule Bases, Information Sciences, Vol. 71, No.1, pp.169-201(1993)

[8] L. T. Koczy and K. Hirota : Approximate Reasoning by Linear Rule Interpolation and General Approximation, International Joural of Approximate Reasoning, Vol. 9, No.3, pp.197-225(1993)

[9] 石岩，水本：疎なファジィルールベースにおけるKoczyの補間型推論法について，10th Fuzzy System Symposium講演論文集，pp.221-224 (1994)

[10] Y. Shi and M. Mizumoto : Some Considerations on Koczy's Fuzzy Interpolative Reasoning Method, Proceedings of Fourth IEEE International Conference on Fuzzy System, pp.2117-2122(1995)

[11] 石岩，水本：Koczy の線形補間型推論法に関する 2，3 の考察，日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.1, pp.147-157 (1996)

[12] 中島：ファジィ数学概説，日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.6, pp.1048-1056 (1994)

[13] 中島：推論とファジィ推論の数理，日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.6, pp.1105-1114 (1994)

[14] 王，土谷：凸性・漸近性・分離性を持つ適合型ファジィ推論法の提案，第6回インテリジェントシステムシンポジウム 講演 論文集, pp.352-355(1996)

[15] 王，土谷：Mamdaniのファジィ推論を関数型ファジィ推論に統合した適合度型ファジィ推論法，第6回インテリジェントシステムシンポジウム 講演論文集，pp.356-359(1996)

[16] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 1 -距離型ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集，pp.9-12(1996)

[17] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 2 -命題の真理値を考慮した距離型ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集pp.13-16(1996)

[18] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 3 -距離型多重多段ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.17-20(1996)

[19] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 4 -ファジィ集合間の計算法について-，第13回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集，(1997)

[20] D. Dubois and H. Prade : Operations on Fuzzy Numbers, International Joural of System Science, Vol. 9, No.6, pp.613-626(1978)

[21] 日本ファジィ学会編：講座ファジィ 2 --ファジィ集合，日刊工業新聞社 (1992)

[22] 廣田，矢鳴：離散的ファジィ集合の一表現法について，7 th Fuzzy System Symposium講演論文集，pp.537-540 (1991)

[23] 島川，村上：プラントのファジィモデリングとファジィ予測制御，第6回インテリジェントシステムシンポジウム 講演 論文集，pp.227-230(1996)

連絡先：〒782　高知県土佐山田町宮ノ口185番地
高知工科大学知能機械システム工学科
王碩玉
TEL:　08875-7-2306
FAX:　08875-7-2320
Email:　wang@mech. kochi-tech. ac. jp

WED1-3

ファジィ関数型推論法

FUZZY FUNCTIONAL REASONING METHOD

水本雅晴
Masaharu MIZUMOTO

大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

As an extended version of functional reasoning method whose consequent parts consist of functions, this paper proposes "fuzzy functional reasoning method" in which fuzzy functions are used in the consequent part. Moreover, this reasoning method is shown to be equivalent to "weighted functional reasoning method" whose consequent parts have weights, by adopting as the weight the area or the base length of fuzzy set from the fuzzy function in the consequent part.

1．はじめに

ファジィ推論法において、ファジィ規則の後件部を関数にしたのが「関数型推論法」であり、菅野のファジィ推論法[1]として知られており、最も汎用性のあるファジィ推論法である。

この関数型推論法では、前件部はファジィ集合であるが、後件部が関数というシングルトンな値をもつために、直感的に理解しがたく、特に初学者には混乱を招いている。

本論文では、直感的な理解を可能にする関数型推論法として、後件部をファジィ関数にした「ファジィ関数型推論法」を提案する。このファジィ関数型推論法は、後件部のファジィ関数から得られるファジィ集合の面積あるいは底辺の長さを重みと見なすことにより、後件部に重みを付加した「重み付き関数型推論法」に等価になることを示す。

2．関数型推論法

まず、関数型推論法[1]のあらましを述べておく。

$$\begin{array}{l} \text{規則1: } A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow f_1(x,y) \\ \quad\cdots\cdots \\ \text{規則n: } A_n \text{ and } B_n \Rightarrow f_n(x,y) \\ \text{事 実: } x_\circ \text{ and } y_\circ \\ \hline \text{結 論: } \qquad z_\circ \end{array} \tag{1}$$

ここで、関数 fi は fi: X x Y → Z なる関数であるが、通常は簡単のため一次式とする場合が多い。

事実「$x_\circ$ and $y_\circ$」が与えられたときの各ファジィ規則の前件部「Ai and Bi」との適合度は

$$h_i = \mu_{A_i}(x_\circ) \cdot \mu_{B_i}(y_\circ) \tag{2}$$

と与えられ、後件部の関数値は $f_i(x_\circ, y_\circ)$ となる。これより、$x_\circ$、$y_\circ$ が与えられたときの結果 $f_i(x_\circ, y_\circ)$ が得られる度合が h_i であると解釈できることから、最終的な結論 $z_\circ$ は、$f_1(x_\circ, y_\circ), \cdots, f_n(x_\circ, y_\circ)$ を適合度 $h_1, \cdots, h_n$ で荷重平均することにより

$$z_\circ = \frac{h_1 f_1(x_\circ, y_\circ) + \cdots + h_n f_n(x_\circ, y_\circ)}{h_1 + \cdots + h_n} \tag{3}$$

と与えられる。

【例】1次元の場合の関数型推論法を考えてみよう。

$$\begin{array}{l} \text{規則1: } A_1 \Rightarrow f_1(x) \\ \text{規則2: } A_2 \Rightarrow f_2(x) \\ \text{事 実: } x_\circ \\ \hline \text{結 論: } \qquad y_\circ \end{array} \tag{4}$$

結論 $y_\circ$ は

$$y_\circ = \frac{h_1 f_1(x_\circ) + h_2 f_2(x_\circ)}{h_1 + h_2} \tag{5}$$

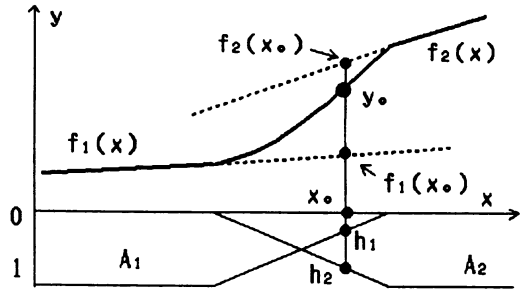


図 1 関数型推論法の説明図

と与えられる（図1）。ここで

$$h_1 = \mu_{A_1}(x_\circ), \quad h_2 = \mu_{A_2}(x_\circ) \tag{6}$$

図1からも分かるように、この関数型推論法は、ファジィ集合 A_1、A_2 の境界付近で関数 $f_1(x)$ と $f_2(x)$ とを結合（すなわち内挿）させる働きをもつ。

関数型推論法では、関数 fi(x,y) を決めるのが多少困難であるが、後件部が定数である簡略化推論法よりもきめ細かな処理が可能であり、盛んに使用されている。

3．ファジィ関数型推論法

ファジィ規則を"因果関係"と見なした場合、原因がファジィである場合に、結論がクリスプとなるのは直感に合わない。むしろ結論はファジィであると考えるのが自然であろう。しかしながら、関数型推論法においては、ファジィ規則の前件部がファジィであるにもかかわらず、後件部が関数というクリスプな値を取るため、直感的に理解しずらい面がある。

本節では、後件部の関数を一般化し、ファジィ関数とした場合の推論法、すなわち「ファジィ関数型推論法」を提案する。これは、後件部がファジィな形で与えられているので、直感的な理解が容易である。

たとえば、ファジィ関数型推論によって

- ８０年後半にかけて、景気は急上昇し、
- ９０年前後に、景気はピークに達し、
- ９０年初めから、景気は急速に悪化した。

といったようにバブル景気を表すことができる。「急上昇する」、「ピークに達する」、「急速に悪化する」などは従来の関数で表すことができなく、ファジィ関数によって表現した方がより現実的であろう。

後件部をファジィ関数にした「ファジィ関数型推論法」は次のように与えられる。

$$\begin{array}{l} \text{規則1: } A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow F_1(x,y) \\ \quad\cdots\cdots \\ \text{規則n: } A_n \text{ and } B_n \Rightarrow F_n(x,y) \\ \text{事 実: } x_\circ \text{ and } y_\circ \\ \hline \text{結 論: } \qquad F'(\rightarrow z_\circ) \end{array} \tag{7}$$

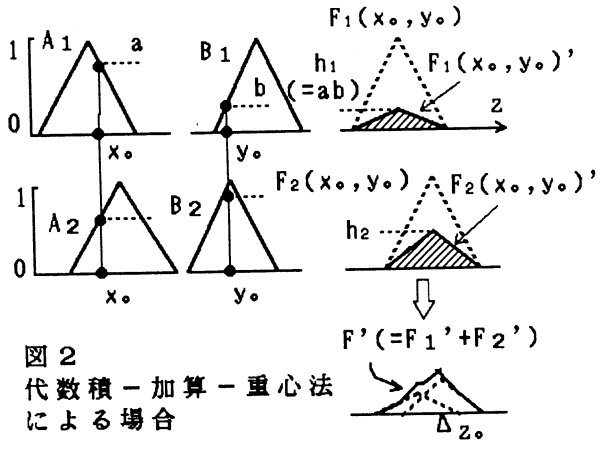


図２
代数積－加算－重心法
による場合

ここで、Fi はファジィ関数であることにより、関数値 Fi(x,y) はファジィ集合となる。

事実「x。and y。」が与えられたときの結論 z。の求め方は、後件部 Fi(x。,y。) がファジィ集合となるため、マムダニ流のファジィ推論法を使用する必要がある。たとえば、「代数積-加算-重心法」[2]を使用した場合、結論 z。は次のようにして求められる（図２参照）。

事実「x。and y。」と各規則の前件部「Ai and Bi」との適合度 hi は式(2)と同様に与えられ、各ファジィ規則から得られる推論結果 Fi(x。,y。)' は

$$\mu_{Fi(x_\circ,y_\circ)'}(z) = hi \cdot \mu_{Fi(x_\circ,y_\circ)}(z) \qquad (8)$$

となる。ここで、・は代数積（掛算）である。

式(7)の最終的な結論 F' は、各推論結果 Fi(x。,y。)' を加算(+)で統合することにより得られる。

$$\mu_{F'}(z) = \mu_{F_1(x_\circ,y_\circ)'}(z) + \cdots + \mu_{Fn(x_\circ,y_\circ)'}(z) \qquad (9)$$

結論 F' の代表値 z。は次の重心法より求められる。

$$z_\circ = \frac{\int z \cdot \mu_{F'}(z)\,dz}{\int \mu_{F'}(z)\,dz} \qquad (10)$$

【参考】式(2),(8)で min を、式(9)で max を使用すると、マムダニの「min-max-重心法」が得られる。

【例】簡単のため、１次元の場合のファジィ関数型推論法を考えてみよう（図３）。

規則1: A_1 => $F_1(x)$
規則2: A_2 => $F_2(x)$
事 実: x。
結 論: y。 (11)

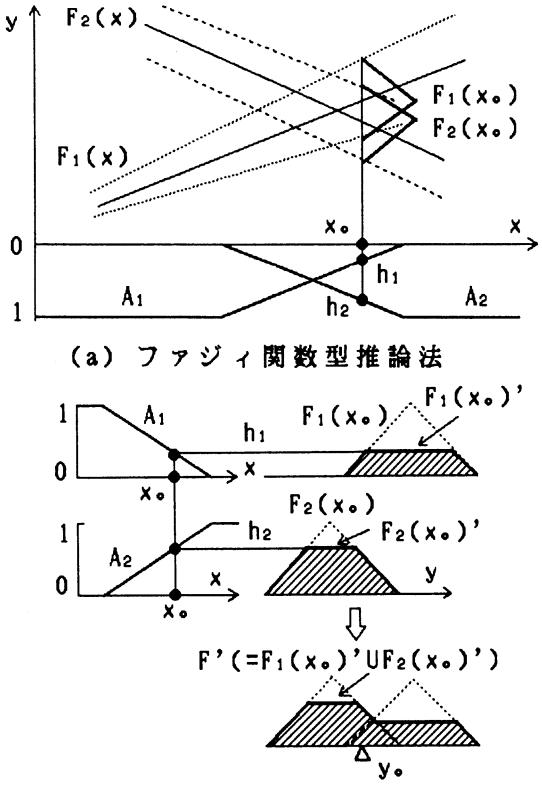
において、後件部 $F_1(x)$, $F_2(x)$ はファジィ関数であり、図３(a)のように幅をもつ関数となる。したがって、x。が与えられたときの関数値 $F_1(x_\circ)$, $F_2(x_\circ)$ はファジィ集合となる。これより、例えば、min-max-重心法を使った場合の結論 y。の求め方を示すと図３(b)のようになる。

具体的な例を示してみよう（図４）。ファジィ関数の値 $F_1(x)$, $F_2(x)$ を三角型のファジィ集合として

$$F_1(x) = \langle\!\langle 0,\ 1,\ 2 \rangle\!\rangle \qquad (12)$$
$$F_2(x) = \langle\!\langle (x-5)/2,\ (x+1)/2,\ (x+7)/2 \rangle\!\rangle$$

のように表す。ここで、記法 《a,b,c》 は三角形を表し、a, b, c はそれぞれ左端、中心、右端を表す。これより、ファジィ関数 F_1, F_2 はそれぞれ幅２、６のプリズム型のメンバーシップ関数で特性付けられていることがわかる。

これより、ファジィ関数型推論法を適用してみると、図４のような推論結果が得られる。推論方法として、min-max-重心法および代数積-加算-重心法を使用した場合の結果である。幅が２、６のように大きいファジィ関数を使用しているため、特に、min-max-重心法ではファジィ関数の重なりの影響が顕著に出るため、代数積-加算-重心法とはかなり異なった推論結果を得ている。



(a) ファジィ関数型推論法

(b) min-max-重心法による場合

図３ １次元の場合のファジィ関数型推論

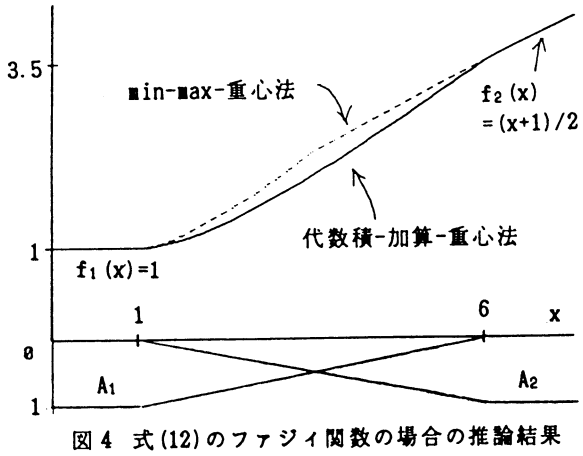


図４ 式(12)のファジィ関数の場合の推論結果

以上のことからもわかるように、ファジィ関数型推論法では後件部にファジィ関数を採用しているため、ファジィ関数の幅や形を変えることにより、きめ細かな推論結果を得ることができる。

４．ファジィ関数型推論法と重み付き関数型推論法との等価性

本節では、ファジィ関数型推論法の後件部のファジィ関数の値はファジィ集合となることから、その面積を重み付き関数型推論法の重みとして採用することにより、両推論法は等価になることを示す。

「重み付き関数型推論法」[3]は、関数型推論法の後件部の関数 fi(x,y) に重み wi(x,y) を付加したものであり

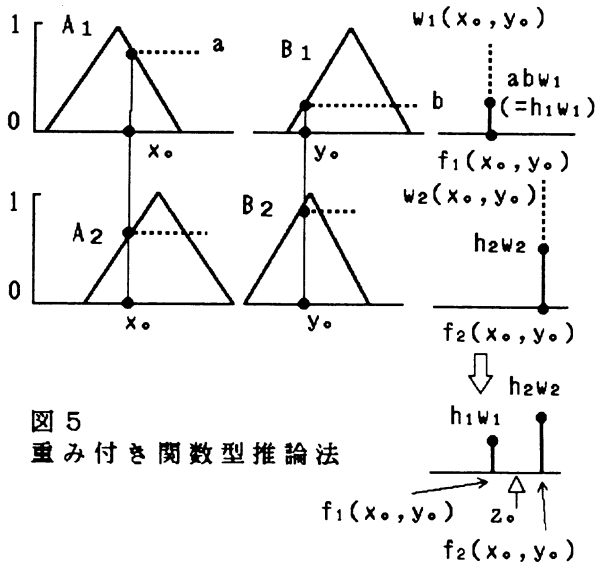


図５
重み付き関数型推論法

規則1: A_1 and B_1 => $w_1(x,y)/f_1(x,y)$
……
規則n: An and Bn => $wn(x,y)/fn(x,y)$ (13)
事 実: x_0 and y_0
結 論: z_0

と表される。ここで、記法 $wi(x,y)/fi(x,y)$ は、関数値 $fi(x,y)$ のグレード（重み）が $wi(x,y)$ であることを表している。重み $wi(x,y)$ は $wi: X \times Y \rightarrow [0,\infty)$ なる非負関数であり、$wi(x,y) = 1$ の場合は通常の関数型推論法に還元される。

重み付き関数型推論法による結論 z_0 は、関数値 $f_1(x_0,y_0),\cdots,fn(x_0,y_0)$ を、各適合度 $h_1,\cdots,hn$ に重み $w_1(x_0,y_0),\cdots,wn(x_0,y_0)$ を掛けたもの $hi\cdot wi(x_0,y_0)$ で荷重平均することにより得られる。すなわち

$$z_0 = \frac{h_1\cdot w_1(x_0,y_0)\cdot f_1(x_0,y_0) + \cdots + hn\cdot wn(x_0,y_0)\cdot fn(x_0,y_0)}{h_1\cdot w_1(x_0,y_0) + \cdots + hn\cdot wn(x_0,y_0)} \quad (14)$$

と与えられる（図５）。

次に、ファジィ関数型推論法と重み付き関数型推論法とが等価になることを示そう。この場合、ファジィ関数型推論法では「代数積-加算-重心法」に基づいた推論法を採用するものとする。他の推論法、例えば min-max-重心法の下では一般に等価性を示すことができない。

式(8)で得られる推論結果 $Fi(x_0,y_0)'$ はファジィ集合の形で得られるが、その重心値を $fi(x_0,y_0)'$、面積を $Si(x_0,y_0)'$ とすると（図６参照）、以下のような関係が得られる。ただし、簡単のため

$$\begin{aligned} Fi' &= Fi(x_0,y_0)' \\ fi' &= fi(x_0,y_0)' \\ Si' &= Si(x_0,y_0)' \end{aligned} \quad (15)$$

なる記法を採用している。

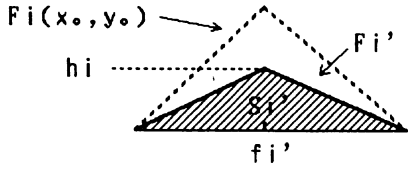


図６ 推論結果 Fi'の面積 Si'と重心 fi'

$$fi' = \frac{\int z\cdot\mu_{Fi'}(z)dz}{\int \mu_{Fi'}(z)dz} = \frac{\int z\cdot\mu_{Fi'}(z)dz}{Si'}$$

より

$$\int z\cdot\mu_{Fi'}(z)dz = Si'\cdot fi' \quad (16)$$

といった関係が得られる。

これより最終的な結論 F' の重心値 z_0 は、式(10),(15),(16)から

$$z_0 = \frac{\int z\cdot[\mu_{F_1'}(z)+\mu_{F_2'}(z)+\cdots+\mu_{Fn'}(z)]dz}{\int [\mu_{F_1'}(z)+\mu_{F_2'}(z)+\cdots+\mu_{Fn'}(z)]dz} = \frac{S_1'\cdot f_1' + S_2'\cdot f_2' + \cdots + Sn'\cdot fn'}{S_1' + S_2' + \cdots + Sn'} \quad (17)$$

となり、z_0 は各推論結果 Fi' の面積 Si' と重心値 fi' から求められることがわかる[4]。

式(7)のファジィ規則の後件部 $Fi(x_0,y_0)$ の面積を $Si(x_0,y_0)$ とすると、式(8)の関係から、推論結果 Fi' の面積 Si' は

$$Si' = hi\cdot Si(x_0,y_0) \quad (18)$$

と与えられる。また、Fi' の重心値 fi' は $Fi(x_0,y_0)$ の重心値 $fi(x_0,y_0)$ に等しいことから、式(15)の記法に注意すれば、最終的な結論 F' の重心値 z_0 は式(17),(18)から

$$z_0 = \frac{h_1\cdot S_1(x_0,y_0)\cdot f_1(x_0,y_0) + \cdots + hn\cdot Sn(x_0,y_0)\cdot fn(x_0,y_0)}{h_1\cdot S_1(x_0,y_0) + \cdots + hn\cdot Sn(x_0,y_0)} \quad (19)$$

のように与えられる。

以上のことから、重み付き関数型推論法とファジィ関数型推論法の代表値 z_0 の算出方法（式(14)と(19)参照）は同じ形をしていることがわかる。これより、ファジィ関数型推論法の後件部 $Fi(x,y)$ の面積 $Si(x,y)$ を重み $wi(x,y)$ とみなすことにより、すなわち

$$wi(x,y) = Si(x,y) \quad (20)$$

とすることにより、ファジィ関数型推論法の規則

$$Ai \text{ and } Bi \Rightarrow Fi(x,y) \quad (21)$$

は、重み付き関数型推論法の規則

$$Ai \text{ and } Bi \Rightarrow Si(x,y)/fi(x,y) \quad (22)$$

に置き換えることができる（図７、８参照）。

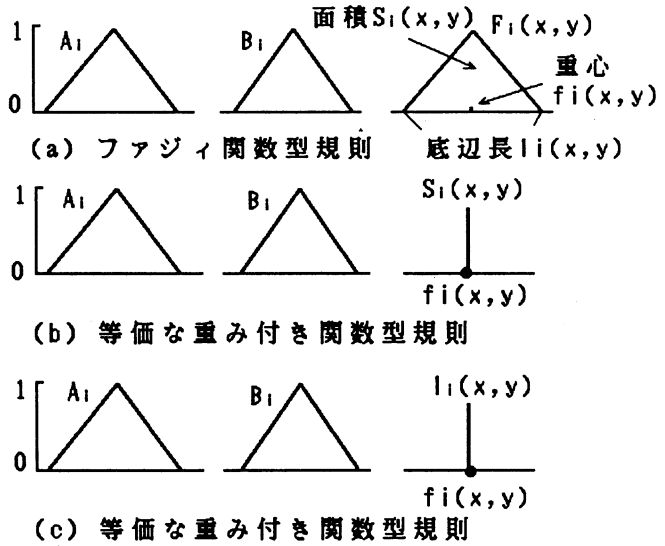
したがって、式(7)に対するファジィ関数型推論法は

規則1: A_1 and B_1 => $S_1(x,y)/f_1(x,y)$
……
規則n: An and Bn => $Sn(x,y)/fn(x,y)$ (23)
事 実: x_0 and y_0
結 論: z_0

のような重み付き関数型推論法に帰着されることがわかる。明らかに、重み付き関数型推論法はファジィ関数型推論法の特別の場合であることから、『ファジィ関数型推論法は重み付き関数型推論法と等価である』といえる。

【参考】後件部 $Fi(x,y)$ $(i=1,\cdots,n)$ のファジィ集合がすべて同じ（一般的には、面積 $Si(x,y)$ がすべて同じ）であれば、ファジィ関数型推論法は通常の関数型推論法に帰着される。

また、図７(a)で示すように、後件部のファジィ集合 $Fi(x,y)$ の面積 $Si(x,y)$ は底辺の長さに比例するので、底辺の長さ $li(x,y)$（ファジィ関数の幅とみなせる）を重

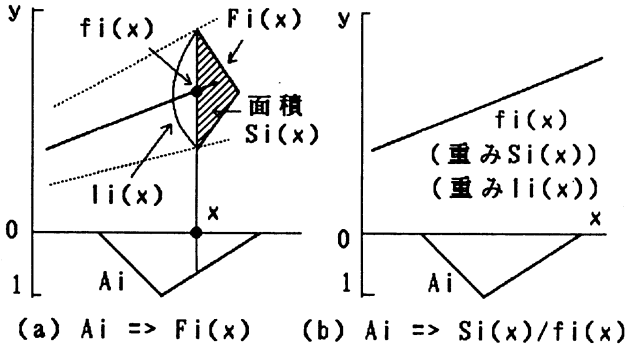


(a) ファジィ関数型規則

(b) 等価な重み付き関数型規則

(c) 等価な重み付き関数型規則

図7 ファジィ関数型規則と等価な重み付き関数型規則



(a) Ai => Fi(x)　(b) Ai => Si(x)/fi(x)

図8 ファジィ関数型規則(a)と等価な重み付き規則(b)

みとみなすこともでき

$$wi(x,y) = li(x,y) \tag{24}$$

とすることによって、ファジィ関数型推論法は

規則1: A_1 and B_1 => $l_1(x,y)/f_1(x,y)$
……
規則n: An and Bn => $ln(x,y)/fn(x,y)$ (25)
事 実: x。and y。
結 論: z。

のような重み付き関数型推論法に置き換えることもできる。

【例】式(11)のファジィ関数型推論法において

$$F_1(x) = \langle x-0.5,\ x,\ x+0.5 \rangle \tag{26}$$
$$F_2(x) = \langle -2x,\ 0.5x,\ 3x \rangle$$

とすると、

中心(重心):	$f_1(x) = x$,	$f_2(x) = 0.5x$
面　積:	$S_1(x) = 0.5$,	$S_2(x) = 2.5x$ (27)
底辺長(幅):	$l_1(x) = 1$,	$l_2(x) = 5x$

となる。たとえば、底辺長（すなわち、ファジィ関数の幅）を重みとして採用すると、重み付きファジィ規則は

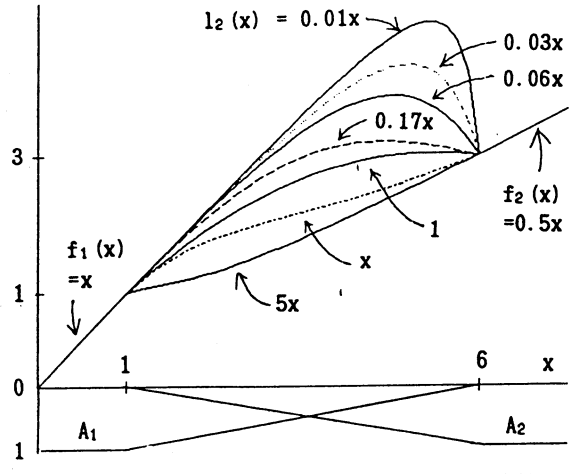


図9 底辺長 $l_2(x)$ を重みとした場合の推論結果

規則1: A_1 => $1/x$ (28)
規則2: A_2 => $5x/0.5x$

のように書き換えられ、推論結果は図9（一番下の曲線）のように得られる。図では、底辺長 $l_2(x)$ を

$$l_2(x) = 0.01x,\ 0.03x,\ 0.06x,\ 0.17x,\ 1,\ x,\ 5x \tag{29}$$

のように変化させた場合の推論結果も掲げている。

5．むすび

ファジィ関数型推論法は、後件部のファジィ関数が単なる関数の場合よりも表現豊富であることから、従来の関数型推論法よりも推論結果の微妙な調整が可能であるが、反面、ファジィ関数の幅や形の取扱が困難であるという欠点を有している。しかしながら、ファジィ関数の断面積や幅を重みとみなした重み付き関数型推論法はファジィ関数型推論法と等価であることから、重み付き関数型推論法は従来の関数型推論法よりも表現能力が豊富なファジィ推論法として使用できるであろう。

参考文献

1. 菅野、ファジィ制御、日刊工業新聞社.
2. 水本、ファジィ制御の改善法(IV)－代数積-加算-重心法による場合－、第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.9-13、1990.
3. 水本、ファジィ制御に対する最近の手法、システム／制御／情報、Vol.38、No.11、pp.590-595、1994.
4. 水本、代数積-加算-重心法＝ファジィシングルトン型推論法＝簡略化推論法、第13回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.305-308、1996.

問い合わせ先：〒572 寝屋川市初町18-8
大阪電気通信大学 情報工学部 情報工学科
水 本 雅 晴
Tel: 0720-24-1131 内 2361
Fax: 0720-24-0014
E-mail: mizumoto@mzlab.osakac.ac.jp

WED2-1

距離型ファジィ推論法 Part 6
——距離型ファジィ推論法の逆問題解法——

A Distance -type Fuzzy Reasoning, Part 6,
—— Method of Solution to Inverse Problem of DTFR——

王 碩玉
Shuoyu WANG
高知工科大学 工学部
Faculty of Engineering, Kochi University of Technology

土谷 武士
Takeshi TSUCHIYA
北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract: In the fuzzy reasoning, an inverse problems means induction of the facts from the deduction conclusions. This proper proposes three induction algorithms for the distance-type fuzzy reasoning method with consideration on quality of DTFR and algebraical approach.

1. はじめに

喉が痛い，咳や鼻水が出る，熱があるなどの症状から病気の原因を推定するということは逆問題と呼ばれている[1]. ファジィ推論の場合，逆問題は推論結果から入力された事実を推定することにあたり，非常に重要な役割を演じている．Part6の本論文では，著者らの提案している距離型ファジィ推論法を検討対象とし，その逆問題の解法を与える.

最近ファジィ制御や複雑系のモデリングなどの分野ではMamdaniの推論法[2]の代わりに簡略化型推論法[3]及び関数型推論法[4]，代数-加法-重心型ファジィ推論法[3]，簡略化型推論法[5]，ファジィ予測モデル[6]などが最もよく使われている．また，拡張原理に基づく凸性を持つ直接法も提案されている[7]. 著者らは分解定理に基づいて凸性・漸近性・分離性を持つ適合度型ファジィ推論法を提案している[11]. また文献[6]の計算量を減らすファジィ推論法も提案している[12]. しかし，これらの適合度型ファジィ推論法では，前件部と与えられた事実との共通集合の高さを，前件部と事実がどの程度一致しているかを示す適合度を根拠にして推論が行われるので，Mamdaniの推論法の持っているような固有な問題点を克服することができない．例えば，複数個のファジィルールにおける前件部が疎である場合つまり前件部集合は隣接したもの同士が互いに空の共通部分をもつ場合，事実がこの空集合に入力される時は，すべての適合度の値がゼロとなってしまい，適切な推論結論を求めることができない．この問題に対して線形補間型推論法が提案されている[8]. しかし，文献[8]の推論法では結論の凸性を保つためにあまりも厳しすぎる条件が付けられている[9]. 著者らは適合度型ファジィ推論法の固有な問題点を根本的に解決するために，従来のファジィ推論の仕組とは異なる出発点から議論することが必要[10]という立場に立って，ファジィ集合間の距離に基づいて距離型ファジィ推論法を提案している[13][14][15]. 文献[13]は距離型ファジィ推論法の基本的なアルゴリズムを述べるものであり，文献[14][15]はそれぞれ真理値を考慮した距離型ファジィ推論法と距離型多重多段ファジィ推論法につて論じている．文献[16]では距離型ファジィ推論の基本となる5種類の距離計算法を提案している．文献[17]では非凸な前件部を持つルールにもできることとより計算量の低減の目的で，特性パラメータ空間における距離型ファジィ推論法のアルゴリズムを提案している.

逆問題に関する理論的研究は古くから続けられてきたが，最近天体物理，資源探査，故障診断，デザイン，医学などのような現実問題に適用されている．ファジィ逆問題はファジィ関係式として定式化されて[18]以来，数多くの解法及び解の性質と存在性の判別が提案されている[19]～[22]. 本論文では提案している一段多変数ルールの距離型ファジィ推論法を議論対象として，その逆問題の定式化及び解法について論じる.

2. 距離型ファジィ推論の逆問題

本章では距離型ファジィ推論の基本アルゴリズムを要約し，その逆問題を定式化する．ここで図1に示すようなm入力1出力のファジィ推論ルールを検討対象とするが，多入力多出力の場合に容易にも拡張できる.

$$
\begin{array}{lllll}
R^1: & x_1=A^{11}, & x_2=A^{12}, \cdots, & x_m=A^{1m} & \Rightarrow y=B^1 \\
R^2: & x_1=A^{21}, & x_2=A^{22}, \cdots, & x_m=A^{2m} & \Rightarrow y=B^2 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^i: & x_1=A^{i1}, & x_2=A^{i2}, \cdots, & x_m=A^{im} & \Rightarrow y=B^i \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^n: & x_1=A^{n1}, & x_2=A^{n2}, \cdots, & x_m=A^{nm} & \Rightarrow y=B^n \\
 & x_1=A^1, & x_2=A^2, \cdots, & x_m=A^m & \\
\hline
 & & & & y=B
\end{array}
$$

図1 m入力nルールのファジィ推論

ただし，$i=1,2,\cdots,n$，$j=1,2,\cdots,m$．A^{ij}，B^i，A^j，Bはそれぞれ前件部，後件部，与えられた事実および推論結果を表わし，$A^{ij}, A^j \subset F(R_A)$，$B^i \subset \overline{F}(R_B)$とする．各ルール$R^1 \sim R^n$において，前件部が全く同一のルールは存在しないとする．すなわち，$\exists q_1, q_2 \in \{1,2,\cdots,n\}$に対して，$q_1 \neq q_2$ならば，不等式$\sum_{l=1}^{m} d(A^{q_1 l}, A^{q_2 l}) \neq 0$が成り立つとする．

距離型ファジィ推論法のアルゴリズムは次の三つのステップから構成する．

STEP1：まず文献[16]に述べた手法を用いて前件部A^{ij}と事実A^jとの距離$d_{ij}(A^{ij}, A^j)$を計算する．次に(1)式により$d_1 \sim d_n$を計算する．

$$d_i = \sum_{j=1}^{m} d_{ij}(A^{ij}, A^j) \tag{1}$$

STEP 2：次のように，推論結果Bのα−レベル集合を求める．

$$B_\alpha = [\, inf(B_\alpha), sup(B_\alpha) \,] \tag{2}$$

$$inf(B_\alpha) := \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[inf(B_\alpha^i) \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j \right]}{\sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j} \tag{3}$$

$$sup(B_\alpha) := \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[sup(B_\alpha^i) \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j \right]}{\sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j} \tag{4}$$

STEP 3：合成定理（分解定理とも呼ばれる）により，(5)式で推論結果Bを求める．

$$B = \bigcup_{\alpha} \alpha \cdot B_\alpha \tag{5}$$

以上，距離型ファジィ推論法のアルゴリズムを纏めた．

生体，医学，経済，社会などのような複雑システムの特性を表現するには数式一本ですべて表わそうとする従来の考え方ではもう通用しないと指摘されてきた．そして状況に応じて行動を適切に判断するといったアプローチが現われてきた．命題のあいまいさを考慮したプロダクションルールはその一つであり，その有効性がすでに色々な実際のシステムにより示されている [2] ～ [6]．すなわち，図１に示すn個の「if-then-」ルールはシステムの特性を表現するモデルになるので，与えられた事実と推論された結果をそれぞれそのシステムの入出力とみなすことができる．本論文では何らかの手段で結果Bが観測されたとして，この結果Bを引き起こさせた原因A^jを求めることを考える．つまり，システムの出力から入力を求める逆問題を論じる．具体的に次のように定義する．

定義１：図１に示すルールで表すシステムにおいて，出力Bが観測されたとする．Bから入力された事実$A^1 \sim A^m$と各ルールR^iにおける前件部$A^{i1} \sim A^{im}$との距離d_i

$$d_i = \sum_{j=1}^{m} d(A^j, A^{ij})$$

を求めることを距離型ファジィ推論の逆問題という．ただし，$i=1,2,\cdots,n$.

3．距離型ファジィ推論法の性質によるファジィ逆問題の解法

本章では距離型ファジィ推論法の持っている性質に基づいて距離型ファジィ推論の逆問題の解法を説明する．以下では混乱を起こさない限り集合A_αの上限$supA_\alpha$を$\overline{A_\alpha}$と，A_αの下限$infA_\alpha$を$\underline{A_\alpha}$と書くことがある．

定理１：推論結果について，$\exists q \in \{1,2,\cdots,n\}$，$B = B^q$である場合，もし$\forall \alpha \in [0,1]$に対して次の二つの等式を同時に満たす定数$d_1, d_2, \cdots, d_{q-1}, d_{q+1}, \cdots, d_n$が存在しなければ，事実について$A^k = A^{qk}$でなければならない．ただし，$k=1,2,\cdots,m$．

$$\underline{B_\alpha^q} = \frac{\sum_{i=1, i\neq q}^{n} \left[\underline{B_\alpha^i} \prod_{j=1, j\neq i,q}^{n} d_j \right]}{\sum_{i=1, i\neq q}^{n} \prod_{j=1, j\neq i,q}^{n} d_j} \tag{6}$$

$$\overline{B_\alpha^q} = \frac{\sum_{i=1, i\neq q}^{n} \left[\overline{B_\alpha^i} \prod_{j=1, j\neq i,q}^{n} d_j \right]}{\sum_{i=1, i\neq q}^{n} \prod_{j=1, j\neq i,q}^{n} d_j} \tag{7}$$

事実$A^1 \sim A^m$が分かれば(1)式により各前件部との距離d_iを求めることができる．

4．等価ルールに基づく逆問題の解法

苺が赤ければ熟している．苺が熟していれば赤い．つ

まり苺に対しては「赤い」と「熟している」が互いに等価関係にある．このようなルールを等価ルールと呼ぶことにする．現実に等価ルールで表現するシステムや事柄がたくさん存在するのでここで取り上げる．次のn個の等価ルールを考える．$i=1,2,\cdots,n.$

$$R^i:\quad x_1=A^{i1},\quad x_2=A^{i2},\cdots,x_m=A^{im}\ \Leftrightarrow\ y=B^i$$

$$x_1=A^1,\quad x_2=A^2,\quad \cdots,\quad x_m=A^m$$

$$y=B$$

図2　m入力n等価ルールのファジィ推論

この場合，(8)～(11)式により観測されたBから起因A^1～A^mを求める．それから(1)式により各前件部との距離d_iを求めることができる．

$$A^k=\bigcup_{\alpha}\alpha\cdot A_\alpha^k \tag{8}$$

ただし，$k=1,2,\cdots,n$

$$A_\alpha^k=[inf(A_\alpha^k),\ sup(A_\alpha^k)] \tag{9}$$

$$inf(A_\alpha^k):=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[inf(A_\alpha^{ik})\prod_{j=1,j\neq i}^{n}d(B^j,\ B)\right]}{\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1,j\neq i}^{n}d(B^j,\ B)} \tag{10}$$

$$sup(A_\alpha^k):=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[sup(A_\alpha^{ik})\prod_{j=1,j\neq i}^{n}d(B^j,\ B)\right]}{\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1,j\neq i}^{n}d(B^j,\ B)} \tag{11}$$

5．ベクトル空間におけるファジィ逆問題の解法

本章ではベクトル空間において線形代数の知識を利用して距離型ファジィ推論の逆問題の解法を与える．

ここで便宜上前件部と後件部とも正規なファジィ集合として展開を進める．観測された結果Bを表現するメンバーシップ関数の代表的特徴点を(L_1+L_2)個とする．これらの特徴点に対応する各αを$\alpha_1,\cdots,\alpha_{L_1},\alpha_{L_1+1},\cdots,\alpha_{L_1+L_2}\in[0,\ 1]$と書く．(3)(4)式により次のマトリクス方程式が得られる．目的は解$D>0$を求める．

$$AD=b \tag{12}$$

ただし，$i=1,2,\cdots,n.\quad k=1,2,\cdots,n.$

$$b=(b_1,\ b_2)^T \tag{13}$$

$$b_1=(infB_{\alpha_1},\ infB_{\alpha_2},\cdots,\ infB_{L_1}) \tag{14}$$

$$b_2=(supB_{L_1+1},\ supB_{L_1+2},\cdots,\ supB_{L_1+L_2}) \tag{15}$$

$$D=(D_1,\ D_2,\cdots,\ D_n)^T \tag{16}$$

$$D_k=\frac{\prod_{j=1,j\neq k}^{n}d_j}{\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1,j\neq i}^{n}d_j} \tag{17}$$

$$A=(a_1,\ a_2,\cdots,\ a_n) \tag{18}$$

$$a_k=\left(\underline{B_{\alpha_1}^k},\cdots,\underline{B_{\alpha_{L_1}}^k},\overline{B_{\alpha_{L_1+1}}^k},\cdots,\overline{B_{\alpha_{L_1+L_2}}^k}\right)^T \tag{19}$$

定理2：もし，不等式(20)(21)を同時に満たすベクトルyが存在すれば，(12)式は非負の解を持たない．

$$A^Ty\geq 0 \tag{20}$$

$$y^Tb<0 \tag{21}$$

この定理はベクトルbがAの列空間$R(A)$に存在する条件だけでは非負解の存在が保証されなく，更に線形空間の択一性を満たすことが必要ということを意味している．

定理3：$a_1,a_2,\cdots,a_n$が線形独立として，もし$\exists i,j\in\{1,2,\cdots,n\}$，次の不等式が成り立てば，解$D>0$は存在しない．

$$cos^{-1}\left(\frac{a_i^Tp_{ij}}{|a_i^T|\cdot|p_{ij}|}\right)+cos^{-1}\left(\frac{a_j^Tp_{ij}}{|a_j^T|\cdot|p_{ij}|}\right)\neq cos^{-1}\left(\frac{a_i^Ta_j}{|a_i^T|\cdot|a_j|}\right) \tag{22}$$

ただし，$|\cdot|$はベクトルの大きさを表わす．

$$p_{ij}=[a_i,\ a_j]\begin{bmatrix}a_i^Ta_i,\ a_i^Ta_j\\ a_j^Ta_i,\ a_j^Ta_j\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}a_i^T\\ a_j^T\end{bmatrix}b \tag{23}$$

つまりこの定理はbがベクトル$a_1,a_2,\cdots,a_n$からなる凸錐体内になければ解$D>0$が存在しないということを意味する．

定義2：ベクトル$a_1,a_2,\cdots,a_n$の先端を結んでできる面を超平面と言い，$SP(A)$で表わす．

定理4：もし，$b\in SP(A)$を満たされれば，非負解$D>0$が存在する．かつ$\sum_{i=1}^{n}D_i=1$が成立する．

定理5：(12)式の解$D>0$が求められれば，定義1により定義された逆問題は(24)式で計算することになる．

$$d_k = \eta \left(\frac{\prod_{i=1, i \neq k}^{n} D_i}{D_k^{n-2}} \right)^{\frac{1}{n-1}} \qquad (24)$$

ただし，$k = 1, 2, \cdots, n$.

η：ある定数.

この定理によれば，システムに入力された事実と各前件部との具体的な距離値が定数ηによって変わるが，長さについての比較関係が変わらないことが分かる.

6．まとめ

本論文は，三つのアプローチすなわち，推論法の固有な性質，等価ルールの概念と線形代数学の立場から，それぞれ著者らの提案している距離型ファジィ推論法の逆問題の解き方についてを議論した．流れとしてはもし推論された結果Bがあるルールの後件部に等しければ，直ちにシステムに入力された事実がそのルールの前件部に等しいということを判定できる．この結論が等価ルールに対しての計算式(10)(11)中に含まれている．この二つの状況以外では一般に直接に事実を求めることができないと予測している．したがって，代数的なアプローチでは事実と前件部との距離を求めることを重点に置いている．また，本推論法では$b \notin R(A|)$の場合，(12)式自体は解を持たない場合について言及していないが，重み付き最小２乗法を用いて，列空間$R(A)$にある近似最適解を求めることができる.

参　考　文　献

[1] 武者（監修），岡本（著）：逆問題とその解き方，オーム社(1992)

[2] E. H. Mamdani : Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588(1974)

[3] 前田，村上：自己調整ファジィコントローラ，計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.2, pp.191-197(1988)

[4] T. Takagi and M. Sugeno : Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Transaction on SMC, Vol.15, No.1, pp.116-132(1985)

[5] 水本：ファジィ制御に対する改善法（IV）-代数積-加法-重心法による場合-，第６回ファジィシステムシンポジウム講演論 文集，pp.9-13(1990)

[6] 中森：ファジィモデリング，オーム社(1994)

[7] K. Uehara : Fuzzy Inference Based on a Weighed Average of Fuzzy Sets and its Learning Algorithm for Fuzzy Exemplars, Proceedings of Fourth IEEE Int. Conf. on Fuzzy System, pp.2253-2260(1995).

[8] L. T. Koczy and K. Hirota : Approximate Reasoning by Linear Rule Interpolation and General Approximation, International Joural of Approximate Reasoning, Vol. 9, No.3, pp.197-225(1993)

[9] 石岩，水本：Koczyの線形補間型推論法に関する２，３の考察，日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.1, pp.147-157（1996）

[10] 中島：推論とファジィ推論の数理，日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.6, pp.1105-1114（1994）

[11] 王，土谷：凸性・漸近性・分離性を持つ適合型ファジィ推論法の提案，第6回インテリジェントシステムシンポジウム 講演 論文集, pp.352-355(1996)

[12] 王，土谷：Mamdaniのファジィ推論を関数型ファジィ推論に統合した適合度型ファジィ推論法，第6回インテリジェントシステムシンポジウム 講演論文集，pp.356-359(1996)

[13] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 1 -距離型ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集，pp.9-12(1996)

[14] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 2 -命題の真理値を考慮した距離型ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集pp.13-16(1996)

[15] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 3 -距離型多重多段ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.17-20(1996)

[16] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 4 -ファジィ集合間の計算法について-，第13回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集(1997)

[17] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 5 -パラメータ空間における距離型ファジィ推論法-，第14回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集(1997)

[18] E. Sanchez: Solution in Composite Fuzzy Relation Equation, Information and control, 30, pp.38-48(1976)

[19] 塚本，田代：Fuzzy逆問題の解法，計測自動制御学会論文集，Vol.15，No.1，pp.2125(1979)

[20] C. P. Pappis and M. Sugeno: Fuzzy Relational Equations and the inverse Problem, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 15, pp.79-90(1985)

[21] M. Miyakosi and M. Shimbo: Sets of Solution-set-invariant Coefficient Matrices of Simple Fuzzy Relation Equations, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 21, pp.59-83(1987)

[22] 山田，本田：条件付き可能性分布を用いた異常診断手法，日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.3, pp.567-575（1996）

[23] 韓，関口，高橋：ファジィ関係逆問題における解の存在性判別，日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.5, pp.1142-1154（1993）

[24] 児玉，須田：システム制御のためのマトリクス理論，計測自動制御学会（1984）

連絡先：〒782　高知県土佐山田町宮ノ口185番地
高知工科大学知能機械システム工学科
王碩玉
TEL: 08875-7-2306 FAX: 08875-7-2320
Email: wang@mech.kochi-tech.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WED2-2

距離型ファジィ推論法 Part 7
——距離型ファジィ推論法の学習アルゴリズム——

A Distance -type Fuzzy Reasoning , Part 7,
——A New Learning Algorithm for Distance-type Fuzzy Reasoning Method——

王 碩玉
Shuoyu WANG
高知工科大学 工学部
Faculty of Engineering, Kochi University of Technology

土谷 武士
Takeshi TSUCHIYA
北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract: In This paper, a new learning algorithm is proposed on the basis of a distance -type fuzzy reasoning method. The effectiveness of the proposed learning algorithm is verified by simulation studies.

1．はじめに

我々人間の持っているあいまいな言語や知識や情報などに対しての表現及び理解能力は日常生活にとっては既になくてはならないものとなっているが，素晴しい学習能力を持っていればこそ，物質財富だけではなく精神財富も含めて継承でき，人類社会が少ない無駄で今日まで進歩してきたのである．ファジィプロダクションルールは明確な境界のない概念を表現するには非常に有効なアプローチであるが，ルール自身は学習機能を持っていない．著者らの提案している距離型ファジィ推論法は幾つかの優れた性質を持っているので，確かにファジィプロダクションルールで表現した知識の処理手法の一つとして考えられるが，より良く明確な境界のない概念が意味している高度な知識を処理するためには，学習機能を備えることが必要である．Part 7 の本論文では，如何に距離型ファジィ推論法に学習機能を付けるかについて論じる．もし，学習誤差で学習効果を計るとすれば，本論文で提案する学習アルゴリズムは，ゼロも含めた任意の指定された誤差内に学習効果を収めることができるという重要な特徴を持っている．

ところが，一言で学習といっても極めて広い概念であり，各分野では自分なりの解釈があり，また個人によっても学習に対しての認識も様々である[1]．ここでファジィプロダクションルールにより表わす知識集合を一つのシステムとみなして，そして新たな事実がシステムに入力されるときファジィ推論に基づいて新たな知識を生成する過程における学習に限定して議論していく．この場合，学習とは少なくとも次の三つの機能を備えることが必要であると考えている．すなわち，（1）環境からのデータより新しい知識を発見，理解そして正確に吸収する機能．（2）もし，既存の知識集合中にある部分集合が変化している環境に適用できなければ，古い知識とみなして速やかに更新する機能．（3）何らかの原因で間違った知識を認識し，直ちに修正する機能．最近ニューラルネットワークによるファジィルールのチューニングに関する研究が盛んに行われ，簡略型推論法[2]を利用するデルタルールの自動チューニング法[3]～[6]や，間接法に基づくファジィルールの同定法などが提案されている[7]．ニューラルネットワークとファジィルールを融合する形としては文献[8]にとりまとめられ詳しく解説されている．また，ニューラルネットワークの弱点を克服するために遺伝的アルゴリズムに基づいたルールの自動生成やチューニングに関する研究も行われている．[9][10][11]．さらにファジィ集合のメンバーシップ関数を表わすパラメータの調整と異なり，結合演算子のチューニング手法[12]やファジィ集合型教師データに対しての学習法[13]も提案されている．

著者らはMamdani型推論法[14]の問題点を改善した適合度型ファジィ推論法を提案した[16] [17]．さらに適合度型ファジィ推論法の固有な問題点を根本的に解決するために，従来のファジィ推論の仕組とは異なる出発点から議論することが必要[14]という立場に立って，ファジィ集合間の距離に基づいて距離型ファジィ推論法を提案している[18][19][20]．文献[18]は距離型ファジィ推論法の基本的なアルゴリズムを述べるものであり，文献[19],[20]はそれぞれ真理値を考慮した距離型ファジィ推論法と距離型多重多段ファジィ推論法につて論じている．文献[21]では距離型ファジィ推論の基本となる5種類の距離計算法を与えている．文献[22]では非凸な前件部を持つルールにもできることより計算量の低減の目的で，特性パラメータ空間における距離型ファジィ推論法のアルゴリズムを提案している．文献[23]これらの距離型ファジィ推論法の逆問題解法を与えている．しかし，エキスパートによるファジィプロダクションルールの作成をこれらの距離型ファジィ推論法の実際のシステムへの適用条件としている．本論文では，距離型ファジィ推論法を

議論対象として，知識集合における新たなファジィプロダクションルールの自動生成及び古いルールの自動更新学習アルゴリズムについて論じる．本学習アルゴリズムはニューラルネットワークやGAなどのアプローチとは異なり，距離型ファジィ推論法の特徴を適切に利用しているものである．結果的に学習誤差が任意に指定できるだけではなく，アルゴリズムが非常に簡単であるのでほとんど学習時間が要らなく極めて速いというメリットがある．

2．距離型ファジィ推論法

本章では距離型ファジィ推論の基本アルゴリズムを要約する．より詳細な説明は文献[18][19][20]を参考されたい．ここで図1に示すようなm入力1出力のファジィ推論ルールを検討対象とするが，多入力多出力の場合にも容易に拡張できる．

$$
\begin{array}{lllll}
R^1: & x_1=A^{11}, & x_2=A^{12}, \cdots, & x_m=A^{1m} & \Rightarrow y=B^1 \\
R^2: & x_1=A^{21}, & x_2=A^{22}, \cdots, & x_m=A^{2m} & \Rightarrow y=B^2 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^i: & x_1=A^{i1}, & x_2=A^{i2}, \cdots, & x_m=A^{im} & \Rightarrow y=B^i \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^n: & x_1=A^{n1}, & x_2=A^{n2}, \cdots, & x_m=A^{nm} & \Rightarrow y=B^n \\
\hline
 & x_1=A^1, & x_2=A^2, \cdots, & x_m=A^m & y=B
\end{array}
$$

図1　m入力nルールのファジィ推論

ただし，$i=1,2,\cdots,n$，$j=1,2,\cdots,m$．A^{ij}，B^i，A^j，Bはそれぞれ前件部，後件部，与えられた事実および推論結果を表わし，$A^{ij}, A^j \subset F(R_M)$，$B^i \subset \overline{F}(R_B)$とする．各ルール$R^1 \sim R^n$において，前件部が全く同一のルールは存在しないとする．すなわち，$\exists q_1, q_2 \in \{1,2,\cdots,n\}$に対して，$q_1 \neq q_2$ならば，不等式$\sum_{l=1}^{m} d(A^{q_1 l}, A^{q_2 l}) \neq 0$が成り立つとする．

距離型ファジィ推論法のアルゴリズムは次の三つのステップから構成する．

STEP1：まず文献[21]に述べた手法を用いて前件部A^{ij}と事実A^jとの距離$d_{ij}(A^{ij}, A^j)$を計算する．次に(1)式により$d_1 \sim d_n$を計算する．

$$d_i = \sum_{j=1}^{m} d_{ij}(A^{ij}, A^j) \tag{1}$$

STEP 2 ：次のように，推論結果Bのα−レベル集合を求める．

$$B_\alpha = [\, inf(B_\alpha), sup(B_\alpha) \,] \tag{2}$$

$$inf(B_\alpha) := \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[inf(B_\alpha^i) \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j \right]}{\sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j} \tag{3}$$

$$sup(B_\alpha) := \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[sup(B_\alpha^i) \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j \right]}{\sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j} \tag{4}$$

STEP 3 ：分解定理により，(5)式で推論結果Bを求める．

$$B = \cup \alpha \cdot B_\alpha \tag{5}$$

以上，距離型ファジィ推論法のアルゴリズムをまとめた．

3．距離型ファジィ推論の学習アルゴリズム

本章では距離型ファジィ推論法の持っている性質を適切に利用した学習アルゴリズムを提案する．

生体，医学，経済，社会などのような複雑システムの特性を表現するには数式一本ですべて表わそうとする従来の考え方では通用しない．何故かといえば，複雑なシステム特性を左右する要素が多すぎて，かつ各要素間には明確な境界がなく，また安定とは限らないからである．例えば，人間の健康管理の場合では，制御目標値は健康（または長生き）であり，制御入力は食事と運動と薬などになる．また，大学システムを考えると，目的は優秀な人材を育てることである．もし制御器を先生とすれば，制御入力は先生からの講義や研究に対しての指導などとなり，当然のことながら制御対象は学生である．時には学生の成長が先生の言行と人格にも大きく影響される場合もある．また企業の追求している利益のことを考えると，ネガティブなフィードバックによる一定値周りの安定性の追及よりも寧ろ不安定なポジティブなフィードバックシステムを追求している．これらのような複雑シス

テムにおいて，電流・電圧・位置・速度などのようなはっきりした物理量だけではそのシステム固有の本質的な特性を表現できないことが判る．従って複雑な状況に応じて適切な判断を行うという考え方が必要である．一つの有効なアプローチとしては，明確な境界のない概念を表現するファジィプロダクションルールを用いて複雑なシステムの特性を表わす知識集合に関する定式化を行う．そして環境からの入力に対して，適切な推論法に基づいて行うべき行動を判断する．

つづいて，以上の背景の下で学習の公理をまとめ，学習アルゴリズムについて説明する．

学習の公理：学習とは理想のルールを獲得する過程であり，その前提条件は次のような公理系としてまとめる．

(a) 先験的知識による作られたルールがすでに存在する．しかし，先験ルールの正確さに対しては特別な要求がない．
(b) 教師信号が与えられたファジィ集合とする．
(c) 教師信号の数が有限個とする．
(d) 教師信号が学習途中では変わっても結構である．
(e) 有限時間内に学習が完了できる．

以上の学習公理の下で，距離型ファジィ推論法の分離特性を基づく学習アルゴリズムは次の三つのステップから構成される．そのブロック線図は図２に示す．

STEP１：与えられた教師信号$\{A_t^j(k), B_t(k)\}$に対して，$A_t^j(k)$を事実として推論システムに入力して推論結果$B(k)$を求める．$j=1, 2, \cdots, m.\ k=1,2, \cdots, L.$

STEP２：教師信号$B_t(k)$と推論結果$B(k)$との距離$d(B_t(k), B(k))$を計算する．

STEP３：もし，$d(B_t(k), B(k)) \le \varepsilon$であれば，その他の教師信号に対してSTEP１に戻る．$\varepsilon\ (\ge 0)$は任意に指定された誤差である．

STEP４：もし，$d(B_t(k), B(k)) > \varepsilon$であれば，なおかつ$\exists q \in \{1, 2, \cdots, n\}$，等式$\sum_{j=1}^{m} d(A_t^j(k), A^{qj}) = 0$が成立すれば，$q$番目のルールの後件部を$B_t(k)$に更新してからSTEP１に戻る．

STEP５：$A_t^1(k), \cdots, A_t^m(k) \Rightarrow B_t(k)$を新しいルールとしてルール集合に追加してからSTEP１に戻る．

４．本アルゴリズムの特徴

本章では本学習アルゴリズムの特徴について述べる

定理１：L個の与えられた教師信号$\{A_t^j(k), B_t(k)\}$に対して，本学習アルゴリズムに基づいて有限時間内に新しいルールの追加，古いルールの構成，間違ったルールの訂正により，学習効果として式$d(B_t(k), B(k)) \le \varepsilon$を満たす．ただし，$\varepsilon\ (\ge 0)$は任意に指定された誤差であり，$B(k)$は$A_t^j(k)$を事実として推論システムに入力された時の推論結果を表わす．$d(B_t(k), B(k))$はファジィ集合$B_t(k)$と$B(k)$の距離を表わす．$j=1, 2, \cdots, m.\ k=1, 2, \cdots, L.$

定理２：図１に示すn個のルールにより推論された結果をB_nとして，もし学習アルゴリズムが実行される過程において，新しいルール$A^{(n+1)1}, \cdots, A^{(n+1)m} \Rightarrow B^{n+1}$が追加される場合，同一の事実に対しての推論結果$B_{n+1}$は新たに推論のSTEP1から求める必要がなく，(6)式のファジィ数の演算により簡単に求めることができる．

$$B_{n+1} = \frac{1}{1+W_{n+1}}(W_{n+1}B_n + B^{n+1}) \tag{6}$$

ただし，$q=1, 2, \cdots, n+1.$

$$W_{n+1} = \frac{1}{d_{n+1}} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i} \tag{7}$$

$$d_q = \sum_{j=1}^{m} d(A^j, A^{qj}) \tag{8}$$

５．例題

ここで二つの例題により本学習アルゴリズムの有効性を示す．集合型教師データよりシングルトン型教師データの方が分かりやすいということで，例題１では，(9)～(11)式で表わされる非線形レーザ光学モデルを教師データとする．例題２ではマウスを使ってディスプレに自由に入力したランダムなデータを教師信号とする．学習により得たルール型モデルにより計算された結果はそれぞれ図３と図４に細実線で示し，図３では誤差を0.1，図４では誤差を10.0に指定している．学習されたルール数はそれぞれ57個と203個である．また太実線で示されるのは教師信号である．

$$x(t+1) = 1 + 0.7\{x(t)\cos[z(t)] - y(t)\sin[z(t)]\} \tag{9}$$

$$y(t+1) = 0.7\{x(t)\cos[z(t)] + y(t)\sin[z(t)]\} \tag{10}$$

$$z(t) = 0.4 - \frac{6.0}{1 + x^2(t) + y^2(t)} \tag{11}$$

６．まとめ

本論文では学習誤差が任意に指定された誤差範囲内に収める学習アルゴリズムを提案し，シミュレーション結果によりその有効性を示した．

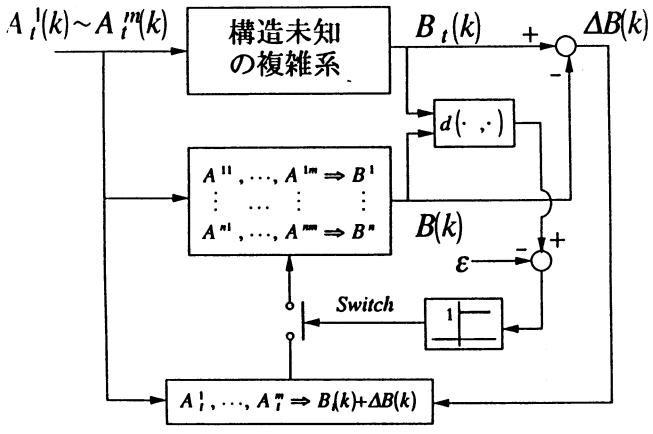


図. 2　学習アルゴリズムブロック線図

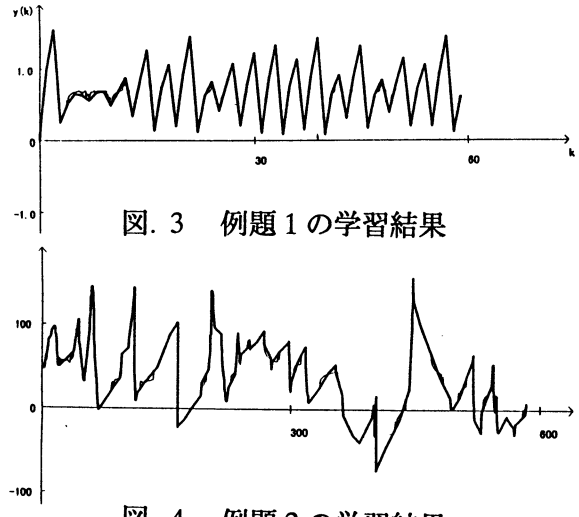


図. 3　例題1の学習結果

図. 4　例題2の学習結果

参　考　文　献

[1] 玉井（訳）：人と機械の知能，トッパン(1992)

[2] 前田，村上：自己調整ファジィコントローラ，計測自動制御学会論文集,Vol.24, No.2, pp.191-197(1988)

[3] 市橋，渡辺：簡略型ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御，日本ファジィ学会誌，Vol.2, No.3, pp.429-437（1990）

[4] H. Ichihashi: Iterative Fuzzy Modeling and a Hierarchical Network, Proc. of the 4th IFSA, Vol. Eng., pp.49-52(1991)

[5] 野村，林，若見：デルタルールによるファジィ推論の自動チューニング手法と障害物回避への応用，日本ファジィ学会誌，Vol.4, No.2, pp.379-388（1992）

[6] 石岩，水本，湯場崎，大谷：ニューロ・ファジィ学習アルゴリズムによるファジィ規則の一生成法，日本ファジィ学会誌，Vol.8, No.4, pp.695-705(1996)

[7] 堀川，古橋，内川：間接法に基づくファジィニューラルネットワークの提案，日本ファジィ学会誌，Vol.8, No.1, pp.174-196(1996)

[8] 林，古橋：ファジィ・ニューラルネットワーク，朝倉書店（1996）

[9] 古橋，中岡，前田，内川：局所改善型遺伝的アルゴリズムの提案とファジィルールの発見，日本ファジィ学会誌，Vol.7, No.5, pp.978-987（1995）

[10] 福田，長谷川，下島：遺伝的アルゴリズムを用いた階層型ファジィモデルの自動生成法，日本ファジィ学会誌，Vol.7, No.5, pp.988-996（1995）

[11] バスチアン アンドレアス，林：ファジィルールと遺伝的アルゴリズムを用いた知識ベースシステムの一提案，日本ファジィ学会誌，Vol.8, No.6, pp.1058-1065（1996）

[12] 三好，田野：結合演算子によるファジィプロダクションルールのチューニング手法，日本ファジィ学会誌，Vol.8, No.1, pp.123-135（1996）

[13] 尾山，田野：ファジィ集合からなる教師データを用いたファジィ推論のパラメータチューニング，日本ファジィ学会誌，Vol.8, No.2, pp.247-260(1996)

[14] E. H. Mamdani: Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588(1974)

[15] 中島：推論とファジィ推論の数理，日本ファジィ学会誌，Vol.6, No.6, pp.1105-1114（1994）

[16] 王，土谷：凸性・漸近性・分離性を持つ適合型ファジィ推論法の提案，第6回インテリジェントシステムシンポジウム 講演 論文集, pp.352-355(1996)

[17] 王，土谷：Mamdaniのファジィ推論を関数型ファジィ推論に統合した適合度型ファジィ推論法，第6回インテリジェントシステムシンポジウム 講演 論文集，pp.356-359(1996)

[18] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 1 -距離型ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集，pp.9-12(1996)

[19] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 2 -命題の真理値を考慮した距離型ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集pp.13-16(1996)

[20] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 3 -距離型多重多段ファジィ推論法の提案-，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.17-20(1996)

[21] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 4 -ファジィ集合間の計算法について-，第13回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集(1997)

[22] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 5 -パラメータ空間における距離型ファジィ推論法-，第14回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集(1997)

[23] 王，土谷：距離型ファジィ推論法Part 6 -距離型ファジィ推論法の逆問題解法-，第14回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集(1997)

連絡先：〒782　高知県土佐山田町宮ノ口185番地
高知工科大学知能機械システム工学科
王碩玉
TEL:　08875-7-2306
FAX:　08875-7-2320
Email:　wang@mech.kochi-tech.ac.jp

WED2-3

階層型因果ネットワークにおけるグレード制約の伝播
Propagation of Grade Constraints on Hierarchical Causal Network

山田耕一
Koichi Yamada

長岡技術科学大学　計画・経営系
Managemanet and Planning Science, Nagaoka University of Technology

Abstract: This paper describes a way of reasoning by propagating intensity constraints of events on a hierarchical causal network. The network has two types of nodes expressing causes and effects, and connects them by arcs giving their causality. Each node has a grade showing the intensity that takes a value in [0, 1]. Each arc has an parameter that gives the strength of the causal relationship. This paper discusses a way of reasoning on the network which propagates given constraints of some nodes to those of the others.

1．はじめに

事象生起の程度（グレード）を扱う階層型因果ネットワークとその因果ネットワークにおけるグレード制約の伝播法を提案する．本ネットワークは原因事象と結果事象を表す２種類のノードと，それらの間に張られ，因果関係を表すアークからなる．各ノードは事象生起のグレードを表す[0,1]間の数値を持ち，各アークは因果関係の強さを表すパラメータを持つ．

本稿ではこの階層型因果ネットワークを対象とし，任意に選択されたノードのグレード制約が区間グレードの形で与えられた時に，その制約を他ノードへ伝播する推論について議論し提案する．本ネットワークは文献[1]において提案される多値論理ネットワークを２段の階層型にし，真理値をグレードに置き換えたものと考えることができる．ただし，[1]が無矛盾に基づく弱い制約伝播を扱うのに対し，本稿では支持の概念に基づく強い制約伝播を扱う．

また，同様の階層型因果ネットワークを用いる推論としてファジィアブダクション[2,3]があるが，これは結果事象を表すノードのグレード（真理値）が与えられたときにそれらを支持する原因側ノードのグレードを求めるものである．本稿で扱う推論は与えられるデータが結果側のノードに限定されず，またグレードそのものでなく制約を表す区間グレードである点が異なる．

2．グレード制約の伝播

2.1　階層型因果ネットワーク

階層型因果ネットワークはX_i (i=1,...,N)とY_j(j=1,...,M)の２つのノード階層と，各階層間のノードを結ぶ一方向のアークからなる．X_i, Y_jは事象を表し，生起の程度を表す[0, 1]間の数値をグレードとして持つ．X_iとY_jを結ぶアークR_{ij}は因果関係を表し，その強さを表すパラメータr_{ij}を持つ．本稿ではネットワーク内の一部のノードのグレード制約として区間$\mathbf{x}_i = [x_i^S, x_i^L]$, $\mathbf{y}_j = [y_j^S, y_j^L]$が与えられた時に，これらを伝播することによってその他のノードのグレードの範囲を求める問題を扱う．

2.2　因果推論と因果逆推論

制約の伝播は因果推論に基づいて行う．多値論理に基づく因果推論[2,3]は，含意A→Bとその前件Aのグレードが与えられたとき，これらが最小限保証するBのグレードを求める演算として定義される．しかし本稿では因果推論を，因果関係A→BとAのグレードaが与えられたときに事象Bが生起する最小グレードと定義し，次の関数で与える．

$$b^* = c(r, a) \tag{1}$$

ただし，rは因果関係の強さを与えるパラメータで，$0 \le r$, $a, c(r,a) \le 1$，さらに$r = 0$ または$a = 0$のとき$c(r,a) = 0$である．またrおよびaを固定したときの$c(r, a)$をそれぞれ$c_r(a)$, $c_a(r)$とするとき，c_r, c_aは単調増加な連続関数である．必要であれば因果関係毎に異なる関数を与えてもよい．

また，観測結果に対する説明を得る因果逆推論を次式で与える．

$$a^* = d(r,b) \equiv \begin{cases} c_r^{-1}(b), & \text{if } b \in [0,\ c_r(1)], \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{2}$$

因果推論の定義から，a, b, rの値が与えられたとき，$b < c(r, a)$であればb (B)とa (A)は矛盾し，$b \ge c(r, a)$であれば無矛盾である．またb = c (r, a)のとき，b (B)はa (A)によって支持されるという．

2.3 制約伝播

2.3.1 順伝播

ノードX_iとY_jがアークR_{ij}で結合されているとき，X_iのグレード制約$\mathbf{x}_i = [x_i^S, x_i^L]$を$Y_j$に伝播することを順伝播と呼ぶ．ここでは$\mathbf{x}_i$に対して無矛盾な$Y_j$のグレードを制約与える弱順伝播と$\mathbf{x}_i$に支持されるグレード制約を与える強順伝播の２種類を定義する．

まず，$\mathbf{x}_i$ に対し無矛盾なY_jのグレード制約は次式で与える．

$$\mathbf{y}_{ij}^{NC} = \bigcup_{x \in [x_i^S, x_i^L]} [c(r_{ij}, x), 1] = [c(r_{ij}, x_i^S), 1] \tag{3}$$

Y_jの制約として$\mathbf{y}_{ij}^{NC}$を与えることを弱順伝播と呼び，$\mathbf{y}_{ij}^{NC}$を$X_i(\mathbf{x}_i)$による無矛盾制約と呼ぶ．Y_jに与えられたグレード制約$\mathbf{y}_j$が$\mathbf{y}_j \subseteq \mathbf{y}_{ij}^{NC}$であるとき，$Y_j(\mathbf{y}_j)$は$X_i(\mathbf{x}_i)$による無矛盾制約を満たす．

次に，$\mathbf{x}_i$が支持するY_jのグレード制約$\mathbf{y}_{ij}^{SP}$を次式で与える．

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{ij}^{SP} &= \{y \mid y = c(r_{ij}, x),\ x \in \mathbf{x}_i\} \\ &= [c(r_{ij}, x_i^S), c(r_{ij}, x_i^L)] \end{aligned} \tag{4}$$

Y_jの制約として$\mathbf{y}_{ij}^{SP}$を与えることを強順伝播と呼び，$\mathbf{y}_{ij}^{SP}$を$X_i(\mathbf{x}_i)$による被支持制約と呼ぶ．また，Y_jに与えられたグレード制約$\mathbf{y}_j$が$\mathbf{y}_j \subseteq \mathbf{y}_{ij}^{SP}$であるとき，$Y_j(\mathbf{y}_j)$は$X_i(\mathbf{x}_i)$による被支持制約を満たす．なお，被支持制約は無矛盾制約に含まれる．

2.3.2 逆伝播

X_iとY_jがアークR_{ij}で結合されているとき，Y_jの制約$\mathbf{y}_j$をX_iに伝播することを逆伝播と呼ぶ．$\mathbf{y}_j = [y_j^S, y_j^L]$に対し無矛盾な$X_i$のグレード制約$\mathbf{x}_{ij}^{NC}$は順伝播と同様に次のように与える．

$$\mathbf{x}_{ij}^{NC} = \bigcup_{y \in [y_j^S, y_j^L]} [0, d(r_{ij}, y)] = [0, d(r_{ij}, y_j^L)] \quad (5)$$

本稿ではこの逆伝播を弱逆伝播，$\mathbf{x}_{ij}^{NC}$を$Y_j(\mathbf{y}_j)$による無矛盾制約と呼ぶ．また，X_iに与えられたグレード制約$\mathbf{x}_i$が$\mathbf{x}_i \subseteq \mathbf{x}_{ij}^{NC}$であるとき$X_i(\mathbf{x}_i)$は$Y_j(\mathbf{y}_j)$による無矛盾制約を満たすという．

【命題2.1】

$\mathbf{x}_i$によるY_jの無矛盾制約$\mathbf{y}_{ij}^{NC}$を求めてこれをY_jのグレード制約$\mathbf{y}_j$とすると，X_iは$\mathbf{y}_j$による無矛盾制約を満たす．逆に，$\mathbf{y}_j$によるX_iの無矛盾制約$\mathbf{x}_{ij}^{NC}$を求めてこれをX_iのグレード制約$\mathbf{x}_i$とするとY_jは$\mathbf{x}_i$による無矛盾制約を満たす．■

しかし一方で，X_iとY_jにグレード制約$\mathbf{x}_i$, $\mathbf{y}_j$が与えられているとき，Y_jがX_iによる無矛盾制約を満たしてもX_iがY_jによる無矛盾制約を満たすとは限らず，その逆も同様である．

次にY_jの被支持制約として$\mathbf{y}_j=[y_j^S, y_j^L]$を与える$X_i$のグレード制約$\mathbf{x}_{ij}^{SP} = [x_{ij}^{SPS}, x_{ij}^{SPL}]$を求め，これを$Y_j(\mathbf{y}_j)$による$X_i$の支持制約と呼ぶ．$\mathbf{x}_{ij}^{SP}$が存在する必要十分条件は$c(r_{ij}, 1) \geq y_j^L$で与えられ，$\mathbf{x}_{ij}^{SP}$は次のように得られる．

$$\mathbf{x}_{ij}^{SP} = [d(r_{ij}, y_j^S), d(r_{ij}, y_j^L)] \quad (6)$$

本稿では(6)式によって$\mathbf{x}_{ij}^{SP}$のグレード制約を求めることを強逆伝播と呼ぶ．定義から$\mathbf{y}_j$を強逆伝播して得た$\mathbf{x}_{ij}^{SP}$を強順伝播して得るグレード制約は$\mathbf{y}_j$に等しい．したがってX_iの制約を$\mathbf{x}_{ij}^{SP}$とするときY_jはX_iによる被支持制約を満たす．また，X_iのグレード制約$\mathbf{x}_i$が$\mathbf{x}_i \subseteq \mathbf{x}_{ij}^{SP}$であるとき$X_i$は$Y_j$による支持制約を満たすという．

【命題2.2】

X_iのグレード制約$\mathbf{x}_i$を強順伝播して求めたY_jの被支持制約$\mathbf{y}_{ij}^{SP}$はX_iに強逆伝播可能である．また，このとき$\mathbf{y}_{ij}^{SP}$をY_jのグレード制約とすると，X_iはY_jによる支持制約を満たす．■

しかし無矛盾制約の場合と同様，X_iとY_jにグレード制約が与えられているとき，Y_jがX_iによる被支持制約を満たしてもX_iがY_jによる支持制約を満たすとは限らず，その逆も同様である．

3．無矛盾に基づく推論

ネットワーク内のすべてのノードに対して制約（[0,1]も含む）が与えられたときに，ノード間の無矛盾制約が互いにすべて満たされるグレード制約を求める問題を扱う．

まず，X_i, Y_jに与えられた制約をそれぞれ$\mathbf{x}_i^0=[x_i^{S0}, x_i^{L0}]$, $\mathbf{y}_i^0=[y_j^{S0}, y_j^{L0}]$とする．ただし，$Y_j$の最大グレード$y_j^{L0}$は$y_j^{L0} \leqq \vee_i c(r_{ij}, 1)$を満たすとする．これによりすべてのjについて少なくとも一つのiで支持制約を求めることができる．このとき，弱順伝播と弱逆伝播を繰り返し行い（どちらが先でもよい），k回目の弱順伝播で得られたY_jのグレード制約を$\mathbf{y}_j^k$, k回目の弱逆伝播で得られるX_iのグレード制約を$\mathbf{x}_i^k$とすると次式の成立が確かめられる．

$$\mathbf{x}_i^k = [x_i^{S0}, \wedge_j d(r_{ij}, y_j^{L0}) \wedge x_i^{L0}], \ k \geq 1 \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_j^k = [\vee_i c(r_{ij}, x_i^{S0}) \vee y_j^{S0}, y_j^{L0}], \ k \geq 1 \quad (8)$$

つまりすべてのi, jにおいて互いに無矛盾制約を満たすグレード制約が得られる．ただし次式を満たすことが条件である．

$$\forall(i,j), \ y_j^{L0} \geq c(r_{ij}, x_i^{S0}) \quad (9)$$

4．支持に基づく推論

一部のノード（決定ノード）のグレード制約を固定したとき因果関係による支持と被支持の制約を満たすように他のノード（未決定ノード）のグレード制約を求める方法を提案する．

4.1 ネットワーク上における強順伝播と強逆伝播

4.1.1 ネットワーク上における強順伝播

ネットワーク上のノードが互いに無矛盾であるためには，個々のノードが接続するすべての他ノードの無矛盾制約を満たせばよかった．しかし支持に基づく推論ではY_jが接続するすべてのX_iによって支持される必要はない．Y_jが少なくとも一つのX_iに支持され，他のX_iに対しては無矛盾であればよい．

因果推論は原因X_iによって引き起こされるY_jの最小グレードを与えるから，複数の原因X_iが生起する場合はiに関して最大値をとればよい．これをグレード制約の場合に拡張するとY_jのグレード制約$\mathbf{y}_j^{SP}=[y_j^{SPS}, y_j^{SPL}]$は次式で得られる．

$$\mathbf{y}_j^{SP} = [y_j^{SPS}, y_j^{SPL}] = [\vee_i c(r_{ij}, x_i^S), \ \vee_i c(r_{ij}, x_i^L)] \quad (10)$$

(4)式より$\mathbf{y}_j^{SP}$は少なくとも一つのX_iの被支持制約を満たすことがわかる．また複数のX_iに対するY_jの無矛盾制約を$\mathbf{y}_j^{NC}$とすると$\mathbf{y}_j^{SP} \subseteq \mathbf{y}_j^{NC}$を満たすことも明らか．さらに，$\mathbf{y}_j^{SP}$の下限をこれ以上小さくすると$\mathbf{y}_{ij}^{NC}$に含まれず，上限を大きくするとどの$X_i$による被支持制約も満たさなくなる．よってネットワーク上での強順伝播を(10)式で与え，これをすべてのX_iによる被支持制約とする．

なお$\mathbf{y}_j^{SP}$をY_jのグレード制約とし，各X_iに強逆伝播して得られるグレード制約を$\mathbf{x}_{ij}^{SP}$とすると，一般にこれは始めに与えられたX_iのグレード制約$\mathbf{x}_i$を含まない．しかし，すべてのX_iがY_jによる無矛盾制約を満たすことは，$\mathbf{y}_j^{SP}$を各X_iに弱逆伝播して得られる無矛盾制約の下限が0であること，また$\mathbf{y}_j^{SP}$の上限が各X_iのグレード制約の上限から求めた因果グレードの最大値であることから容易に示される．つまりY_jのグレード制約を被支持制約$\mathbf{y}_{ij}^{SP}$とするとY_jはすべてのX_iによる無矛盾制約を満たし，またすべてのX_iもY_jによる無矛盾制約を満たす．

4.1.2 ネットワーク上での強逆伝播

$\mathbf{y}_j = [y_j^S, y_j^L]$が与えられたときに(10)式を満たすグレード制約$\mathbf{x}_i = [x_i^S, x_i^L]$を求めると，すべてのiにおいて$x_i^S \leq d(r_{ij}, y_j^S)$と$x_i^L \leq d(r_{ij}, y_j^L)$を満たし，さらにそれぞれ少なくとも一つのiにおいて$x_i^S = d(r_{ij}, y_j^S)$, $x_i^L = d(r_{ij}, y_j^L)$でなくてはならない．この条件を満たす最も広いグレード区間$\mathbf{x}_i$は次のように得られる．

$$x_i = \begin{cases} [d(r_{ij}, y_j^S), d(r_{ij}, y_j^L)], & \text{for one "i"}, \quad (11a) \\ [0, d(r_{ij}, y_j^L)], & \text{for other "i"s.} \quad (11b) \end{cases}$$

ここで(11a)は(6)式の強逆伝播，(11b)は(5)式の弱逆伝播に等しい．ネットワーク上の強逆伝播はすべてのY_jから上式で得られる$\mathbf{x}_i$を伝播し各iにおいて共通部分を取ればよい．得られる結果はすべてのY_jによる支持制約である．ただしn個のY_jがそれぞれp個のX_iと接続されているとき，pn個の支持制約が存在することになる．

4.2 支持制約に基づく推論方法の検討

決定ノードのグレード制約を強伝播することによって未決定ノードの制約を求める方法を検討する．ただし，ここでは未決定ノードに初期値として[0,1]のグレード制約を与えて3章で述べた無矛盾に基づく推論を行った後のネットワークを対象とする．つまり，決定ノードも含めてすべてのノードは隣り合うノードと互いに無矛盾なグレード制約を初期値として持ち，決定ノードは(7),(8)式，未決定ノードは次式で与えられる制約を持つ．

$$\mathbf{x}_i = [0, \bigwedge_j d(r_{ij}, y_j^{L0})] \quad (12)$$

$$\mathbf{y}_j = [\bigvee_i c(r_{ij}, x_i^{S0}), \bigvee_i c(r_{ij}, 1)] \quad (13)$$

4.2.1 ネットワークの簡略化

ネットワーク上には支持制約に基づく推論に影響を与えないノードやアークが存在することがあり，それらはネットワークから削除する．削除の結果孤立するノードが生ずる場合，そのノードの最終的なグレード制約はその時点で得られているものとなる．

(1) ケース1

未決定ノードX_iとの接続のない決定ノードY_jがあるとき，このY_jは未決定ノードの制約決定に影響を与えないため削除する．

(2) ケース2

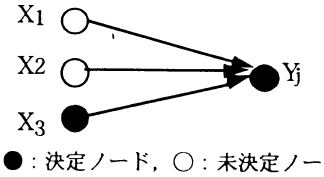
未決定ノードX_iとの接続を持つ決定ノードY_jにおいて（図1参照）伝播はY_jからX_iへと行われることになるが，初期条件から(11b)式の条件はすべてのiに対して満たされている．従ってもしあるiが(11a)式の条件を満たすなら，X_iはY_jからの制約をすべて満たしているためY_jは不要となり削除してよい．もしどのiも満たさないならY_jからX_1，あるいはX_2に強逆伝播する必要があるがこれは後述する．またこのときX_3とY_jのアークは不要となるので削除する（この時点で決定ノード間のアークは存在しなくなる）．

(3) ケース3

ノードX_i，Y_jの間にアークR_{ij}がありそれらが以下の条件を満たすことがある．

$$y_j^S > c(r_i, x_i^L) \quad (14)$$

これの条件が満たされるときX_iとY_jの間には支持関係が存在しえない．また無矛盾性は初期条件で保証されているためこのアークは不要となり削除できる．



●：決定ノード，○：未決定ノード

図1　ノードとアークの削除：ケース2

4.2.2 グレード制約の伝播

ネットワーク上でグレード制約の伝播を行う場合，伝播された制約と対象ノード自身が始めに持っていた制約の共通部分がそのノードの新たな制約となる．このときノード間の結合パターンによって，得られた制約を最終的な制約として確定できる場合とそうでない場合がある．本稿では前者を決定伝播，後者を非決定伝播と呼ぶ．また，非決定伝播には伝播方法が複数考えられる場合がありこれを特に組合せ非決定伝播と呼ぶ．なお，ここでは4.2.1の簡略化が行われた後のネットワークを対象とする．

(1) 決定伝播

決定伝播が可能な結合パターンは図2(a)と(b)に示す2つがある．

(a) 結合パターン1

図2(a)のように未決定ノードY_jが決定ノードであるX_iとのみ接続される場合，X_iのグレード制約を強順伝播することによってY_jのグレード制約を決定できる．この場合(10)式で与えられるY_jの被支持制約$\mathbf{y}_j^{SP}$を求め，Y_jが始めに持っていたグレード制約$\mathbf{y}_j$との積$\mathbf{y}_j \cap \mathbf{y}_j^{SP}$をとると，これが$Y_j$の最終的なグレード制約となる．決定後，$Y_j$は未決定ノード$X_i$との接続がないため削除される．

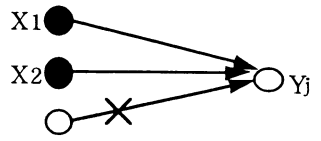
(b) 結合パターン2

図2(b)のように未決定ノードY_jとの接続がない未決定ノードX_iが，他ノードとの接続を持たない決定ノードY_jとのみ接続されている場合X_iのグレード制約を決定できる．これは事象Y_jを起こす原因としてX_iしかありえないためである．この場合はY_1とY_2から(11a)式で強逆伝播される支持制約とX_iが始めに持っていた制約の共通部分を最終的なグレード制約とすればよい．決定後Y_1とY_2は削除される（その結果X_iも孤立するため削除される）．なお，X_iが未決定ノードY_jと結合を持つ場合は得られたグレード制約を最終的な制約とすることはできないためここでは伝播しない．

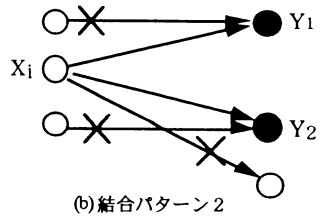
以上の処理を終えるとネットワークには決定ノード同士の結合も図2の(a)，(b)のパターンも存在しない．ノードY_jに注目すると，残されたネットワークは図3に示す3つの結合パターンの組み合わせによって表現可能となる．

(2) 組合せ非決定伝播

図3(a)のように決定ノードY_jが未決定ノードX_iと結合されている場合，ある一つのX_iがY_jによる支持制約を満たし，他のX_iは無矛盾盾制約を満たせばよい．初期条件および4.2.1の処理結果からすべてのX_iはY_jによる無矛盾制約



(a) 結合パターン1



(b)結合パターン2

×は存在してはならないアークを示す．

図2　決定伝播可能なパターン

を満たすが支持制約は満たさない．そこでX_iのどれか一つを選択してY_jから(11a)式による強逆伝播を行い，得られた支持制約とX_iが始めに持つ制約の共通部分を新たな制約とする．この後決定ノードY_jはこれ以上必要ないため削除する．なお，この削除によって孤立ノードとならないX_iは他のノード$Y_{j'}$から制約を伝播される可能性があるため未決定ノードのままである．また，この処理は組合せ問題となるためこの時点で何通りかのネットワークが得られる．

(3) 非決定伝播

組合せ非決定伝播後のネットワークではY_jはすべて未決定ノードとなり，図3(b), (c)の結合パターンの組み合わせで表現される．この時点で，決定ノードX_iおよび未決定ノードY_jは始めに与えられた制約をそのまま保持しており，未決定ノードX_iの制約は上限は初期制約の上限と等しく，下限は初期制約の下限より大きいか等しいことに注意されたい．なぜなら，決定伝播により新たに決定ノードとなったものはすべて削除されており，未決定ノードとして残されているノードへの伝播は(11a)による強逆伝播のみだからである．つまり決定ノードX_iの制約は(7)式，未決定ノードY_jの制約は(13)式，未決定ノードX_iの制約は次式で与えられる．

$$x_i = [a, \bigwedge_j d(r_{ij}, y_j^{L0})] \qquad (15)$$

ただし，aは0，またはX_iに接続されていた決定ノードY_jから(11a)式によって強逆伝播して得た制約の下限である．

ここで，結合パターン4，5においてX_iの制約を(10)式によってY_jに強順伝播してみよう．すると伝播された制約は(13)式で与えられるY_jの現在の制約に必ず含まれることが容易に示される．これは現時点でX_iに与えられているグレード制約がY_jに与えられている制約より厳しく，Y_jのグレード制約がX_i対する新たな制約となりえないことを示している．したがって，結合パターン4，5ではX_iの制約を(10)式によってY_jに強順伝播したものをY_jの新たな制約とする．このときY_jがすべてのX_iの無矛盾制約を満たし，少なくとも一つの支持制約を満たすのは明らかである．

4.3 多値論理ネットワークにおける推論

2段の階層型多値論理ネットワークにおけるグレード制約の伝播による推論アルゴリズムをまとめる．

i) ネットワーク上の一部のノードにグレード制約を与え，決定ノードとする．他のノードの制約は[0,1]とする．

ii) 無矛盾に基づく弱伝播を行うことにより，すべてのノードに与えられたグレード制約からそのノードのグレードとなりえない範囲を除く（決定ノードの制約も更新される）．

iii) ネットワークの簡略化を行い，推論に不要なノードとアークを削除する．

iv) 決定伝播によってグレード制約を決定できる未決定ノードに強伝播を行う．不要となったノードは削除する．

v) 組み合わせ非決定伝播を行い，不要なノードを削除する．この伝播において一般にグレード制約の異なる複数のネットワークが生成されるが，それらすべてについて次の処理を行う．

vi) 残されたノードを用いて非決定伝播を行い，得られたグレード制約を最終結果とする．

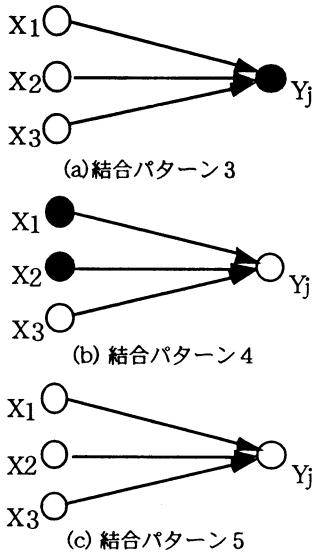


図3　非決定伝播パターン

5．おわりに

階層型因果ネットワークにおけるグレード制約の伝播方法を提案した．事象間の因果関係は我々が日常的に行う推論で用いられる最も基本的な知識であるが，事象生起に関わる推論には不確実さと程度（強弱）の問題が常につきまとう．そのうち不確実さについては確率や可能性などを用いた研究が数多くある．しかし事象生起の程度を因果関係知識と共に扱う研究は，定性推論やファジィ推論があるものの，十分に行われているとはいいがたい．

また，因果関係を用いた推論には原因から結果を導く演繹推論と結果から原因を推測する発想的推論がありえるが，我々人間は明らかになった一部の原因と観測された一部の結果を用いて，演繹的推論と発想的推論を繰り返し適用し，未知の原因や結果を推論する．このように演繹と発想を融合して行う推論の研究も確率ネットワークを除くと見あたらない．

本稿では，因果関係を用いて行う推論において従来注目されることの少なかった事象生起の程度問題を扱い，さらに演繹推論と発想的推論の融合を因果推論に基づく順伝播と因果逆推論に基づく逆伝播という形で統合的に扱った．本稿で提案する推論法はこのように複雑な推論を必要とする現実世界の問題に対し新たな可能性を提供し，その応用範囲も広いと考えられる．

参考文献

[1] 山田耕一：多値論理に基づく因果ネットワークモデルにおける真理値制約の伝播，日本ファジィ学会誌，Vol.9, No.1,pp.89-98 (1997)

[2] 山田，向殿：ルカシュビッツの無限値論理をベースにしたファジィアブダクションについて，日本ファジィ学会誌，Vol. 7, No.1, pp.103-112 (1995)

[3] 山田耕一：ファジィアブダクションを用いた異常診断，計測自動制御学会論文誌，Vol.31, No.10, pp.1746-1753 (1995)

【問い合わせ先】
山田耕一　長岡技術科学大学　計画・経営系
〒９４０－２１　長岡市上富岡町１６０３－１
email:yamada@pms.nagaokaut.ac.jp

WED3-1

ファジィ推論規則の線形補間に関する一考察
A Consideration on Linear Interpolation in Fuzzy Reasoning Rules

河口万由香　　宮腰政明
Mayuka F. Kawaguchi　　Masaaki Miyakosi

北海道大学大学院工学研究科　システム情報工学専攻
Division of Systems and Information Engineering, Hokkaido University

Abstract　Two approaches to cope with the gaps in a sparse fuzzy rule base are discussed. One is rule interpolation technique represented by Kóczy's linear rule interpolation. The authors propose another natural method of rule interpolation using the Cartesian products of the α-level sets of given rules. The other approach is a technique to cover the gap with adequate fuzzy rules. We propose also a method to generate several triangular fuzzy rules required to support input date when the rule base is given as a set of triangular fuzzy rules.

1. はじめに

Kóczy & Hirota [2], [3] によって提案された線形補間型推論法は，推論ルールベースが疎であるときに簡便な計算によって妥当な推論結果を与え得る手法として注目されている。しかし，Kóczy & Kovác [4] や石・水本 [6] によって指摘されているように，線形補間型推論法はファジィ集合の範疇を逸脱するようなメンバシップ関数を与える場合がある。

本報告では，Dubois et al. [1] が提案した線形補間関数の考え方を用いて線形補間型推論の新たなアプローチを提案する。さらに，線形補間型推論の原理に基づいて，必要最小限の個数の推論規則を生成し，常に正規なファジィ集合として推論結果を与える補間推論の方法を提案する。

2. 疎なファジィルールベース

本報告では "If x is A_i then y is B_i" という形式の r 個のルールからなるルールベース $R=\{R_1,R_2,\ldots,R_r\}$，$R_i=(A_i\rightarrow B_i)$ $(i=1,\ldots,r)$ が疎である場合を取り扱う。ここで A_i と B_i はそれぞれ全体集合 X と Y のファジィ集合で表される概念であり，ルールベース R が疎であるとは

$$X-\bigcup_{i=1}^{r}\mathrm{supp}(A_i)\neq\varnothing \tag{1}$$

となるような場合を指す。このときファジィルール R_i は $X\times Y$ 上のファジィ関係となる。

以下，簡単のため，全体集合 X と Y は実数の集合 $\mathbf{R}$，A_i と B_i はファジィ区間として取り扱う。ファジィ区間とは実数軸 $\mathbf{R}$ 上の正規・凸・上半連続・有界ファジィ集合を指す。ファジィ区間 M の α-レベル集合 M_α はメンバシップ関数 $\mu_M(x)$ と任意の $\alpha\in[0,1]$ に対して以下のように定義される。

$$M_\alpha\equiv\begin{cases}\{x|\mu_M(x)\geq\alpha\} & (\alpha\in(0,1])\\ \mathrm{cl}\{x|\mu_M(x)>\alpha\} & (\alpha=0)\end{cases} \tag{2}$$

3. 線形補間型推論法

疎なルールベース R のギャップ内に事実 A が観測された場合に妥当な推論結果を与える代表的な方法として Kóczy の線形補間型推論法[2], [3]（以下，Kóczy の補間法と呼ぶ）がある。ここでは，線形補間型推論に関するもう一つのアプローチを提案し，両者を比較する。

線形補間型推論法では，実数軸上で隣り合い，かつ台の共通部分が存在しない二つのルールの間に事実 A が観測された場合にこの二つのルールのみから推論結果 B が求められる。従ってここでは次に示すような２つのルールからなるデータベースモデルを考察する。

ルール 1：　$A_1\rightarrow B_1$
ルール 2：　$A_2\rightarrow B_2$
観測事実：　A

推論結果：　B

Kóczy の補間法（図１）では，推論結果 B の α-レベル集合は以下のように得られる。

$$\begin{cases}b_\alpha^L=b_{1\alpha}^L+\dfrac{a_\alpha^L-a_{1\alpha}^L}{a_{2\alpha}^L-a_{1\alpha}^L}\left(b_{2\alpha}^L-b_{1\alpha}^L\right)\\ b_\alpha^R=b_{1\alpha}^R+\dfrac{a_\alpha^R-a_{1\alpha}^R}{a_{2\alpha}^R-a_{1\alpha}^R}\left(b_{2\alpha}^R-b_{1\alpha}^R\right)\end{cases} \tag{3}$$

ただし，A_1, A_2, B_1, B_2, A, B の α-レベル集合は

$$A_{i\alpha}=\left[a_{i\alpha}^L, a_{i\alpha}^R\right], \quad B_{i\alpha}=\left[b_{i\alpha}^L, b_{i\alpha}^R\right] \quad (i=1,2),$$

$$A_\alpha=\left[a_\alpha^L, a_\alpha^R\right], \quad B_\alpha=\left[b_\alpha^L, b_\alpha^R\right], \quad \alpha\in[0,1]$$

と表すものとする。

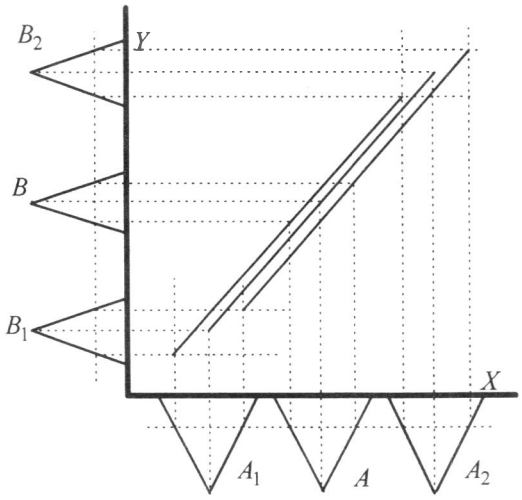


図１．　Kóczy の線形補間型推論法

これに対して Dubois ら[1]はルール 1 とルール 2 の α-レベル集合の直積 $A_{1\alpha}\times B_{1\alpha}$ と $A_{2\alpha}\times B_{2\alpha}$ を考え，それらの凸包 S_α（すなわち $A_{1\alpha}\times B_{1\alpha}$ と $A_{2\alpha}\times B_{2\alpha}$ を含む最小の閉凸集合）を導入して，$S=\bigcup_{\alpha\in[0,1]}\alpha S_\alpha$ をルール 1 とルール 2 を結ぶファジィな線形関数と定義した（図２）。

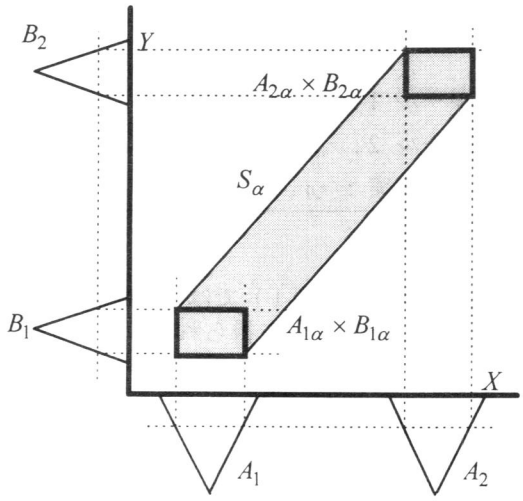


図２．　ルール 1 とルール 2 の凸包 S_α

この方法の延長として，観測された事実 A に対して $A_\alpha\times B_\alpha\subseteq S_\alpha$ を満足する最大の B_α を求めてこれを推論結果とする方法が考えられる（図３）。このとき次の式が得られる。

$$\begin{cases} b_\alpha^L = b_{1\alpha}^L + \dfrac{a_\alpha^R - a_{1\alpha}^R}{a_{2\alpha}^R - a_{1\alpha}^R}\left(b_{2\alpha}^L - b_{1\alpha}^L\right) \\ b_\alpha^R = b_{1\alpha}^R + \dfrac{a_\alpha^L - a_{1\alpha}^L}{a_{2\alpha}^L - a_{1\alpha}^L}\left(b_{2\alpha}^R - b_{1\alpha}^R\right). \end{cases} \tag{4}$$

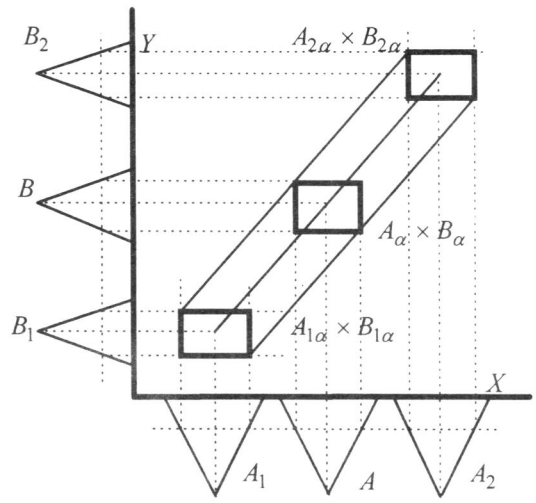


図３．　凸包を用いた線形補間型推論法

式(3)と式(4)を比較すると明らかなように，両式は $a_\bullet^L$ と $a_\bullet^R$ が入れ替わっているだけであり，今回提案する式(4)の方法も線形補間型推論法の一種と解釈する事ができる。

Kóczy の補間法(3)と凸包を用いた補間法(4)において，$\alpha'\geq\alpha''$ なる任意の $\alpha', \alpha''\in[0,1]$ に対して $B_{\alpha'}\subseteq B_{\alpha''}$ となるならば，$B=\bigcup_{\alpha\in[0,1]}\alpha B_\alpha$ はファジィ区間である。ところが Kóczy et al. [4] や石ら [6] が指摘しているように，Kóczy の補間法では $B_{\alpha'}\subseteq B_{\alpha''}$ $(\alpha'\geq\alpha'')$ が常に成り立つとは限らない。すなわち，B は常にファジィ集合となるとは限らない。また，提案手法においても同様の現象が起こり得ることが予想される。

4.　三角形ファジィルールによる補間

前節で述べた線形補間の原理を用いて，常に推論結果 B が正規なファジィ集合として得られる方法

を提案する。

まず，石ら[6]の方法に従って，A_i, B_i $(i=1,2)$ が三角形ファジィ区間である場合に事実 A と推論結果 B がともに三角形ファジィ区間となる条件を示す。簡単のため，三角形ファジィ区間 A を平均値 a，左右の端点 a^L, a^R の三点を用いて $A=\left(a, a^L, a^R\right)$ と表すものとする（図４）。

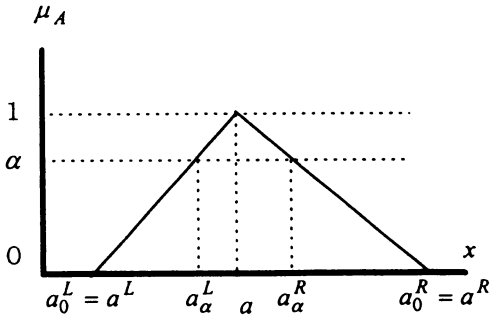


図４．　三角形ファジィ区間 $A=\left(a, a^L, a^R\right)$

このとき Kóczy の推論法および提案手法のいずれにおいても，以下の式が成り立つならば，A と B はともに三角形ファジィ区間となる。

$$a^L = a_1^L + \frac{a-a_1}{a_2-a_1}\left(a_2^L - a_1^L\right) \tag{5}$$

$$a^R = a_1^R + \frac{a-a_1}{a_2-a_1}\left(a_2^R - a_1^R\right) \tag{6}$$

$$b = b_1 + \frac{a-a_1}{a_2-a_1}\left(b_2 - b_1\right) \tag{7}$$

$$b^L = b_1^L + \frac{a-a_1}{a_2-a_1}\left(b_2^L - b_1^L\right) \tag{8}$$

$$b^R = b_1^R + \frac{a-a_1}{a_2-a_1}\left(b_2^R - b_1^R\right) \tag{9}$$

式(5)～(9)を用いると，a を平均とする三角形ファジィ区間 $A=\left(a, a^L, a^R\right)$ と，線形補間の意味で A に対応する $B=\left(b, b^L, b^R\right)$ の組が一意に定まる。言い換えると X の部分区間 $[a_1, a_2]$ 内の任意の点 a が与えられると，線形補間法の原理に基づいて新しいルール $A \rightarrow B$ を生成し，ルールベースのギャップに挿入することができる。また，a^L（あるいは a^R）が与えられた場合にも式(5)（あるいは式(6)）を解いて a を求め，A と B を定めることができる。

ここでルール１ $A_1 \rightarrow B_1$ とルール２ $A_2 \rightarrow B_2$ および観測事実 A が与えられたと仮定して，二つのルールから線形補間によって新たなルール $\tilde{A}_{\pm i} \rightarrow \tilde{B}_{\pm i}$ $(i=0,1,2,\ldots)$ を生成し，A の台を包含するファジィパーティション[1] を構成する手順を示す。以下，図４と同様に $\tilde{A}_i=\left(\tilde{a}_i, \tilde{a}_i^L, \tilde{a}_i^R\right)$ と表す。

$\tilde{a}_0 = a$ として式(5)～(9)を用いて $\tilde{a}_0^L, \tilde{a}_0^R, \tilde{b}_0, \tilde{b}_0^L, \tilde{b}_0^R$ を求める（ルール $\tilde{A}_0 \rightarrow \tilde{B}_0$ の生成）。次に $\tilde{a}_1^L = a$ として $\tilde{a}_1, \tilde{a}_1^R, \tilde{b}_1, \tilde{b}_1^L, \tilde{b}_1^R$ を求める（ルール $\tilde{A}_1 \rightarrow \tilde{B}_1$ の生成）。$\tilde{a}_i^L = \tilde{a}_{i-2}^R$ とおいて $\tilde{a}_i, \tilde{a}_i^R, \tilde{b}_i, \tilde{b}_i^L, \tilde{b}_i^R$ を求める（ルール $\tilde{A}_i \rightarrow \tilde{B}_i$ の生成）ことを $a^R \le \tilde{a}_{i-1}^R$ となるまで繰り返す。次に $\tilde{a}_{-1}^R = a$ として $\tilde{a}_{-1}, \tilde{a}_{-1}^L, \tilde{b}_{-1}, \tilde{b}_{-1}^L, \tilde{b}_{-1}^R$ を求める（ルール $\tilde{A}_{-1} \rightarrow \tilde{B}_{-1}$ の生成）。$\tilde{a}_{-i}^R = \tilde{a}_{-i+2}^L$ とおいて $\tilde{a}_{-i}, \tilde{a}_{-i}^L, \tilde{b}_{-i}, \tilde{b}_{-i}^L, \tilde{b}_{-i}^R$ を求める（ルール $\tilde{A}_{-i} \rightarrow \tilde{B}_{-i}$ の生成）ことを $\tilde{a}_{-i+1}^L \le a^L$ となるまで繰り返す。

このように生成されたルールの集合 $\left\{A_i \rightarrow B_i\right\}$ を用いて，事実 A に対する通常のファジィ推論を行なうことで常に正規な推論結果が得られる。図５および図６に示す例では，線形補間により５個のルール $\left\{A_i \rightarrow B_i \middle| i=0,\pm1,\pm2\right\}$ が生成されており，Mamdani の推論法（頭切り法[5]）によって推論結果 B は正規ファジィ集合として得られている。図５において B は正規・上半連続・有界であるが，凸ではないのでファジィ区間とはいえない。

5. むすび

本報告では二つのファジィルールの凸包を用いた線形補間型推論の新手法を提案した。さらに線形補間型推論の原理に基づき，三角形のファジィルールと入力が与えられたとき，観測事実の台を覆う最小数の三角形ファジィルールを生成し，妥当な推論結果を導く方法を提案した。本手法においては，入力に対して直接補間推論を行う場合に，出力が奇妙な様相を呈することなく，常に正規ファジィ集合となる。さらに，数少ないルールで広い入力空間をカバーすることによってメモリ容量を節約できるという補間型推論の利点も踏襲されている。

今後の課題としては，線型補間型推論を非線形型に拡張し，精度の向上をはかることが挙げられる。

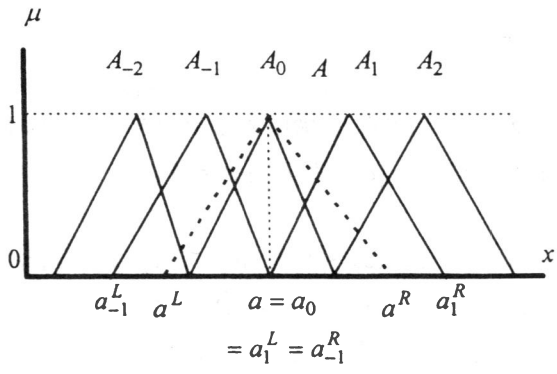


図５．　Aに対するファジィパーティション
$\{A_{-2}, A_{-1}, A_0, A_1, A_2\}$

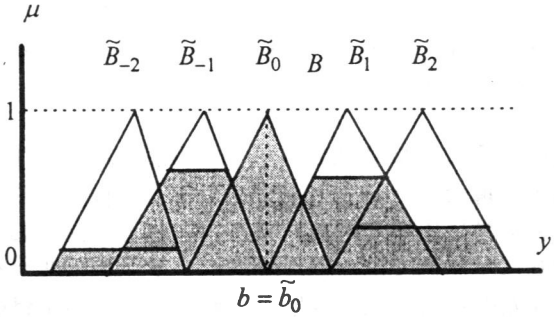


図６．　推論結果 B

参考文献

[1] D.Dubois, H.Prade & M.Grabisch: Gradual rules and the approximation of control laws, in H.T.Nguyen et al. (eds.), *Theoretical Aspects of Fuzzy Control*. John Wiley & Sons, 147-181, 1995.

[2] L.T.Kóczy & K.Hirota: Interpolative reasoning with insufficient evidence in sparse fuzzy rule bases, *Information Sciences*, **71**, 169-201, 1993.

[3] L.T.Kóczy & K.Hirota: Approximate reasoning by linear rule interpolation and general approximation, *Int. J. Approximate Reasoning*, **9**, 197-225, 1993.

[4] L.T.Kóczy & S.Kovács: Linearity and the cnf property in linear fuzzy rule interpolation, *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, Orlando, 870-875, 1994.

[5] 水本雅晴：ファジィ推論(1), (2)，日本ファジィ学会誌，**4**, 256-264, 433-444, 1992.

[6] 石岩，水本雅晴：Kóczy の線形補間型推論法に関する２，３の考察，日本ファジィ学会誌，**8**, 147-157, 1996.

[問い合わせ先]
〒060　札幌市北区北13条西８丁目
北海道大学大学院工学研究科
システム情報工学専攻
河口 万由香
TEL.: 011-706-6805　FAX.: 011-706-7830
E-mail: mayuka@huie.hokudai.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WED3-2

凸性・漸近性・分離性を持つ適合度型ファジィ推論法の提案

A Proposal of Compatibility--type Reasoning Method Having Convexness, Asymptoticness, and Modus Ponens

○王 碩玉（高知工科大学）　　土谷 武士（北海道大学）

Shuoyu WANG, Faculty of Engineering, Kochi University of Technology

Takeshi TSUCHIYA, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract: In actual systems, it is very important that fuzzy reasoning has convexness, asymptoticness, and modus ponens in order to make fully use of features of FR; and therefore, this paper proposes a new compatibility degree-type reasoning method having this three important characteristics.

1．はじめに

本論文では，新しい適合度型ファジィ推論法を提案する．本推論法は次の主な特徴がある．(1)推論ルールの後件部が凸なファジィ集合であれば推論される結果も凸なファジィ集合になる．(2)与えられた事実があるルールの前件部に近づくほど，推論される結果がそのルールの後件部に近づくことになる．つまり漸近性を満たしている．(3)分離規則を満たしている．

ここでは与えられた事実とルールの前件部との共通集合を表わすメンバーシップ関数の最大値に基づくファジィ推論法を適合度型ファジィ推論法と呼ぶことにする．したがって適合度型ファジィ推論法と呼ばれるものは直接法中の一種類であると考えられる[1][2][3]．直接法に対して真理値空間を利用した間接法[4][5]があり，両者の関係についても論じられている[6][7][8]．また，ファジィ推論の満たすべき基本的基準とする７つの項目は文献[9]によって与えられている．開発されるファジィ推論法はこれらの項目をすべて満たすのが理想的であるが，実際の応用の立場から考えると，ファジィ推論法はその特徴をよく生かすために，少なくとも分離性，漸近性，凸性という三つの重要な性質を整備する必要がある．しかし，Mamdaniのファジィ推論法[10]を代表とする従来の適合度型ファジィ推論法は多重並列ファジィルールに適用する場合，この三つの性質を一つも持っていない．これに対して，文献[11]が拡張原理[12]を利用して凸性を満たすファジィ推論法を提案している．本論文では，合成定理[13]を適切に利用することにより，分離性・漸近性・凸性を持つ適合度型ファジィ推論法を提案する．また，この三つの性質を持つ新しい関数型推論法及び簡略化型推論法についても議論する．

最近，著者らはファジィ集合間の距離という概念に基づいて，距離型ファジィ推論法[14]，真理値を考慮した距離型ファジィ推論法[15]及び距離型多重多段ファジィ推論法[16]を提案している．この三つの推論法も全て分離性・漸近性・凸性を満たしているが，本論文は適合度を基本的出発点としているので，文献[14]~[16]と異なるものである．

2．新しい適合度型ファジィ推論法

本章では，まず分離性・漸近性・凸性を満たした適合度型ファジィ推論法を提案する．それから計算量を減らすことと，疎なルールの場合にも適用できるという二つの目的を達成するために，提案した推論法を更に改善する．

実数全体の集合をRで表わす．Rを全体集合とし，Rにおけるファジィ集合の全体は$F(R)$で表わす．いま，図１に示すn個の推論ルールを検討対象とし，事実が与えられるとき，結果を推論することを考える．ただし，$i=1,2,\cdots,n$，$j=1,2,\cdots,m$．$A^{ij}\subset F(R_{Aj})$，$B^i\subset F(R_B)$，$A^j\subset F(R_{Aj})$，Bはそれぞれ前件部，後件部，事実，推論結果であり，それらのメンバーシップ関数は$\mu_{Aij}(x_j)$，$\mu_{Bi}(y)$，$\mu_{Aj}(x_j)$，$\mu_B(y)$で表す．

$$
\begin{array}{lllll}
R^1: & x_1=A^{11}, & x_2=A^{12}, \cdots, & x_m=A^{1m} & \Rightarrow y=B^1 \\
R^2: & x_1=A^{21}, & x_2=A^{22}, \cdots, & x_m=A^{2m} & \Rightarrow y=B^2 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^i: & x_1=A^{i1}, & x_2=A^{i2}, \cdots, & x_m=A^{im} & \Rightarrow y=B^i \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^n: & x_1=A^{n1}, & x_2=A^{n2}, \cdots, & x_m=A^{nm} & \Rightarrow y=B^n \\
 & x_1=A^1, & x_2=A^2, \cdots, & x_m=A^m & \\
\hline
 & & & & y=B
\end{array}
$$

図１　m入力nルールのファジィ推論

推論条件としては次の三つがある．

(a) 前件部と事実は正規なファジィ集合である．

(b) 後件部は有界，正規，凸なファジィ集合である．

(c) ルールR^1~R^nにおいて，前件部が全く同一のルールは存在しない．

以上の三つの条件が成り立てば推論結果Bを求めるアルゴリズムは次の四つのステップから構成する．

STEP1：各ルールの前件部に対して事実の適合度を計算する．ただし，$i=1,2,\cdots,n$，$j=1,2,\cdots,m$．

$$h_{ij}=\bigvee\left[\mu_A(x^j)\wedge\mu_{Aij}(x^j)\right] \tag{1}$$

STEP 2：新たな変数h_iを計算する．

$$h_i = 1 - \prod_{j=1}^{m} h_{ij} \tag{2}$$

STEP 3：$\forall\alpha\in[0,\ 1]$に対して推論結果Bのα－レベル集合B_αを求める．

$$B_\alpha = [infB_\alpha,\ supB_\alpha] \tag{3}$$

ただし，

$$infB_\alpha := \frac{\sum_{p=1}^{n} infB_\alpha^p \cdot \prod_{q=1,\,q\neq p}^{n} h_q}{\sum_{p=1}^{n} \prod_{q=1,\,q\neq p}^{n} h_q} \tag{4}$$

$$supB_\alpha := \frac{\sum_{p=1}^{n} supB_\alpha^p \cdot \prod_{q=1,\,q\neq p}^{n} h_q}{\sum_{p=1}^{n} \prod_{q=1,\,q\neq p}^{n} h_q} \tag{5}$$

STEP 4：合成定理（分解定理とも呼ばれる）により推論結果Bを求める．

$$B = \cup\alpha \cdot B_\alpha \tag{6}$$

以上本推論法の基本を述べた．つづいて，計算量を低減する目的から，更に次のように改善する．ここでやはり図1に示した推論ルールを検討対象とし，上に仮定した推論条件が成り立つとする．

STEP1：各ルールの前件部に対して事実の適合度を計算する．ただし，$i = 1, 2, \cdots, n,\ j = 1, 2, \cdots, m$.

$$h_{ij} = \bigvee\left[\mu_A(x^j) \wedge \mu_{Ai}(x^j)\right] \tag{7}$$

STEP 2：新たな変数h_iを計算する．

$$h_i = m - \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \tag{8}$$

STEP 3：$\forall\alpha\in[0,\ 1]$に対して推論結果Bのα－レベル集合B_αを求める．

$$B_\alpha = [infB_\alpha,\ supB_\alpha] \tag{9}$$

ただし，

$$infB_\alpha := \frac{\sum_{p=1}^{n} infB_\alpha^p \cdot \prod_{q=1,\,q\neq p}^{n} h_q}{\sum_{p=1}^{n} \prod_{q=1,\,q\neq p}^{n} h_q} \tag{10}$$

$$supB_\alpha := \frac{\sum_{p=1}^{n} supB_\alpha^p \cdot \prod_{q=1,\,q\neq p}^{n} h_q}{\sum_{p=1}^{n} \prod_{q=1,\,q\neq p}^{n} h_q} \tag{11}$$

STEP 4：合成定理により推論結果Bを求める．

$$B = \cup\alpha \cdot B_\alpha \tag{12}$$

通常計算機で一回の掛け算を実行するのにかかる時間は一回の足し算に必要な時間の数十倍である．(2)式と(8)式を比較すれば，掛け算を足し算に変えたことにより，計算時間が相当減らされたことが分かる．勿論，足し算を使うということで，(1)～(6)式では推論ができない場合[17][18]でも，(7)～(12)式を使えば適切な推論結果が得られる．

3．本ファジィ推論法の特徴

本章では，3章で提案した適合度型ファジィ推論法の特徴について説明する．以下では，定理の形で凸性・分離性・漸近性を含めた六つの特徴を述べるが，その証明は省略する．また，簡単のためファジィ集合B^iのα－レベル集合B_α^iの上限$sup(B_\alpha^i)$と下限$inf(B_\alpha^i)$はそれぞれ$\overline{B_\alpha^i}$と$\underline{B_\alpha^i}$で表わす．$\overline{F}(R)$は台集合Rにおける有界なファジィ集合の全体を表わす．$\overline{F_n}(R)$は$\overline{F}(R)$中の正規なファジィ集合の全体を表わす．

定理1：(1)～(6)式または(7)～(12)式により推論されたBが有界である，具体的には，$\forall\alpha$に対して，

$B_{\alpha min} := min\{\underline{B_\alpha^1},\ \cdots,\ \underline{B_\alpha^n}\},\ B_{\alpha max} := max\{\overline{B_\alpha^1}, \cdots, \overline{B_\alpha^n}\}$とすれば，(13)式が成立する．

$$B_\alpha \subseteq [B_{\alpha min},\ B_{\alpha max}] \tag{13}$$

定理2：(1)～(6)式または(7)～(12)式により推論されたBが正規なファジィ集合となる．つまり，$\exists\, y',\ \mu_B(y') = 1$が成り立つ．

定理3：(1)～(6)式または(7)～(12)式により推論されたBが凸なファジィ集合となる．すなわち，$\forall y_1, y_2$及び，$\forall y_3 \in [min(y_1, y_2),\ max(y_1, y_2)]$に対して，(14)式が成立する．

$$\mu_B(y_3) \geq min\{\mu_B(y_1),\ \mu_B(y_2)\} \tag{14}$$

定理4：もし，$\exists k\in\{1, 2, \cdots, n\},\ \forall l\in\{1, 2, \cdots, m\}$に対して$A^l = A^{kl}$であれば，(1)～(6)式または(7)～(12)式により推論された結果について$B = B^k$が成立する．すなわち，本推論法は分離規則（*modus ponens*）を満たしている．

定理5：(1)～(6)式または(7)～(12)式により推論を行うとする．Bが変数$h_1, h_2, \cdots, h_k, \cdots, h_n$であるときの推論結果を，$B'$が変数$h_1, h_2, \cdots, h'_k, \cdots, h_n$であるときの推論結果を表わす．$\forall l \in \{1, 2, \cdots, n\} - k$に対して，$h_l \neq 0$として，もし，$h_k < h'_k$であれば，$d(B, B^k) < d(B', B^k)$が成立する．

ただし，B^kは$h_k = 0$（すなわち，$h_{k1}=h_{k2}=\cdots=h_{km}=1$）のときの推論結果であり，$d(\cdot,\cdot)$はファジィ集合間の距離を表わす[14][15][16].

定理5の意味するところであるが，$h_k < h'_k$から不等式 $\prod_{j=1}^{m} h'_{kj} > \prod_{j=1}^{m} h_{kj}$ が得られる，つまり，事実A^jがルールR^kの前件部A^{kj}に近づくことであり，近づくほど推論結果BはルールR^kの後件部B^kに近づくということを意味している．このことを漸近特性と言う．

定理6：もし，図1に示すルールの後件部がすべて三角型のファジィ集合であれば，(1)～(6)式または(7)～(12)式により推論された結果Bも三角型のファジィ集合となる．

ファジィ制御などのような重心値を求める必要がある場合，定理6によれば，積分を使わなくても簡単に推論結果Bの重心値を求めることができる

4．新しい関数型ファジィ推論法

関数型ファジィ推論法[19]及び簡略型ファジィ推論法[20][21]が提案されてから，ファジィ制御，ファジィエキスパートシステム，モデリングなどの分野で広く使われ，数多くの実例でその有効性が示されている．本章では，実際のシステムにおいてより良く関数型ファジィ推論法と簡略型ファジィ推論法との素晴しい考え方を生かすために，最も重要と思われる分離性と漸近性を満たす関数型ファジィ推論法及び簡略型ファジィ推論法を提案する．

いま，図2に示すような後件部を関数とする推論ルールを考える．後件部は関数であるので，推論結果が実数y_0となる．ただし，与えられた事実はファジィ集合であるとする．実数はファジィ集合の特例であるので，当然のことながら，実数の事実が与えられる場合も推論できる．

$$
\begin{array}{lllll}
R^1: & x_1=A^{11}, & x_2=A^{12}, \cdots, & x_m=A^{1m} \Rightarrow & y=f_1(x_1,\cdots,x_m) \\
R^2: & x_1=A^{21}, & x_2=A^{22}, \cdots, & x_m=A^{2m} \Rightarrow & y=f_2(x_1,\cdots,x_m) \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^i: & x_1=A^{i1}, & x_2=A^{i2}, \cdots, & x_m=A^{im} \Rightarrow & y=f_i(x_1,\cdots,x_m) \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^n: & x_1=A^{n1}, & x_2=A^{n2}, \cdots, & x_m=A^{nm} \Rightarrow & y=f_n(x_1,\cdots,x_m) \\
 & x_1=A^{1}, & x_2=A^{2}, \cdots, & x_m=A^{m} & \\
\hline
 & & & & y=y_0
\end{array}
$$

図2　m入力nルールの関数型推論

具体的な推論アルゴリズムは次の四つのステップからなる．

STEP1：各事実$A^j(j=1,2,\cdots,m)$の重心値x_j^0を計算する．

$$
x_j^0 := \frac{\int_{x_{jmin}}^{x_{jmax}} x_j \mu_A(x_j) dx_j}{\int_{x_{jmin}}^{x_{jmax}} \mu_A(x_j) dx_j} \tag{15}
$$

ただし，

$$
x_{jmin} := min\left\{lim\left[\mu_{\tilde{A}^j}^{-1}(\alpha)\right]\right\}
$$

$$
x_{jmax} := max\left\{lim\left[\mu_{\tilde{A}^j}^{-1}(\alpha)\right]\right\}
$$

STEP 2：各ルールの前件部に対して事実の適合度を計算する．ただし，$i=1,2,\cdots,n,\ j=1,2,\cdots,m.$

$$
h_{ij} = \bigvee\left[\mu_A(x^j) \wedge \mu_{A^{ij}}(x^j)\right] \tag{16}
$$

STEP 3：(17)式または(18)式で新たな変数h_iを計算する．

$$
h_i = 1 - \prod_{j=1}^{m} h_{ij} \tag{17}
$$

$$
h_i = m - \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \tag{18}
$$

STEP 4：(19)式により推論結果y_0を求める．

$$
y_0 := \frac{\sum_{p=1}^{n} f_p(x_1^0,\cdots,x_m^0) \cdot \prod_{q=1,q\neq p}^{n} h_q}{\sum_{p=1}^{n} \prod_{q=1,q\neq p}^{n} h_q} \tag{19}
$$

もし，与えられた事実はファジィ集合ではなく，実数$(x_1=x^1,\ x_2=x^2,\ \cdots,\ x_m=x^m)$である場合，step 1は省略される．また，step 2では，実数をメンバーシップ関数の値が1であるファジィ集合と見なして，計算された適合度は$h_{ij}=\mu_{A^{ij}}(x^j)$になる．(19)式におけるf_pは$f_p(x^1,\cdots,x^m)$で計算することになる．

つづいて，簡略型ファジィ推論法を説明する．図3に示すルールを考える．ここで後件部y_i^cと事実x^jともにシングルトンであるとする．

$$
\begin{array}{lllll}
R^1: & x_1=A^{11}, & x_2=A^{12}, \cdots, & x_m=A^{1m} \Rightarrow y=y_1^c \\
R^2: & x_1=A^{21}, & x_2=A^{22}, \cdots, & x_m=A^{2m} \Rightarrow y=y_2^c \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^i: & x_1=A^{i1}, & x_2=A^{i2}, \cdots, & x_m=A^{im} \Rightarrow y=y_i^c \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
R^n: & x_1=A^{n1}, & x_2=A^{n2}, \cdots, & x_m=A^{nm} \Rightarrow y=y_n^c \\
& x_1=x^1, & x_2=x^2, \cdots, & x_m=x^m &
\end{array}
$$

$$y = y_0$$

図3　m入力nルールの簡略型推論

具体的な推論アルゴリズムは次の三つのステップから構成される.

STEP 1 ：各ルールの前件部に対して事実の適合度を計算する. ただし, $i=1, 2, \cdots, n$, $j=1, 2, \cdots, m$.

$$h_{ij} = \mu_{A_i}(x^j) \tag{20}$$

STEP 2 ：(21)式または(22)式で新たな変数h_iを計算する.

$$h_i = 1 - \prod_{j=1}^{m} h_{ij} \tag{21}$$

$$h_i = m - \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \tag{22}$$

STEP 3 ：(23)式により推論結果y_0を求める.

$$y_0 := \frac{\sum_{p=1}^{n} y_p^c \cdot \prod_{q=1, q\neq p}^{n} h_q}{\sum_{p=1}^{n} \prod_{q=1, q\neq p}^{n} h_q} \tag{23}$$

以上述べた関数型ファジィ推論法及び簡略型ファジィ推論法はルールの分離性と漸近性を満たしている. また, 3章に説明した他の特性も持っていることは簡単に証明できる.

5. まとめ

本論文は, 凸性・分離性・漸近性を満たす新しい適合度型ファジィ推論法を提案した. また, 本推論法の他の特徴についても説明した. さらに, 分離性・漸近性を満たす関数型ファジィ推論法及び簡略型ファジィ推論法も提案した. 当日, 例題により具体的に本推論法の諸特徴を示す.

参考文献

[1] 水本：ファジィ推論(1), 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.2, pp.256-264, ファジィ推論(2), 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.3, pp.433- 444 (1992)

[2] 塚本: ファジィ推論(3), 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.4, pp.676-684 (1992)

[3] 村上：ファジィ制御のためのファジィ推論, 日本ファジィ学会編講座5ファジィ制御第2章, 日刊新聞出版社 (1993)

[4] J. F. Baldwin: A New Approach to Approximate Reasoning Using a Fuzzy Logic, Fuzzy Sets and Systems, Vol.2, pp.309-325 (1979)

[5] Y. Tsukamoto: An Approach to Fuzzy Reasoning Method, in Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, edited by M. M. Gupta et al., pp.137-149, North Holland, Amsterdam (1979)

[6] 向殿, 野島：ファジィ推論における直接法と間接法に関する考察, 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.2, pp.325-333(1992)

[7] 川瀬, 柳原：ファジィ推論における間接法, 信学論(A), Vol. J 77-A, No.3, pp.530-537(1994)

[8] 陳, 柳原, 川瀬：各種ファジィ推論法の間の関係について, 日本ファジィ学会誌, Vol.7, No.6, pp.1200-1208(1995)

[9] 塚本：あいまい推論, 計測と制御, Vol.22, No.1, pp.139-145(1982)

[10] E. H. Mamdani: Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588(1974)

[11] K. Uehara: Fuzzy Inference Based on a Weighed Average of Fuzzy Sets and its Learning Algorithm for Fuzzy Exemplars, Proceedings of Fourth IEEE International Conference on Fuzzy System, pp.2253-2260(1995).

[12] L. A. Zadeh: The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Appromimate Reasoning--Part1, Information Sciences, Vol. 8, pp.199-249(1975).

[13] 田中：ファジィモデリングとその応用, システム制御情報ライブラリー2, 朝倉書店, 2p. 19-20 (1990)

[14] 王, 土谷：距離型ファジィ推論法Part 1 -距離型ファジィ推論法の提案-, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集, pp.9-12(1996, 6)

[15] 王, 土谷：距離型ファジィ推論法Part 2 -命題の真理値を考慮した距離型ファジィ推論法の提案-, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集, pp.13-16(1996, 6)

[16] 王, 土谷：距離型ファジィ推論法Part 3 -距離型多重多段ファジィ推論 法の提案-, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集, pp.17-20(1996, 6)

[17] L. T. Koczy and K. Hirota: Approximate Reasoning by Linear Rule Interpolation and General Approximation, International Joural of Approximate Reasoning, Vol. 9, No.3, pp.197- 225(1993)

[18] Y. Shi and M. Mizumoto: Some Considerations on Koczy's Fuzzy Interpolative Reasoning Method, Proceedings of Fourth IEEE International Conference on Fuzzy System, pp.2117-2122(1995)

[19] T. Takagi and M. Sugeno: Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Transaction on SMC, Vol.15, No.1, pp.116-132(1985)

[20] 前田, 村上：自己調整ファジィコントローラ, 計測自動制御学会論文誌, Vol.24, No.2, pp.191-197(1988)

[21] 市橋, 渡辺：簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御, 日本ファジィ学会誌, Vol.2, No.3, pp.429-437(1990)

連絡先：〒782　高知県土佐山田町宮ノ口185番地
高知工科大学知能機械システム工学科
王碩玉
TEL: 08875-7-2306
FAX: 08875-7-2320
Email: wang@mech.kochi-tech.ac.jp

WED3-3

推論結果におけるファジネス学習機能を有するファジィ推論

Fuzzy Inference with Fuzziness Learning in Consequences

上原 清彦†, 廣田 薫‡
Kiyohiko Uehara, Kaoru Hirota

†(株) 東芝. 研究開発センター. 情報・通信システム研究所
Communication and Information Systems Research Laboratories
Research and Development Center, Toshiba Corporation

‡東京工業大学大学院. 総合理工学研究科
Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology
Tokyo Institute of Technology

Abstract — A fuzzy inference method is proposed on the basis of α-level sets and generalized means. This method is named α-GEM(α-level-set and GEneralized-Mean based inference) in this paper. The α-GEM method can control the degree to which the fuzziness and specificity of given facts are reflected to those of inference consequences. This paper studies learning of this degree from fuzzy exemplars. The simulation results show the feasibility of the α-GEM method.

1 まえがき

本論文では、α-レベル集合と一般化平均に基づいて、入力のファジネスが推論結果のファジネスに反映される度合を制御可能なファジィ推論法を提案する。更に、誤差逆伝播法に基づいてファジネスの反映の度合を学習する手法を示す。本推論法は推論結果を常に凸ファジィ集合で得ることができ、ファジィ数で学習データを与えることが可能である。これらの機能についてシミュレーションを行なった結果を示し、本推論法の有効性について述べる。

2 α-レベル集合と一般化平均に基づいたファジィ推論 [1]

2.1 一般化平均

本論文で提案するファジィ推論では、以下に示す一般化平均およびその双対演算を用いる。

定義 1 $x_j, (j = 1, 2, \cdots, n)$ に対して重み p_j を与えた場合の一般化平均を次式で定義する。

$$M_\omega(x_j, p_j) = \left[\frac{\sum_j p_j x_j^\omega}{\sum_j p_j}\right]^{\frac{1}{\omega}}, \; x_j > 0, \; p_j > 0 \quad (1)$$

定義 2 $x_j \in (0,1]$ に対し、$M_\omega(x_j, p_j)$ の双対演算 $\bar{M}_\omega(x_j, p_j)$ を次式で定義する。

$$\bar{M}_\omega(x_j, p_j) = 1 - M_\omega(1 - x_j, \; p_j) \quad (2)$$

2.2 α-レベル集合と一般化平均に基づいたファジィ推論

α-レベル集合と一般化平均に基づいたファジィ推論を以下に提案する。この推論法をα-GEM(α-level-set and GEneralized-Mean based inference) 法と呼ぶことにする。ここで、ファジィルール j の後件部を与えるファジィ集合 Q_jは、$(0,1]$ 上に定義された正規な凸ファジィ集合とする。従って、Q_jのα-レベル集合 $Q_{j\alpha}$は閉区間で与えられる。すなわち、

$$Q_{j\alpha} = [y^\ell_{Q_{j\alpha}}, y^u_{Q_{j\alpha}}] \quad (3)$$

ファジィ数は一般に正規な凸ファジィ集合で与えられる。また、応用上、ファジィルールは正規な凸ファジィ集合で与えられることが多い。

α-GEM 法では推論結果を以下の手順により求める。

ステップ 1：事実 (入力) を与えるファジィ集合$\tilde{P}$と前件部のファジィ集合 $P_j, (j = 1, 2, \cdots, n)$ の一致度$\tilde{p}_j$ を求める。例えば次式により求められる。

$$\tilde{p}_j = \sup_x [\mu_{\tilde{P}}(x) \wedge \mu_{P_j}(x)] \quad (4)$$

$$\tilde{p}_j = \sup_x [\mu_{\tilde{P}}(x) \cdot \mu_{P_j}(x)] \quad (5)$$

ここで $\wedge$は min 演算を表す。

ステップ 2：推論結果$\tilde{Q}$のα-レベル集合$\tilde{Q}_\alpha$を与える閉区間 $[y^\ell_{\tilde{Q}_\alpha}, y^u_{\tilde{Q}_\alpha}]$ を次式で求める。

$$y^\ell_{\tilde{Q}_\alpha} = \bar{M}_{\omega(\alpha)}(y^\ell_{Q_{j\alpha}}, \tilde{p}_j), \quad \omega(\alpha) \geq 1 \quad (6)$$

$$y^u_{\tilde{Q}_\alpha} = M_{\omega(\alpha)}(y^u_{Q_{j\alpha}}, \tilde{p}_j), \quad \omega(\alpha) \geq 1 \quad (7)$$

ここで、$\omega(\alpha)$ はαの非増加関数である。

注意：式 (1) で定義された一般化平均を用いるに際し、条件 $\exists \tilde{p}_j > 0, (j = 1, 2, \cdots, n)$ を満足するものとする。これにより、式 (1) における $p_j > 0$ の条件を満足する。この条件は、入力空間 Xがファジィ集合 $P_j, (j = 1, 2, \cdots, n)$ のサポートで完全に覆われている状態を意味し、実用上成立すると考えられる。ファジィルールがスパースな場合 [2] は、上記の条件を満足するように$\tilde{P}$のファジネスを増加させて推論結果を得ることも可能である。

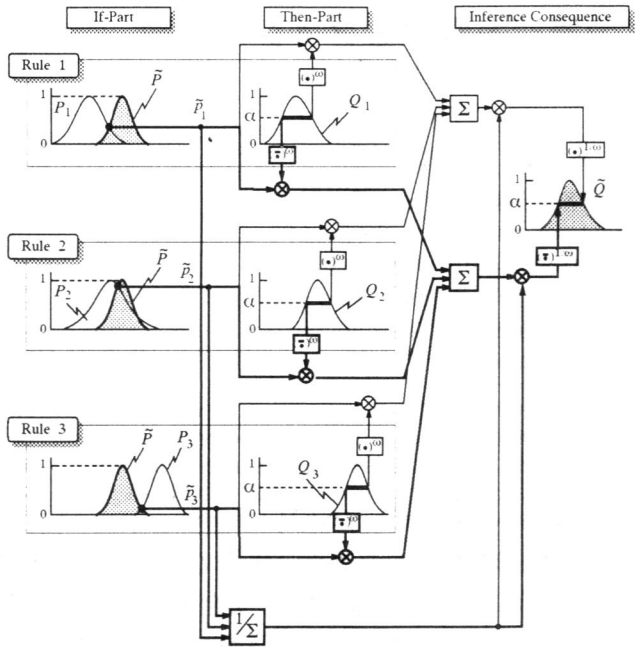


図1. α-レベル集合と一般化平均に基づいたファジィ推論：α-GEM 法

ステップ3：必要に応じ、$\tilde{Q}$のメンバーシップ関数を分解原理に基づいて求める。 ■

通常、ファジィ集合 A をメンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ で定義する場合は1価関数を用い、α-レベル集合で定義する場合はそのα-レベル集合 A_αに対し条件 $A_{\alpha'} \supseteq A_{\alpha''}, \alpha' \leq \alpha''$ を満足させる。Q_jがこの条件を満足する場合、α-GEM 法ではα-レベル集合毎に求めた推論結果$\tilde{Q}_\alpha$が条件$\tilde{Q}_{\alpha'} \supseteq \tilde{Q}_{\alpha''}, \alpha' \leq \alpha''$を満足し、正規な凸ファジィ集合として推論結果を得ることができる。従って、推論結果をファジィ数として扱うことができる。

図1はα-GEM 法の演算過程を示している。同図で、$\otimes$と$\sum$はそれぞれ乗算と加算を表し、$1/\sum$は$\sum_j \tilde{p}_j$の逆数を表す。また、$(y)^\omega$、$(\bar{y})^\omega$、$(y)^{1/\omega}$, and $(\bar{y})^{1/\omega}$は、それぞれ $(y)^{\omega(\alpha)}$、$(1-y)^{\omega(\alpha)}$、$(y)^{1/\omega(\alpha)}$、$(1-y)^{1/\omega(\alpha)}$を表す。

3 推論結果におけるファジネスの制御

ファジィ集合 A のファジネス $H_f(A)$ を Kaufmann の定義に基づいて次のように与える。

定義 3 [1] 有界な全空間 X上で定義された正規な凸ファジィ集合 A において、A のファジネスをそのα-レベル集合 $A_{\alpha_i}, (i=1,2,\cdots,m)$ により次式で定義する (通常、α^{near}は0.5 で与える)。

$$H_f(A) = \frac{2}{m\mathcal{R}(X)} \sum_{i=1}^{m} \mid w_{\alpha_i} - w^{\text{near}} \mid \quad (8)$$

$$A_{\alpha_i} = [x^\ell_{\alpha_i}, x^u_{\alpha_i}],\ x^\ell_{\alpha_i} \in X,\ x^u_{\alpha_i} \in X$$
$$A^{\text{near}} = [x^\ell_{\alpha^{\text{near}}}, x^u_{\alpha^{\text{near}}}],\ x^\ell_{\alpha^{\text{near}}} \in X,\ x^u_{\alpha^{\text{near}}} \in X$$
$$w_{\alpha_i} = x^u_{\alpha_i} - x^\ell_{\alpha_i}, \quad w^{\text{near}} = x^u_{\alpha^{\text{near}}} - x^\ell_{\alpha^{\text{near}}}$$
$$\mathcal{R}(X) = \sup x - \inf x,\ x \in X$$

この定義に基づいて、推論結果におけるファジネスを$\omega(\alpha_i)$ により次のように制御することが可能である。すなわち、次式の H_ωが大きな値を与えるほど、推論結果のファジネスを大きくすることができる。

$$H_\omega = \sum_i \mid \omega(\alpha_i) - \omega_0 \mid, \quad \omega_0 = \omega(\alpha^{\text{near}}) \quad (9)$$

同様に、α-GEM 法では$\omega(\alpha_i)$ により推論結果のスペシフィシティも制御できる。ファジィ集合 A のスペシフィシティ$SP(A)$ を Yager の定義に基づいて次のように与える。

定義 4 [1] 有界な全空間 X上で定義されたファジィ集合 A が正規な凸ファジィ集合の場合、A のスペシフィシティをそのα-レベル集合 $A_{\alpha_i}, (i=1,2,\cdots,m)$ を用いて次式で定義する。

$$SP(A) = 1 - \frac{1}{m\mathcal{R}(X)} \sum_i (x^u_{\alpha_i} - x^\ell_{\alpha_i}) \quad (10)$$

推論結果のスペシフィシティは、次式の$\overline{SP}_\omega$が大きな値を与えるほど、推論結果のスペシフィシティを小さくすることができる。

$$\overline{SP}_\omega = \sum_i \mid \omega(\alpha_i) - 1 \mid \quad (11)$$

$\omega(\alpha)$ は、入力空間の変数 x の関数$\omega(\alpha, x)$ として更に一般化できる。これを実現する手法として、本論文では$\omega(\alpha, x)$ をもう一つのファジィ推論を用いて生成してファジネス、スペシフィシティを制御することを提案する。その例として、図2に後述の簡略化したα-GEM 法に対する構成を示す。詳細は次章で述べる。

4 推論結果におけるファジネスの学習

4.1 推論演算の簡略化

推論演算の簡略化に際し、メンバーシップ関数を次式で定義する。

$$\mu_{P_j}(x) = \exp\left[-(x - x^\circ_{P_j})^2/(2\eta^2_{P_j})\right] \quad (12)$$

$$\mu_{Q_j}(y) = \exp\left[-(y - y^\circ_{Q_j})^2/(2\eta^2_{Q_j})\right] \quad (13)$$

$$\mu_{\tilde{P}}(x) = \exp\left[-(x - x^\circ_{\tilde{P}})^2/(2\eta^2_{\tilde{P}})\right] \quad (14)$$

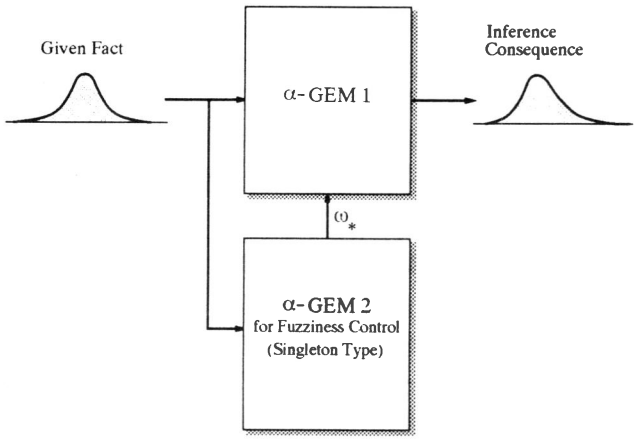


図 2. ファジネス制御パラメータの推論機能を有するα-GEM 法によるファジィ推論

更に、$\omega(\alpha)$ を次式で定義する。

$$\omega(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha = 1 \\ \omega_*, & \alpha = \alpha_* \end{cases} \tag{15}$$

この場合、推論結果のメンバーシップ関数は非対称となるため$\mu_{\tilde{Q}}(y)$ を次式で与える。

$$\mu_{\tilde{Q}}(y) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(y-y^\circ_{\tilde{Q}})^2}{2(\eta^\ell_{\tilde{Q}})^2}\right], & y \le y^\circ_{\tilde{Q}} \\ \exp\left[-\frac{(y-y^\circ_{\tilde{Q}})^2}{2(\eta^u_{\tilde{Q}})^2}\right], & y > y^\circ_{\tilde{Q}} \end{cases} \tag{16}$$

従って、$\tilde{Q}_{\alpha_*}$は次式で与えられる。

$$\tilde{Q}_{\alpha_*} = [y^\circ_{\tilde{Q}} - \eta^\ell_{\tilde{Q}}/2,\ y^\circ_{\tilde{Q}} + \eta^u_{\tilde{Q}}/2] \tag{17}$$

ここで、$y^\circ_{\tilde{Q}}$は次式により求められる。

$$y^\circ_{\tilde{Q}} = \frac{\sum_j \tilde{p}_j\, y^\circ_{Q_j}}{\sum_j \tilde{p}_j} \tag{18}$$

また、式 (6), (7), (17) より、

$$\eta^\ell_{\tilde{Q}} = 2\left[y^\circ_{\tilde{Q}} - \bar{M}_\omega(y^\circ_{Q_j} - \eta_{Q_j}/2,\ \tilde{p}_j)\right] \tag{19}$$

$$\eta^u_{\tilde{Q}} = 2\left[M_\omega(y^\circ_{Q_j} + \eta_{Q_j}/2,\ \tilde{p}_j) - y^\circ_{\tilde{Q}}\right] \tag{20}$$

図 2は、上述のように簡略化したα-GEM 法による推論 (同図のα-GEM1) において、ω_*を x の関数として推論結果のファジネスを制御するための構成を示している。α-GEM 法はシングルトンタイプのファジィ推論法を特別な場合として含んでいるため、ω_*をシングルトンタイプのファジィ推論法 (同図のα-GEM2) で求める。ここでは簡単のため、α-GEM2 は$x^\circ_{\tilde{P}}$のみを入力としている。

4.2 学習アルゴリズム

ファジネスの学習は、上記の簡略化した推論演算に対して誤差逆伝播法を用いて行なう。ここで

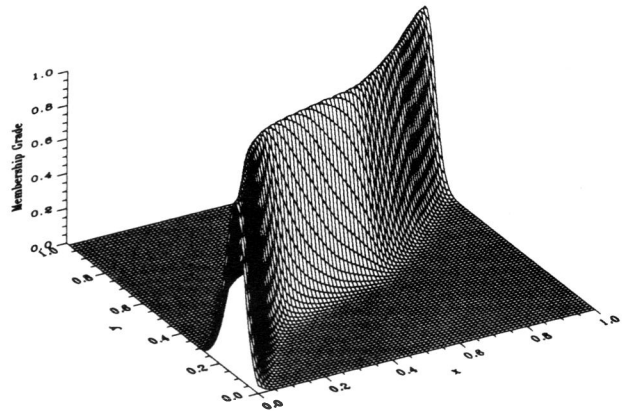


図 3. シミュレーション I–III に用いたファジィ推論の入出力関係

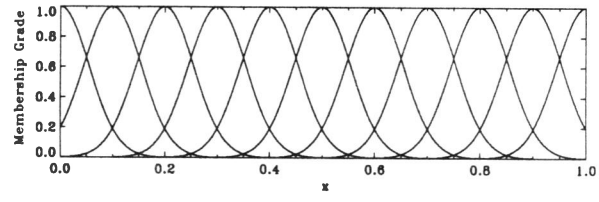


図 4. シミュレーション I–III に用いたファジィルールの前件部を与えるメンバーシップ関数

は一致度を式 (5) で求める。式 (13), (16) を用いるに際し、次のパラメータを定義する。

$$y^\ell_{Q_j} = y_{Q^\circ_j} - \eta_{Q_j}/2, \qquad y^u_{Q_j} = y_{Q^\circ_j} + \eta_{Q_j}/2,$$
$$y^\ell_{\tilde{Q}} = y_{\tilde{Q}^\circ} - \eta^\ell_{\tilde{Q}}/2, \qquad y^u_{\tilde{Q}} = y_{\tilde{Q}^\circ} + \eta^u_{\tilde{Q}}/2$$

これらのパラメータを用いて、エネルギー関数を次式で定義する。

$$E = \frac{1}{2n_t}\sum_c \Big[(y^\circ_{\tilde{Q}} - \hat{y}^\circ_{\tilde{Q}})^2 + (y^\ell_{\tilde{Q}} - \hat{y}^\ell_{\tilde{Q}})^2 + (y^u_{\tilde{Q}} - \hat{y}^u_{\tilde{Q}})^2\Big],\ (c = 1, 2, \cdots, n_t) \tag{21}$$

ここで、$\hat{y}^\circ_{\tilde{Q}}$, $\hat{y}^\ell_{\tilde{Q}}$, $\hat{y}^u_{\tilde{Q}}$はそれぞれ $y^\circ_{\tilde{Q}}$, $y^\ell_{\tilde{Q}}$, $y^u_{\tilde{Q}}$の学習 (教師) データを表す。また、n_tは学習データ $(\hat{y}^\circ_{\tilde{Q}}, \hat{y}^\ell_{\tilde{Q}}, \hat{y}^u_{\tilde{Q}})$ の数を表す。

図 2におけるα-GEM2 のファジィルールも、ファジィ学習データから誤差逆伝播法により求めることができる。この場合、誤差はα-GEM1 の出力側から逆伝播させる。

5 シミュレーション

α-GEM 法におけるファジネス制御、学習の基本機能を確認するためにシミュレーションを行なった。以下、その結果について述べる。

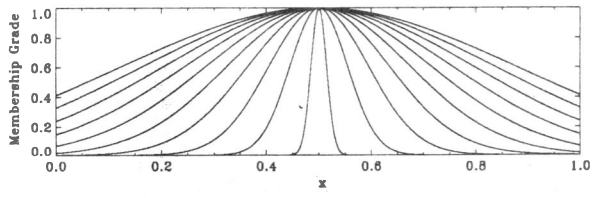


図5. シミュレーションIに用いた事実(入力)を与えるメンバーシップ関数

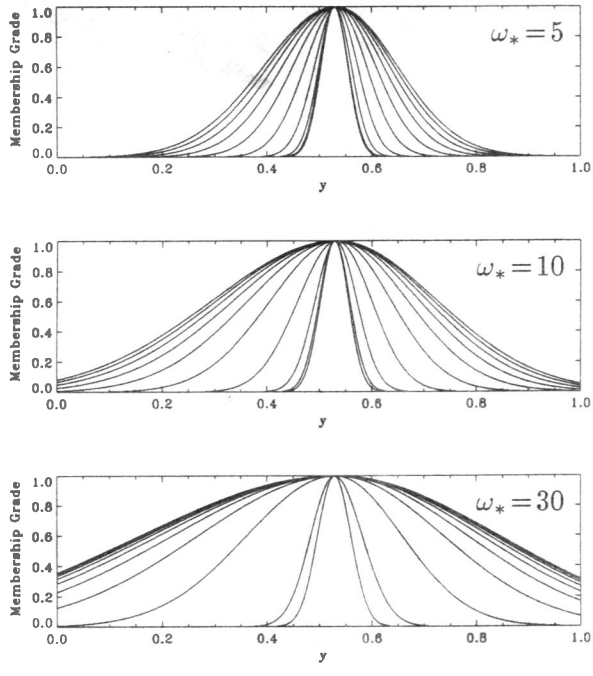


図6. シミュレーションIで得られたα-GEMによる推論結果

5.1 ファジネスの制御 — シミュレーションI

ω_*による推論結果のファジネスの制御をシミュレーションした結果について示す。ファジィルールは図3に示した入出力関係(シングルトン入力, $\omega_*=1$で表示)を与える11個のif-thenルールを用いた。前件部のファジィ集合P_jのメンバーシップ関数を図4に示す。図5が示すようにファジネスを変化させたファジィ集合を事実(入力)として与え、この場合のω_*に対する推論結果を求めた。その結果を図6に示す。これより、図3に示した入出力関係に応じて、ω_*の値が大きくなるほど事実におけるファジネスが推論結果のファジネスに反映される度合が大きくなっていることがわかる。

5.2 ファジネスの学習 — シミュレーションII

与えられたファジィ学習データからω_*を学習させた結果を次に示す。$x^{\circ}_{\tilde{P}_j}, \eta_{\tilde{P}_j}$を乱数で与え、シミュレーションIと同じファジィルールを用いてω_*の値を5とした場合の推論結果を学習データとして与えた。すなわち、学習によって得られるω_*の正解値は5となる。学習データ数は50とした。学習後のエラーは0.028×10^{-4}となり、正解値に極めて近い値に収束した。これにより、α-GEMがファジィ学習データからファジネスを学習できることがわかる。

5.3 ファジネス制御のためのファジィルール学習 — シミュレーションIII

図2に示す構成で、α-GEM1に与えられたファジィ学習データからα-GEM2のファジィルール学習を行なった結果を以下に示す。ここでは簡単のため、α-GEM2の前件部はα-GEM1と同一にして固定した。学習データの生成に際し、α-GEM2における後件部を図4の前件部に対して左から順にそれぞれ6.5,6,5,4,3.5,3,3,3,3,3,3で与えた。よって、これらの値が学習後の正解値になる。学習データは$x^{\circ}_{\tilde{P}_j}, \eta_{\tilde{P}_j}$を乱数で与えて$\alpha$-GEM1に入力し推論結果を求めて生成した。学習データ数は100とした。

α-GEM2の後件部を乱数で初期化して学習させた後のエラーは0.114×10^{-4}となり、α-GEM2の後件部は上記の正解値に極めて近い値に収束した。これにより、α-GEM2がファジィ学習データからファジネス制御のためのファジィルールを学習できることがわかる。

6 あとがき

推論結果におけるファジネスを制御可能なファジィ推論法を提案し、ファジィ学習データからファジネスを制御するパラメータを学習する方法を示した。この推論法はα-レベル集合と一般化平均に基づいており、α-レベル集合毎に推論できる。本論文ではファジネスの学習を中心に述べたが、ここで提案した推論法はファジィルールの学習も同様に行なうことができる。

参考文献

[1] K. Uehara and K. Hirota, "Parallel fuzzy inference based on α-level sets and generalized means," *Int. J. Information Sciences*, accepted.

[2] L. T. Koczy and K. Hirota, *Int. J. Approx. Reason.*, vol. 9, no. 3, pp. 197–225. 1993.

[3] K. Uehara, in *Proc. FUZZ-IEEE/IFES'95*. 1995. vol. IV, pp. 2253–2260.

連絡先：〒210 川崎市幸区小向東芝町1
(株)東芝、研究開発センター
情報・通信システム研究所
上原 清彦
電話: (044) 549-2238, Fax: (044) 520-1806
E-mail: k-uehara@csl.rdc.toshiba.co.jp

WED4-1

Application of Thornber's Fidelity to Petri Net

Mitsuro Isobe
NEC System Integration & Construction
1-39-9 Higashishinagawa,Shinagawa-ku,Tokyo 140,Japan
email ISOBE_118-2390@ala.nesic.nec.co.jp

Abstact:The author discusses on Fuzzy Petri Net (FPN),which has been treated by conventional fuzzy algorithms ,but its application field is not far advanced. The author propose to apply Thornber`s Fidelity to FPN for its wide usage.As shown in feasibility studies,the results of applying Thornber`s Fidelity are well coincident with intuitional insights. FPN can be used for failure analysis,replacing Fault Tree Analysis(FTA) ,especially in case of non Baysian world ,as shown in examples.

1.Introduction

FPN has been formalized by analogy to conventional fuzzy algorithms[1][2].But conventional treatment bring results of too small or too big values and some learning methodologies are tried to seek reasonable results[3].

The author propose to apply Thornber's Fidelity to FPN,and can give reasonable solution ,especially for nondeterministic case.

As shown in feasibility studies,the results by application of Thornber's Fidelity give better coincidence with intuitional insights than conventionals. The author would like to give a name of "improved FPN "to this approach. Expecting more suitable application fields for improved FPN, the author proposes replacement of FTA .

2.Fuzzy Petri Net

1.1 Fuzzy Petri Net

Fuzzy Petri Net esp. marked FPN is shown neatly in Fig.1[1].

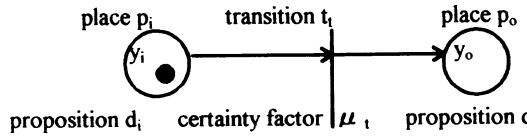


Fig.1

The structure of FPN is described as follows:

FPN = (PN, D, f , α , β), D = (d_1 ,d_2 ,...,d_m)

α : proposition P → [0, 1], β : place P → proposition D,

f: transition T → [0, 1],

y_i,, y_o:label of token :degree of truth for d_i ,d_o

Ri : production rule, If d_i , then d_o

Ri can be written as follows:

Ri : $d_i \rightarrow d_o$ (CF = μ_t)

$y_o = y_i * \mu_t$ (after fire)

Firing condition is set ,if necessary ,as follows:

$\forall\ p_i \in I(t_t)$: $\alpha(p_i) \geq \lambda$ ($\lambda \in [0,1]$)

1.2 Conventional FPN Algorithm

Fuzzy algorithm is formalized to emulate production rules,which are classified and corresponding FPN are defined as follows[1]:

Type 1:

$\wedge d_{ik} \rightarrow d_o$ (CF = μ_t)

$y_0 = \mathrm{Min}\{y_{iik}\} * \mu_t$

Type 2:

$d_i \rightarrow \wedge d_{ok}$ (CF = μ_t)

$y_{ok} = y_i * \mu_t$ (k = 1,2,...,n)

Type 3:

$\vee d_{ik} \rightarrow d_o$ (CF = μ_t)

$y_0 = \mathrm{Max}\{y_{ik}\} * \mu_t$

Type 4:

$d_i \rightarrow \vee d_{ok}$ (CF = μ_t)

This is conflict case, namely nondeterministic.But the tree methodology is applied and solved[2].

1.3 Merit / demerit of conventional FPN

(1)Merit: Simple calculation

(2)Demerit: Loss of information by Max and Min(too large or too small values are obtained, data have been fitted artificially using beautiful naming "learning").

2.Thornber's Fidelity

Thornber introduced fidelity [4] to certify reasonability in inference.

$$d_i \wedge (d_i \rightarrow d_o) \rightarrow d_o \quad (1)$$

Iff $y_i + \mu_t - 1 > 0$, (2),

then,

$$y_o = \mu_t \quad (3).$$

Fidelity f is defined as the grade of the reasonability in Modus Ponens : $f = y_i + \mu_t - 1$ (4)

3.Application of Thornber's principle to solve demerit of FPN keeping its merit

Type 1

$y_o = \mu_t$ with fidelity f_{min} (5)

$f_{min} = \mathrm{Min}\{\mu_t + y_i . - 1\} = \mu_t + \mathrm{Min}\{y_i .\} - 1$ (6)

Type 2

$y_o . = \mu_t$ (7)

if $f = \mu_t + y_i - 1 > 0$, with fidelity f

Type 3

Considered that μ_t is not common generally, μ_t. is to be applied.This procedure is not implication,but as inference process to be emulated.Naturally,the maximum fidelity is prefered.

$y_o = \mu_{tk}$, (8)

$k = \{k| f_k = \text{Max } f_.\}$ $f_. = \mu_{t.} + y_{i.} - 1$

Type 4

Considered that μ_t is not common in general, μ_t. is to be applied.From the view point of application,any path with non zero fidelity ia to be exhausted.

$y_{oi} = \mu_{ti}$ (9)

In case where a set of data is to be used fully, for example in physics base model,this proposal is to be applied.Even in non natural science fields,all possible cases are covered by this proposal.

4. Chain of inferences

By the above mentioned fidelity-oriented methodology, reachable paths are certified ,and these paths are reasonable to be treated as inference chains.

Thornber's fidelity is again applied in series to certify reasonability through full inference chains is written by Thornber[4],but with notations changed for FNP style,as follows:

$d_1, d_2, \ldots d_n$:proposition corresponding to places between terminal nodes p_i, p_o.

$d_i \rightarrow d_1, d_1 \rightarrow d_2, \ldots, d_n \rightarrow, d_o$ (10)

then above chain is collapsed into

$(d_i \rightarrow d_1, d_n \rightarrow d_o, f_{io})$, (11)

where f_{io} is defined as

$f_{io} = \min\{[d_1 \rightarrow d_2] - (1 - [d_i \rightarrow d_1]), [d_2 \rightarrow d_3] - (1 - [d_1 \rightarrow d_2]), \ldots, [d_n \rightarrow d_o] - (1 - [d_{n-1} \rightarrow d_n])\}$ (12)

and only if $f_{io} > 0$,where the bigger is f_{io}, the bigger is reasonability of inference chain.

Thus, fidelity is the degree of transitivity in inference chain,and inference is wider as scheme than causalty.

By Thonber[4],d_o is deduced as

$[d_o] = y_o = [d_n \rightarrow d_o], f_o = \min\{[d_i \rightarrow d_1] - (1 - y_i), f_{io}]$ (13)

From plural $[d_o]$ obtained by plural reachable paths to p_o ,the path with maximum value of fidelity is to be picked up as the conclusion .

In case where the weighing multi-path inferences is prefered, $[d_o]$ is deduced just the same as the formalism in causal relations[6]:

$[d_o] = \{(\Sigma [d_{o\,m}] f_{om} + \Sigma (1 - [d_{0\,n}]) f_{on}\} / (\Sigma f_{om} + \Sigma f_{on})$, (14)

where

m:path through which affirmations of proposition p_o are obtained,

n: path through which negations of proposition of p_o are obtained.

Examples

FPN examples(Fig.2,3)[1] are calculated by author's proposals compared with conventionals.

Following network in Fig. 2 for example,both methodologies give same routings.Fidelity oriented method is as follows:

1)path starts from p_1 reaches p_4 through t_1, p_2, t_3 with 0.65 fidelity and 0.80 truth value

2)starting from p_1 path is completed through t_5, p_6, t_6 to p_4 with 70 fidelity and 0.95 truth value

3)p and p can pass t_7 with smaller fidelity 0.6, reach p_7 with truth value 0.90,and come to p_4 with truth value 0.90.

Thus, Thornber's method gives

$y_4 = 0.95$ (f = 0.70)

Conventional; $y_4 = 0.68$

Fig .3: Thornber's method; $y_4 = 0.90$ (f = 0.70)

Conventional; $y_4 = 0.66$

5.Merit in application of Thornber's theory

1)Information of loss is not introduced.

2)Principle of implication is considered exactly.

3)Backward process (propositions are negations)can also be certified,if necessary.

4)Intuitional leap can be modeled in inference chains.

5)All chains with zero fidelity can be neglected .

6.Feasibility Study

The quantitative analysis in FTA is difficult,because probabilities of all factors could be determined only by experimental data, but large weights of human factors which can not be easily expressed qualitatively should be considered in complex systems.

Technique for Human Error Rate Prediction(THERP), and Success Likelihood Index Methodology(SLIM) are proposed and Bayesian calculation can be applied directly and tried widely.

But they are very complicated methodologies and not reasonable from the standing point of cognitive science or probability theory.

Thus ,fuzzy like approach has been expected to be applied to these problems.

As alternative for THERP or SLIM ,fuzzy integrals is applied to model likelihood for success in factors by atomic plant engineers in Japan[5],which are ,theoretically, not enough stochastic to be used directly in Bayesian world.

FTA in Fig.4 is rewritten by FPN as shown in Fig. 5.

(2)FPN free from stochastic formalism

Fig.6 shows an example of an expression of an intuitional reasoning with rough estimations for a trouble in LP reproducing,which is difficult to be written in FTA.

7.Conclusion

(1)Thornber's fidelity is applied to improve FPN algolithm:

1)given data are fully usable by improved FPN,

2) negation of proposition is can be calculated.

(2)FPN can be applied to replace FTA ,if given data are not sufficient for stochastic requirements.

Acknowledgment

The author could not express gratitude to Dr.Karvel K. Thornber for his academic advises and frequent encouragement.

References

1.C.G.Looney et al:"Logical Control via Boolean Rule Matrix Transformation",IEEE Trans. on Systems,Man and Cybernetics,Vol. SMC-17,No.1,pp.178-183,1988

2.S.M.Chen et al:"Knowledge Representation Using Fuzzy Petri Nets",IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, Vol. 2, No. 3,pp.311-319(1990)

3.Y. Maeda :"Evaluation of Fuzzy State Transition in Fuzzy Algorithm Based on Petri Nets"(in Japanese),SOFT Vol. 6,No. 4,pp.690-700(1994)

4.K.K.Thornber:"The Fidelity of Fuzzy-Logic Inference", Trans. on Fuzzy Systems IEEE Vol. 1,No. 4,pp.288-297 (1993)

5.T. Kizawa :"Modeling of PSF using Fuzzy Integral"(in Japanese),Human Engineering Vol.22,No. 2,pp.81-89(1986)

6.M.Isobe :"An Application of Thornber's Fidelity to Causal Relations",Proc. 12th Fuzzy System Symposium(Tokyo,June 4-7,1996),WEA1-1,pp.159-162

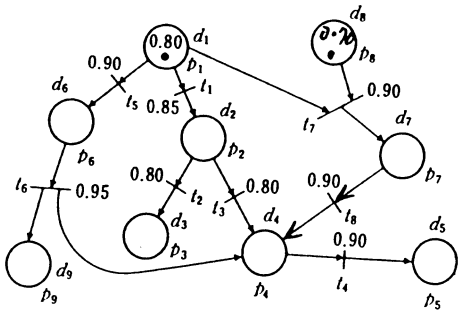


Fig.2

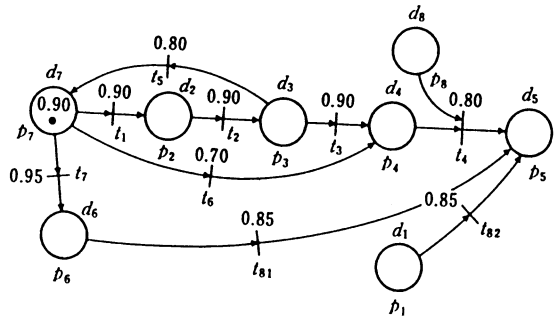


Fig.3

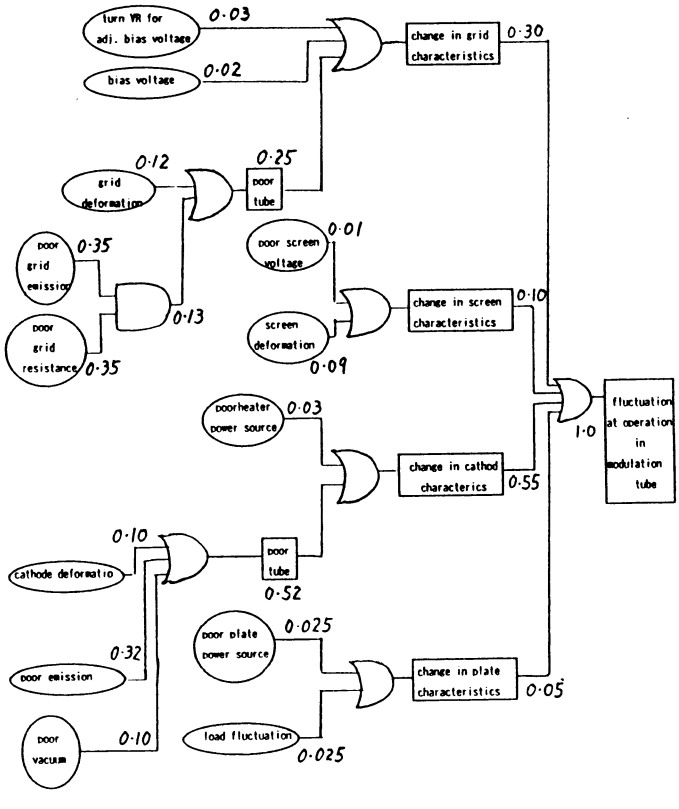


Fig.4

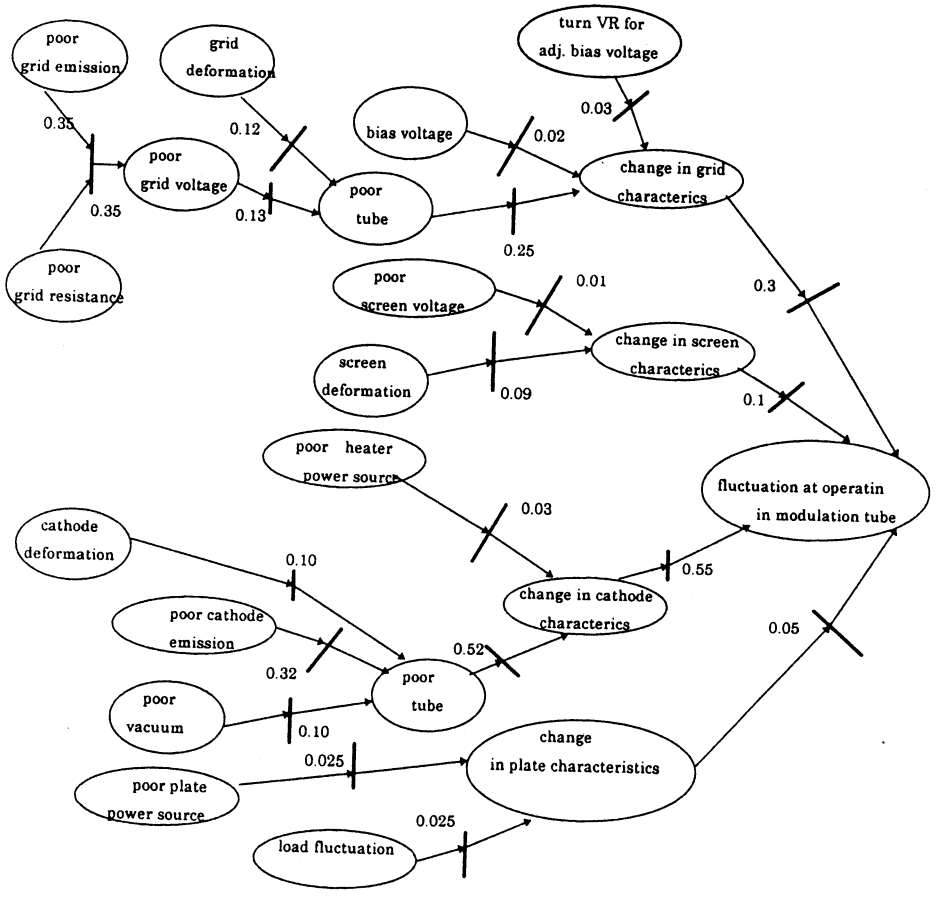

poor grid emission
grid deformation
turn VR for adj. bias voltage
0.35
0.12
0.03
bias voltage
0.02
poor grid voltage
change in grid characterics
0.35
0.13
poor tube
0.25
poor grid resistance
poor screen voltage
0.01
0.3
change in screen characterics
screen deformation
0.09
0.1
poor heater power source
fluctuation at operatin in modulation tube
0.03
cathode deformation
0.10
0.55
change in cathode characterics
poor cathode emission
0.05
0.52
0.32
poor tube
poor vacuum
0.10
change in plate characteristics
0.025
poor plate power source
0.025
load fluctuation

Fig.5

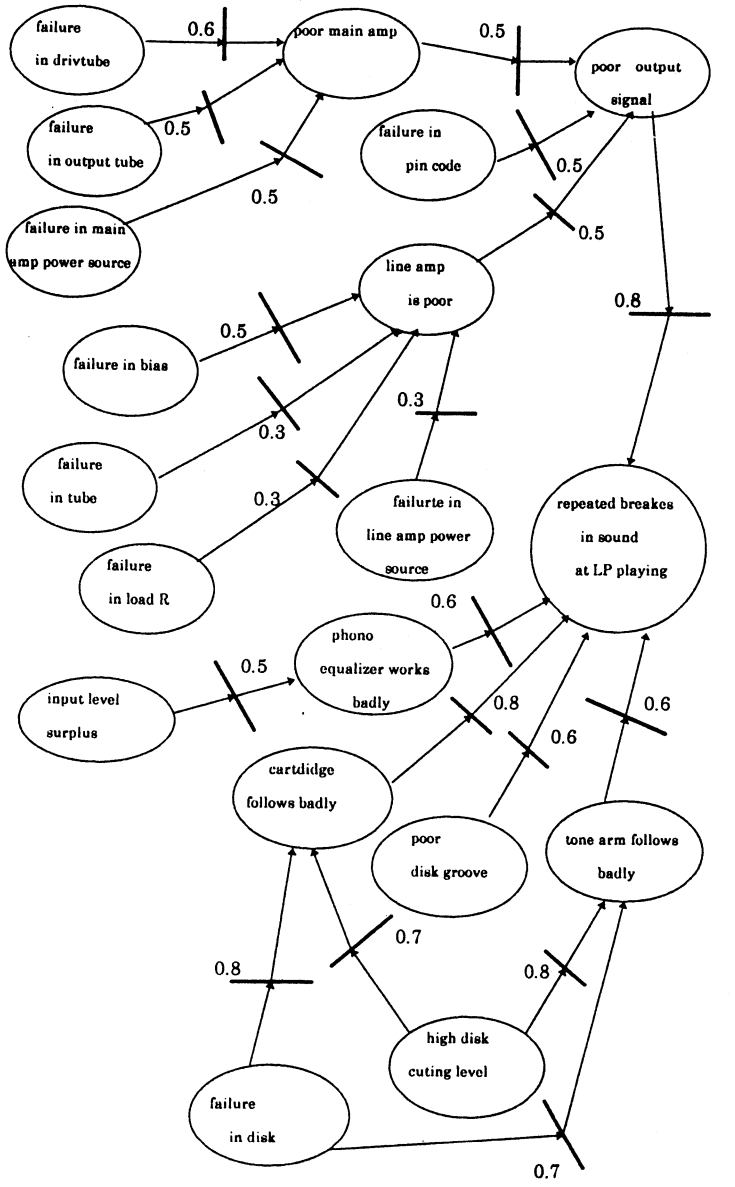

failure in drivtube
0.6
poor main amp
0.5
poor output signal
failure in output tube
0.5
failure in pin code
0.5
0.5
failure in main amp power source
0.5
line amp is poor
0.8
failure in bias
0.5
0.3
failure in tube
0.3
failurte in line amp power source
repeated breakes in sound at LP playing
0.3
failure in load R
0.6
phono equalizer works badly
0.5
input level surplus
0.8
0.6
0.6
cartdidge follows badly
poor disk groove
tone arm follows badly
0.7
0.8
0.8
high disk cuting level
failure in disk
0.7

Fig.6

WED4-2

ファジィカラーペトリネットによる ルール学習型推論エンジンの構築

Implementation of Rule Training Type Inference Engine Using Fuzzy Coloured Petri Nets

○大内　裕士　田崎　栄一郎
○Yuji Ouchi and Eiichiro Tazaki

桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract:

Coloured Petri Nets belong to the class of high-level nets, have been widely used to model all kind of engineering applications. It keeps equally amount of information, while it decreases its net size.

In this paper, we propose a reasoning method using Fuzzy Coloured Petri Nets that combine Coloured Petri Nets with Fuzzy Petri Nets, and construct fuzzy inference engine using the method. Further, we may meet the relations among its fuzzy production rules are ambiguous. An algorithm is presented for checking the consistency of fuzzy knowledge base via a learning process using Genetic Algorithm.

To verify the validity and the effectiveness of the proposed method, the system is applied to a medical diagnostic system.

1. はじめに

システムにおける情報の流れを表す一般的なモデルの一つとしてペトリネット(Petri Net)が提案されている。ペトリネットを用いれば並列非同期同時進行する複数のプロセスからなる離散事象システムを容易にモデル化することができる。また、これにファジィ理論を組み合わせることによってファジィプロダクションルールを表現することができ、ファジィ推論システムを容易に構築することができる[1]。しかしその構築の容易さ故に適用する問題によっては、そのネットサイズが非常に大規模になってしまう。このことを改善させる方法として、高レベルネットに属しているカラーペトリネット(Coloured Petri Net) [2]を拡張したファジィカラーペトリネット(Fuzzy Coloured Petri Net)を提案する。本論文ではこの手法を用いてファジィ推論システムの構造を階層化し、ネットサイズの巨大化を防ぐ方法を提案する。さらに、このシステムでファジィ多段多重推論システムを構築した場合における"あいまい性"の膨張を制御するために、ファジィプロダクションルールにおけるファジィ真理値を、生物の進化の過程を工学的に模倣した遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm)を用いて学習[3]を施し、精度の高い推論エンジンを構築する。

また、本手法を腰痛の椎間に由来している複数の疾患に対する医療診断支援システムの構築に適用しその有効性を示す。

2. ファジィペトリネット

命題論理を用いたルールベース推論をペトリネットモデルで表現すると、状態や真理値を表現するトークンはクリスプ値によってマーキングされる。しかし実際の推論においては、より複雑であいまいな知識を用いなければならない場合が数多く存在している。この問題を解決する方法として、ファジィプロダクションルールがある。ファジィプロダクションルールとは、知識を IF-THEN(CF)の形式で表現できるファジィ推論方法である。この動作をペトリネットで表現させるために、ファジィ論理を導入したものがファジィペトリネット(Fuzzy Petri Net)である。ファジィペトリネットは、プレースに命題を、トランジションに確信度を、トークンに[0,1]のファジィ真理値を割り当てることによって、ファジィ推論の動作をグラフィカルに表現させることができる[1]。

以上のような方法を用いることによって、以下のような第 i 番目のルール"Ri"は、図１のように表現できる。

Ri:IF dj THEN dk　(CF=μ i)

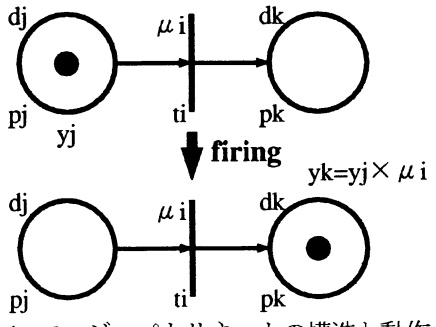


図１ ファジィペトリネットの構造と動作

3. カラーペトリネット

ペトリネットにおいて、たとえ２つのそれぞれのサブネットのプロセスが非常に類似したものでさえ、別々に全ての構造について表現しなければならなかった。このようなことは、システムのサイズが小さい場合ではさほ

ど問題にはならないが、システム全体が非常に大きく複雑な場合になると、そのシステムにおけるサブネット間の類似性と相違性を理解することやその構造のモデル化が非常に困難になってしまう。このような問題は実際のペトリネットの使用において頻繁に現れており、これらを解決するために、高レベルネットであるカラーペトリネットがある。これはペトリネットにおけるそれぞれのトークンにカラーという属性を設定することによって、ある種の階層化を施すことができ、より簡潔なペトリネットモデルの構築が可能となるものである[2]。

カラーペトリネットでは、プレース、トランジションにはそれぞれカラー集合と呼ばれるものが加えられる。そして、トランジションは、そのカラートークンの各々に対して発火することができる。発火におけるトークンの移動はカラーに関することを除いては通常のペトリネットと同様な動作を行う。トークンに設定されたカラーはトランジションの発火によって変化するかもしれない。アークには、そのアークに流れるトークンカラーであるアーク表現が記述される。複雑なカラーを制御するためには、このアーク表現も複雑にしなければならない。

以上のようにペトリネットにカラーという概念を導入することによって、同等な構造を持つネットを階層的に表現することができる。

4. ファジィカラーペトリネット

ファジィプロダクションルールにおける知識表現をファジィペトリネットで行うことは、多段多重推論の構築することにおいて非常に有効な手段である。しかし、その構築の容易さ故に巨大なシステムを構築する場合において、そのネットサイズや理解が非常に困難になる。それらを解決する方法として、通常のペトリネットと同等の情報量を持ち、なおかつ構造を縮小化することができるカラーペトリネットを組み込んだファジィカラーペトリネットを提案する。

ファジィペトリネットにおいて、それぞれのトークンはすでにファジィ真理値のデータを与えられている。これらにカラーという属性を与えたとすると、例えば0.8<赤>のような0.8の値をもつ<赤>色トークンという表現になる。ただし、それぞれのカラー属性がファジィ真理値データに直接的な影響を与えることはない。トランジションにはそれぞれのルールの確信度が与えられており、これらはその入力プレースにあるトークンカラーによって値を変化させることができる。この情報はアーク表現と同じ方法を用いてそれぞれのトランジションに書き込まれる[4]。ファジィペトリネットではプレースは命題の数に依存するが、ファジィカラーペトリネットでは、カラーの種類はその命題の数に依存しており、決してプレースの数と一致することはない。なぜなら1つのプレースにおいて多種のカラートークンを制御するからである。

カラーファジィペトリネットの構造は、ファジィペトリネットと同様にファジィプロダクションルールの形態に依存する。ファジィプロダクションルールには、一般的に以下のような5つの形態を持ち、それぞれの形態において同様の構造を持つ場合において、ファジィカラーペトリネットを用いて表現することが可能となる。

形態1：
IF d1j THEN d1k　(CF＝μ 1i)
IF d2j THEN d2k　(CF＝μ 2i)

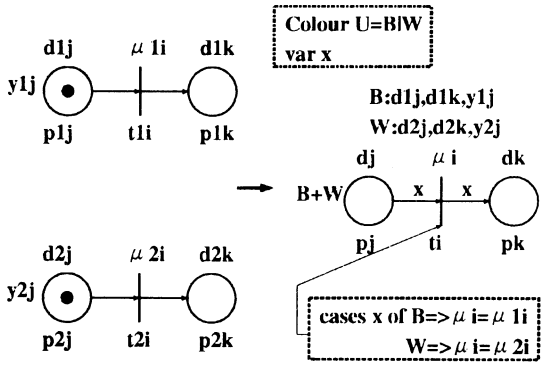


図2　形態1によるファジィペトリネットからファジィカラーペトリネットへの変換

形態2：
IF d11 AND d12 THEN d1k　(CF＝μ 1i)
IF d21 AND d22 THEN d2k　(CF＝μ 2i)

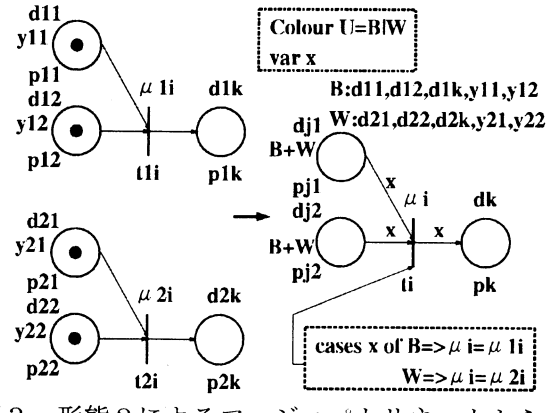


図3　形態2によるファジィペトリネットからファジィカラーペトリネットへの変換

形態3：
IF d1j THEN d11 AND d12　(CF＝μ 1i)
IF d2j THEN d21 AND d22　(CF＝μ 2i)

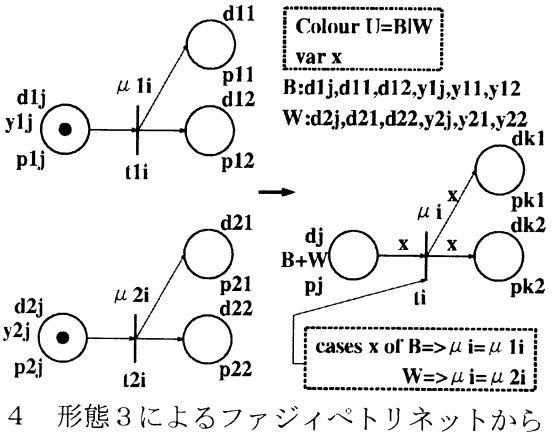


図4　形態3によるファジィペトリネットからファジィカラーペトリネットへの変換

形態４：
IF d11 OR d12 THEN d1k　(CF＝μ 11, μ 12)
IF d21 OR d22 THEN d2k　(CF＝μ 21, μ 22)

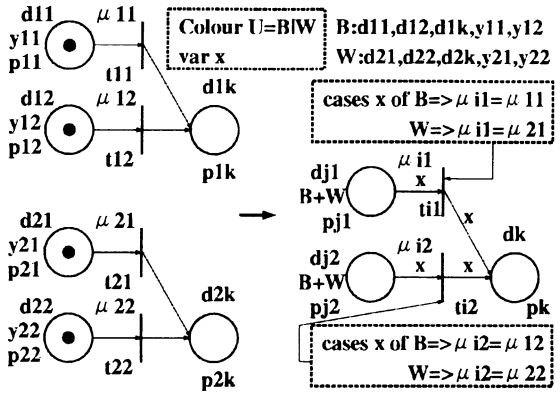


図５　形態４によるファジィペトリネットから
ファジィカラーペトリネットへの変換

形態５：
IF d1j THEN d11 OR d12　(CF＝μ 11, μ 12)
IF d2j THEN d21 OR d22　(CF＝μ 21, μ 22)

*CF＝Certainty Factor(確信度)

それぞれのルール形態を、通常のファジィペトリネットからファジィカラーペトリネットへ変換させると図２～図５の様になる。ただし、形態５についてのみ通常のファジィペトリネットと同様に、それぞれのルールが明確な含意関係を持たないために不適当であると判断され、除外される。

また、図５の形態において、入力のトークンカラーが同じであり、かつその確信度が同じである場合に限り、出力トークン値はその入力トークン値の最大値と確信度との積となるので、入力アーク表現を "MAX" と書くことによって、出力トークンを出力することができる。さらに、その確信度の値が[1.00]の場合には出力トークン値は入力トークン値の最大値になり、トランジションに "MAX" を書くことによって表現することができる。

以上のような手法を用いることによって、簡潔なファジィ推論エンジンが構築可能となる。

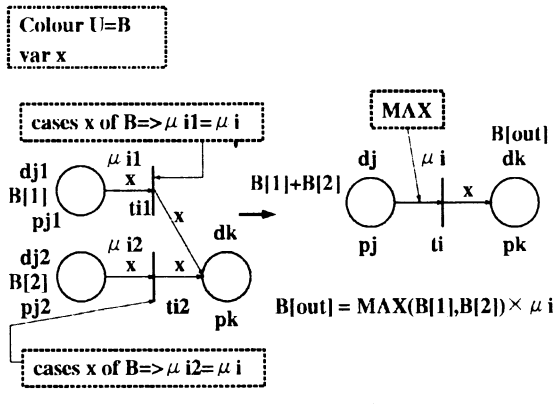


図６　ファジィカラーペトリネットにおける
"MAX" 表現１

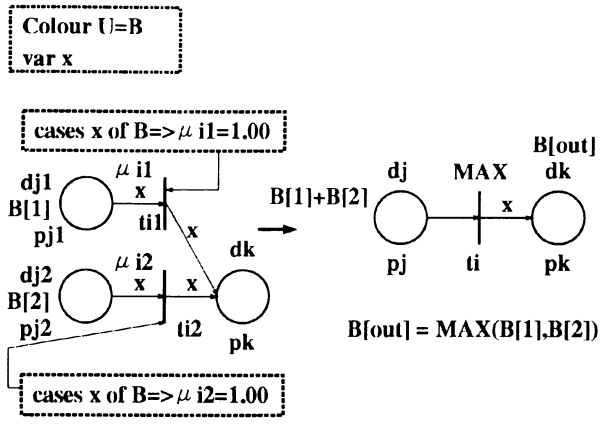


図７　ファジィカラーペトリネットにおける
"MAX" 表現２

5. 遺伝的アルゴリズムによるファジィルールの学習

ファジィペトリネットを用いて推論エンジンを構築する場合、その性質においてファジィルールの精度がその推論エンジンの精度に対して直接的な影響を及ぼしてしまう。このことはファジィ多段多重推論エンジンを構築する際に、その"あいまい性"が拡散することに通じている。これを回避するためにルールを学習的に改善させる必要がある。本論文ではこの学習アルゴリズムに対して遺伝的アルゴリズムを導入し、ルール学習型推論エンジンを構築する。これはファジィプロダクションルールにおける前件部とその確信度を遺伝子型に変換させたものを染色体とし、それを遺伝的オペレータによってより環境に適用するものに進化させていくものである[3]。このコード化の構造を図８に示す。遺伝的オペレータとしては、ルーレット選択、エリート保存選択、一様交差、突然変異をそれぞれ組み込んだ。

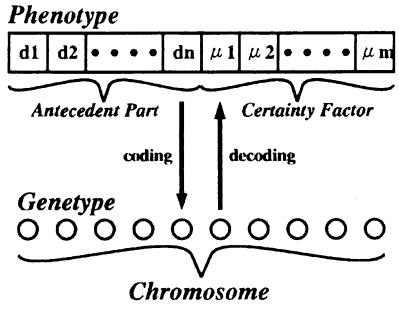


図８　ファジィルールの遺伝子型への
コード化(coding)とデコード化(decoding)

6. 医療診断支援システムへの適用例

提案した方法の有効性を検証するために、腰痛の椎間に由来している複数の疾患に対する医療診断支援システムのためのファジィ推論エンジンを構築した。

用いたルールとしては、中間仮説"根性神経症"を持つ椎間由来の疾患"椎間板ヘルニア"、"椎間関節性疼痛"、"腰椎椎間関節性"の３つの疾患について、合計 30 個のファジィプロダクションルールがあり、これを用いてファジィ推論エンジンを構築した。それぞれネットモデルを図

9に示す。その結果、構造の複雑さの比較をプレース、トランジション、アークの総数で判別させると、表1のようになり、約 26.0%のネットサイズの縮小化が可能になる。さらに、ファジィペトリネットとカラーファジィペトリネットとの違いによる計算量の比較を、それぞれについて 10000 回計算を行った際の計算時間を比較することによって計測を行った。その1部を表2に示す。これは構造を縮小化することによって、計算量を約 91.5%に減少させることができ、これによる計算機への負担が軽減されることが可能になることを表している。

表1　ファジィペトリネット(FPN)とファジィカラーペトリネット(FCPN)との複雑さの違い

	FPN	FCPN	縮小率 (%)
プレース	52	14	26.9
トランジション	40	10	25.0
アーク	103	27	26.0

表2　ファジィペトリネット(FPN)とファジィカラーペトリネット(FCPN)との計算量の違い

	FPN	FCPN	縮小率 (%)
マシン1 (sec)	1787	1955	91.4
マシン2 (sec)	594	649	91.5

7. おわりに

ペトリネットの構造をトークンをカラーという属性を設定することによって、そのネットサイズを縮小化し、さらにファジィペトリネットの概念を導入することによって、"あいまい性"をもつ推論エンジンを簡潔に表現することが可能になった。その結果、計算機への負担も軽減されることが判明した。このことは、大規模なファジィ多段多重推論を構築する際には提案した手法を用いることによって、これらの効果は一層顕著に表れてくるものと期待される。

References

[1]SHYI-MING CHEN, JYH-SHENG KE, AND JIN-FU CHAN:"Knowledge Representation Using Fuzzy Petri Nets", IEEE TRANSACTIONS ON KNOWLEDGE AND DATA ENGINEERING, VOL. 2, NO. 3, pp. 311-319. (1990)

[2]Kurt JENSEN:"COLOURED PETRI NETS AND THE INVARIANT-METHOD", Theoretical Computer Science 14, pp. 317-336. (1981)

[3]大内裕士,田崎栄一郎:"遺伝的アルゴリズムを用いたペトリネットによるルール学習型推論エンジンの構築", 第12回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集, pp. 27-30. (1996)

[4]Heloisa Scarpelli, Fernando Gomide and Ronald R. Yager:"A Reasoning Algorithm for High-Level Fuzzy Petri Nets", IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, VOL. 4, NO. 3, pp. 282-294. (1996)

連絡先：

〒225

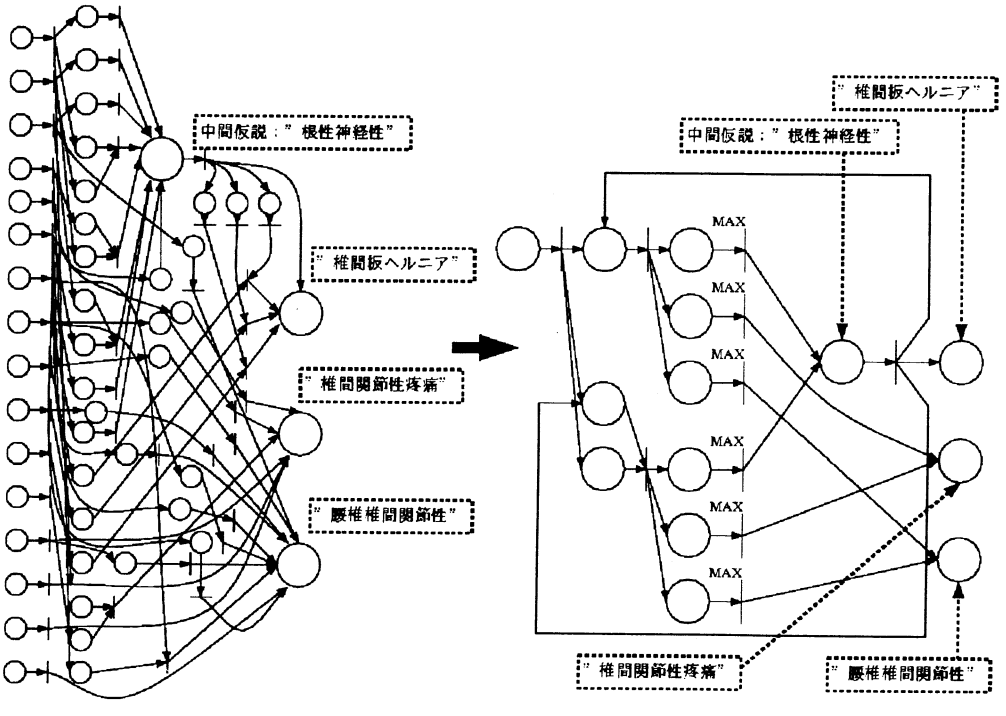
横浜市青葉区鉄町1614番地

桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科

田崎　栄一郎

TEL:045-974-5057　FAX:045-973-1311

E-mail:tazaki@intlab.toin.ac.jp



ファジィペトリネットモデル　　ファジィカラーペトリネットモデル

図9 腰痛における医療診断支援システムのファジィペトリネットモデルとファジィカラーペトリネットモデル

WED4-3

プログラマブル制御のためのファジィ的操作タイミングのチューニング

Optimal Arrangement of Operation Timing for Programmable Control Using Fuzzy Theory

西守克己*, 宮内 肇**, 石原永伯*, 平川 進***
K. Nishimori, H. Miyauchi, N. Ishihara, S. Hirakawa
*鳥取大学工学部, **松江工業高等専門学校, ***富士通株式会社
Tottori University, Matsue National College of Technology, Fujitsu Co.

We have applied fuzzy theory to construct operation timing in a programmable driving control of a model car. The operation timing of steering expressed by fuzzy sets is used to the simulation of steering control for driving in a crank shaped course and parking in a garage by backing. The results show the smooth steering operation in each case.

1．はじめに

従来のファジィ制御の手法では多くの制御ルールをマムダニ法に代表される推論法で処理，実行されるが，我々は，制御操作タイミングをファジィ集合で直接表現できるようにし，非ファジィ化過程を用いないで最適な制御操作量を決定できることを報告した[1]。人が行う制御操作のうちで一番身近かにあるのが自動車の運転である。走行途中に障害物などがなく運転操作における目的がはっきりと決められているときは，走行路に従ってその時々刻々にハンドル操作を行ってゆけばよいのある。今回は，このようなプログラマブル制御を想定して，模型自動車における右折，クランク路および縦列駐車の各運転操作のタイミングをファジィ的に取り扱う方法を提案する。

2．操作タイミングのファジィ化

前回[1]には，模型自動車の右折走行モデルを考え，簡単のため，まず2つの状態AとBに対し，状態Aには直進状態を，状態Bには旋回状態を割り当てた。そこでは，状態AからBへの遷移タイミングT_0の信号の与え方にファジィ的な取り扱いを行った。すなわち，図1に示すように遷移タイミングT_0に時間的なあいまいさを表わすファジィ集合（メンバーシップ関数$\mu_{T0}(t)$で与えられる）を用いることにより，それぞれの状態に対する帰属度μ_A, μ_Bの間に，次の関係式を定義した。

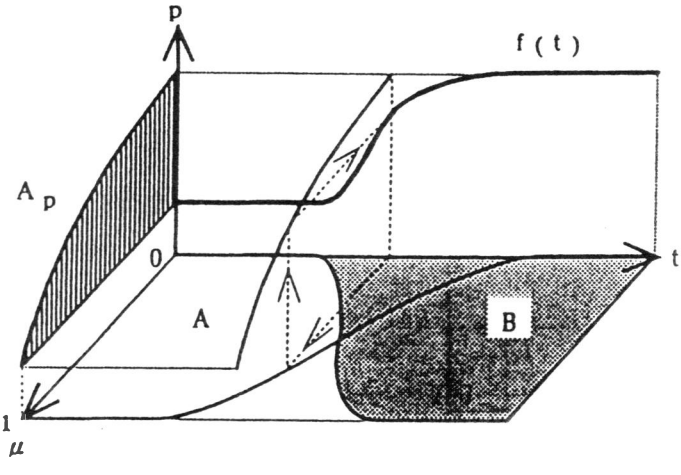


図1. 状態A から状態B への過渡的なファジィ的遷移

$$\mu_B(t) = 1 - \mu_A(t) = k \int_0^t \mu_{T_0}(\tau)\, d\tau \qquad (1)$$

また，制御信号pはμ_A，μ_Bに対応するp_a，p_bまでの値をとるとすると，

$$\mu_{Bp}(p) = 1 - \mu_{Ap}(p) = \mu_B(t) \qquad (2)$$

となるよう操作タイミングTから制御信号Pへの関数fを定義する。

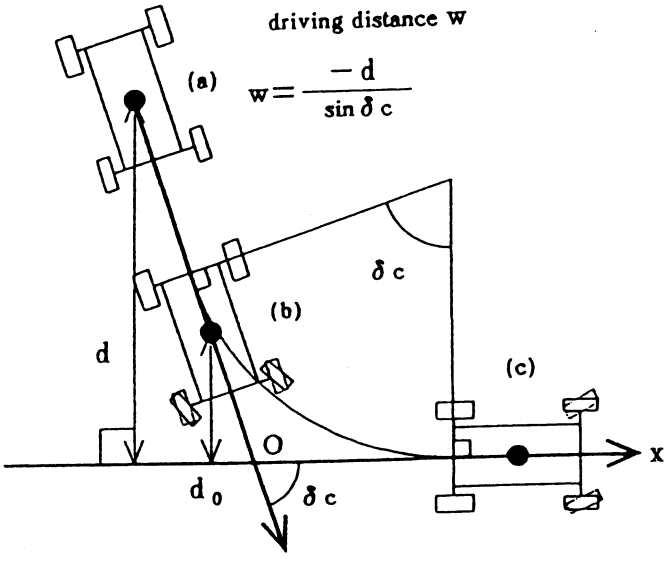


図2. 模型自動車の旋回状態における走行モデル

3. 模型自動車の走行モデル

模型自動車の旋回状態における走行モデルを図2に示す。旋回後に直進軌道のx軸を目標とし，現在の車体進行軸とx軸との交点を原点Oにとる。旋回状態において車体は横滑りを起こさずに，低速旋回し一定の移動速度Vを保持する。この走行モデルのシミュレーションに用いる車体の移動の計算式は次式である。

$$\Delta\theta = \frac{V \cdot \xi}{a}\ \phi \qquad (3)$$

$$\Delta x = V \cdot \xi \cos\left(\theta + \alpha\phi + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \qquad (4)$$

$$\Delta y = V \cdot \xi \sin\left(\theta + \alpha\phi + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \qquad (5)$$

ここで，aは車長，θは車体角，ξは推論時間，αは車長に対する重心位置比である。また，基本的にはクランク走行路ではこの旋回モデルを左，右旋回と組み合わせればよく，縦列駐車や車庫入れの後退走行のときにはクランク走行において車体の前後を逆にして考える。

4. 走行シミュレーション結果

最大操舵角ϕ_0を車の諸元，道幅や曲がり角の角度から適切にとり，走行路に適合するようにクリスプモデルの旋回開始タイミングts，旋回終了タイミングteを幾何学的に定めた。ファジィモデルの旋回開始タイミングTs，旋回終了タイミングTeは，中心がそれぞれts，teである三角形のファジィ集合とした。走行路幅が600[mm]で角度が90[°]のコーナー角を想定した。また，車体の前輪と後輪の間隔はa＝243[mm]とし，車体座標観測点は車体中央（α＝0.5）とした。これらのタイミングから前輪操舵角ϕの変化を(3)～(5)式を用いて算出すれば左折，または右折走行に適用できることが報告された[1]。そこで今回はクランク路で走行させる場合を考え，このような走行タイミングを左右2回連続的に適用すればよい。走行中の操舵状態は直進状態S，右旋回状態R，左旋回状態Lの3つのファジィ集合に分割される。分割のタイミングとして，右旋回開始タイミングT_{Rs}，右旋回終了タイミングT_{Re}，左旋回開始タイミングT_{Ls}，左旋回終了タイミングT_{Le}の4つを設定しなければならない。すなわち，

$$\mu_R(W)=k_{TRs}\int_{W_0}^{W}\mu_{TRs}(\tau)\,d\tau - k_{TRe}\int_{W_0}^{W}\mu_{TRe}(\tau)\,d\tau \quad (6)$$

$$\mu_L(W)=k_{TLs}\int_{W_0}^{W}\mu_{TLs}(\tau)\,d\tau - k_{TLe}\int_{W_0}^{W}\mu_{TLe}(\tau)\,d\tau \quad (7)$$

$$\mu_S(W)=1-\mu_R(W)-\mu_L(W) \quad (8)$$

のように決められる。

ここで，μ_R ，μ_L と操舵角ϕとをそれぞれ関係づけるファジィ集合R_ϕ ，L_ϕは，

$$\mu_{R\phi}(\phi)=\phi/\phi_R \quad (9)$$

$$\mu_{L\phi}(\phi)=\phi/\phi_L \quad (10)$$

のように求められる。

ここで，それぞれ$\phi_R<0$，$\phi_L>0$である。

これらをまとめて，出発点からの距離Wの関数として，総合した操舵角は，次のようになる。

$$\phi(W)=\phi_R\cdot\mu_R(W)+\phi_L\cdot\mu_L(W) \quad (11)$$

これを操舵角タイミングT（$\in |T_{Ls}, T_{Le}, T_{Rs}, T_{Re}|$ ）として表現すると，

$$\phi|T(W)|=\sum_{T}\int_{T(W_0)}^{T(W)}K_T\cdot\mu_T(\tau)\,d\tau \quad (12)$$

ただし，新しい係数K_Tは次のいずれかの値をとるものとする。

$$K_{TRs}=\phi_R\cdot k_{TRs}\ ,\quad K_{TRe}=-\phi_R\cdot k_{TRe}$$
$$K_{TLs}=\phi_L\cdot k_{TLs}\ ,\quad K_{TLe}=-\phi_L\cdot k_{TLe}$$

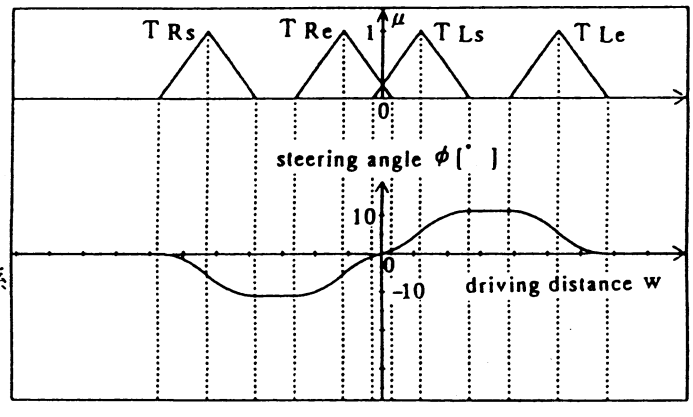


図3. クランク路におけるファジィ操舵タイミングと前輪操舵角

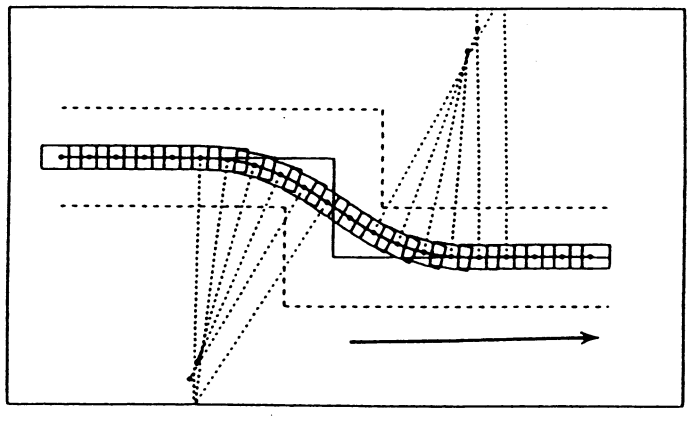


図4. クランク路におけるファジィ操舵タイミングによる走行制御シミュレーション軌跡

シミュレーションで用いたクランク路は直角の右コーナー角から600[mm] 進んだところに左の直角コ

ーナー角を設定したものである。図3 にこれらの操舵タイミングと前輪操舵角の関係を示す。また，そのときの走行軌跡では，図4 に示すように道幅を車幅のおよそ3.5倍と狭く設定したので，車体が道からはみ出ないようにタイミングを得るのに，何度かの試行錯誤が必要であった。今回はタイミングのメンバーシップ関数を単に操舵角に比例させただけなので，最適化されているとは言えない。

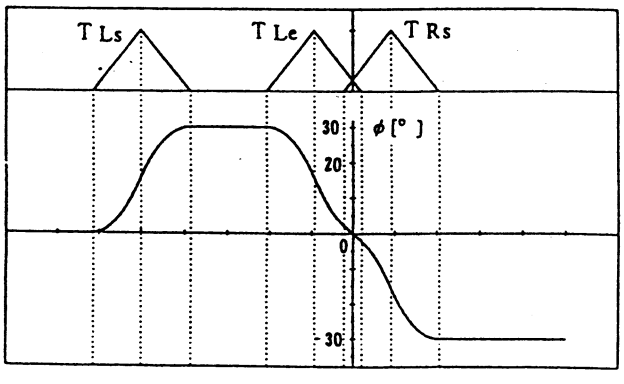


図5. 縦列駐車における後退ファジィ操舵タイミングと前輪操舵角

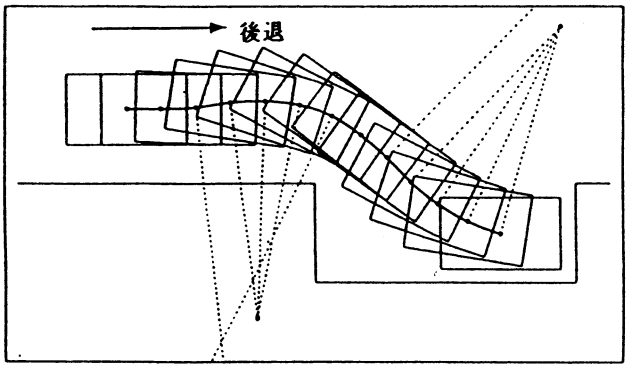


図6. 縦列駐車における後退ファジィ操舵タイミングによるシミュレーション軌跡

次に後退による縦列駐車走行制御シミュレーション適用した場合について述べよう。縦列駐車はクランク走行とほぼ同じハンドル操作を行う。駐車位置に入れば，ハンドルを戻さずに操作を終えることとする。狭い空間に模型自動車を縦列駐車させるためには，前進するより後退しながら駐車位置に近づけてゆく方が有利である。図5 に縦列駐車のタイミングと前輪操舵角の変化を，また図6 に縦列駐車シミュレーションの結果を示す。クランク路の場合と同じように，ファジィ的タイミングを位置を変えずにクリスプ的タイミングに置き換えた場合，走行軌跡はどちらのタイミングでもほぼ等しくなる。

5．まとめ

模型自動車におけるプログラマブル制御を想定して，右折，クランク路および縦列駐車の各運転操作のタイミングをファジィ的に取り扱う方法を提案した。走行制御シミュレーション結果から，クリスプ的な瞬間のタイミングを用いて前輪操舵を決定した場合，前輪操舵角は不自然な断続的な変化になるが，ファジィ的なタイミングを用いた場合には，前輪操舵角は滑らかに変化することがわかった。しかし，うまく表現した操舵タイミングを用いても，外乱があればうまく制御できない。そこで，外乱による操舵タイミングの補正をフィードバック制御的に行うことが考えられる。

参考文献

[1] 平川，西守他：ファジィ理論を用いた制御操作タイミングの表現とその応用，第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.297-300. (1992)

問い合わせ先： 西守克己
〒680 鳥取市湖山町南4－101
鳥取大学工学部電気電子工学科
TEL 0857-31-5688
FAX 0857-31-0880
E-mail nisimori@ele.tottori-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEE1-1

医療診断システムにおけるファジィ入力情報の総合評価

Synthetic Evaluation of Fuzzy Information Inputted to Medical Diagnostic System

廣田 博 [1)] 有田 清三郎 [2)] 堀 義巳 [3)] 坂口 聡 [4)]
Hiroshi HIROTA Seizaburo ARITA Yoshimi HORI Satoru SAKAGUCHI

馬庭 芳朗 [4)] 谷村 弘 [4)] 水本 雅晴 [1)]
Yoshio MANIWA Hiroshi TANIMURA Masaharu MIZUMOTO

[1)] 大阪電気通信大学 Osaka Electro-Communication Univ.
[2)] 関西医科大学 Kansai Medical School
[3)] 川崎医療福祉大学 Kawasaki Univ. of Medical Welfare
[4)] 和歌山県立医科大学 Wakayama Medical School

Abstract: S.Arita proposed a diagnostic system by using Min–Max–type fuzzy inference in the medical field. In this paper, we propose a new synthetic evaluation method of fuzzy information inputted to medical diagnostic system. We can obtain diagnostic results using an weighted average of each item's degree inferred from fuzzy inferences by their important coefficient. We implement a new graphical computer supporting system for surgical site infection adopting the new synthetic evaluation method.

1 はじめに

本論文では、医療診断において多くの観察項目を考慮したシステムを構築するために必要となる総合評価方法の提案を行う。従来、医療診断において有田ら [1] が多数の観察項目に対して Min–Max 法を用いた診断ロジックを「医療画像診断」や「糖尿病診断」に応用し、この分野へのファジィ理論の適用の先駆けとなった。近年、我々は術後感染症診断に対して観察項目の白血球分画の位置情報とその動きを基に、術後感染症診断システム [2, 3] を簡略化推論法を用いて構築し、良好な結果が得られることを示した。しかしながら、医師による診断時には顕著な特徴のため "感染有" と判定可能な症例にもかかわらず、医師の直感と適合せず "感染無" となる症例が数例認められた。本論文では、医師が診断時に重要視する観察項目 [4] と、ファジィ推論による白血球分画の診断結果を考慮した、多項目を扱うことが可能な総合評価方法を提案する。本手法では、診断に必要となる各観察項目をファジィ値に変換し、ファジィ値とその項目の重視度の積の加重平均を求めることにより診断結果を得る。さらに、本手法を術後感染症発症の早期発見システムに適用した結果を報告する。

2 総合評価方法

一般に、多項目に対するファジィ推論システムを構築する場合、すべての項目の組み合わせを考慮すれば、非常に多くのファジィ規則が必要となる。例えば、1 項目が "少"、"中"、"多" の 3 ラベルのメンバーシップ関数で構成されるとき、4 項目の場合は 81 ルール ($=3^4$)、6 項目の場合は 729 ルールとなり、ルール数は指数的に増大する。実際問題として、このようにすべての規則の組み合わせを考えることは到底不可能であり、経験豊富な医師もすべての組み合わせを考えているとは思えない。また、入力項目の組み合わせで考える場合、1 項目でも欠損値を含むとファジィ推論を行えなくなってしまう欠点もある。

そこで、我々は図 1 に示すような入力情報部、ファジィ推論部、総合評価部、出力部の 4 つの部分で構成される、多項目を扱うことが可能な総合評価方法によるシステムを提案する。

[入力情報部]
診断に必要となる観察項目のデータの入力を行う。

[ファジィ推論部]
入力された観察項目のファジィ推論を行い、n 個のファジィ推論値 z_i $(i=1,\cdots,n)$ を出力する。次に、各項目が診断時にどの程度重要視されるかを考慮する項目重視度 w_i $(i=1,\cdots,n)$ を設定する。さらに、欠損値を判定するための $flag_i$ $(i=1,\cdots,n)$ を添える。観察項目が入力された時は 1 となり、データが欠損している時は 0 となる。

[総合評価部]
総合評価値 z_0 は、ファジィ推論値 z_i と項目重視度 w_i の加重平均により得られる。

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} z_i \times w_i \times flag_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i \times flag_i} \tag{1}$$

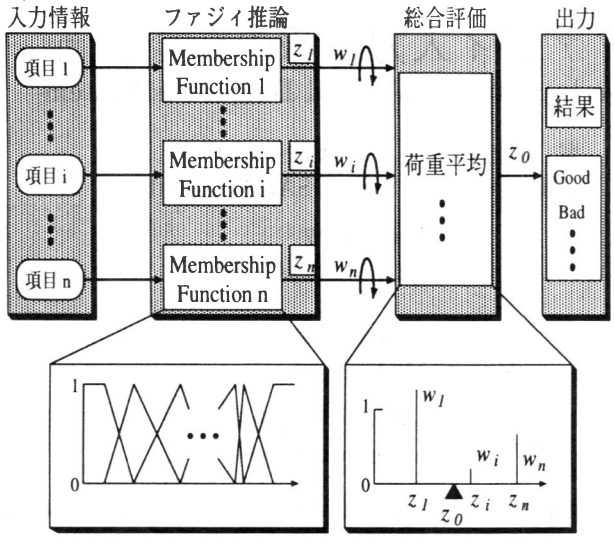


図 1　総合評価方法による診断ロジック

[出力部]
総合評価部で得られた総合評価値 z_0 を基に診断結果を提示する。

3　診断システム

我々は、術後感染症早期発見システム [2] において、白血球分画 (Lymph, Stab) on 4 pod (Postoperative Day) の位置情報によるファジィ推論と、(Lymph, Stab) from 1 pod to 4 pod の角度情報に基づく診断ロジックを提案し、良好な結果を得ることができることを示した。しかしながら、システムの診断結果を検討したところ、WBC(White Blood Cells) on 4 pod や CRP (C-Reactive Protein) on 4 pod の数値が顕著であるにも関わらず、"感染症発症" 有の症例に対して、"感染無" の結果を出力した。この状況を改善するために、提案する術後感染症診断システムでは、表 1 に示す 6 項目を用いた総合評価方法によるファジィロジックの再構築を行う。

表 1　総合評価方法による診断に用いた術後感染症観察項目

(i) 熱型パターン
(ii) 出血量
(iii) (Lymph, Stab) on 4 pod の位置情報
(iv) (Lymph, Stab) from 1 pod to 4 pod の角度
(v) CRP on 4 pod
(vi) WBC on 4 pod

3.1　白血球分画による感染度合

まず、従来の術後感染症早期発見システムで注目した、白血球分画 (Lymph, Stab) on 4 pod の位置情報による感染度合と、(Lymph, Stab) from 1 pod to 4 pod の角度情報による感染度合について述べる。

3.1.1　白血球分画 (Lymph, Stab) on 4 pod の位置情報による感染度合

白血球分画 (Lymph, Stab) on 4 pod に注目すると、Stab の全白血球数に占める割合 (%) が多ければ "感染有" の状態で、Stab の全白血球に占める割合が少なく、Lymph の割合が多ければ "感染無" の特徴が読みとれる。白血球分画 (Lymph, Stab) on 4 pod の白血球数に占める割合に対して "少"、"中"、"多" のラベル付けを行い、表 2 の Lymph, Stab の割合より感染度合 z_3 を求めるファジィ規則表を作成した。ファジィ推論は 2 入力 1 出力の簡略化推論法を使用する。表中の値は感染度合であり、1 に近づけば近づくほど "感染有" を意味し、0 に近づけば "感染無" を意味する。

表 2　Lymph, Stab より感染度合を求めるファジィ規則表

		Lymph (%)		
		多	中	少
Stab(%)	多	1	1	0.5
	中	0.7	0.7	0
	少	0.5	0.5	0

3.1.2　白血球分画 (Lymph, Stab) from 1 pod to 4 pod の角度情報による感染度合

白血球分画 (Lymph, Stab) from 1 pod to 4 pod の時系列変化に注目すると、"感染有" では 1 日目から 4 日目の変化が左上がりの上昇方向を、"感染無" では 1 日目から 4 日目の変化が右下がりの下降方向を示す。この特徴は、図 3 に示す角度 θ よって抽出でき、図 4 の角度 θ と感染度合 z_4 に関するファジィ規則を作成する。

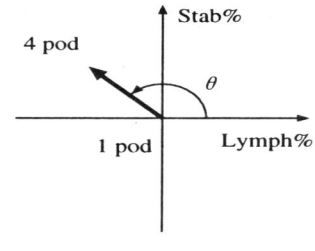


図 3　角度情報の抽出

3.2　熱型パターンによる感染度合

熱型パターンは手術後 2 日目から 4 日目の体温の動きを一つのパターンとしてとらえたもので、パターン

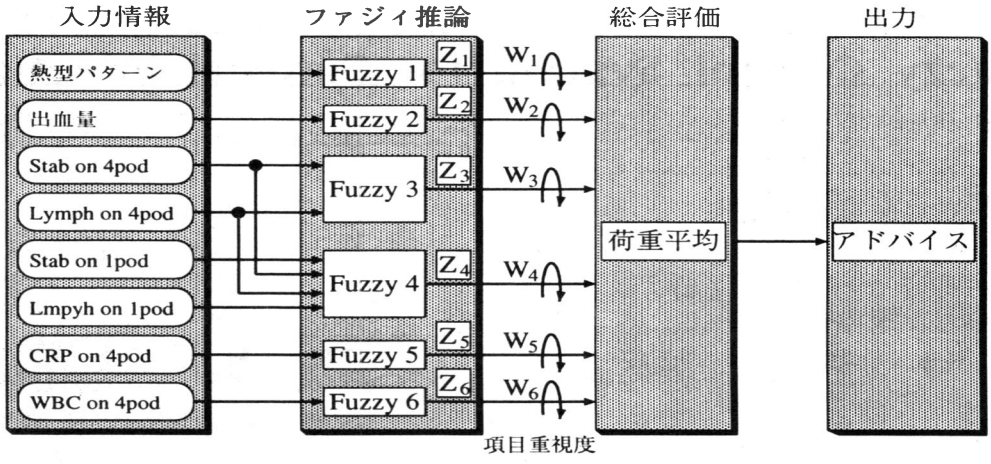


図 2　総合評価方法による感染症診断ロジック

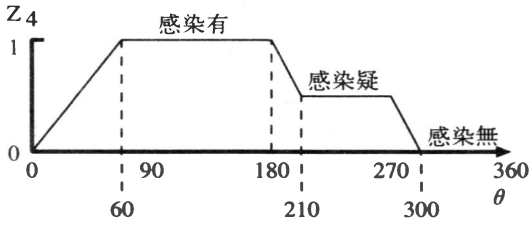


図 4　角度と感染度合の関係

により A, B, C, D, E の 5 つのカテゴリーに分類される。感染度合 z_1はそれぞれ 0.0, 0.2, 0.5, 0.9, 1.0 に対応している。

3.3　出血量などによる感染度合

出血量は医師の経験を基に “少”、“中”、“多” の 3 つのラベルをもつメンバーシップ関数で設定し、1 入力 1 出力の簡略化ファジィ推論を行う。ファジィ規則は

$$
\begin{array}{ll}
\text{規則 1：If 出血量 = 少} & \text{Then z=0} \\
\text{規則 2：If 出血量 = 中} & \text{Then z=0.5} \\
\text{規則 3：If 出血量 = 多} & \text{Then z=1} \qquad (2) \\
\text{事　実：　出血量 = 700} & \\
\hline
\text{結　論：} & z_2 = ????
\end{array}
$$

である。規則中の 0 は “感染無”、0.5 は “感染疑い”、1 は “感染有” に対応し、出血量による感染度合 z_2 は加重平均によって得られる。

同様にして、CRP on 4 pod、WBC on 4 pod の感染度合は z_5, z_6 として得られる。

3.4　項目重視度

項目重視度は一意的に決定できないため、医師の経験を基に表 3 の数値を採用した。

表 3　術後感染症における項目重視度 w_i

(1) 熱型パターン	1.3
(2) 出血量	0.5
(3) (Lymph, Stab) 位置情報	1.4
(4) (Lymph, Stab) 角度情報	1.0
(5) CRP on 4 pod	0.5
(6) WBC on 4 pod	0.3

4　総合評価による診断システム

従来の白血球分画 (Lymph, Stab) on 4 pod と新たに提案した多項目による総合評価方法の推論結果を図 6 に示す。データ数は 54 症例で、54 症例中 14 症例が “感染症発症” 有である。従来の位置情報からの感染度合では、“感染症発症” 有の場合は 0.4 から 1、“感染症発症” 無の場合は 0 から 0.8 に分布し、重なり合う部分にデータが多く存在する。今回の多項目による診断の場合は、“感染症発症” 有の場合は 0.5 から 0.9、“感染症発症” 無の場合 0.1 から 0.8 に分布するが、“感染症発症” 有の場合、感染度合が低かった領域の症例に対して改善がみられる。また、“感染症発症” 無の場合も、感染度合が高い症例が 4 症例あるが、その他の症例に対しては感染度合に大きな抑制の作用がみられる。

図 5 は、提案した診断ロジックを Symantec 社の Think C Ver 6.0.1 を用いて Apple Computer 社 Macintosh 上で実現したものである。この症例では、従来法による感染度合が 0.384 で “感染無” と誤判定されたが、本手法を用いることにより感染度合は 0.591 になり、感染疑いが強くなるといった改善が見られた。これは、熱型パターン “E”、出血量 “700”、CRP on 4 pod “15” が “感染有” の特徴を強く示しているためである。なお、図中の Conclusion 部の棒の位置が感染度合を表現し、高さが項目重視度を示す。

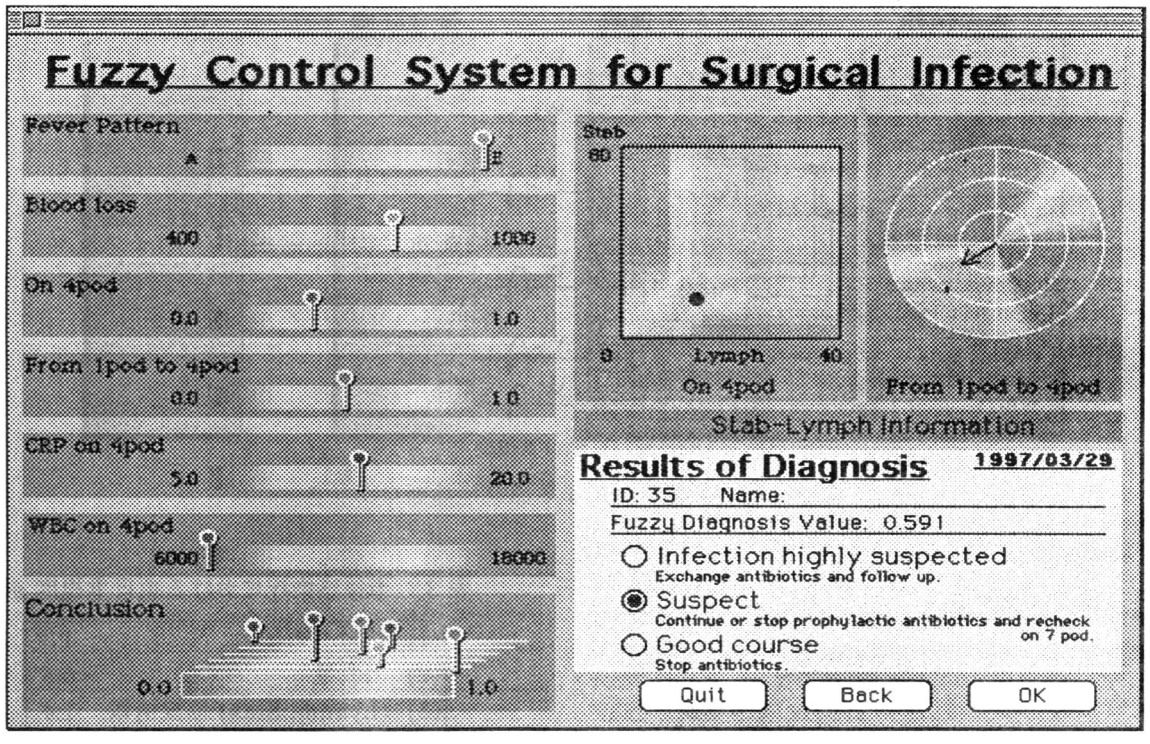


図 5　総合評価による診断システムの画面

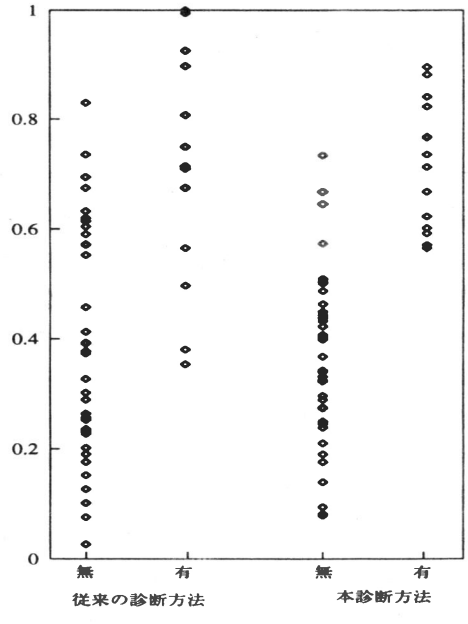


図 6　総合評価による診断結果

5　おわりに

多数の観察項目に対するファジィ推論法を用いた総合評価方法を提案し、術後感染症診断システムに応用することにより、医師が診断に必要とする項目を取り入れることが可能となった。診断結果の比較表より、“感染症発症” 有の症例に対して大きな改善がみられた。今後、システムのメンバーシップ関数・項目重視度の微調整を行った後、未知データでの検証や欠損値がある場合にどの程度の診断結果が得られるかを検討しなければならない。

参考文献

[1] 有田：メディカル・ファジィのはなし、日刊工業新聞社、1992

[2] 廣田・有田・坂口・馬庭・谷村・堀・水本・長澤・李：術後感染症におけるファジィ診断支援システムの構築、**第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集**、pp.657–658、1996

[3] 馬庭・坂口・谷村・有田・廣田・堀・長澤・李：外科術後感染症のファジィ診断システム、**第 9 回バイオメディカル・ファジィ・システム学会講演論文集**、pp.28–29、1996

[4] S. Arita, Y. Hori, H. Hirota, M. Mizumoto, Y. Maniwa, S. Sakaguchi, H. Tanimura, Z. Li, R. Nagasawa: Fuzzy Logic for the Diagnosis of Surgical Site Infection Based on Multiple Items and Time Series Data, **Proc. of IFSA '97**, (in Press)

連絡先：
〒 572 大阪府寝屋川市初町 18–8
大阪電気通信大学大学院工学研究科情報工学専攻
廣　田　博
Tel： 0720–20–4569　Fax： 0720–24–0014
E-mail：hirota@mzlab.osakac.ac.jp

WEE1-2

ファジィ推論を応用したCT画像診断支援システム
― 第4報：メンバーシップ関数の調整とシステムの再構築 ―

Diagnostic Supporting System for CT Scan Diagnosis using Fuzzy Inference
— Tuning of Membership Function and Reconstruction of the System —

○片山 佳之[1)] 細田 超[1)] 有田 清三郎[2)] 掘 義巳[3)]
○Yoshiyuki Katayama Masaru Hosoda Seizaburo Arita Yoshimi Hori

1)川崎医科大学 口腔外科学教室
Dept. of Oral Surgery, Kawasaki Medical School
2)関西医科大学 数学教室
Dept. of Mathematics, Kansai Medical University
3)川崎医療福祉大学 医療情報学科
Dept. of Medical Informatics, Kawasaki University of Medical Welfare

Abstract : Diagnosis with medical imaging such as CT scan essentially contains fuzziness because of subjective assessment of the findings by examiner. The subjective assessments have a possibility that may lead to different results in CT scan diagnosis, even if the same diagnostic criteria are used. We have developed a computer diagnostic supporting system using fuzzy inference, which allows objective assessment of cervical lymph nodes metastasis in head and neck cancer. We used six items as the degree of variation in CT findings of lymph nodes which were included ring enhancement, low density area, internal density, size, shape, and margin of lymph nodes. The input and output membership functions were prepared for each item and the final assessment was made by the center of gravity of the max-sets of the output membership function. Evaluation of the adequacy for this system was performed in 67 CT scans of cervical lymph nodes in head and neck cancer patients by three examiners with different clinical experience. The diagnostic accuracy of this system was approximately 90% for every examiner. This diagnostic supporting system appears to be beneficial for diagnosis of cervical lymph node metastasis by CT scan, however there was 4 false-negative cases in 67 cases. Therefore this system was tuned up a membership function, and the possibility for a clinical use was evaluated..

1. はじめに

頭頚部癌における頸部リンパ節転移は手術法の選択，患者の予後などを左右し早期にかつ正確に診断することが臨床上重要で，これに対しCT画像診断は有用な診断法の一つである．

しかし造影CT画像診断において転移の特徴画像に乏しいリンパ節所見にも遭遇し，その診断に苦慮することもあり，また画像診断の各観察項目の所見評価やそれを統合した診断過程は検者の主観に大きく左右されファジィ性が存在する．

われわれはこのようなCT画像の特徴と検者の主観的評価を生かした診断ロジックを構築し，頸部リンパ節転移のCT画像診断にファジィ推論を応用した画像診断支援システムを作製し良好な結果を得た．これまでにシステムの概要，診断精度などをバイオメディカル・ファジィ・システム学会などで報告［1,2］し，本稿ではこれまでの診断精度の評価，誤診例の検討結果より，各観察項目の整理と再評価およびメンバーシップ関数の調整を行い，ファジィ診断支援システムの安定化を図るため，システムの再構築を行ったので報告する．

2. CT診断支援システムについて

2.1 対象と方法

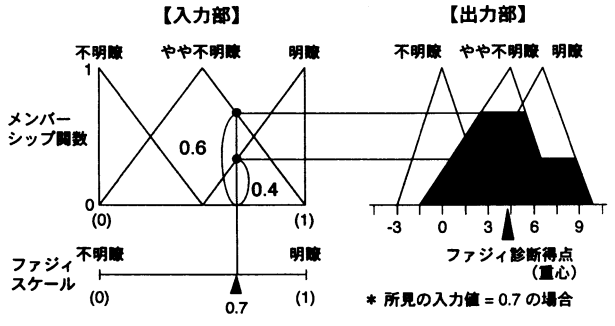
対象は頭頸部扁平上皮癌症例で，術前に頸部造影CT検査を施行し頸部リンパ節が認められ，その後頸部郭清術を行い病理組織学的にリンパ節転移の有無が確定したもので，1症例中のCT画像に描出された最大径のリンパ節を選択し，その部位，大きさが手術所見と一致したものを用いた．

リンパ節はファジィ診断支援システムの構築に24例（転移14例，非転移10例），さらにシステムの調整と検証に43例（転移26例，非転移17例）の計67例を用いた．

CT画像上のリンパ節の観察項目は辺縁増強，内部密度の低下（低濃度域），内部性状，大きさ，形状，境界の6項目を設定し，各観察項目の評価の計量化をファジイスケールを用いて行った．各観察項目の所見を3～4のカテゴリーに分類し，これを基に入力メンバーシップ関数を作成した．一方，症例の評価所見を多変量解析数量化Ⅱ類で解析し，各項目の診断に対する重要性を求め，

1項目または複数項目を組み合わせてIF THENルールによる出力メンバーシップ関数を作成した．さらにリンパ節の病理組織診断結果と照合し，各項目の出力メンバーシップ関数の調整を行った．

ファジィ推論方式は各項目の出力メンバーシップ関数の和集合による判定方式（診断システム1）と特定項目の相乗効果による発火診断方式（診断システム2）の2つの方式を設定した．最終判定は2つの診断システムの出力メンバーシップ関数のmax集合の重心を求め総合診断得点とし，転移か非転移かの判定を行った（図1）．診断基準値は1.8以上を転移陽性，1.4以下を転移陰性，その間を判定保留（ファジィゾーン）として設定した．



（図1：入力および出力メンバーシップ関数）

2.2 結果

前述のごとく画像の所見評価は検者の主観に左右され，同一のCT画像においても検者により所見評価は異なる．また経験の差によっても各々の観察項目の診断への重み付けやその印象は異なるため，臨床経験年数の異なる複数の検者にて所見入力，評価を行い，システムの妥当性について検討した．先ず67例のリンパ節のCT画像を，それぞれ臨床経験年数の異なる3名の検者によって読影し，画像そのものからの印象で各症例のリンパ節転移の有無を診断しこれを経験診断とした．次いでこれらの読影結果を前述したファジィスケールで示された入力チャートに各観察項目ごとに記入し，これをコンピュータ上の診断支援システムにマウスキー入力しファジィ診断得点を得た．

3名の検者の経験診断における診断成績は，正診率では差はなかったが，感度，特異性では検者の主観に左右さればらつきを認め経験診断の不安定性が示された．ファジィ診断成績（表1）は，感度，特異性，正診率のいずれも約90％と良好な成績を得，経験年数の異なる複数の検者においても安定した結果を示し，システムの設定は妥当であると考えられた．ファジィ診断においても，特異性は検者によって若干の偏りが認められたが，転移陰性症例は特徴的な所見に乏しいリンパ節が多く，判定保留のファジィゾーンに含まれた症例が多かったことと，検者のリンパ節転移に対する主観的評価の差が現われていると推測された．

	sensitivity		specificity		accuracy	
	経験診断	ファジィ診断	経験診断	ファジィ診断	経験診断	ファジィ診断
検者1	77.5	90.0	70.3	92.6	74.6	91.0
検者2	82.5	92.5	92.6	88.9	77.6	91.0
検者3	85.0	92.5	66.7	85.2	77.6	89.6

(%)

（表1：3名の検者の経験診断と本システムによる診断結果）

3．考察

これまでの診断支援システムにおいても前述したとおり良好な診断精度を得ているが，偽陰性および誤診例も認めており，これらの検討の結果，

1）CT画像上で頸部リンパ節転移を強く示唆するring enhancement（辺縁増強像），low density area（内部低濃度域）の観察項目が総合評価，最終診断結果を大きく左右しており，これらの項目のメンバーシップ関数の設定，項目としての取扱いを再検討する必要がある．

2）比較的均一，充実性のリンパ節が偽陰性の症例の大部分を占め，これに対し内部性状，内部濃度の項目の診断への寄与を再検討する．

3）リンパ節の大きさ，存在部位は観察項目に含んでいなかったが，症例の蓄積に伴い，両者の関連も観察項目として評価できると考えられる，といった若干の知見を得た．

これらを基に今回さらにメンバーシップ関数の調整，システムの再構築を行い，新たに作製した診断支援システムの概容および診断結果などについて報告する予定である．

参考文献

［1］片山佳之,細田　超,有田清三郎,堀　義巳,福田道男：ファジィ理論を応用した頸部リンパ節転移CT画像診断のコンピューター診断支援システム，第6回バイオメディカル・ファジィ・システム研究会年次大会講演論文集，pp.115-124，1993

［2］細田　超,片山佳之,有田清三郎,堀　義巳,福田道男:CT画像による頸部リンパ節転移診断へのファジィ推論の応用，Biomedical Fuzzy and Human Sciences，Vol.1，No.1，pp.49-56，1995.

連絡先：〒701-01　岡山県倉敷市松島577
川崎医科大学口腔外科学教室　片山佳之
TEL：086-462-1111
FAX：086-462-1199
E-mail：katayama@med.kawasaki-m.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEE1-3

ファジィ推論を用いた診断支援システム

～2群鑑別システムの構築法～

A Method of constructing a fuzzy diagnostic support system for two-group differentiation

斎藤 恵一* 内山 明彦**

Keiichi SAITO, Akihiko UCHIYAMA

＊早稲田大学人間総合研究センター，＊＊早稲田大学理工学部

*Advanced Research Center for Human Science, Waseda University

**School of Science and Engineering, Waseda University

This paper introduces an acquisition method of consequent clause membership functions in a fuzzy diagnostic system for two-group differentiation. In fuzzy diagnostic systems, the expert knowledge is represented by fuzzy if-then rules. However, the membership function acquisition in the fuzzy if-then rule is time consuming owing to less information about the weight of each clinical diagnostic rule. This method calculates the relative positions and widths of consequent clause membership functions using the possibility of fuzzy events and the information content of fuzzy sets in antecedent clauses. Furthermore, the membership functions are detected by optimization using learning data. To evaluate the performance of our method, we have applied it on Fisher's iris data. As a result, the accuracy is from 96% to 100%.

1. はじめに

ファジィ診断システムを構築するために，医学的知識をファジィ IF～THEN ルール（以下ルールと略す）に書き換える必要がある．診断システム内のルールは，ファジィ集合で表現されていることから，これらのファジィ集合を決定することでルールを生成することができる．ここでは，ルール生成問題とはルール内のファジィ集合を決定する問題と考える．ところでファジィ集合はメンバシップ関数によって特徴づけられるので，結局ルール生成問題は，各ファジィ集合を特徴づけるメンバシップ関数を決定する問題となる．

2. 二群鑑別ファジィシステム

ここで述べるファジィ診断支援システムは，あるサンプルが状態S_1であるか状態S_2であるかを決定する際に，サンプルの持つ情報を使ってファジィ推論を行い，サンプルが状態S_1である可能性を提示することで，診断の支援を行うシステムである．このシステムはn入力1出力であり，出力は診断したいサンプルが状態S_1である可能性である．

本システムで使用するルールの形式は，

IF x is A THEN y is B … (1)

とする．ここでA，Bはファジィ集合である．

ファジィシステムではファジィ推論により結果を導く．いま，式（1）のルールとx is A′という事実からファジィ推論によりy is B′という結果が得られたとする．ただし，A,A′は全体集合U上のファジィ集合，B,B′は全体集合V上のファジィ集合である．

ファジィ推論により得られたファジィ集合B′の重心をサンプルの評価点とし，評価点に対するS_1の可能性分布を，

$$\pi(y)=\begin{cases}0 & \text{for } y<G_2\\ \dfrac{y-G_2}{G_1-G_2} & \text{for } G_2\le y\le G_1\\ 1 & \text{for } G_1<y\end{cases} \quad \cdots (2)$$

とする．ただし，G_1，G_2はそれぞれ状態S_1であるサンプル群と状態S_2であるサンプル群の評価点の平均値である．

また$G_2\le G_1$が成り立つものとする．システムの出力であるサンプルC_jが状態S_1である可能性は，

$$poss\left(G_j\middle|S_1,C_j\right)=\max_{y\in V}\left(\min\left(\pi(y),\chi_j(y)\right)\right) \quad \cdots (3)$$

により計算される．ここでG_jはサンプルC_jの評価点，Vは後件部の全体集合である．また，

$$\chi_j(y)=\begin{cases}1 & \text{for } y=G_j\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases} \quad \cdots (4)$$

である．

3. メンバシップ関数の型

ルールの前件部と後件部を分けて考える．ルールを用いた診断システムの場合，前件部のファジィ集合を特徴づけるメンバシップ関数は後件部のメンバシップ関数に比較して決定がしやすい場合が多い．なぜなら前件部のファジィ集合は入力項目ごとにそれぞれ異なった全体集合上の部分集合であり，メンバシップ関数決定のための知識が得られている場合が多いからである．そこで前件部のメンバシップ関数は診断知識に基づきエキスパートが決定するものとする．

次に後件部のファジィ集合を特徴づけるメンバシップ関数を決定することを考える．ルールでは，診断に対する各ルールの重みを後件部のメンバシップ関数に反映させている．そのため，前件部のメンバシップ関数に比べ後件部のメンバシップ関数を決定することは手数を要する．なぜなら後件部のファジィ集合は同一の全体集合上に定義しなければならず，さらに診断に対する各ルールの重みは，普通知識として準備されてはいないからである．

決定すべき後件部のメンバシップ関数は，単調性とメンバシップ値が0あるいは1に等しい部分がどこに位置しているかが重要である．そこで，決定すべき後件部のファジィ集合を正規かつ凸であるとする．さらに，このファジィ集合を特徴づけるメンバシップ関数は，位置（中心値）と幅の二つのパラメータを持つ対称型の関数とする．

4. メンバシップ関数のパラメータ

一つの後件部メンバシップ関数が二つのパラメータを持つことから，N個のルールがある場合2N個のパラメータを決定しなければならない．もしNが大きくなると各メンバシップ関数を決定する労力は飛躍的に増大する．そこで決定すべきパラメータの数を減らすことを考える．ここでは，前件部のファジィ事象の生起確率とファジィ集合の情報量を使って，ルールの数によらずパラメータの数を2つに減らす方法について説明する．さらに学習データを用いて2つのパラメータの最適値を求め，後件部メンバシップ関数を決定する方法についても述べる．

つぎに，後件部メンバシップ関数の位置パラメータの表現方法について述べる．いま前件部のファジィ事象（集合）Aの生起する確率が，状態S_1のとき高く，状態S_2のとき低いとする．可能性／確率調和原理より，このファジィ事象Aが生起する可能性はS_1では高いことがいえる．さらにこの「可能性」を事象を起こさせる「能力」と解釈すると，S_1はこのファジィ事象Aを生起させる能力が高いということがいえる．ここで，このファジィ事象Aが生起したとすると，このファジィ事象Aを生起させた状態はS_1である可能性が高いということがいえる．

一方，式（2），（3）より，あるサンプルが状態S_1である可能性が高いときその評価点は高い値をとる．ということはファジィ事象Aを生起させたサンプルの評価点は高い値であるといえる．

さらに非ファジィ化に重心法を用いていることから次のことがいえる．ファジィ事象Aが生起したとき，そのファジィ事象を生起させたサンプルの評価点が高いということは，Aに対応する後件部のファジィ集合Bを特徴づけるメンバシップ関数の位置パラメータの値が大きいことを意味する．

以上から後件部のメンバシップ関数の位置パラメータについて次のことがいえる．前件部のファジィ事象Aの確率が，S_1で高くS_2で低いとき，Aに対応する後件部のファジィ集合Bを特徴づけるメンバシップ関数の位置パラメータは大きい値となる．同様にして，前件部のファジィ事象Aの確率が，S_1で低く，S_2で高いとき，Aに対応する後件部のファジィ集合を特徴づけるメンバシップ関数の位置パラメータは小さい値となる．

いま，ファジィ事象AのS_1，S_2についての確率を$P(A|S_1)$，$P(A|S_2)$としたとき，式（2）で述べたように$G_2 \le G_1$を仮定してファジィ鑑別指標（ＦＤＩ：Fuzzy Discriminant Index）を以下のように定義する．

$$FDI(A|S_1 - S_2) = P(A|S_1) - P(A|S_2) \quad \cdots (5)$$

このＦＤＩは区間［－1，1］内の値をとり，ファジィ事象Aの確率が，S_1で高くS_2で低いとき大きな値をとり，ファジィ事象Aの確率が，S_1で低くS_2で高いとき小さな値となる．そこでこのＦＤＩを用いて後件部メンバシップ関数Bの位置$k(B)$を以下のように定義する．

$$k(B) = sr \cdot FDI(A|S_1 - S_2) \quad \cdots (6)$$

ここで，srは正数である．

つぎに，後件部メンバシップ関数の幅のパラメータの表現方法について述べる．ここで前件部のメンバシップ関数の情報量が多ければ，対応する後件部のメンバシップ関数の推論結果に及ぼす影響力を大きくするという考え方は自然である．非ファジィ化に重心法を用いる場合，推論結果に及ぼす影響力はメンバシップ関数の面積が大きいほど大きくなる．本システムでは後件部のメンバシップ関数の高さはすべて1である．ということは後件部メンバシップ関数の幅を広くすることで，推論結果に与える影響を大きくすることができる．

ファジィ集合の持つ情報量を求める方法の一つにYagerが提唱したSpecificity[1]（以下Ｓｐと略す）がある．

Ｓｐはファジィ集合の情報量が多いほどその値は大きくなる．そこで前件部メンバシップ関数のＳｐを用いて，

後件部メンバシップ関数の幅を以下のように定義する．前件部メンバシップ関数Aに対応する後件部メンバシップ関数Bの幅のパラメータを$d(B)$とすると，

$$d(B) = wd \cdot Sp(A) \qquad \cdots (7)$$

ここでwdは正数である．

5. メンバシップ関数の最適化

つぎに，メンバシップ関数の位置と幅を決定するために，パラメータsrとwdの最適値を求める方法について述べる．sr，wdを決定するためには何らかの評価基準が必要となる．ここでは診断能が高いほど良いシステムであると考える．そこで診断能の指標の一つである正診率を評価基準として採用する．すなわち後件部のメンバシップ関数を決定することは，正診率が最も高くなるsr，wdを決定する問題に帰着する．

いまsr，wdを適当な値に設定すると，後件部のメンバシップ関数が決定され，ルールが生成される．このルールを用いて推論された学習データのうち状態がS_1であるサンプル群とS_2であるサンプル群の評価点の平均値と分散をそれぞれG_1，σ_1^2，G_2，σ_2^2とする．ただし$G_2 \leq G_1$が成り立つものとする．ここで新しい症例C_{new}の評価点をG_{new}としたとき以下のような判別をおこなう．

もし$G_{th} \leq G_{new}$ならばG_{new}はS_1である．

もし$G_{new} < G_{th}$ならばG_{new}はS_2である．

ここでG_{th}は

$$G_{th} = \frac{G_1\sigma_2 + G_2\sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2} \qquad \cdots (8)$$

より求められる境界値とする．

この判別方式により全学習データの判別をおこない正診率を求めることができる．これをsr，wdの探索範囲内の全組み合わせについておこない正診率を最大にするsrとwdの組を最適解として採用しルールを決定する．

さらに二次的な評価基準として以下の式を採用する．

$$D(sr, wd) = \left| \frac{G_1 - G_2}{sr} \right| \qquad \cdots (9)$$

これは鑑別すべき2群の平均値の間の標準化された距離である．正診率を最大にするsrとwdの組が複数あった場合，それらの組の中から式（9）を最大にするsrとwdを最適解とする．

6. 実験

Iris[2]を用いて提案した手法の学習能力を検討した．学習データである*Iris*属のIris setosa, Iris versicolor, Iris virginicaの3群から2群を選びそれぞれ鑑別を行った．各群の個体数は５０である．入力項目はがくの長さ（SL），がくの幅（SW），花弁の長さ（PL），花弁の幅（PW）の4項目である．各入力項目の値は，それぞれの最大値と最小値で規格化し，0～10の11段階とした．前件部のファジィ集合は全入力項目で「長い」，「短い」の2種類とした．以下にそのメンバシップ関数を示す．

$$\mu_{[long]}(z) = \frac{z}{10} \qquad \cdots (10)$$

$$\mu_{[short]}(z) = \frac{10 - z}{10} \qquad \cdots (11)$$

ただし，zは区間[0,10]内の整数である．

また，後件部のファジィ集合Bを特徴づけるメンバシップ関数は次式で示す三角形とした．

$$\mu_B(y) = \max\left[0, \frac{1}{d(B)}\left(-|y - k(B)| + d(B)\right)\right] \qquad \cdots (12)$$

ここで，$k(B)$および$d(B)$は式（6），（7）により計算される．

srとwdは以下の範囲と刻み幅とした．

$0.5 \leqq sr \leqq 8.0$ (0.5step)

$0.4 \leqq wd \leqq 8.0$ (0.4step)

以上の条件のもとに，学習させた結果を表１～３に示す．

表１：本手法による学習結果

真の群	判別された群	
	setosa	*versicolor*
setosa	50	0
versicolor	0	50

表２：本手法による学習結果

真の群	判別された群	
	setosa	*virginica*
setosa	50	0
virginica	0	50

表３：本手法による学習結果

真の群	判別された群	
	versicolor	*virginica*
versicolor	４８	2
virginica	2	４８

*Iris setosa*と*Iris versicolor*および*Iris setosa*と*Iris virginica*の各組み合わせでは的中率は１００％，

*Iris versicolor, Iris virginica*では９６％と良好な学習結果がえられた.

7. むすび

システム内のルールの数がいくら増えても，調整すべきパラメータが２つですむ，前件部のファジィ事象の生起確率とファジィ集合の情報量から，後件部のファジィ集合の相対的な位置と幅を求め，さらに学習データによりメンバシップ関数を最適化する方法を示した．また，*Iris* データを用いて本法の学習能力が良好であることを示した．今回示した手法を用いた診断システムは，いくつか報告[3]~[8]してきたが，今後の課題として，前件部メンバシップ関数の最適化[9]の検討，診断に有効なルールの選択方法および多群鑑別[10]への拡張などがあげられる．

参考文献

[1]R.R.Yager, “Expert systems using fuzzy logic”, in: R.R.Yager and L.A.Zadeh, Ed., An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems (Kluwer Academic Publishers) 27-44, 1992.

[2]R.A.Fisher, “The use of multiple measurements in taxonomic problems” Annals of Eugenics, Vol.7, pp.179-188, 1936.

[3]K.Saito, H.Hashimoto, et al., “Differential Diagnosis of Gastric Cancer and Gastric Ulcer Using a Fuzzy Inference”, Proc. of Int.. Congress of Biomedical Fuzzy Systems, pp.51-52, 1991.

[4]橋本，斎藤，他，“ファジー理論を用いた内視鏡診断”，Gastro. Endosc., 35, 7, 1992.

[5]田坂，斎藤，他，“ファジィ理論を用いた陥凹型胃癌の内視鏡診断支援システムの開発”，第32回ＭＥ学会，1-4-74, 1993.

[6]藤波，斎藤，他，“超音波画像を用いたファジィ理論による脂肪肝の自動診断支援の試み”，第２５回画像工学コンファレンス，9-2, 1994.

[7]斎藤，橋本，他，“ファジィ理論を用いた生化学データによる脂肪肝診断支援”，電学誌，Vol.115-C, No1, pp127-132, 1995.

[8]藤波，斎藤，他，“超音波画像を用いたファジィ理論による脂肪肝診断支援”，電学誌，Vol.115-C, No12, pp1432-1437, 1995.

[9]斎藤，大野，他，“ＧＡ学習機能を付加したファジィ診断支援システムに関する研究”，第35回ＭＥ学会，157, 1996.

[10]加藤，斎藤，他，“ファジィ理論を用いた診断支援システム～多群鑑別システムの構築～”，BMFSA 第９回年次大会論文集，pp104-105, 1996.

問い合わせ先：

〒１６９　東京都新宿区大久保3-4-1

早稲田大学理工学部　55N-6-10

人間総合研究センター　斎藤恵一

TEL：　０３－５２８６－３３８２

FAX：　０３－３２００－７０９４

E-mail：saito@uchiyama.comm.waseda.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEE2-1

動物ロボットの主観と行動の設計
— 視覚センサを用いた追跡行動実験 —

Autonomous Robot Behavior Design with Use of A Model of A Subjective Field for Imitating Animal Behavior
— Pursuit Action Experiment with Vision Sensor —

久保 公彦, 喜多村 直
Kimihiko Kubo, Tadashi Kitamura

九州工業大学大学院 情報工学研究科
College of Computer Science and System Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract- This paper describes behavior design of an autonomous robot with use of a model of the subjective field. This model is based on an idea that consciousness appears when an intentional behavior is inhibited. We transplanted this model on two autonomous robots with a line camera and realized autonomous behaviors, such as pursuit and ambush.

1．はじめに

動物のもつ重要な機能の１つに，環境の変化に適応できる能力がある．これまでに著者らは，この能力を模倣した自律ロボットの行動設計を行ってきた．ベトナムの哲学者チャン・デュク・タオが現象学的に構想した動物の意識と行動の発現機構モデル[1]を基に意識と行動の階層構造モデルを構築し，ロボット行動を制御するソフトウェアアーキテクチャを開発した．これはロボットの意識と行動を階層的に関係づけたもので，意識アーキテクチャと呼ぶ．本研究では，ラインカメラと呼ばれる濃淡値を検出する視覚センサを搭載した２台の小型ロボット（Himiko と Takeru と呼ぶ）に意識アーキテクチャを適用し，行動実験として「追いかけっこ」を実施した．追いかける側のロボット（Himiko）について，視界内の環境の空間的関係の認識を行い，対象物の記憶や環境を利用した待ち伏せなどの自律行動の実現を行ったので報告する．

2．「意識と行動」の発現機構モデル

チャン・デュク・タオは「意識とは抑制された行動の意味である」という基本認識に立って，動物の系統発生と人間の個体発生に沿った，動物行動とそれに対応する意識の階層構造モデルを提案した[2]．これから自律ロボットに応用する部分を抽出し（哺乳動物まで），著者らが補足事項を書き加えたものを Table 1 に示す[2][3][4][5]．

レベルと系統発生及び人間の個体発生との関係は，レベル０は原生動物と誕生したばかりの人間，レベル１は腔腸動物と誕生したばかりの人間，レベル２はみみずと生後１ヶ月の人間，レベル３は魚と生後５ヶ月の人間，レベル４は哺乳動物と生後９ヶ月の人間，レベル５は低級猿類と生後１２ヶ月の人間にそれぞれ対応する．この表では右欄の行動が抑制されると，一つ上のレベルの意識が現れ，そのレベルに対応した行動を実施するといった関係にある．一方，動物がある行動をしているときにはその行動そのものに関する意識は消失していると考える[2]．

Table 1 「意識と行動」の発現機構モデル

	意識野	行動のカテゴリー
5	対象の時間・空間関係	環境，地形，介在物の利用
4	対象物の安定した知覚と持続する安定した感情	迂回，探索，ねらい，構え，手足の操作，追跡
3	眼前の対象物の幻影と快，喜怒哀楽，恐怖，怒りなどの一時的感情	把捉，接近，攻撃，回避，逃走
2	好悪の価値づけられた感覚野	身体，手足の定位移動
1	好悪の原始感覚	反射的転位，反射的方向転換，食餌
0	覚醒時の基底意識	生存の基礎反応

3．意識アーキテクチャ

意識アーキテクチャとは，このチャンの意識と行動のモデルを発展させたもので，ロボットとは素材・機構において異なる動物の意識過程の模倣物を，計算機で実現するためにソフトウェアで構築した固定的枠組みのことであり，ロボットと動物行動を関連づけるインターフェースとしての役割を果たす．

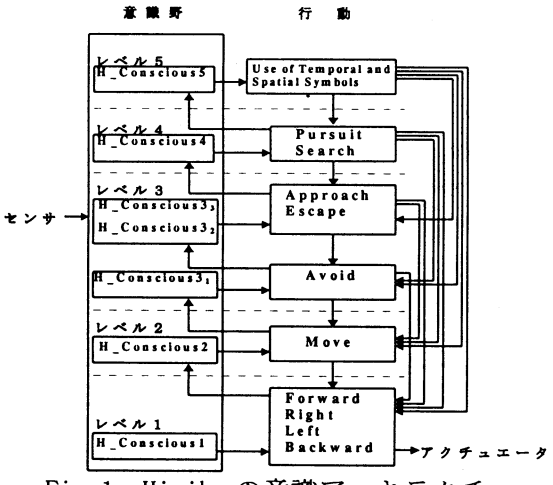


Fig. 1　Himiko の意識アーキテクチャ

Fig. 1[5]は本実験でスイス製の小型ロボット Khepera に適用した，意識アーキテクチャである（Himiko 側）．意識と行動の両方とも階層構造を持っており，あるレベルの行動が何らかの理由で抑制されたとき，上位のレベルの意識（意味）が意識野に描かれる．この意識野に基づいて，一つ上のレベルの行動が行われる．つまり，センサの情報や抑制された行動から意識野を形成し，その意識野に基づいてそのレベルの行動が選択される．また上位の行動からは，それより下位のすべての行動を呼び出すことができる．

Khepera は赤外線センサ８つと DC モータ２つ，視覚センサとしてラインカメラを装備している．赤外線センサにより３[cm]以内の障害物の有無と，ラインカメラにより４０[cm]以内の対象物を認識できる．また２つの DC モータにより前後移動や方向転換を行うことができる．意識アーキテクチャによって生成された意識を，Himiko を制御するパソコンのディスプレイに表示した．この画面は Fig. 2 に示すもので，これを意識野画面と呼ぶ．

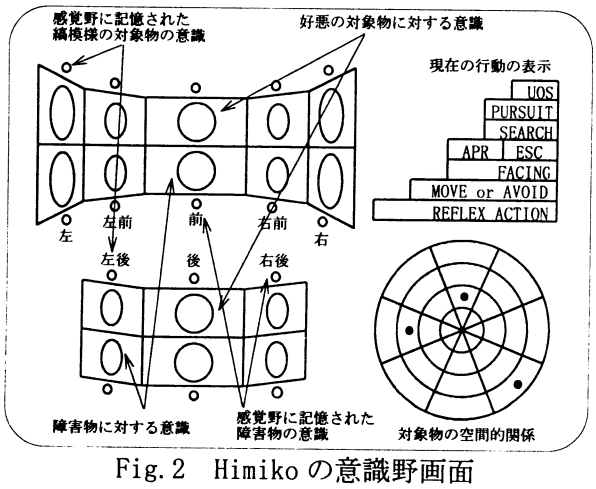


Fig. 2　Himiko の意識野画面

４．対象物の空間的関係（Conscious5）の認識について

Fig. 3 は自分（Himiko）を中心とした対象物との空間的関係（Conscious5）を表す座標系である．以下に示すように Himiko を中心として，方向（８方向）と距離（４段階）の情報を伴った知覚が座標系に表される．ここで Conscious5 はレベル５の行動を駆動する意識であるが，Table 1 ではレベル５の行動として環境，地形，介在物の利用などがある．本論文においてはレベル５の行動のうち，環境内の空間的関係の情報を利用して介在物である障害物を待ち伏せ行動に利用するような自律行動の実現を目的としている．

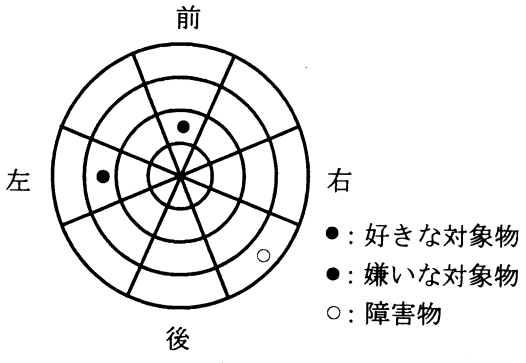


Fig. 3　対象物の現実的関係

５．小型ロボット Khepera について

Fig. 4 は，本研究で用いた小型ロボット Khepera の上面図である．機体の周囲に赤外線センサ８つと，DC サーボモータを２つ装備している．また，今回の実験において Khepera の視覚センサとして用いたラインカメラの外観を Fig. 5 に示す．

Khepera は上記の赤外線センサにより 3[cm]以内の対象物の有無と，ラインカメラにより 40[cm]以内の対象物の有無を認識することができる．

また，Himiko と Takeru はそれぞれ以下に示す Table 2 のように，ラインカメラを使って 40[cm]以内の対象物を認識する．

Table 2　ラインカメラを用いた Himiko と Takeru の知覚機能

	Himiko	Takeru
黒色の対象物	好き (Takeru)	嫌い (Himiko)
縞模様の対象物	嫌い	好き (巣穴)
橙色の対象物	障害物	障害物

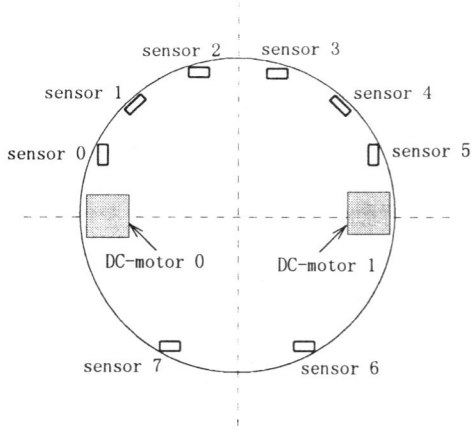


Fig. 4　赤外線センサと DC サーボモータ

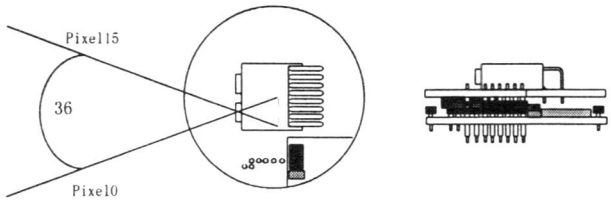


Fig. 5　ラインカメラの外観

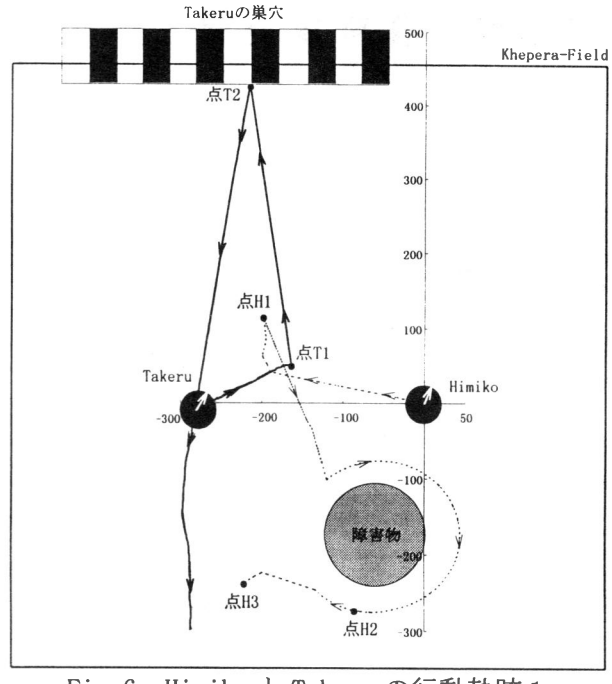


Fig. 6　Himiko と Takeru の行動軌跡 1

6．２台の Khepera を用いた行動実験

意識アーキテクチャを適用した２台の Khepera, Himiko と Takeru を用いて行った行動実験の結果を Fig. 6, Fig. 8 に示し，その時の行動をそれぞれ Fig. 7, Fig. 9 に概説する．ここで，Himiko と Takeru のボディ側面部には黒色の布が取り付けられており，ラインカメラを使って互いに認識できる．Himiko と Takeru の行動特徴を Table 3 に示す．初期設定として，Himiko はレベル５まで，Takeru はレベル３までの行動をできることにし，Himiko と Takeru の運動能力（並進・回転運動の速度）は同じものとする．

Table 3　Himiko と Takeru の行動特徴の例

	Himiko（追いかける側）	Takeru（追われる側）
好きな対象	黒色の対象物	縞模様の対象物（巣）
嫌いな対象	縞模様の対象物	黒色の対象物
好きな対象に対する行動	接近	嫌いな対象物を認識した後，接近（巣に逃げる）
嫌いな対象に対する行動	一定距離以上は近づかない	逃走（好きな場所に接近）
その他	Takeruを捕まえることができなかったとき，Khepera-Field内の障害物に身を隠してTakeruを待ち伏せする	Himikoからの逃走に成功して巣に帰った後，ある時間が経過すると，Himikoの存在を忘れて再び巣から離れる

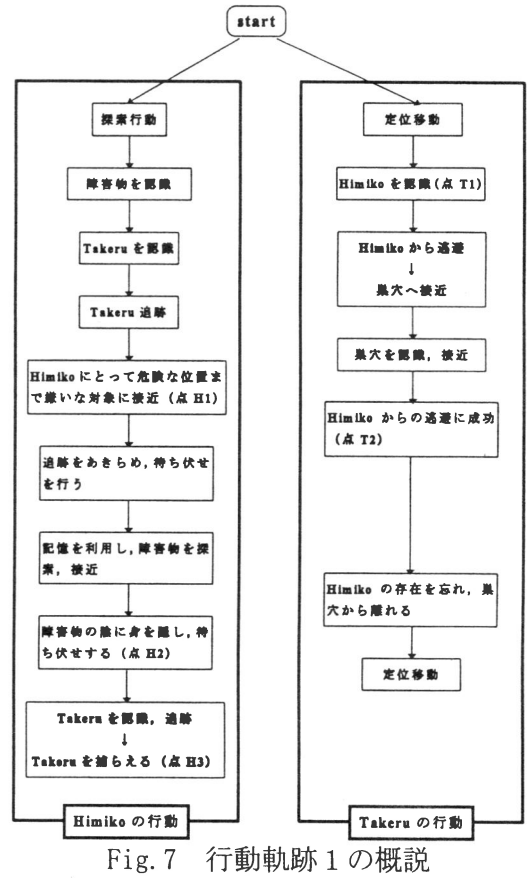


Fig. 7　行動軌跡 1 の概説

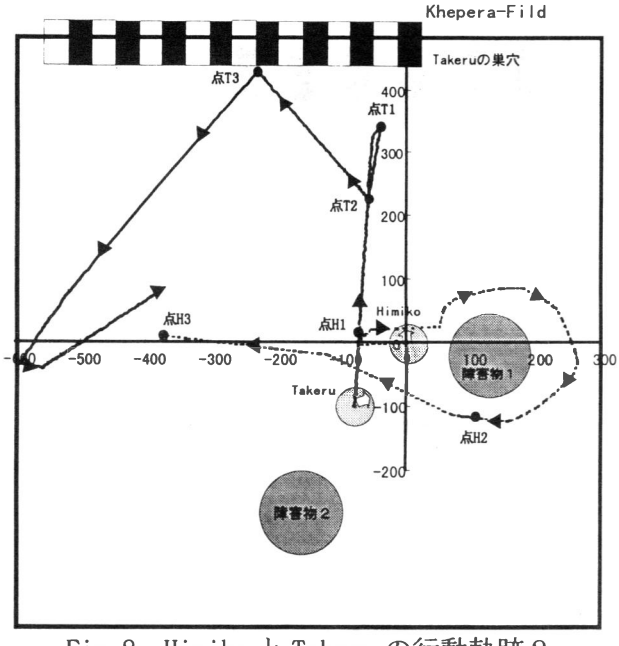


Fig.8　Himiko と Takeru の行動軌跡２

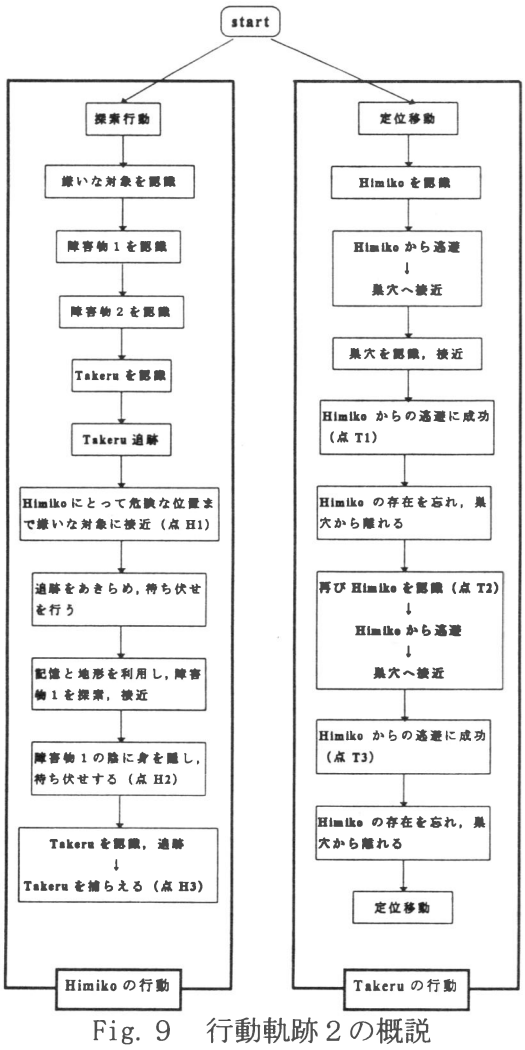


Fig. 9　行動軌跡２の概説

Himiko と Takeru を用いて行わせた，「追いかけっこ」の実験をビデオで見せる．

７．おわりに

チャン・デュク・タオの動物の意識と行動の階層構造モデルを発展させた意識アーキテクチャをロボットに適用し，動物行動を模倣した自律行動が可能であることが確かめられた．本実験では明白な学習アルゴリズムなどを用いないでレベル５までの行動が可能であることを示している．

次のステップでは，第一に行動選択の優先順位を定める評価関数の導入を目指す．これは，例えば，動物は空腹の時は少々の危険を冒しても獲物を追いかけるが，余り空腹でないときには獲物は追いかけず，危険を回避する．このように動物はその時の内部状態によって行動の優先順位が変動する．今後，このような動物の行動選択の優先順位の変動も模倣することが第一の目標である．次に Khepera にハンドモジュールであるグリッパーを搭載し，より上位のレベルの自律行動を実現する．

８．参考文献

[1] 市川浩：精神としての身体，剄草書房，1975
[2] チャン・デュク・タオ：現象学と弁証法的唯物論，合同出版，竹内訳，1989
[3] T. KITAMURA et at : Imitation of Animal Behavior with Use of a Model of Consciousness Behavior Relation for a Small Robot, PP. 313～317, IEEE RO-MAN, July, 1995, Tokyo
[4] 喜多村直，大塚泰司：意識野の生成モデルによる動物行動の模倣に関する基礎的考察，第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1995
[5] 大塚泰司，喜多村直，久保公彦：動物行動の模倣からのアプローチによる自律ロボット，第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1995

問い合わせ先

〒820　飯塚市大字川津 680 番 4
九州工業大学　情報工学部
機械システム工学科　喜多村研究室
E-Mail: kita@lonestar.mse.kyutech.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEE2-2

Theoretical approach to complex many-body systems

actin myosin system as an example

Masahiro Nakano [1] and Hiroyuki Matsuura [2]

[1] *University of Occupational and Environmental Health, Japan*
[2] *Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, Tokyo, Japan*

Abstract

We have been studying on a possibility of new micro and nano machines utilizing thermal fluctuation of water molecules in an open system since 1989. We propose a conceptual macroscale model named Stochastic Inclined Rods Model(SIRM). SIRM has many inclined rods stood out from its body like myosin, and it moves always forward to one direction whenever those rods are independently vibrating. Thus, SIRM can convert the thermal noise to the one directional motion by using stochastic resonance and inclined rods in the random open field. We estimate concretely the physical characteristics of SIRM as a conceptual model of the actin myosin system. If SIRM have the radius $r = 5$nm and mass 10^{-21}kg like the myosin molecule, the estimated frequency of the stochastic resonance is nearly phonon frequency 10^{11} rad/s. The amplitude of the stochastic resonance is 2×10^{-11} m. Moreover, physical work of this machine is about 10^{-18} joules, which is nearly equal to the energy of 1ATP hydrolysis, and the output is 10^{-10} N/head.

Recently many efforts have been paid to understanding of complex many-body systems. The complex systems do not have a regular structure so that it is very difficult to understand the property. The examples of complex systems are liquid, glass, amolphas, protein, economics, and the life itself. Here we study actin myosin system in muscle as an example of the complex systems. Especially we want to point out possibility that the myosin action system utilizes random noise around them for their movement.

The phenomenon in which noise enhances the responce of nonlinear system to a weak signal is called Stochastic Resonance(SR), and this phenomenon is shown to be important functionally in various systems. However, there has been no study which proposes the concrete physiological models of muscle based on the stochastic resonance. Since 1989, we have been studying on the possibility of new micro- and nano-machine using the thermal fluctuation of water molecules in open system, and we found the importance of utilizing the

stochastic resonance[1-4]. We named those machines which use the thermal fluctuation and the random noise as "stochastic machines". The stochastic machines should satisfy at least the following two conditions for machines to work; 1) existence of stochastic resonances and 2) existence of asymmetric structure. On the second condition, there are two ways for the machines to have the asymmetric structure a) outer type asymmetry: the asymmetric structure are in the surrounding system and b) inner type asymmetry. So far the asymmetric structure of outer type has been discussed in many models.

On the other hand, a new possibility of the model comes from the inner type asymmetry, where the asymmetry exists in the machine itself. We have recently proposed a new possible stochastic model, which is a kind of the inner type asymmetry. The model, we call "stochastic inclined rods model(SIRM)" is miming the actin myosin system of muscle, and has prefarable characteristics which we could never find in the privious models. The aim of this talk is to propose the new possible stochastic machine which we name Stochastic Inclined Rods Model(SIRM) miming actin myosin system of muscle.

SIRM has asymmetric structure of inner type. We show the conceptual figure of SIRM in Fig.1, and the macroscale model of the SIRM we made is shown in Fig.2. This macroscale SIRM has inclined steel rods stood out from its body like myosin of muscle, and moves always forward to one direction whenever macro random noise is given to it on a board. We analyze the motion of SIRM based on Langevin equation, which describes the motion of a kind of damped oscillator in the thermal fluctuation.

References

[1] Matsuura H, Fujimasa I, Nakano M, et al. Micromachine. Micromachine Society 7(1),54-126 (in Japanese) (1994).

[2] Matsuura H, Fujimasa I, Imachi K, et al. BME (suppl.) 30,155 (in Japanese) (1992).

[3] Matsuura H, Fujimasa I, and Nakano M. The International Journal of Artificial Organs (submitting), European Society for Artificial Organs. (1996).

[4] Matsuura H, Fujimasa I, Nakano M. Abs. of Meeting of Physical Society of Japan (suppl.), 786 (in Japanese) (1996).

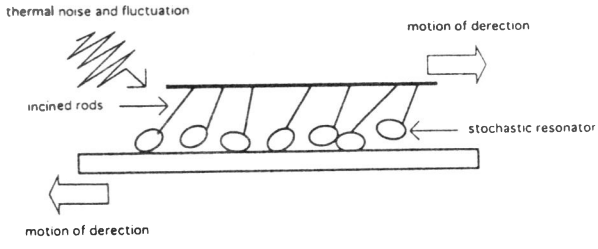


Fig.1 STOCHASTIC INCLINED RODS MODEL (SIRM)

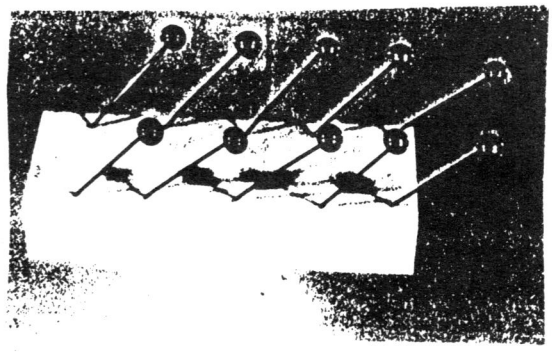


Fig.2. macroscale model of the SIRM

WEE2-3

周波数スペクトラムに基づく記号のコード化と記号粒子蓄積型ニューロンモデル

Symbolized Particle Store Type Neuron Model Based on the Coded Symbol by Frequency Spectrum

矢鳴虎夫

Torao Yanaru

九州工業大学・工学部・電気工学科

Dept. Electric Electronics and Computer Sciences,

Kyusyu Institute of Technology

Abstract: This paper proposes a new type of neuron model considering the background on chemical particle transmission in synaptic region, and the recent scientific knowledge that the several kinds of transmission particles have been discovered. The model has the following three major functions as an simplified analogy of real neuron activity in the synaptic region.: 1) Symbolized particles, each of which has identical mass as an analogy of chemical particles are defined, and also generation mechanism of the particles are defined related with the output spike sequence from the simulated axon. 2) Reaction for those of the simulated symbolized particles is defined by the analogy mechanism of deposition toward basement and accumulation on the basement in the defined vessel. 3)The accumulated symbolized particles cause strong effect on the generation of simulated post synaptic potential.

まえがき：ニューラルネットを用いた工学的応用がファジィ理論の工学的応用とあいまって，ここ数年の間に目覚しい進歩をとげた．一方において，脳神経科学の発達も長足のスピードで進歩しつつある．　特に脳神経系における最近のおおきな研究成果はシナプス部の構造の解明であろう．今までの神経回路モデルから飛躍して，新たな神経回路モデルを構築できる可能性を，これらの研究成果の中に観ることができる．

本研究は，シナプス部における化学伝達物質が最近脳神経生理学の分野で数多く見いだされたことと，それらの伝達物質の種類が，現在２５種類前後発見されている（実際は百十種類存在していると予想されている）ことを背景にシナプス部で行われている化学伝達物質の伝達機構を真似て；

1）ニューロンからの出力刺激パターン（そのスパイク列の周波数スペクトラムパターン）に関係して，質量を持つ数種類の記号粒子が生成される機構を構築する．

2）記号粒子系列の反応を簡単な沈殿による蓄積として定義する．

3）蓄積された記号粒子系列はシナプス後ポテンシャル（Simulated Post Synaptic Potential）に影響を与え，ひいてはニューロン出力のスパイク頻度もしくはスパイク列のパターンに影響を与える．

4）蓄積された記号粒子群の統計量をもって，記号粒子蓄積型ニューラルシステムの動作状態の記述情報としてもちいる．

このようなモデルを用いて，シナプス部に単なるスカラー量の重みだけで記憶と学習機能の実現をはかっている今日的ニューラルネットモデルを，今一歩だけ，現実のシナプス部の動作に近い機構を導入したモデルで，このモデルによって創りだされるであろう新たな現象を模索することは意義深い．

この意味で，本論文は，第１章で，モデルの基

本的考え方について，その目指すところを端的に理解されるよう図解によって説明し，第２章ではこの記号粒子蓄積型ニューロンの記号粒子生成の実例を単純な母音音声信号を用いた実験例を用いて示す

１．モデルの説明

図１は，X，Y および Z ニューロンによって構成される実際のニューロン回路（上図）と，各種の化学伝達物質が 生成され，後シナプスリセプタに受容されていることのイメージ図である．一方 図２はこれらの実際の神経系における化学伝達物質の生成を，「質量をもつ記号粒子生成である」という仮定のもとに，模擬シナプス器を通して結合のされる回路のイメージ図である．図３は 模擬シナプス器の中での記号粒子の生成のされ方を示している．実際の神経系のシナプス部における化学的伝達物質が，軸策からのスパイク列の刺激によってマイクロチューブに導かれ，そのノズルから放出される過程を模擬したものである．また生成される記号粒子の種類は，擬似軸策からの刺激信号の周波数スペクトラムパターンに依存することを示している．

図４は 周波数スペクトラムに基づく記号のコード化の定義の仕方を示している．つまり；

１）まず，周波数領域を台集合とする複数個のファジィ・メンバーシップ関数を用いて，「コード化のためのスペクトラム基底関数 (Spectrum Basis Function for Coding,SBFC) (単純に ベース関数 ということにする) を定義する．

２）記号粒子は，刺激信号の周波数パワースペクトラムとベース関数との共通面積比に依存して放出する．例えば，面積比が 80%以上であれば放出するというように．

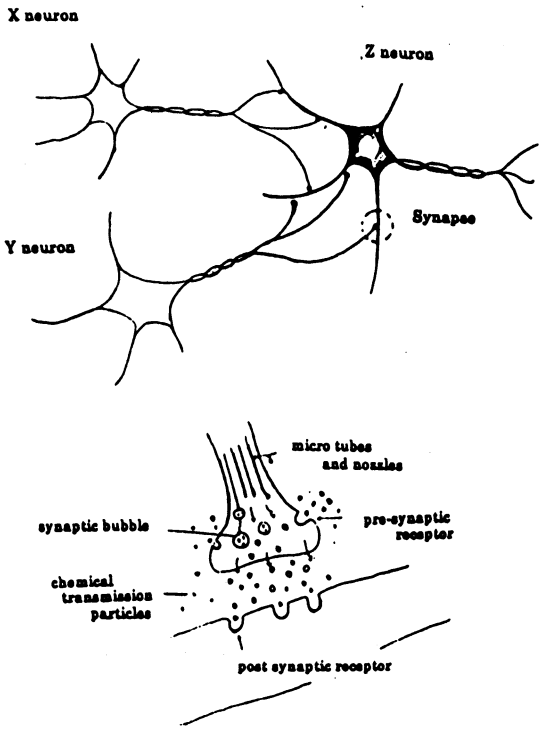


Fig.1 Neurons and Chemical Transmission Particles in Synaptic Region

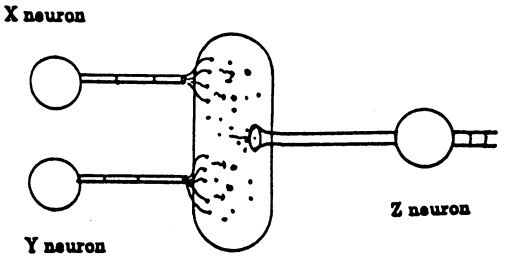


Fig.2 Image of Three Types of the Model Taking the Synaptic Particles Transmission into Consideration.

３）周波数パワースペクトラム S(ω)は，対応する刺激信号 s(t) [t,t+τ]の時間での逐次計算から得られる．このτの大きさは，入力信号の時系列の特徴（たとえば，自己相関関数の特徴）から自動的に割り出す．

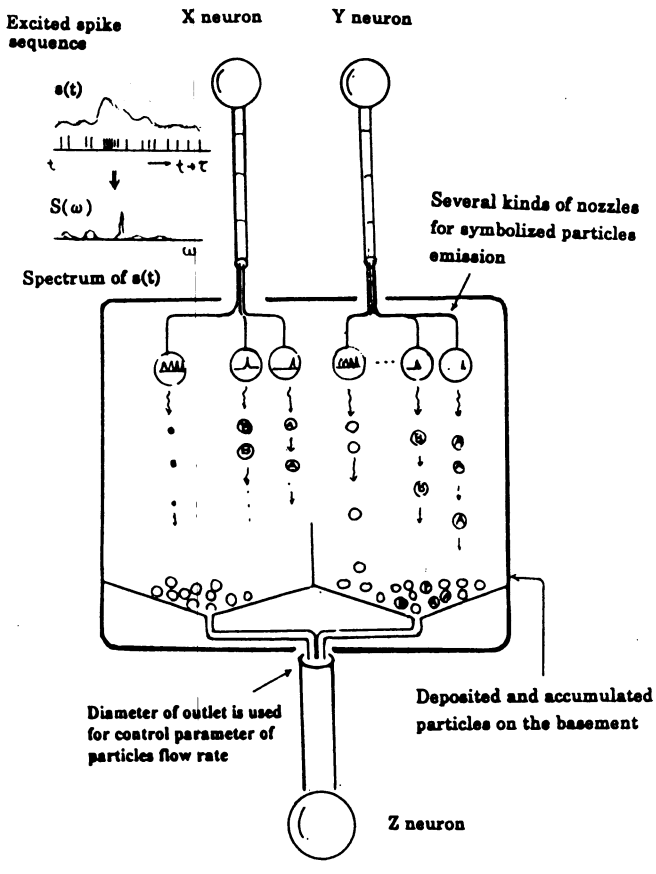


Fig.3 Image Diagram of Symbolized Particles Generation in Simulated Synaptic Region

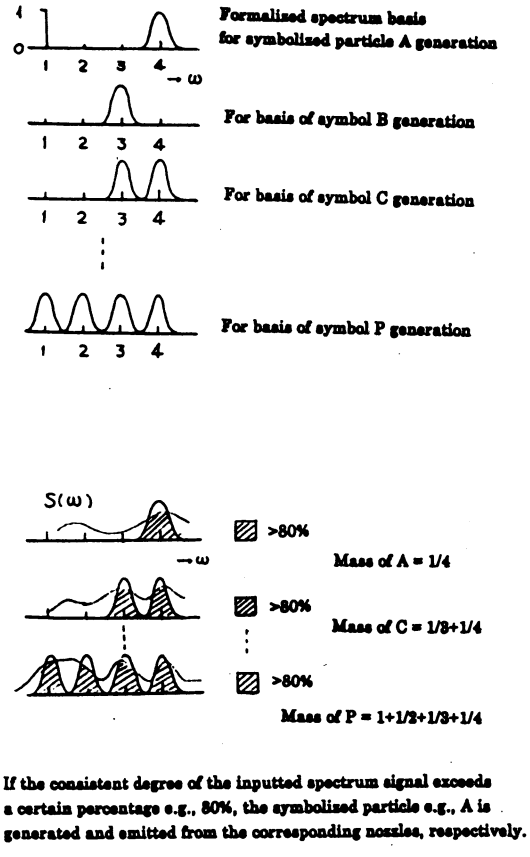


Fig.4 Definition of Spectrum Codes and the Mass of Symbolized Particles

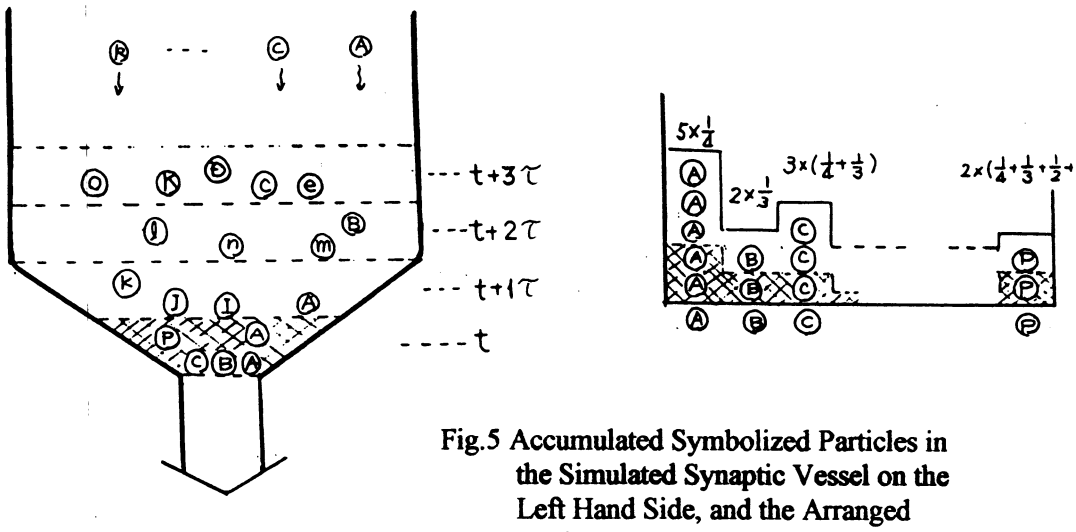


Fig.5 Accumulated Symbolized Particles in the Simulated Synaptic Vessel on the Left Hand Side, and the Arranged Particles on Each of Symbol on the Right Hand Side

図５の左側は，擬似シナプス内で，各種の記号粒子が，時刻ｔ から ｔ＋３τまでの間に蓄積されていく様子を示している．また右側の図は，記号粒子の種類ごとに整理された１つの統計としてのヒストグラムである．この統計情報は，モデルが次の状態へ遷移するための動作条件の１つとして機能する．

蓄積された記号粒子はその質量に応じた伝送力をもって出力ニューロン（ｚニューロン）への模擬後シナプスポテンシャルを形成し，閾値を超えた時に出力スパイクを発射する．

2. 記号粒子生成過程のシミュレーション例

図６は　著者の研究室に所属する一人の学生の「あ」という母音と，これに帯域的及び振幅的にほぼ同程度のガウス雑音を重畳した信号を用いて処理した実験例である．(ａ)図は，その２つの信号の１部分である．(ｂ)図はそれぞれの信号のパワースペクトラムをベース関数に重ねて描かせたものである．そして，(ｃ)図が その処理結果を表わしている．つまり面積比が 50% を超えた記号粒子のみが，棒状に表現されている．

３．あとがき

今回実験したのは，ｘニューロンからのスパイク列が，スムージングされて得られるであろう信号の代わりに，音声信号，とりわけ母音を用いて，記号粒子生成機構の実験してみた．その結果，音声のエッセンスを掴み取る，新しいタイプの音声認識器を創る方式になりそうだ ということが確認できた．また，この記号粒子蓄積型ニューロンモデルの基本的性質については，今後総合的に研究を進める予定である．

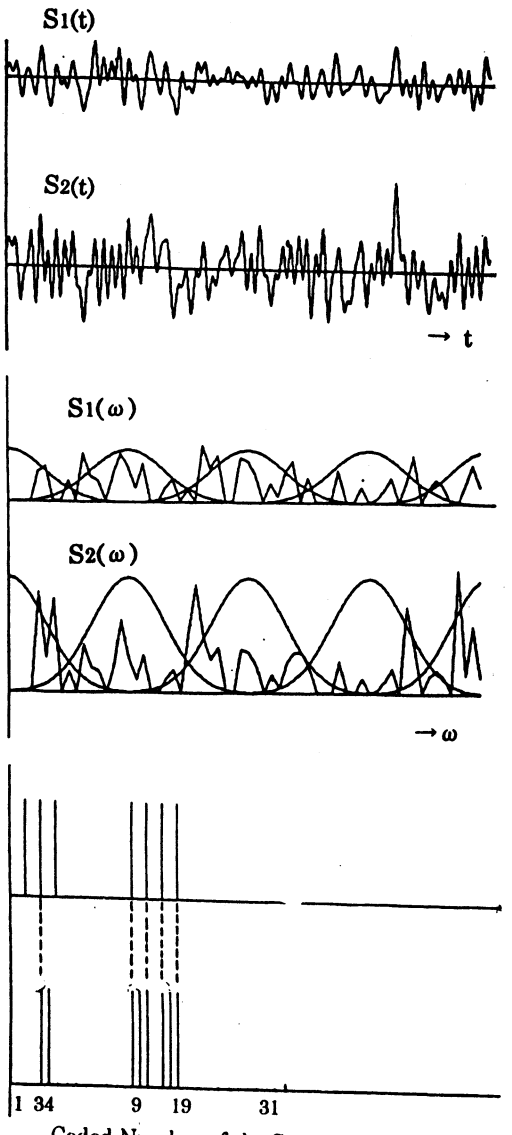


Fig.6　Symbolized Particle Generation from the Sound Signal “あ” and the Signal including Noise

参考文献

[1]川合述史 ”分子から見た脳” 講談社サイエンスブック.

[2]林他，“脳内物質活用法”,Quark, 1996, 7 月号.

[3]有山兼孝 “磁気共鳴吸収物質の電気的性質” 共立出版，19578

問い合わせ先

〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1

九州工業大学．電気工学科　矢鳴虎夫

Tel&Fax: 093-884-3245

WEE3-1

ファジィ発想推論を用いた発散的思考支援システムに関する研究

A Study on Divergent Thinking Support System Using Fuzzy Abductive Inference

宮田 裕次郎　古橋 武　内川 嘉樹
Yujiro MIYATA　Takeshi FURUHASHI　Yoshiki UCHIKAWA
名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering Nagoya University

Abstract This paper proposes a divergent thinking support system using fuzzy abductive inference. The divergent thinking is a process for creating new ideas. This process is different from the covergent thinking which converges fragments of ideas. This system presents related concepts to keywords to users, and the cencepts inspires the divergent thinking of the users. The fuzzy abductive inference is used for deriving the concepts of keywords.

1 はじめに

現在、発想支援システムの構築に関する研究が多くの分野で進められており、診断、設計支援システム等への応用が期待されている[1]。発想支援システムは、すでに得られているアイディアの断片をまとめあげていく「収束的思考」、逆にアイディアそのものを作り上げていく「発散的思考」、アイディアを評価し採択する「アイディア結晶化」を支援するステムと定義される[1][2]。文献 [2] では過去提案された発散的思考を支援するシステムについて種々紹介されており、最近では高杉、國藤によるばねモデルを用いたアイデア触発システム[3]等がある。発散的思考支援システムは、より多くのアイディアをユーザに提示することが求められるが、あまりに多くのアイディアを提示すると逆にユーザを混乱させる結果にもなる。そこで、アイディアそのものを生成するのではなく、ユーザの思考を刺激することで、ユーザのアイディア導出を支援する研究が注目されている[3]。

本稿では、入力されたキーワード群に関連する概念をユーザに提示することによってユーザの発想を刺激する発散的思考支援システムを提案する。しかし、入力キーワード群に関連する概念を全て提示すると、あまりに多くの情報を提示することになり、ユーザを混乱させることになる。また、キーワード群全てに共通する概念のみを提示するシステムでは、ユーザの思考を刺激するには不十分である。そこで本稿ではキーワード群の説明に必要な概念の組み合わせを、倹約基準[4]に基づいて選択し提示する発散的思考支援システムを提案する。本システムではファジィ発想推論を用いる。ファジィ発想推論は、キーワード群から、そのキーワード群を説明する概念の組み合わせ候補を信頼度と共に推論する。ファジィ発想推論は、Peng、Reggia が提案した原因と結果の関係に基づく発想推論モデル (association-based abductive model)[4] にファジィ理論を適用したものである[5]。得られた概念の組み合わせは、どれ一つ欠けてもキーワード群を説明出来なくなるという制限を満たす。この制限により、ユーザの思考を刺激するのに、適当な量の情報を提示することが可能となる。

2 発散的思考支援システム

本節では提案するシステムの概要について述べる。まず、単語とその単語の概念の関係を獲得する。ここで概念とはある単語より抽象度の高い単語と定義する。単語と概念の関係は電子化されたネットニュース等から自動生成する。単語と概念の関係はファジィ化されている。ファジィ化された関係により、単語と概念の間の関係をより柔軟に記述することができる。

次にユーザは考えている問題（目的）に関して思いつく単語列をそれぞれの重みと供に入力する。システムは入力された単語列を説明する概念の組み合わせを提示する。概念の導出はファジィ発想推論によって行う。

以上を定式化すると以下のようになる。概念 $c_i(1 \leq i \leq n)$ からなる集合を C、キーワード $w_j(1 \leq j \leq m)$ からなる集合を Wとする。そして概念 c_iを表現可能なキーワードの集合を、

$$R(c_i) = \{w_j | \text{キーワード } w_j \text{は概念 } c_i \text{に属している}\} \tag{1}$$

と定義する。

このとき、関係 $R(c_i)$ をファジィ化した集合$\tilde{R}(c_i)$ を

以下のように定義する。

$$\widetilde{R}(c_i) = \sum_{w_j \in R(c_i)} \mu_{\widetilde{R}(c_i)}(w_j)/w_j \qquad (2)$$

ここで$\mu_{\widetilde{R}_i}(w_j)$は$w_j$のメンバーシップ値とする。このメンバーシップ値はキーワードに対して付けられた重みである。

そして、ユーザはキーワード群を以下のファジィ集合で入力する。

$$\widetilde{W}^+ = \sum \mu_{\widetilde{W}^+}(w_j)/w_j \qquad (3)$$

ここで$\mu_{\widetilde{W}^+}(w_j)/w_j$はユーザーがキーワード$w_j$に付けた重みである。

この$\widetilde{W}^+$が与えられた時、その概念の組合わせ$E_I(1 \leq i \leq N)$を求め、ユーザに提示する。ユーザはこの概念の組合せを見ることで、新たな視点を発見することが出来、アイディアの発想が可能となる。

3 キーワードと概念の関係の獲得

本節ではキーワードと概念の関係の自動生成について述べる。本稿ではインターネット上のネットニュースの記事からキーワードを抽出し、キーワード間の関係からキーワードが属する概念を導出する。

まず、ニュースの記事の余分なヘッダー等を削除し、その後日本語形態素解析により名詞をキーワードとして抽出する。そしてキーワードの出現頻度をもとにキーワードのテキスト中の重みを計算する。キーワードw_jが記事t_iに現れる重みをv_{ij}とするとき、キーワードw_iとw_jの関連度r_{ij}を計算する[6]。

$$r_{ij} = \frac{\sum_k min(v_{ki}, v_{kj})}{\sum_k v_{ki}} \qquad (4)$$

そしてあるカットオフKについて$r_{ij} \geq K$かつ$r_{ji} < K$であるときw_jはw_iの親であるとし、$r_{ij} \geq K$かつ$r_{ji} \geq K$のときw_iとw_iは同義語、$r_{ij} < K$かつ$r_{ji} < K$のときw_iとw_jは無関係とする。この関連度は2つのキーワードがテキストに一緒に現れる頻度が高いなら意味的にも近い、という考えに基づいている[6]。

本稿では、あるキーワードw_iの親w_jを概念とし、w_jを概念c_jとおいた時の関連度r_{ji}を重み$\mu_{\widetilde{R}_i}(w_j)$とすることでキーワードと概念の関係が得られる。次に実際にユーザーがキーワードを入力したとき、そのキーワード群の親を概念集合とし、ファジィ発想推論によって概念の組み合わせとその信頼度をユーザに提示し、ユーザの思考を刺激することが可能である。

4 まとめ

本稿では、ファジィ発想推論による発散的思考支援システムを提案した。本システムは概念とキーワードの関係を決定し、ユーザが入力したキーワード群の概念をその信頼度と共に提示する。ユーザは提示された概念により、様々な角度から問題を捉えることが可能となり、発散的思考が促進される。

参考文献

[1] 國藤： 発想支援システムの研究開発動向とその課題, 人工知能学会誌, Vol8, No.5, pp.552–559 (1993)

[2] 折原： 発散的思考支援ツールの研究開発動向, 人工知能学会誌, Vol8, No.5, pp.560–567 (1993)

[3] 高杉, 國藤： ばねモデルを用いたアイデア触発システムの構築について, 人工知能学会第7回合同研究会 “AI シンポジウム ’96” 資料 (SIG-J-9602), pp.34–39 (1996)

[4] Y. Peng , J.A. Reggia : *Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving*, Springer-Verlag New York Inc.,1990.

[5] 宮田 , 古橋 , 内川： 症状の程度情報を利用したファジィ発想推論による診断問題の解法, 日本ファジィ学会誌（掲載予定）(1997)

[6] 日本ファジィ学会 編： 講座ファジィ第9巻 ファジィ・データベースと情報検索, 日刊工業新聞社 (1993)

問い合わせ先

〒464-01　名古屋市 千種区 不老町
名古屋大学 工学部 電子情報学科 生体電子工学講座
宮田 裕次郎
TEL (052)789-2793
FAX (052)789-3166
E-mail *miyata@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp*

WEE3-2

ファジィクラスタリングの概念に基づく意思決定支援手法の提案
Decision Support System Based on Fuzzy Clustering Concept

北島 康広　亀井且有
Yasuhiro KITAJIMA　Katsuari KAMEI
立命館大学
Ritsumeikan University

Abstract: It is very important for us to solve decision problems. So, Hierarchical Fuzzy Integral (HFI), one of the methods which avoid the wrong decision, is proposed.

In this paper, we propose a new decision support system based on two fuzzy clustering concepts. The one is Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) to rank items by mathematical model and the other is an advanced Fuzzy c-Means (FCM*) algorithm to evaluate differences from ideal values. Finally, we apply this system to the car choice problem and show the validity of our system.

1. はじめに

人間が社会生活を営んでいく際，種々の複雑であいまいな性質をもつ意思決定問題が多数存在し，それらをどのように解決するのかということが重要な問題となりつつある．そこで，人間が誤った意思決定を避けるための評価方法に階層的ファジィ積分 (HFI：Hierarchical fuzzy integral)[1] が提案されている．

HFI は，評価基準となる評価項目の重要度をファジィ測度で考え，各評価項目における評価対象の評価値をファジィ積分することにより，評価値を統合し，最終評価値を求める手法である．

しかし，HFI では以下のような問題点があげられる．

(1) 意思決定者が主観的に評価項目を階層化している．従って，数学的なモデルを用いた客観的な方法による階層化が必要である．

(2) 評価項目を [0, 1] のあいまいな値で人間の主観的な判断により評価している．しかし，人間が意思決定をする際，ある理想がありそれをもとに距離的に評価している場合が考えられる．そのため，距離的に測ることができる評価項目については距離的な評価が必要である．

(3) 重要度を決定するとき無意識で気が付かない心理的な要因が考慮されていない．そのため，この要因を評価方法に加味する必要がある．

本論文では，2つのファジィクラスタリング概念 (AHC と FCM*) と満足度を用いて上記の問題点を解決する手法を提案し，それを意思決定問題の一つである自動車選定問題に適用することにより，提案手法の有効性を検証する．

2. 階層的ファジィ積分 (HFI)

HFI とは評価基準となる項目の重要度をファジィ測度で考え，各評価項目における評価対象の評価値をファジィ積分することにより，評価値を統合し，最終評価値を求める方法である．

以下に HFI の計算手順を示す．

[Step 1] 問題および評価対象の定義

まず，何を意思決定するのか，問題 (目標) を明確にし，その問題を解決するための代替案となる「評価対象」を考える．

[Step 2] 階層図の作成

いくつかある評価対象のうちの，どれを選択すべきかを決める評価基準を考える．HFI では評価基準を根にもつ木構造により分析し，階層図を作成する．

[Step 3] 各評価項目における評価対象の評価

各評価項目における評価対象をそれぞれ評価し，評価値を付ける．評価対象の評価値は比率尺度ではなく，1 を満点とする 0 ~ 1 の評価値で表す．

[Step 4] 評価項目の重要度

各ランクの評価項目について，その上位ランクの線で結ばれた項目に関する重要度を求める．HFI における評価項目の重要度はファジィ測度で表す．

以下に，ファジィ測度に λ-ファジィ測度を用いた場合の計算方法を示す．

$$g_\lambda(E \cup F) = g_\lambda(E) + g_\lambda(F) + \lambda g_\lambda(E) g_\lambda(F) \qquad (1)$$

ここで，$g_\lambda(E)$：評価項目 E におけるファジィ測度，λ：λ-ファジィ測度におけるパラメータ，とする．

[Step 5] 評価値の統合

最後にファジィ積分により評価値の統合を行う．n 個の評価対象 $S_i\left(i=1,\cdots,n\right)$ とランク数が L 個の評価基準をもつ階層図があるとき，最終評価値は次のようにして求められる．

まず，ランク k の評価項目 $x_{k,j}$ からみた評価対象 S_i の評価値 $h_i\left(x_{k,j}\right)$ が，

$$h_i\left(x_{k,1}\right) \geq h_i\left(x_{k,2}\right) \geq \cdots \geq h_i\left(x_{k,m}\right) \qquad (2)$$

となるように，$x_{k,j}$ にランク k の各評価項目を割り当てる．ここで，m はランクの評価項目数を表す．そして，ファジィ測度 $g\left(X_{k,j}\right)$ を用い，$h_i\left(x_{k,j}\right)$ をファジィ積分すると，その値はランク $k-1$ の項目 $x_{k-1,j}$ における S_i の評価値 $h_i\left(x_{k-1,j}\right)$ となる．つまり，

$$h_i\left(x_{k-1,j}\right) = \sum_{j=1}^{m}\left(h_i\left(x_{k,j}\right) - h_i\left(x_{k,j+1}\right)\right) g\left(X_{k,j}\right)$$

$$\left(X_{k,j} = \left\{x_{k,1},\cdots,x_{k,j}\right\},\ h_i\left(x_{k,m+1}\right) = 0\right) \qquad (3)$$

となる．これらの操作を，全ての評価対象について行う．

以上の手順を k について L から 1 まで繰り返し行い，最終評価値を $h_i(x_{0,1})$ として算出できる．

3. 自動車選定評価実験

人間の意思決定に近い支援システムを構築するために，人間の評価が必要となる．そこで，学生 17 人によるアンケート形式の自動車選定評価実験を行った．実験方法は以下の通りである．

(1) 自動車のデータと写真は，市販の情報誌を用い，24 台を選定した．

(2) 評価項目は車種，色，外観，機能性，価格，乗車定員，排気量，総合評価の 8 項目とした．

(3) それぞれの評価項目について，1 を満点とする [0，1] の値で，24 台の自動車に対して主観的に評価する．これをクリスプな評価とする．その際，総合評価を除く 7 項目については，許容した評価も行う．これをファジィな評価とする．(表 1 参照)．

表 1　主観的評価の例

	車種	色	外観	機能性
評価 (クリスプ)	0.7	0.3	0.7	0.6
評価 (ファジィ)	0.5 ～ 0.8	0.2 ～ 0.5	0.6 ～ 0.8	0.4 ～ 0.7
	価格	乗車定員	排気量	総合評価
評価 (クリスプ)	0.5	0.8	0.6	0.7
評価 (ファジィ)	0.4 ～ 0.7	0.7 ～ 1.0	0.55 ～ 0.7	

(4) 総合評価を除く 7 項目の重要度を決定する．その際，7 項目の重要度を合計すると 1 になるように割り当てる (表 2 参照)．

表 2　重要度の決定の例

	車種	色	外観	機能性
重要度	0.3	0.1	0.05	0.05
	価格	乗車定員	排気量	
重要度	0.4	0	0.1	

(5) 自動車の理想を価格，乗車定員，排気量の 3 項目について決定する．これは，4.2 の距離的評価を算出する際，クラスタセンターとなる (表 3 参照)．

表 3　理想 (クラスタセンター) の決定の例

	価格 (万円)	乗車定員 (人)	排気量 (cc)
理想	100	5	1500

4. 階層的ファジィ積分における問題点の解決

4.1　階層的クラスタリング (AHC)

HFI では，評価項目を階層構造に分解する場合，意思決定者が主観的に決定している．従って，数学的モデルを用いて，より客観的な方法で最適な階層構造を導出することが望まれる．そこで，評価項目を階層構造に分解する手法に階層的クラスタリング (AHC：Agglomerative Hierarchical Clustering) [2] が提案されている．

AHC とは，個体集合と類似度を入力として，階層分類を出力する方法である． AHC で使われる変数を以下のように定義し，計算手順を示す．

$$x, y \in X \tag{4}$$

$$G_i, G_j \in \Gamma \tag{5}$$

ここで，x, y：個体，X：個体集合，G_i, G_j：個体のクラスター，Γ：クラスター集合，とする．

[Step 1] 初期クラスターの設定

まず，個々の個体を初期クラスターとする．

$$G_i = \{x_i\} \tag{6}$$

$$i \in \{1,2,\cdots,N\} \tag{7}$$

$$\Gamma = \{G_1, G_2, \cdots G_N\} \tag{8}$$

$$S(G_i, G_j) = S(x_i, x_j) \quad i \neq j, 1 \leq i, j \leq N \tag{9}$$

ここで，$S(G_i, G_j)$：個体 i と個体 j の類似度，$S(G_i, G_j)$：クラスター G_i とクラスター G_j 間の類似度，N：個体数，とする．

[Step 2] クラスター統合

$$S(G_p, G_q) = \max_{1 \leq i, j \leq N, i \neq j} S(G_i, G_j) = m_{pq} \tag{10}$$

を満たす G_p，G_q，つまり類似度が最大となるクラスターのペアをとる．そして，$G_r = G_p \cup G_q$ と統合し，Γ から G_p，G_q を除去して G_r を Γ に加える．類似度を m_{pq}，一つ前のクラスターを $\Gamma(m')$ とすると

$$\Gamma(m_{pq}) = \Gamma(m') \cup \{G_r\} - \{G_p, G_q\} \tag{11}$$

となる．

[Step 3] クラスタリングの終了判別

$N = N - 1$ とし，$N = 1$ ならば終了．そうでなければ，[Step 4] にすすむ．

[Step 4] クラスター間類似度の再計算

$m' = m_{pq}$ とする．次に，最短距離法により G_r と Γ の他のクラスターとの間の類似度 $S(G_r, G')$ を再計算する．そして，[Step 2] にもどる．

$$S(G_r, G') = \max\left[S(G_p, G'), S(G_q, G')\right] \tag{12}$$

この AHC により，自動車選定問題における評価項目を階層構造に分解するためには，評価項目間の類似度を算出する必要がある．そこで，その類似度を算出するためのアンケート実験を学生 16 人に行った．そのアンケート実験による評価項目間の類似度を表 4，その類似度を用いた AHC による階層化を図 1 に示す．ただし，評価項目間の類似度は平均値とした．

表 4　評価項目間の類似度 (平均値)

	車種	色	外観	機能性	価格	乗車定員	排気量
車種		0.27	0.81	0.48	0.77	0.69	0.72
色			0.54	0.04	0.14	0.03	0.01
外観				0.19	0.46	0.33	0.28
機能性					0.79	0.30	0.31
価格						0.41	0.71
乗車定員							0.42
排気量							

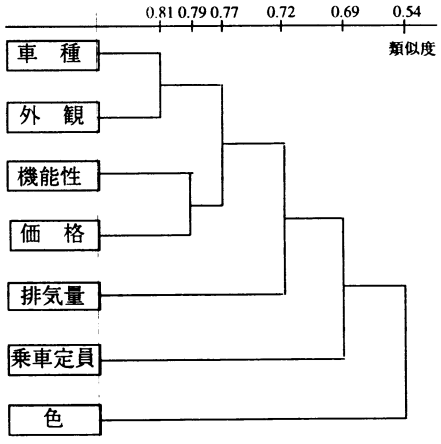


図1 AHCによる階層化

ここで，評価項目を階層化しない場合と図1の階層構造を用いた場合の最終評価値をHFIで算出し，この最終評価値とアンケート実験による総合評価の相関係数を求めることにより，人間の意思決定にどの程度近いか比較した．その結果，評価項目を階層化しない場合の相関係数は0.894，AHCにより階層化した場合0.907となり，AHCによる階層化が有効であることが確認できる．

4.2 主観的評価と距離的評価

HFIは評価項目を[0，1]のあいまいな値で人間の主観的な判断により評価している．しかし，人間が意思決定をする際，ある理想がありそれをもとに距離的に評価している場合が考えられる．このように理想をもとに距離的に評価できる項目については，FCM* アルゴリズム[3]の距離によるメンバーシップ値（評価値）を用いて評価する．

FCM* アルゴリズムのメンバーシップ関数の形状は，理想（クラスタセンター）上のデータ点，クラスター半径 r（$d^m/2$）上のデータ点，クラスターに対し最遠距離 d^m にあたるデータ点のメンバーシップ値 u が，それぞれ1.0，0.5，0.0となる3定点を通る釣り鐘型とする（図2参照）．図2にFCM* アルゴリズムのメンバーシップ関数を示す．

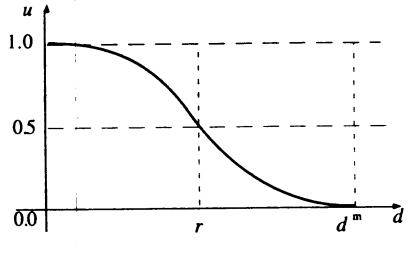


図2 FCM* アルゴリズムのメンバーシップ関数

FCM* アルゴリズムの距離による評価は，理想に近ければ近いほど高い評価値をもつことになる．このように主観的に評価できる項目と距離的に測ることができる項目に分けて評価し，最終評価値を算出する評価方法を提案する．その際，距離的に評価できる項目は価格，乗車定員，排気量の3項目とする．

AHCとFCM* アルゴリズムを用い，HFIにより最終評価値を算出した．この場合の相関係数は0.902となり，4.1のAHCのみと比較すると相関係数が下がった．この理由としては，意思決定をする際，主観性が強かったことがあげられる．

4.3 満足度

本人も無意識で気が付かない心理的要因を，意思決定の評価方法に取り入れることにより，更に人間に近い意思決定支援システムが構築できると考えられる．そこで，ファジィな評価（評価値に幅をもたせた評価）を行うことにより，クリスプな評価値に対してどの程度満足しているかを表す満足度を算出する．この満足度はクリスプな評価値に対する信頼性とも考えられ，評価値の区間幅（上限と下限の差）が大きいほど満足度は小さくなり，評価値の区間幅が小さいほど満足度は大きくなる．この満足度をその評価項目を重要視する度合いとみなし，従来の重要度に加味した新たな重要度を提案する．

以下に，満足度を用いた重要度の計算手順を示す．

[Step 1] 距離の重みの算出

クリスプな評価値とファジィな評価値（上限 u，下限 l）との距離にかかる重み w を算出する．重みは区間幅が大きいとき小さく，区間幅が小さいとき大きくなる．

$$w = \frac{1}{1+u-l} \tag{13}$$

ここで，w：距離の重み，u：上限の評価値，l：下限の評価値，とする．

[Step 2] 不満足度の算出

不満足度 us は，ファジィな評価値の幅が大きいほど満足度は高くなる．

$$us = w(u-l) \tag{14}$$

ここで，us：不満足度，とする．

[Step 3] 満足度の算出

満足度 s は，クリスプな評価値に対してどの程度満足しているかを表し，不満足度に直線的に反比例するものとする．

$$s = 1 - us \tag{15}$$

ここで，s：満足度，とする．

[Step 4] 新重要度の算出

従来の重要度 g に満足度を掛けたものを新重要度 g^* とする．

$$g^* = g\,s \tag{16}$$

ここで，g：従来の重要度，g^*：新重要度，とする．

AHCと満足度を用い，HFIにより最終評価値を算出した．この場合の相関係数は0.919となり，4.1のAHCのみと比較すると相関係数が上がった．この理由としては，総合評価に近い評価値となる評価項目では，評価値の区間幅が小さくなる傾向があり，このような場合評価値に対する満足度が増し，その評価項目の重要度が大きくなる．従って，総合評価に近い最終評価値が算出され，相関係数が上がったといえる．

4.4 相関係数による階層化

AHC は，類似度の高い評価項目をペアとして階層分類を出力する．このように類似度の高い評価項目から順番にファジィ積分するよりも，何らかの形で過去の意思決定に履歴から総合評価を知ることができれば（計算することができれば），それと高い相関をもつ評価項目から順番にファジィ積分した方がより人間に近い意思決定が行えると考えられる．つまり，人間の総合評価に高い相関をもつ評価項目は重要度が大きいため，最終評価値は人間の総合評価に近くなると思われる．

そこで，評価項目間の類似度を総合評価と評価項目の相関係数に置き換え， AHC により階層化し，更に満足度を加味した評価方法を提案する．

表 5 に総合評価と各評価項目との相関係数，図 3 に相関係数を用いた AHC による階層構造を示す．

表 5　総合評価値と各評価項目との相関係数

	車種	色	外観	機能性
相関係数	0.825	0.482	0.829	0.474
	価格	乗車定員	排気量	
相関係数	0.541	0.311	0.5	

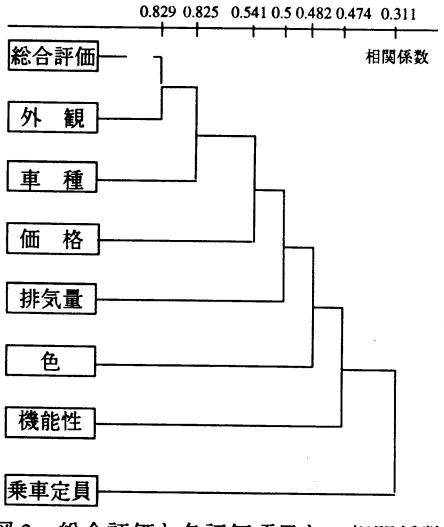


図 3　総合評価と各評価項目との相関係数

図 3 の相関係数による AHC と 満足度を用い，HFI により最終評価値を算出した．この場合の相関係数は 0.924 となり，4.3 の 0.919 と比較すると相関係数が上がった．この理由としては，総合評価に高い相関をもつ評価項目のは重要度が高いため，機能性や乗車定員の評価値を統合する段階では，これらの重要度が低くなり，最終評価値は総合評価に近くなったことが考えられる．

4.5 手法の比較検討

表 6 に上記提案手法と相関係数との関係を示す．これより階層化手法に AHC を用いることは有効と認められる．しかしながら，項目の評価に FCM* を用いることは今後の検討を必要とする．また，幅を持った重要度を得ることができる場合は満足度を考慮することが有効である．さらに，何らかの形で過去の意思決定に履歴から総合評価を知ることができれば，類似度に相関係数を用いることは有効である．

表 6　各手法の比較

積分法	HFI				
階層化手法		AHC			
項目評価法			FCM*		
重要度				満足度	
類似度					相関係数
相関係数	0.894	0.907	0.902	0.919	0.924

5. おわりに

本稿では，自動車選定評価実験をもとに HFI における問題点を解決する手法を提案し，それを意思決定問題の一つである自動車選定問題に適用することにより，その有効性を検証した．その結果，クラスタリング概念の一つである AHC を用いることの有効性は確認できたが，FCM* アルゴリズムの有効性は確認できなかった．この点では今後の検討の余地を残した．また，満足度や総合評価との相関係数を考慮することも重要であることが分かった．

また，意思決定問題として自動車選定問題を用いたが，他の意思決定問題に対して提案手法が有効であるとは限らない．そのため，他の意思決定問題に対して適用し，有効性を検証することが必要となる．また， AHC により評価項目を一つずつ階層化したが，評価項目の組み合わせ（例えば，車種と外観を一つの評価項目とする）によっては，相乗効果により更に良い結果が得られると考えられる．従って，評価項目の最適な組み合わせを見つける方法を考えることが課題である．

参考文献

(1) 杉山孝男，椎塚久雄：階層的ファジィ積分による意思決定法，日本ファジィ学会誌，Vol.5，No.4，pp.772 - 782 (1993)

(2) 宮本定明：ファジィグラフによる階層的クラスタリングについて，日本ファジィ学会誌，Vol.5，No.6，pp.1354 - 1371 (1993)

(3) 亀井且有：ファジィクラスタリングの制御への応用，日本ファジィ学会誌，Vol.8，No.3，pp.448 - 455 (1996)

[問い合わせ先] 〒 525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1
立命館大学理工学部情報学科亀井研究室　北島 康広
Tel. (0775) 61-2807　　Fax. (0775) 61-2669
E-mail：kitajima@spice.cs.ritsumei.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEE3-3

FSM(Fuzzy Structural Modeling)による合意形成支援システム

Interactive Support System for Group Decision Making and Consensus in FSM

○若狭　浩　，奥田　通大　，田崎　栄一郎

○Hiroshi Wakasa, Michihiro Okuda, Eiichiro Tazaki

桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科

Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract:

In several complex systems, Fuzzy Structural Modeling (FSM) is an useful method to structure hierarchy under uncertainty in order to deal with arrangement of system's elements systematically. Especially, when we apply FSM to group decision making problems under imprecision of expert judgement, it is needed to construct the multiattribute utility function to coordinate the multi-viewpoints of cooperated participants. We propose an interactive support system on group decision making with the fuzzy subordination matrix in FSM.

According to the consenting structure of decision makers in a group, a structural model of system is obtained. If there is a difference between both models, the difference is reflected to the generation of individual indifference curve, because the indifference experiment is repeated to adjust the difference of individual evaluation to match the consenting value. To verify the effectiveness of the proposed method, we make an experiment with real multiattribute and multiobjective problem.

1.まえがき

今日の社会問題をはじめとする諸問題の多く（都市の安全問題、エネルギー問題など）は、不明確な目的や要因が複雑に絡み合った問題複合体である。また、このような諸問題は数式モデルにするにはあまりにも大規模・複雑なため、その取り扱いは困難を極めている。そのため、そのような問題を解くには、解析的なアプローチとは違ったアプローチが必要になってくる。

そこで本研究は、このような問題に対して、その要因を取り出し、Fuzzy Structural Modeling(FSM)法[1]を用いて要因間の関係を構造モデル化する構造分析による方法を考えることとする。構造分析手法の特徴は、複雑で不明確な問題において、構造化される内容が次第に問題を明らかにする過程を構築するところにある。さらに、ここでは、対象の問題にかかわる複数の関係者が存在する場合を考える。そのため、FSMで用いる要因間の従属関係を示す行列の構成に、グループによる意思決定法を導入する。意思決定法におけるグループにおける合意と多属性を取り扱う方法の１つとしてIntelligent Decision Support Systems(IDSS)法[2]があるが、これを拡張することによりグループに対するFSMにおける従属行列を構築する方法を提案する。

このことを円滑に実現するために問題の要因間の関係に重点を置いた相互支援型man-machineインターフェースを構築する。

また、具体的な例に適用して提案した方法の有効性の検証を行なう。

2.本研究における意思決定法の特徴

意思決定とは、代替案を評価する目的もしくは属性が、意思決定者にとってどのような選好構造を持っているかを決定するものである。ここで意思決定支援手法が備えるべき能力として次のようなことが指摘される。まず第１に意思決定において評価すべき対象やその属性について、定性的、定量的なものを含めて多種広範囲なものが考慮可能であること。第２に評価作業の労力が過大ではなく、現実的な問題について低いコストで意思決定を支援可能ということ。第３に意思決定プロセスが簡明で、決定者自身や第三者によって結果の解釈、追認、妥当性の検証が容易に行なえるということなどがある。

また意思決定者が複数であるグループによる意思決定とは、意思決定者個人が属するグループにおいて、最もよく承認される選択肢を挙げることである。意思決定は人間そのものに関与しており、意見をまとめることにおいて、人間固有の主

観、感覚、曖昧さに深く関与している。意思決定法が備えるべき能力とは、決定者自身の判断の際の自己矛盾や論理的な不整合の程度が検出、評価でき、またこの機能を利用して、複数の意思決定者間に対立が存在する場合、それぞれの決定者の評価、判断の内部的不整合を比較できることである。従って、グループ意思決定としてのFSM法を考える場合には、これらのことが反映される必要がある。

3.FSM法の概要[1]

FSMによるシステムの構造化とは、ある対象システムを構成すると考えられる要因を適切な方法 (例えばブレーンストーミング、NGT法等) により抽出整理し、ある文脈上の関係に依存して、ファジィ関係に基づく理論により階層化し、階層間ならびに階層に属する要因間の従属関係を決定し、それをグラフで表すことである。

4.合意形成の概要

一次元属性の視点による構造化手法では、現実の多くの問題が多次元的視点において解決されなければならない複雑な問題であることを考えるとき、それらの解決は難しい。このためまず多次元的視点についてこれを多属性問題として属性間の調整を図り、さらに問題に係わる関係者が複数存在する場合にはグループの合意を図ることとする。

このような問題に対して有効と考えられる手法の1つとしてIDSS法がある。ここでは、この手法を拡張することによりFSMにおける従属行列の構成法を提案する。また、これに基づく構造化手法を図1に示す。この図において、選好構造を定める無差別曲線は問題の要因数に対応するだけ求められる必要があり、従って、それに対応する回数だけ無差別実験は行なわれる。

また、無差別曲線の構成に、多属性であることを利用したグループにおける合意を形成することができる三角型メンバーシップ関数[3]が用いられる。次にシステム構造化までのアルゴリズムを示す。

○システム構造化アルゴリズム

図1によって示されたフローに従って、構造化のアルゴリズムをステップごとに与える。

Step1:問題における要因を適当な方法でいくつか選定する。

Step2:選定されたすべての要因に属する数個の属性を選定する。

要因にグループとしての相互作用を入れるために、意思決定者と分析者の交渉による無差別実験を以下のように行なう。

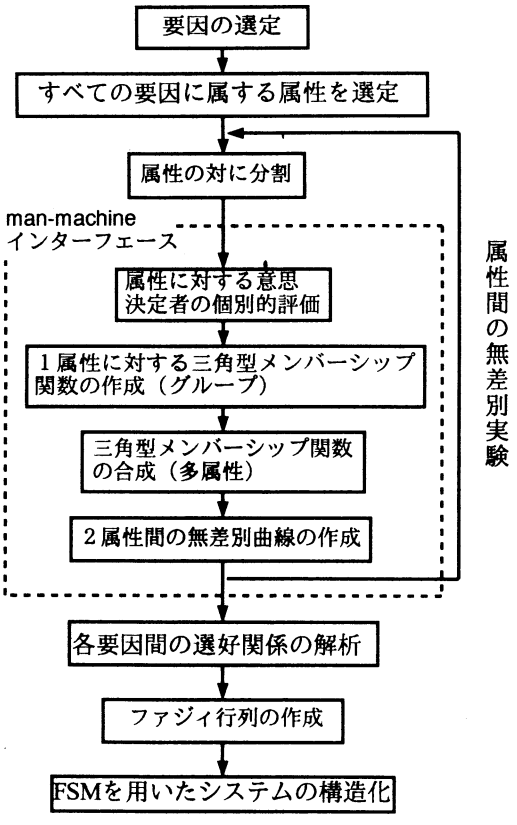


図1　システム構造化までのフローチャート

Step3:すべての属性を対、ここでは基本となる最重要属性x_sとそれ以外の属性x_j (j=1,...,n, j≠s) に分ける。

Step4:グループとしての各意思決定者に質問事項を提示し各属性の個別的評価を尋ねる。

質問事項は以下に示す。

各意思決定者に対する質問事項

ポイントAと無差別なポイントBがある。

x_sはワーストレベルを取り、かつx_jはある程度高いレベルを取るポイントAがある。それに対する無差別なポイントBとして、x_jはワーストレベルを取り、そのx_jに対するx_sの値は何を取るか？

$$A\begin{bmatrix} x_s:\text{ワースト} \\ x_j:\text{固定} \end{bmatrix} \sim B\begin{bmatrix} x_s:? \\ x_j:\text{ワースト} \end{bmatrix}$$

Step5:グループとしての合意を図るため、三角型メンバーシップ関数を1属性ごとに作成し、すべての属性のメンバーシップ関数を求める。ここで得られた三角型メンバーシップ関数の例を図2に示す。

この図の×印は各意思決定者の属性の選好値を表し、その平均を○印で示す。最も低い属性値と最も高い属性値の効用値を0.0と置き、平均値に対応する効用値を1.0と置く。

Step6:Step3において、分割した属性の対に対して、Step5の三角型メンバーシップを合成することにより多属性についての合意を図る。

Step7:Step6の三角型メンバーシップ関数を無差別曲線に当てはめることにより、２属性間の無差別曲線を作成する。

Step8:Step3からStep7までを要因の数だけ繰り返し行なうことにより、すべての要因に対する無差別曲線は得られる。

Step9:各要因の無差別曲線を面積比において相互に照合し、ファジィ値を与える。

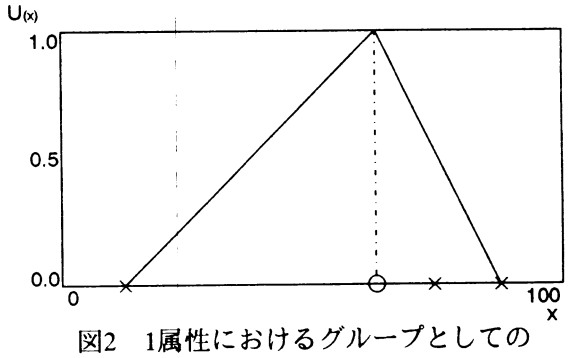


図2　1属性におけるグループとしての三角型メンバーシップ関数

属性間の無差別実験で得られたファジィ値によりファジィ従属行列を得るのでそれに基づき構造化を図る。

5.無差別曲線を用いた構造化プロセス

4節において得られた、要因の無差別曲線は、意思決定者によって合意された選好関係を表していると考えられ、無差別曲線を面積比において各要因どうし相互に照合し、各要因間の選好関係によりファジィ値を与える。その結果、ファジィ従属行列Aの要素a_{ij} (i=1,...,m, j=1,...,m)(i<j 部分)が得られる。i=j 部分の要素は同一要因間の比較となり、行列において0の値を取る。i>j 部分の要素は、１つの簡便な方法として次式により与えられる。

$$a_{ij} = (1-a_{ji}) / (1+\lambda a_{ji}),\ i>j,\ -1< \lambda < \infty.$$

これは菅野のλ-補集合に基づいており、λはファジィパラメータである。λの値を決定する１つの方法として、要素a_{ij}の i<j 部分の無差別実験における質問事項と対となる問題を数個意思決定者に対し個別的評価をしてもらい、その結果の平均により定める方法を用いる。

以上の過程によりファジィ従属行列は求まり、構造モデルを与える。

ここで得られたファジィ従属行列は、属性間と意思決定者間の相互作用が考慮されている。すなわち４節で述べた無差別実験においてman-machineインターフェースを用いた交渉によりグループにおける意思決定者と評価者の間の相互支援システムが構成される。

6.具体的な問題を用いた提案した方法の検証

具体的な例題として、どのような事柄を重視しているかという観点からの「就職に対する意識構造」についての実験を行なった。

意思決定者を「進学希望学生」「就職希望学生」「社会人」の３人とした。

問題に対する要因を抽出するまでは、既に取り扱われたものを参考にし、就職に対する要因を列挙した。共通かつ基本となる最重要属性x_sは”ステータスとして満足したい”とする。

要因１：人間関係を深めたい
x_j：困ったときに、協力して欲しい
要因２：お金が欲しい
x_{j1}：欲しい物がある
x_{j2}：貯金したい
要因３：自分の望んでいる仕事につきたい
x_j：望んでいる仕事がやりたい
要因４：安定性のある企業に入りたい
x_j：安定した生活が送りたい
要因５：社会人として責任を果たしたい
x_j：みんなのためになりたい（役に立ちたい）
要因６：福利厚生の整っている会社に入りたい

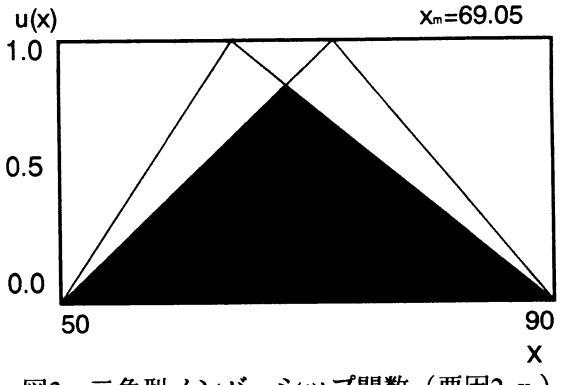


図3　三角型メンバーシップ関数（要因2, x_s）

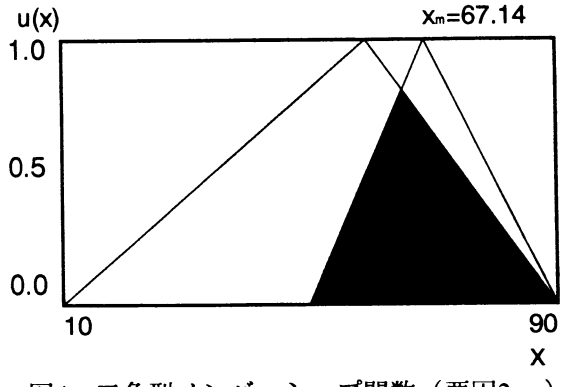


図4　三角型メンバーシップ関数（要因2, x_j）

x_j：休みを充実させたい
要因７：生活圏を拡大したい
x_j：いろんなところで仕事がしたい
要因８：自分の存在価値を認識させたい
x_j：自分のやってることを見てもらいたい
要因９：創造をしたい
x_{j1}：造る喜びを得たい
x_{j2}：頭を使いたい

合意形成の過程を明確にするためのman-machineインターフェイスを用い、FSMにおける従属行列により構造モデルを作成した。

要因2における基本となる最重要属性x_sでは、Step6に基づき図3に示す三角型メンバーシップ関数を作成し、また、それ以外の属性x_jについても図4に示す三角型メンバーシップ関数を作成した。横軸にx_s、縦軸にx_jを当てはめることにより、Step7に基づき図5に示す属性間の無差別曲線が求まる。

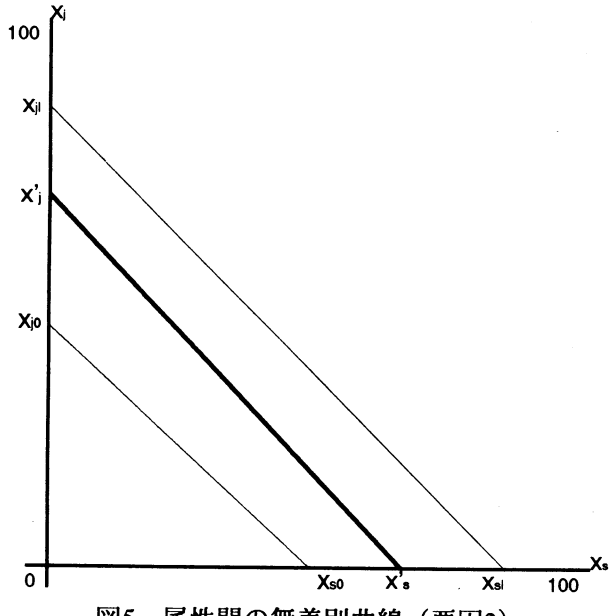


図5　属性間の無差別曲線（要因2）

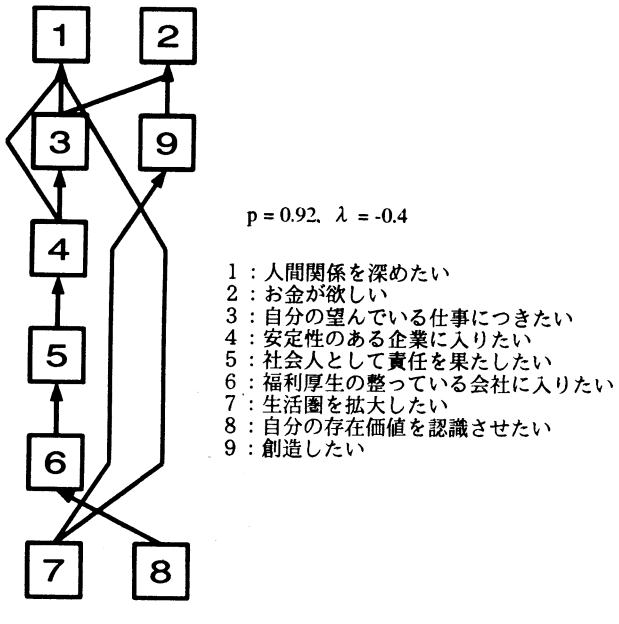


図6　グループにおける意識構造モデル

これらの結果を用いて5節で述べた方法によりファジィ従属行列を求め、構造モデル化した結果が図6で与えられる。この図6より「お金が欲しい」と「人間関係を深めたい」が上位を占め、その下にそれ以外の要因が従属するという構造モデルが得られたことが分かる。その結果を各意思決定者に提示したところ、おおよそ妥当であるという意見を得ることができた。

7.おわりに

具体的な問題に対して提案した方法を適用した結果グループとして妥当な構造モデルが得られた。これにより本方法により現実的諸問題に対して構造モデル化を図ることが可能と考えられる。

しかし、今回のような問題だけでなく、今後意思決定者間により厳しい利害があるような複雑な現実的問題に適用し、その実用性についてさらに検証する必要があると思われる。

参考文献

[1]E.Tazaki and M.Amagasa :Structural Modeling in a Class of Systems Using Fuzzy Sets Theory, Fuzzy Sets and Systems 2 (1979) 87-103.

[2]Ichiro Nisizaki and Fumiko Seo :Interactive Support for Fuzzy Trade-off Evaluation in Group Decision Making, Fuzzy Sets and Systems 68 (1994) 309-325.

[3]Ichiro Nisizaki and Fumiko Seo :On Construction of Fuzzy Membership Functions in Group Decision Making under The IDSS Environment, in:Trappl, Ed., Cybernetics and Systems Research, '92, Vol.1 (World Scientific, Singapore, 1992) 455-462.

連絡先

〒225
横浜市青葉区鉄町1614番地
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
田崎　栄一郎
TEL : 045-974-5070　FAX : 045-978-1311
E-mail : tazaki@intlab.toin.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEF1-1

Division Operators in Fuzzy Databases
ファジイデータベースにおける割り算

中田　典規
Michinori Nakata
千葉経済大学短期大学部
Chiba-Keizai College

Abstract

Division operators are formulated in the fuzzy relational database based on possibility and necessity measures, where attribute values are expressed by possibility distributions. We formulate division operators from considering the following items: 1. Membership attribute values of tuples in relations, 2. Resemblance degrees between elements in domains, 3. Attribute values expressed by possibility distributions. For the last item, we extend the division operator by considering possible values. When possibility distributions are allowed as attribute values, the most fundamental component is possible values. We cannot obtain correct results of division operators if possible values obtained from the possibility distributions are not considered.

1　序論

関係代数を構成する演算の一つである割り算という演算は全称修飾子で定義され、実体間に多対多の関係があるときのある種の質問に有効である。例えば、”必要な全ての部品を供給している業者を探しなさい”が一例として挙げられる。最近、多数の著者が割り算に関する研究を発表している [1, 2, 3, 4, 5, 6, 13, 14]。これらの研究は２つの流れに大別される。一つは、重み付きのファジイ関係で割り算を扱うものである。もう一つは、全称修飾子を弱めるものである。この論文は前者の流れに関係する。前者の流れにおいて、割り算は、以下の３点を考慮して調べられて来た。１．関係はタプル値のメンバシップ属性を持っている。２．ドメインの要素が類似度を持っている。３．属性値が可能性分布であらわされている。本論文では、先ず、可能性と必然性測度を用いたファジイ関係データベースで、この３点を考慮して、割り算を定式化する。

属性値として可能性分布を許した時、基本要素は可能性分布から得られる可能値である。可能値の考慮なしには正しい質問処理結果が得られない事があることが知られている。このことは、割り算は可能値を考慮して定式化すべきことを示唆している。従って、本論文では、特に、属性値として可能性分布を許した時に、可能値の影響を考察し、この点を考慮した定式化を行う。

2　ファジイ関係データベース

ファジイ関係データベースは、Zadeh によって提案されたファジイ集合論と可能性理論を使って従来の関係データベースを拡張したものと考えられる。[10, 11, 12, 15]。

定義 2.1
ファジイ関係データベーススキーム R は通常の属性 $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \ldots, A_n\}$ とメンバシップ属性 μ から構成される。

定義 2.2
タプル t における属性 A_l の値 $t[A_l]$ は正規な可能性分布 $\pi_{t[A_l]}$ で表される。

$$t[A_l] = \sum_{u \in dom(A_l)} \pi_{t[A_l]}(u)/u, \quad \sup_{u \in dom(A_l)} \pi_{t[A_l]}(u) = 1,$$

ここで、ドメイン $dom(A_l)$ はクリスプ集合である。

属性値が可能性分布で表わされている時、その属性値が取れる可能値は可能性分布を構成している要素である。この可能値はその属性に関する可能タプル値に対応している。よって、属性値の要素はその属性に関する可能タプル値と関連づけることができる。

例 2.3
関係 pp の一番めのタプルで属性 $PRICE$ が取ることのできる値は可能性分布 $0.8/20 + 1/40$ を構成する要素の 20 と 40 である。これらの要素は可能タプル値 $(z, 20)$ と $(z, 40)$ にそれぞれ対応している。

pp

$PART$	$PRICE$	μ
$1/z$	$0.8/20 + 1/40$	1,1
$1/x$	$1/30$	1,1

この例が示すように、属性値として可能性分布を認めた時、基本要素は可能値である。

定義 2.4
関係 r はメンバシップ値 $t[\mu_r] = (t[\mu_{N,r}], t[\mu_{\Pi,r}])$ を持つタプル値のファジイ集合である。

$$r = \{\langle t[\mathcal{A}], (t[\mu_{N,r}], t[\mu_{\Pi,r}])\rangle \mid t[\mu_{\Pi,r}] > 0\},$$

ここで、$t[\mu_{N,r}]$ $(t[\mu_{\Pi,r}])$ はタプル値 $t[\mathcal{A}]$ が関係 r に属する必然性（可能性）の度合である。

基本関係におけるメンバシップ値はタプル値と関係に課されている一貫性制約との整合性の度合である。この度合は与えられるのではなく、必然性測度と可能性測度によって計算される [7]。ここで、一貫性制約のある制約が、”関係 r において A_i は a である”としよう。a がメンバシップ関数 μ_a によって表わされる時、タプル値 $t[\mathcal{A}]$ と制約 c との整合性の度合は Prade と Testemale[10] に

従って計算される。

$$\Pi(c \mid t[\mathcal{A}]) = \sup_{u \in D_i} \min(\pi_{t[A_i]}(u), \mu_a(u)),$$
$$N(c \mid t[\mathcal{A}]) = \inf_{u \in D_i} \max(1 - \pi_{t[A_i]}(u), \mu_a(u)).$$

もし、関係 rにこの制約以外の制約が課されていなければ、タプル t のメンバシップ値は、

$$t[\mu_r] = (t[\mu_{N,r}], t[\mu_{\Pi,r}]) = (N(c \mid t[\mathcal{A}]), \Pi(c \mid t[\mathcal{A}])).$$

例 2.5
ファジイ制約 "$PRICE$ は $about$ 35" が例 2.2 の関係 pp に課せられているとする。整合性の度合を計算して以下の基本関係が得られる。但し、$about$ 35 は $0.3/20 + 0.7/25 + 1/30 + 1/35 + 1/40 + 0.7/45 + 0.3/50$ である。

pp

$PART$	$PRICE$	μ
$1/z$	$0.8/20 + 1/40$	0.3,1
$1/x$	$1/30$	1,1

質問処理は、可能性測度と必然性測度を用いて行うものとする。このことは、全ての関係におけるメンバシップ値は必然性測度と可能性測度とによって計算された値であることを意味する。従って、我々のファジイ関係データベースで得られる全ての情報は必然性測度と可能性測度によって得られる。

3 割り算演算子の拡張

関係データモデルにおいて、割り算演算子は以下のように定義されている。

定義 3.1
r と s は関係とする。割り算 $r \div s$ は、全てのタプル $t_s \in s$ に関して、関係 rに $\langle t, t_s \rangle$ が存在するサブタプル t を含む導出関係である。

$$r \div s = \{t \mid \forall t_s \in s, \langle t, t_s \rangle \in r\}.$$

Dubois と Prade はメンバシップ値とクリスプな属性値を持つファジイ関係に基づくファジイデータベースにおいて定義 3.1 を拡張した。彼らに従って、2節で述べたファジイ関係モデルで割り算演算子を定式化する。

定義 3.2
関係 r と s はそれぞれ、ファジイ関係データベーススキーム R と S において、定義 2.4 で定義された関係とする。タプル値 $t_{r \div s}[\mathcal{A}_{R-S}]$ が導出関係 $r \div s$ に属していれば、このタプルのメンバシップ値は以下の通りである。

$$t_{r \div s}[\mu] = (t_{r \div s}[\mu_N], t_{r \div s}[\mu_\Pi]),$$
$$t_{r \div s}[\mu_N] = \inf_{t_s}(t_s[\mu] \to \langle t, t_s \rangle_r[\mu])_N,$$
$$t_{r \div s}[\mu_\Pi] = \inf_{t_s}(t_s[\mu] \to \langle t, t_s \rangle_r[\mu])_\Pi,$$

ここで、$\to$ はファジイ含意である。
ファジイ含意の評価方法はメンバシップ値の性質に依存する [1, 5]. 我々のモデルではメンバシップ値は必然性測度と可能性測度によって計算され、与えられた値ではない。割り算演算子 $r \div s$ に対する要請として以下の二つの場合が考えられる。

場合 1
関係 s にある全てのタプル値が関係 r に完全に含まれている。

場合 2
関係 s にある全てのタプルが必然性と可能性の点で関係 r に含まれている。

場合 1 は、関係 s にある全てのタプル値が必然性と可能性の最大の度合で関係 r に含まれていることを要求している。場合 2 は、関係 s にある全てのタプルが、可能性と必然性において関係 s におけるよりも大きな度合で関係 r に含まれていることを要求する。
Dubois と Prade[5] や Bosc et al.[1] に従えば、我々のファジイ関係モデルでは、Dienes の含意が場合 1 に、Gödel の含意が場合 2 に適切である。しかし、このファジイ関係モデルでは必然性測度と可能性測度が用いられているので、Dienes の含意や Gödel の含意をそのまま使う事はできない。
先ず、場合 1 の定式化を述べる。Dienes の含意の拡張版を使う。

$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s \rangle_r[\mu])_N = \max(1 - t_s[\mu_\Pi], \langle t, t_s \rangle_r[\mu_N]),$$
$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s \rangle_r[\mu])_\Pi = \max(1 - t_s[\mu_N], \langle t, t_s \rangle_r[\mu_\Pi]),$$

これらの式は、含意について $p \to q = \neg p \vee q$を使っていることに対応している。属性値がクリスプで必然性測度と可能性測度に基づくメンバシップ属性を持つ関係の場合に、上述の式をそのまま使う。

例 3.3
場合 1 について、以下の導出関係 $sp1 \div p1$ が得られる。

$sp1$

$SUPPLIER$	$PART$	μ
$1/a$	$1/x$	1,1
$1/a$	$1/y$	0.7,0.7
$1/b$	$1/y$	1,1

$p1$

$PART$	μ
$1/x$	1,1
$1/y$	0.6,0.6

$sp1 \div p1$

$SUPPLIER$	μ
$1/a$	0.7,0.7

Mouaddib[6] はドメインの要素の類似度を考慮した。この点を取り入れれば、上の式は以下のように拡張される。

$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s \rangle_r[\mu])_N = \max(1 - t_s[\mu_\Pi], \sup_{t'} \min(\mu_=(t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t' \rangle_r[\mu_N])),$$
$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s \rangle_r[\mu])_\Pi = \max(1 - t_s[\mu_N], \sup_{t'} \min(\mu_=(t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t' \rangle_r[\mu_\Pi])),$$

ここで、$\mathcal{A}_S = \langle A_1, A_2, \ldots, A_m \rangle$ はファジイ関係データベーススキーム $S(A_1, A_2, \ldots, A_m, \mu)$ における属性の並びで、

$$\mu_=(t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]) = \inf_{A_l \in \mathcal{A}_S} \mu_=(t_s[A_l], t'[A_l]),$$

ここで、$\mu_=(t_s[A_l], t'[A_l])$ は関係 s のタプル t_sにおける属性値 $t_s[A_l]$ と関係 rのサブタプル t'における属性値の $t'[A_l]$ の類似度である。

例 3.4
例 3.3 で属性 $PART$ のドメインで類似度 $\mu_=(x, y) = 0.9$ を仮定すると、以下の導出関係が得られる。

$sp1 \div p1$

$SUPPLIER$	μ
$1/a$	0.9,1
$1/b$	0.9,1

属性値として可能性分布によって表わされた不正確な値を許すとしよう。Bosc と Liétard[3] はこの点を可能な関係の下に考察した。この点を取り入れて、拡張する。

$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_N = \max(1 - t_s[\mu_\Pi],$$
$$\sup_{t'} \min(N(=|\, t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_N])),$$
$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_\Pi = \max(1 - t_s[\mu_N],$$
$$\sup_{t'} \min(\Pi(=|\, t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_\Pi])),$$

ここで、

$$N(=|\, t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]) = \inf_{A_l \in \mathcal{A}_S} N(=|\, t_s[A_l], t'[A_l]),$$
$$\Pi(=|\, t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]) = \inf_{A_l \in \mathcal{A}_S} \Pi(=|\, t_s[A_l], t'[A_l]),$$

ここで、$N(=|\, t_s[A_l], t'[A_l])$ と $\Pi(=|\, t_s[A_l], t'[A_l])$ はタプル t_s における属性値 $t_s[A_l]$ とサブタプル t' における属性値 $t'[A_l]$ が等しい必然性と可能性の度合である。これらの度合は Prade and Testemale[10] に従って、

$$N(=|\, t_s[A_l], t'[A_l]) =$$
$$= 1 - \sup_{u,v \in dom(A_l)} \min(1 - \mu_=(u,v), \pi_{t_s[A_l], t'[A_l]}(u,v)),$$
$$\Pi(=|\, t_s[A_l], t'[A_l]) =$$
$$\sup_{u,v \in dom(A_l)} \min(\mu_=(u,v), \pi_{t_s[A_l], t'[A_l]}(u,v)),$$

ここで、$t_s[A_l]$ と $t'[A_l]$ に相互作用がなければ、

$$\pi_{t_s[A_l], t'[A_l]}(u,v) = \min(\pi_{t_s[A_l]}(u), \pi_{t'[A_l]}(v)).$$

例 3.5
$\mu_=(y,z) = 0.9$ とする。

$sp2$

$SUPPLIER$	$PART$	μ
$1/a$	$1/x$	1,1
$1/a$	$1/y$	1,1
$1/a$	$1/z$	1,1
$1/b$	$1/y$	1,1

$p2$

$PART$	μ
$1/x + 0.3/y$	0.6,0.6
$1/z$	1,1

$sp2 \div p2$

$SUPPLIER$	μ
$1/a$	0.7,1
$1/b$	0.4,0.4

次に、場合 2 の定式化を示す。Gödel の含意の拡張版 [9] を用いる。

$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_N =$$
$$\begin{cases} 1 & if\ t_s[\mu_N] \le \langle t, t_s\rangle_r[\mu_N] \\ & and\ t_s[\mu_\Pi] \le \langle t, t_s\rangle_r[\mu_\Pi] \\ \langle t, t_s\rangle_r[\mu_\Pi] & if\ t_s[\mu_N] \le \langle t, t_s\rangle_r[\mu_N] \\ & and\ t_s[\mu_\Pi] > \langle t, t_s\rangle_r[\mu_\Pi] \\ \langle t, t_s\rangle_r[\mu_N] & otherwise, \end{cases}$$
$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_\Pi =$$
$$\begin{cases} 1 & if\ t_s[\mu_\Pi] \le \langle t, t_s\rangle_r[\mu_\Pi], \\ \langle t, t_s\rangle_r[\mu_\Pi] & otherwise. \end{cases}$$

属性値がクリスプな値である時、この式はそのまま使われる。

要素の類似度を考慮すれば、以下の式を得る。

$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_N = \begin{cases} 1 & if\ t_s[\mu_N] \le Q_N \\ & and\ t_s[\mu_\Pi] \le Q_\Pi \\ Q_\Pi & if\ t_s[\mu_N] \le Q_N \\ & and\ t_s[\mu_\Pi] > Q_\Pi \\ Q_N & otherwise, \end{cases}$$
$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_\Pi = \begin{cases} 1 & if\ t_s[\mu_\Pi] \le Q_\Pi, \\ Q_\Pi & otherwise, \end{cases}$$

ここで、

$$Q_N = \sup_{t'} \min(\mu_=(t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_N]),$$
$$Q_\Pi = \sup_{t'} \min(\mu_=(t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_\Pi]).$$

属性値に可能性分布で表わされた不正確な値を認める時、上述の式における Q_N と Q_Π は以下の式で置き換えられる。

$$Q_N = \sup_{t'} \min(N(=|\, t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_N]),$$
$$Q_\Pi = \sup_{t'} \min(\Pi(=|\, t_s[\mathcal{A}_S], t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_\Pi]).$$

4 可能値を考慮した定式化

前節で可能性分布で表わされた不正確な値を考慮した式は十分ではない。例 3.5 における導出関係は正しくない。関係 $p2$ の一番目のタプル属性 $PART$ の可能値は x か y のいづれかである。これらの可能値に対応するタプル値 $\langle a, x\rangle$ と $\langle a, y\rangle$ はメンバシップ値 (1,1) で関係 $sp2$ に存在している。従って、例 3.5 の結果は以下のように修正されなければならない。

$sp2 \div p2$

$SUPPLIER$	μ
$1/a$	1,1
$1/b$	0.4,0.4

このことは、可能性分布で表わされた不正確な属性値を認める時、可能値を考慮しなければ、正しい結果が得られないことを示している。この点を考慮すると以下の式を得る。

$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_N = \inf_{d \in dom(\mathcal{A}_S)} \max(1 - t_s[\mu_\Pi], 1 -$$
$$\Pi(=|\, d, t_s[\mathcal{A}_S]), \sup_{t'} \min(N(=|\, d, t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_N])),$$
$$(t_s[\mu] \to \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_\Pi = \inf_{d \in dom(\mathcal{A}_S)} \max(1 - t_s[\mu_N], 1 -$$
$$N(=|\, d, t_s[\mathcal{A}_S]), \sup_{t'} \min(\Pi(=|\, d, t'[\mathcal{A}_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_\Pi])),$$

ここで、$dom(\mathcal{A}_S) = dom(A_1) \times dom(A_2) \times \cdots \times dom(A_m)$ で、$d \in Dom(\mathcal{A}_S)$ は $t_s[A_l]$ の可能値 $d[A_l]$ の並び $\langle d[A_1], d[A_2], \ldots, d[A_m]\rangle$ である。

$$N(=|\, d, t_s[\mathcal{A}_S]) = \inf_{A_l \in \mathcal{A}_S} N(=|\, d[A_l], t_s[A_l]),$$
$$\Pi(=|\, d, t_s[\mathcal{A}_S]) = \inf_{A_l \in \mathcal{A}_S} \Pi(=|\, d[A_l], t_s[A_l]),$$

ここで、

$$N(=|\, d[A_l], t_s[A_l]) =$$
$$1 - \sup_{u \in dom(A_l)} \min(1 - \mu_=(d[A_l], u), \pi_{t_s[A_l]}(u)),$$
$$\Pi(=|\, d[A_l], t_s[A_l]) =$$
$$\sup_{u \in dom(A_l)} \min(\mu_=(d[A_l], u), \pi_{t_s[A_l]}(u)).$$

前節で示した場合２の式も場合１と同じ欠点を持っている。そこで、可能値を考慮した場合２に関する式を以下に示す。

$$(t_s[\mu] \rightarrow \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_N = \inf_{d \in dom(A_S)} (t_s[\mu] \rightarrow \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_{d,N},$$
$$(t_s[\mu] \rightarrow \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_\Pi = \inf_{d \in dom(A_S)} (t_s[\mu] \rightarrow \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_{d,\Pi},$$

ここで、

$$(t_s[\mu] \rightarrow \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_{d,N} = \begin{cases} 1 & if\ P_N \leq Q_N \\ & and\ P_\Pi \leq Q_\Pi \\ Q_\Pi & if\ P_N \leq Q_N \\ & and\ P_\Pi > Q_\Pi \\ Q_N & otherwise, \end{cases}$$

$$(t_s[\mu] \rightarrow \langle t, t_s\rangle_r[\mu])_{d,\Pi} = \begin{cases} 1 & if\ P_\Pi \leq Q_\Pi \\ Q_\Pi & otherwise, \end{cases}$$

ここで、

$$\begin{aligned} P_N &= \min(t_s[\mu_N], N(=|\ d, t_s[A_S]), \\ Q_N &= \sup_{t'} \min(N(=|\ d, t'[A_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_N])), \\ P_\Pi &= \min(t_s[\mu_\Pi], \Pi(=|\ d, t_s[A_S]), \\ Q_\Pi &= \sup_{t'} \min(\Pi(=|\ d, t'[A_S]), \langle t, t'\rangle_r[\mu_\Pi])). \end{aligned}$$

5 結論

必然性測度と可能性測度に基づくファジイ関係データモデルにおいて、以下の要請の下に割り算演算子 $r \div s$ を定式化した。

1. 関係 s の全てのタプル値が完全に関係 r に含まれる。
2. 関係 s の全てのタプルが必然性と可能性において関係 r に含まれる。

定式化にあたって以下の３点を考慮した。

1. 関係におけるタプルのメンバシップ値
2. ドメインの要素の類似度
3. 可能性分布で表わされた属性値

可能性分布が属性値として認められる時、基本要素は可能値である。もし、可能値が割り算演算子で考慮されなければ、正しい結果は得られない。そこで、可能値を考慮した割り算演算子の定式化を示した。

参考文献

[1] Bosc, P., Dubois, D., Pivert, O. and Prade, H. [1995] Fuzzy Division for Regular Relational Databases, in Proceedings of FUZZ-IEEE '95, IEEE, pp. 729-734.

[2] Bosc, P. and Liétard, L. [1995] On the Comparison of the Sugeno and the Choquet Integrals for the Evaluation of Quantified Statements, in Proceedings of the 3rd European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT '95), Aachen, Germany, pp. 709-716.

[3] Bosc, P. and Liétard, L. [1995]On the division of relations with imprecise information. In: Fuzzy division for regular relational databases. in: Foundations and Applications of Possibility Theory(Proceedings of FART '95)(G. de Gooman, Da Ruan, and E. E. Kerre, eds.), Gent, Belgium, Dec. 13-15, 1995, World Scientific, Singapore, pp. 287-294.

[4] Cubero, J. C., Medina, J. M., Pons, O., and Vila, M. A. [1994] The Generalized Selection: An Alternative Way for the Quotient Operations in Fuzzy Relational Databases, in Proceedings of IPMU '94, pp. 23-30.

[5] Dubois, D., and Prade, H. [1996] Semantics of Quotient Operators in Fuzzy Relational Databases, Fuzzy Sets and Systems, **78**, 89-93.

[6] Mouaddib, N. [1994] Fuzzy Identification in Fuzzy Databases. The Nuanced Relational Division, International Journal of Intelligent Systems, **9**, 461-473.

[7] Nakata, M. [1993]Integrity Constraints in Fuzzy Databases, in: Proceedings of the First Asian Fuzzy Systems Symposium, Singapore, Nov. 23-26, 1993, pp. 964-979.

[8] Nakata, M. [1996]Formulating division operators in fuzzy relational databases, in: Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based-Systems(IPMU '96), Granada, Spain, July 1-5, 1996, pp.1277-1282.

[9] Nakata, M. [1997]Formulation of Functional Dependencies in Fuzzy Relational Databases, in: Lectures on Fuzziness and Databases, Fifth Series, R. De Caluwe, ed., Gent University 1997.

[10] Prade, H. and Testemale, C. [1984] Generalizing Database Relational Algebra for the Treatment of Incomplete or Uncertain Information and Vague Queries, *Information Sciences* **34**, 115-143.

[11] Raju, K. V. S. V. N. and Majumdar, A. K. [1988] Fuzzy Functional Dependencies and Lossless Join Decomposition of Fuzzy Relational Database Systems, *ACM Transactions on Database Systems* **13**(2), 129-166.

[12] Umano, M. [1982] FREEDOM-O: A Fuzzy Database System, in *Fuzzy Information and Decision Processes*, M. M. Gupta and E. Sanchez, Eds., North-Holland, Amsterdam, 1982, pp. 339-347.

[13] Umano, M. and Fukami, S. [1994] Fuzzy Relational Algebra for Possibility-Distribution-Fuzzy-Relational Model of Fuzzy Data, Journal of Intelligent Information Systems, **3**, 7-27.

[14] Yager, R. R. [1994] Interpreting Linguistically Qualified Propositions, International Journal Intelligent Systems, **9**, 541-569.

[15] Zemankova, M. and Kandel, A. [1984] *Fuzzy Relational Databases–A Key to Expert Systems*, Verlag TÜV Rheinland, Cologne.

問い合わせ先：
263 千葉市稲毛区轟町４丁目 3-30 千葉経済大学短期大学部
経営情報学科　　中田　典規
TEL 043-255-3451 FAX 043-252-6050
E-mail: nakata@chiba-kc.ac.jp

WEF1-2

正規化相互出現頻度に基づくファジィ関連語行列生成法

Fuzzy Related Term Matrix Generation Algorithm Based on Normalized Cross-Occurrence Frequency

野本　弘平
Kohei Nomoto
三菱電機(株)　鎌倉製作所
Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corporation

Abstract　We presented a fuzzy thesaurus generation algorithm based on cross-occurrence frequency for similar case retrieval. This algorithm was applied to a decision support system to plan a rescue operation against a disaster and was evaluated using 200 real cases. Then, useful past cases were retrieved by the resultant fuzzy thesaurus, but a strange phenomenon was found. Degree of a relation between a pair of index attribute values will be unnaturally weak, if their occurrence frequencies are very different each other. In this paper, a modified algorithm is shown to solve this problem.

1　はじめに

現在の問題に類似した過去の事例をその類似の度合に応じて検索することにより、意思決定や計画立案の支援を行うことができる。このような類似事例検索にはファジィシソーラスが有効であるが、ここで扱う各事例には、複数のインデックスにそれぞれ１個のインデックス値しか付与されていないので、キーワードの同時出現に基づく文献検索の分野で標準的なファジィシソーラス生成法[1]は適用できない。そこで、上述の類似事例検索のために、あるインデックスに属するインデックス値のファジィシソーラスを生成するために、別のインデックスに属するインデックス値との、相互出現頻度に基づいてファジィシソーラスを生成する方法を提案した[2][3]。

この方法を実際の事例群に適用した結果、機能的には所期の有用性を示したものの、インデックス値対の出現頻度の差が大きい場合、これらの間の関連度は、常に、不自然に低く算出されるという現象が見られた。これは、そのような場合には相互出現頻度が相対的に小さな値しか取りえないからである。本報告では、出現頻度の絶対値ではなパタンを比較するために、正規化を一連の処理の前段に行うことにより、この問題を解決する方法について示す。

2　相互出現頻度に基づくファジィ関連語行列生成法

過去の事例には、複数のインデックスが設定されており、各インデックスにはそれぞれに属するインデックス値の集合の中から１個ずつが付与されているものとする。このような事例の構造を図１に示す。

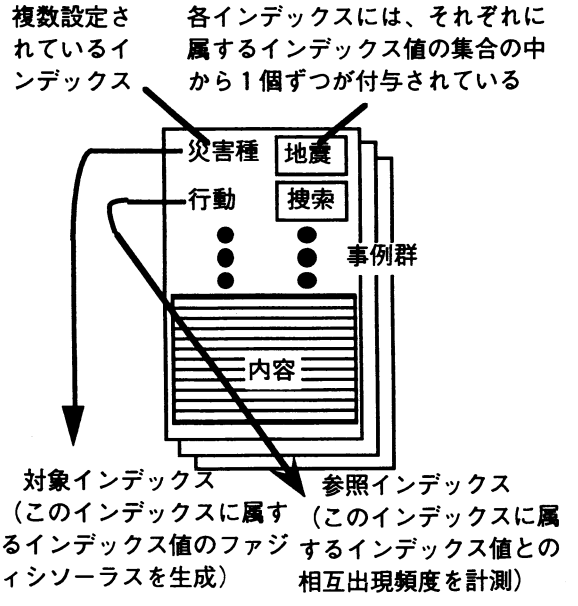


図１　事例のインデックス構造

類似事例の検索は、各インデックスのインデックス値を指定することにより行われるので、シソーラスは各インデックス毎に必要である。しかし、あるインデックスに属するインデックス値のシソーラスを生成しようとしても、各事例にはその中の１個だけしか付与されていないので、このインデックス値群内での同時出現はありえない。そこで、あるインデックス（以下、対象インデックスと呼ぶ）に属するインデックス値のファジィシソーラスを生成するために、別のインデックス（以下、参照インデックスと呼ぶ）に属するインデックス値との、同一の事例における相互出現の関係を調べ、これに基づいてファジィシソーラスを生成する方法を示した[2][3]。

この方法では、まず、対象インデックスの事例への付与の関係$\mathbf{A}(k)$と、参照インデックスの事例への付与の関係$\mathbf{A}(l)$とを、それぞれ計測する。

つぎに、max-min合成と呼ぶ次式の合成を定義する。ここで、大括弧の添え字は行列の要素を表わす。

$$[\mathbf{A}\oplus\mathbf{B}]_{i,k}=\sum_{j=1}^{q}\left([\mathbf{A}]_{i,j}\wedge[\mathbf{B}]_{j,k}\right) \qquad (1)$$

このmax-min合成により上記2つの付与関係の合成を行うと、対象インデックスに属するインデックス値と参照インデックスに属するインデックス値との間の関係、すなわち相互出現頻度行列$\mathbf{C}(k,l)$が得られる。

$$\mathbf{C}(k,l)=\mathbf{A}(k)\oplus\mathbf{A}(l)^T \qquad (2)$$

さらに、これをもう一度max-min合成すると、対象インデックスに属するインデックス値同士の関係、すなわち間接的同時出現行列$\mathbf{G}(k|l)$が得られる。

$$\mathbf{G}(k|l)=\mathbf{C}(k,l)\oplus\mathbf{C}(k,l)^T \qquad (3)$$

ただし、この関係は、対象インデックスに属するインデックス値同士の間に、何本のパスがあるかを示す0以上の整数値で表現されたものである。そこで、この間接的同時出現行列$\mathbf{G}(k|l)$の対角要素の値が、対応するインデックス値の総出現回数となることを利用して、この値により、対応する行の要素の値を正規化する。この正規化の結果は、インデックス値の意味の包含関係を示しているので、対象要素対の小さい方の値を選択することにより、最後に、関連語行列$\mathbf{R}(k|l)$としての解釈を行う。

以上の相互出現頻度に基づくファジィ関連語行列生成法のアルゴリズムを図2のブロック線図に示す。

過去の事例として200件あまりの実際の災害派遣活動の事例を登録した災害派遣活動に関する意思決定支援システムに、この方法を適用し、さまざまな評価を行った。その結果、機能的には所期の有用性を示したものの、出現頻度の差が大きいインデックス値対の関連度は、常に不自然に低く算出されてしまうという現象が見られた。

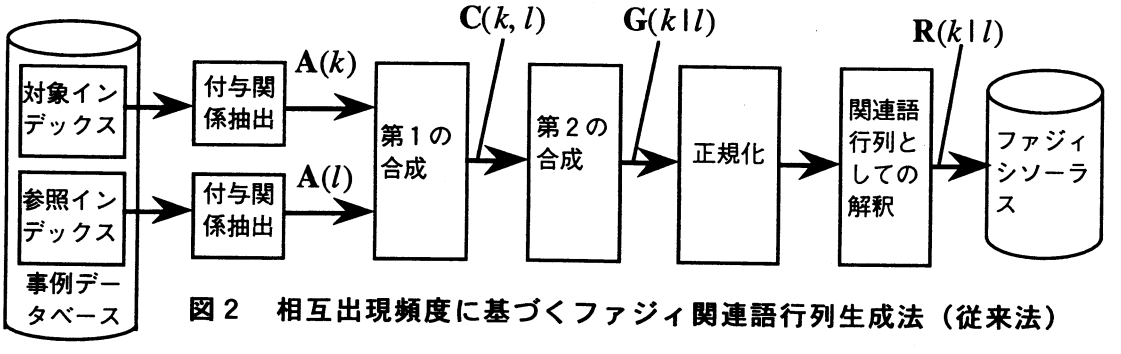


図2　相互出現頻度に基づくファジィ関連語行列生成法（従来法）

3　アルゴリズムの一般化と問題点の解決法

以上に述べた相互出現頻度に基づくファジィ関連語行列生成法では、インデックス値の直接的な同時出現が計測できないために、別のインデックスに属するインデックス値との相互出現行列を求めて、これを用いて間接的に同時出現に相当する指標を得ていることが特徴である。このため、このアルゴリズムでは、前記の2つのインデックスの事例への付与関係$\mathbf{A}(k)$と$\mathbf{A}(l)$から両インデックスの相互出現頻度行列$\mathbf{C}(k,l)$を得るための第1の合成と、この相互出現頻度行列から間接的同時出現頻度行列$\mathbf{G}(k|l)$を得るための第2の合成が必要であり、さらに、得られた結果をファジィシソーラス$\mathbf{R}(k|l)$とするために0から1までの値への正規化が必要である。つまり、2度の合成と正規化によるファジィシソーラス生成法として、相互出現頻度に基づくファジィ関連語行列生成法を一般化することができる。

一方、出現頻度の大きな違いによる関連度の低下の問題について考察する。一般に、インデックス値の持つ概念の包含関係は、図3のような概念の空間を用いて説明される[1]。つまり、2つの円は、インデックス値AとBそれぞれの概念を示している。このとき、これらAとBとの関連度は、両者の交わり$\mathrm{A}\cap\mathrm{B}$の面積をこれらAとBの内の大きな方の面積で正規化したものであると説明される（両者の結び

A∪Bで正規化することもあるが、本質は変わらない）。実際の応用では、この「概念」は、文献や事例など、具体的に計測できる指標で置き換えられる。前章に述べた方法もこの考え方に基づいている。

この図を用いて先の問題を考えると、出現頻度に大きく違いがあるインデックス値対の場合、この図でいえば、A と B の面積が大きく違うときには、A∩Bの面積が相対的に小さな部分となるため、これらの関連度は大きく成り得ないことが理解できる。実際のシステムの場合、各インデックス値の出現頻度は、多いものと少ないものとでは何桁もの違いがあるので、この問題は、実応用において深刻な問題となる。

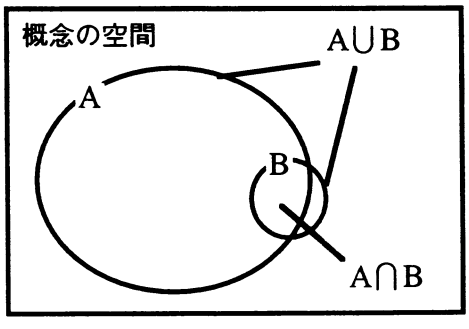


図３　インデックス値の概念の包含関係

以上のように考えると、出現頻度の絶対値、この図では面積自体、によって関連度を定義する方法では、この問題は解決できないことが分かる。つまり、各インデックス値の出現がそれぞれどの事例に対するものであるかを区別し、その出現頻度パタンを比較することにより、インデックス対の関連度を定義しなおす必要がある。

さて、前述のように、相互出現頻度に基づくファジィ関連度行列生成法は、２度の合成と正規化に一般化されたから、出現頻度のパタンを得るためには、処理の順番を変えて、合成により出現頻度が総合化されてしまう前に、早い段階で正規化を行うことが考えられる。

以下、この考え方に基づくファジィシソーラス生成法、正規化相互出現頻度に基づくファジィ関連語行列生成法のアルゴリズムを示す。

まず、従来法と同様に、対象インデックスの事例への付与関係$\mathbf{A}(k)$と参照インデックスの事例への付与関係$\mathbf{A}(l)$とを、それぞれ計測する。つぎに、対象インデックスの事例への付与関係を、各インデックス値の総出現頻度により正規化する。つまり、出現頻度の絶対値表現から、パタンとしての表現に変換する。

$$\left[\tilde{\mathbf{A}}(k)\right]_{i_k,p}=\left[\mathbf{A}(k)\right]_{i_k,p}/\sum_{p=1}^{n}\left[\mathbf{A}(k)\right]_{i_k,p} \quad (4)$$

この正規化された対象インデックスの付与関係$\tilde{\mathbf{A}}(k)$と参照インデックスの付与関係との合成として、正規化相互出現頻度行列$\tilde{\mathbf{C}}(k,l)$を定義する。この「正規化」という意味は、この行列の行方向の要素の和が、常に１となるということである。

$$\tilde{\mathbf{C}}(k,l)=\tilde{\mathbf{A}}(k)\oplus\mathbf{A}(l)^T \quad (5)$$

この正規化相互出現頻度行列同士の合成による対象インデックスに属するインデックス値同士の関係、

$$\tilde{\mathbf{R}}(k\,|\,l)=\tilde{\mathbf{C}}(k,l)\oplus\tilde{\mathbf{C}}(k,l)^T \quad (6)$$

は、直接、ファジィ関連語行列$\tilde{\mathbf{R}}(k\,|\,l)$として利用できるものとなっている。つまり、正規性、反射性、および対称性を満たしている。これは、(1)式のmax-min合成による効果である。

以上の正規化相互出現頻度に基づくファジィ関連語行列生成法のアルゴリズムを、図４のブロック線図に示す。

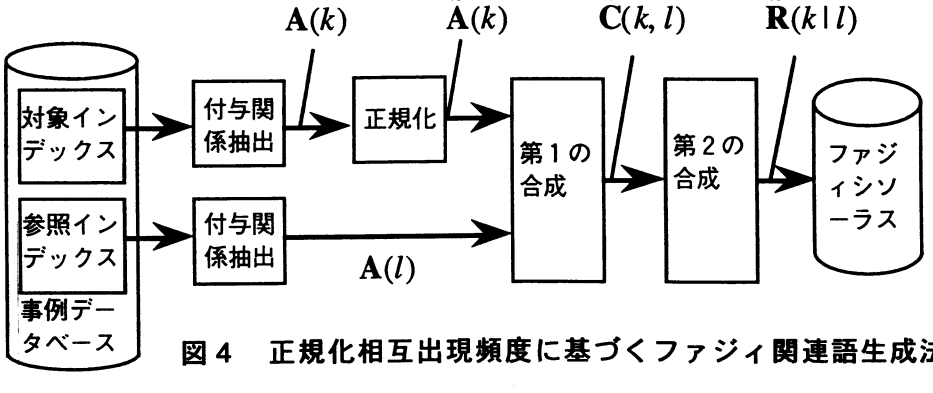


図４　正規化相互出現頻度に基づくファジィ関連語生成法

4　数値例

対象インデックスと参照インデックスが、図5のように事例群に付与されている例を考える。

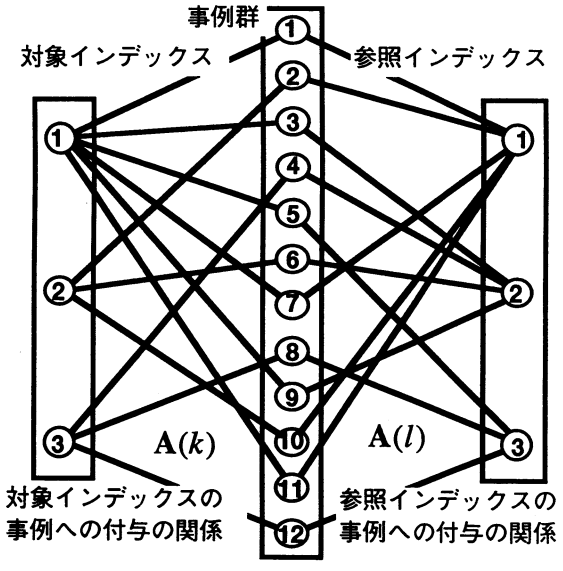


図5　インデックスの事例への付与関係の例

この対象インデックスの付与関係と参照インデックスの付与関係は、それぞれ次のよう計測される。ここで、値が0となる要素は空欄としている。

$$\mathbf{A}(k)=\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}\hline 1 & & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & \\ \hline & 1 & & & & 1 & & & & 1 & & \\ \hline & & & 1 & & & & 1 & & & & 1 \\ \hline\end{array}$$

$$\mathbf{A}(l)=\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}\hline 1 & 1 & & & & & 1 & & & 1 & 1 & \\ \hline & & 1 & 1 & & 1 & & & 1 & & & \\ \hline & & & & 1 & & & 1 & & & & 1 \\ \hline\end{array}$$

従来の方法により、初めから合成を行うと、(2)式により相互出現行列は、次のようになる。

$$\mathbf{C}(k,l)=\begin{array}{|c|c|c|}\hline 3 & 2 & 1 \\ \hline 2 & 1 & \\ \hline & 1 & 2 \\ \hline\end{array}$$

つまり、対象インデックスの1番目のインデックス値は、参照インデックスの1番目、2番目、3番目のそれとそれぞれ3回、2回、1回の頻度で、同一の事例に相互出現している。この傾向は、2番目のインデックスが、同じく、2回、1回、0回の頻度で相互出現している傾向によく似ている。したがって、両インデックス値の関連度は大きな値を取るべきである。しかし、総出現頻度が1番目のものが6回で2番目のものの3回に勝っているので、(3)式とそれに続く正規化と関連語行列としての解釈の結果、ファジィ関連語行列は次のようになり、対象インデックスの1番目と2番目のインデックス値の関連度は、0.50という小さな値に留まってしまう。

$$\mathbf{R}(k\,|\,l)=\begin{array}{|c|c|c|}\hline 1.00 & 0.50 & 0.33 \\ \hline 0.50 & 1.00 & 0.33 \\ \hline 0.33 & 0.33 & 1.00 \\ \hline\end{array}$$

そこで、正規化を先に行う本アルゴリズムに従えば、まず、対象インデックスの各事例への出現傾向が、正規化によりパタンとして捕えられる。

$$\tilde{\mathbf{A}}(k)=\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}\hline 1/6 & & 1/6 & & 1/6 & & 1/6 & & 1/6 & & 1/6 & \\ \hline & 1/3 & & & & 1/3 & & & & 1/3 & & \\ \hline & & & 1/3 & & & & 1/3 & & & & 1/3 \\ \hline\end{array}$$

以下、新たな定義による相互出現頻度行列とファジィ関連語は、次のように得られれ、前記の関連度は、0.83と直感に近い大きな値となっていることが分かる。

$$\tilde{\mathbf{C}}(k,l)=\begin{array}{|c|c|c|}\hline 0.50 & 0.33 & 0.17 \\ \hline 0.67 & 0.33 & \\ \hline & 0.33 & 0.67 \\ \hline\end{array}$$

$$\tilde{\mathbf{R}}(k\,|\,l)=\begin{array}{|c|c|c|}\hline 1.00 & 0.83 & 0.50 \\ \hline 0.83 & 1.00 & 0.33 \\ \hline 0.50 & 0.33 & 1.00 \\ \hline\end{array}$$

5　おわりに

インデックスの出現頻度の差異による関連度低下の問題を解決するために、正規化を一連の処理の前段に行う方法を示した。実際のシステムにおいてインデックス値の総出現頻度は、多いものと小さいものとでは桁違いに異なるため、この問題は、ここに示した例題よりも極端な形で現われる障害である。

参考文献

[1] 宮本:ファジィ理論と情報検索のモデル、pp.123-151 in 日本ファジィ学会:講座ファジィ第9巻ファジィデータベースと情報検索、日刊工業新聞社 (1993).

[2] K.Nomoto, et al.: Fuzzy thesaurus generation based on cross-index matrix for case-based reasoning, IEEE International Conference on SMC, pp.4033-4038 (1995).

[3] 野本、ほか: 類似事例検索のための相互出現頻度に基づくファジィシソーラス生成法、日本ファジィ学会誌、Vol.8, No.6, pp.1134-1143 (1996).

問い合わせ先：　野本弘平
〒247 鎌倉市上町屋325　三菱電機(株)鎌倉製作所
tel.: 0467-41-5758 E-mail: nomoto@kama.melco.co.jp

WEF1-3

音声認識と自然言語処理を用いたデータベースインタフェース

九州工業大学 工学部 ○波呂浩一郎 前田博

The database interface using speech recognition and natural language

○Kouichirou Haro and Hiroshi Maeda, Faculty of engineering Kyushu Institute of Technology

Abstract:We are developing a user-friendly database interface that uses a speech recognition and a natural language processing. For this propose, the database system into which the interface developed by users can be freely built is necessary. E.base adopted here is indeed such a database system. This paper describes a prototype interface with a speech recognition and a natural language processing.

1．はじめに

ユーザにとってコンピュータシステムが使いやすく，分かりやすくなるように考慮し，実現しているインタフェースをユーザフレンドリなインタフェースと言う．このようなインタフェースの代表例としてＧＵＩがあるが，その他にも，ジョイスティック，ライトペン，タッチスクリーン，バーコードリーダー，音声入力などの入力装置を組み合わせて行こうとするアプローチがある．

これらの中で，音声入力を本研究の中に取り入れているが，現時点では，音声認識は人間の日常的な会話を制限なしにコンピュータが理解するまでには至っていない．単語認識が可能なレベルである．したがって，本研究では，単語認識レベルの音声認識を用いたデータベースインタフェースを作成することにした．

一方，データベースとしてＥ．ｂａｓｅを使用した．Ｅ．ｂａｓｅはアプリケーションプログラムに組み込むために利用するデータベースである．Ｅ．ｂａｓｅは検索機能，レポート出力機能等が不足しているため，一般ユーザが使用するシステムではなく，Ｃ言語を用いて必要な機能を自由にカスタマイズしていくデータベースである．

特に，データ検索部にはキーボートからの入力ではあるが，自然言語処理を取り入れ，音声認識システムとＥ．ｂａｓｅを組み合わせた，ユーザフレンドリなデータベースインタフェースの開発を行っている．

2．音声認識を用いたデータベースインタフェース

音声認識は，人間の音声の区切りが不明瞭なこと，個人差，認識対象の増大，外部雑音の除去等課題は多く，現時点では人間の日常的な会話を制限なしにコンピュータが理解するまでには至っていない．本研究では，単語認識レベルの音声認識を用いたデータベースインタフェースを作成する．

データベースインタフェースは，ユーザにデータベースを操作するための命令文をメニュー表示する．ユーザは，メニューに示された中から選んだ命令文を音声入力する．メニューを選択すると，さらにその命令に対応したメニューを表示する階層メニュー方式とした．（図１）

音声認識システムは，メニューに表示された命令文しか認識できないので自由な自然言語を命令文として使用できない．しかし，データベースの検索などでは，検索命令や部品名のように文字で表されたデータ値の場合は様々な言い方があり，すべての言い方をメニュー表示するのは困難である．そこで，データベース検索の部分に，キーボードによる入力ではあるが，自然言語処理を取り入れた．

また，データ検索部以外のインタフェースに対する入力は，できる限り音声入力を用いるようにしたが，音声認識システムが登録した単語しか認識できないため，データベース名，データベースの表の列名，データ値など認識不可能な単語はキーボード入力とした．また，数字もテンキーを使って入力した方が正確で速いと思われたので一部を除いてキーボード入力とした．

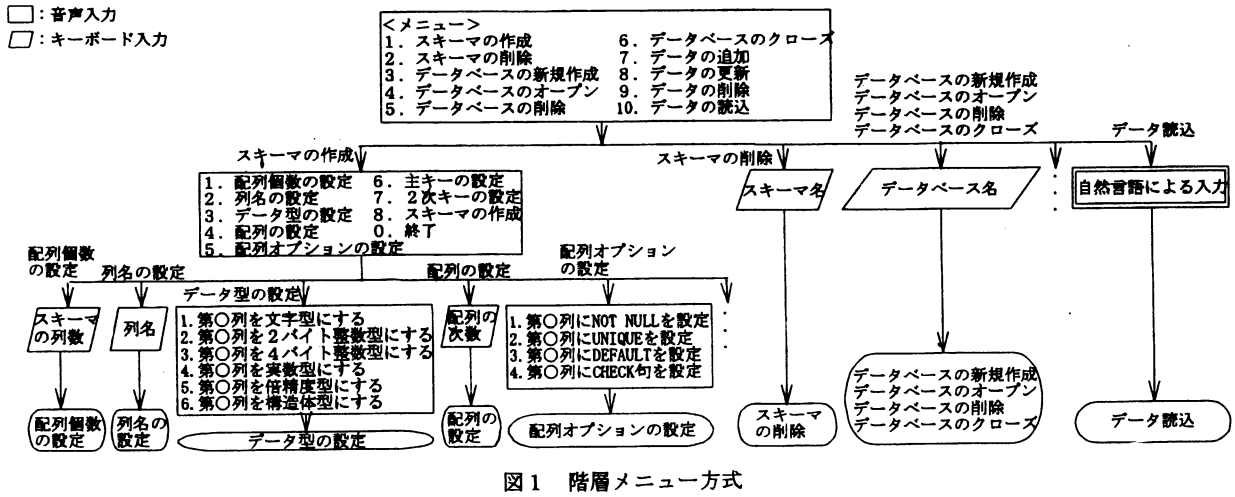


図１　階層メニュー方式

3．音声認識システム

以下のような音声認識システムを本研究に用いた．

（1）不特定話者対応

事前の発話者の限定・発話者の音声登録が不要である．男女の区別を選択するだけで，誰が話した言葉でも認識できる．

（2）連続音声入力可能

特別な発音（単語で区切るとか）の必要はなく，自然な文を認識できる．

3.1 シンタックス

一般に，人間が音声を認識する場合でも，人間はその言葉の文法に関する知識をもとに，次にくる単語をある程度予想して，音声の認識を行っている．同じように，音声認識システムでも，シンタックスというルールを用いることにより，音韻デコーダが，次にくる単語を予想して，音声の認識を行う．

音声認識の処理プロセスの中で，シンタックスは以下のような役割を果たす．

1）シンタックスは，ユーザがある場面で認識しなければならない可能性のあるセンテンスの数を限定させる役割を持っており，このことにより，音声認識の認識速度と正確さを高めている．

2）シンタックスによって，音韻デコーダが認識しなければならないセンテンス，フレーズの語順を明瞭にすることができる．

3）シンタックスによって，特定のアプリケーションで使用可能なセンテンス群が明瞭になる．

4）音韻デコーダが認識した結果を出力する場合には，シンタックスに記述された文字列で出力される．

図2のシンタックスを用いた音声入力により，取り出せる文字列の例を以下に示す．

例1　スキーマ の 新規作成

例2　データベース の オープン

例3　データ の 追加

シンタックスを用いることにより例にあげたような文を認識することを可能にしている．このようなシンタックスから取り出せる文字列を命令文としてメニューに表示する．

現時点では人間の日常的な会話を制限なしにコンピュータが理解するまでには至っていないので，シンタックスを用いて単語認識を可能にしているのである．しかしこれは，シンタックスにあらかじめ記述できない文は認識出来ないという欠点となっている．

```
S -> +スキーマ | +データベース | +データ
+スキーマ -> スキーマ[すきーま] の (+作成 | +削除)
+データベース -> データベース[でーたべーす] の (+作成 | +オープン | +削除 | +クローズ)
+データ -> データ[でーた] の (+追加 | +更新 | +削除 | +読込)
+作成 == 新規作成[しんきさくせい] 作成[さくせい]
+オープン == オープン[おーぷん] 開く[ひらく]
+削除 == 削除[さくじょ]
+クローズ == クローズ[くろーず] 閉じる[とじる]
+追加 == 追加[ついか] 書込[かきこみ]
+更新 == 変更[へんこう] 更新[こうしん]
+読込 == 読込[よみこみ]

※S -> は文の始まりである.
 (|)や | はOR条件を示す.
 +OO は変数であり，2行目以下は変数の内容を示す.
```

図2　シンタックスの例

4．データベース

本研究で使用するE．ｂａｓｅは，科学技術計算系のエンジニアリング分野のアプリケーションプログラムを作成するためのデータベースシステムである．E．ｂａｓｅは，リレーショナルデータベースライクなデータ構造とデータベース言語を装備し，その上にエンジニアリング分野が必要な機能を付加している．

4.1 ＳＱＬ

ＳＱＬ（Structure Query Language）とは，関係（リレーショナル）データベースのための構造化問合わせ言語である．ＳＱＬは，関係データベースに対する管理およびアクセス全般の機能を規定する専用言語であり，データ定義言語（ＳＱＬ＿ＤＤＬ）と，データ操作言語（ＳＱＬ＿ＤＭＬ）から構成されている．１９８７年にＪＩＳ　Ｘ３００５－1987として制定されている．

4.2 ＥＳＱＬ

ＥＳＱＬは，Ｅ．ｂａｓｅ独自のＳＱＬライクな構造化問合せ言語である．ＳＱＬの一部を採用し，配列型属性や構造体型属性のアクセス機能を拡張したものである．E．ｂａｓｅは，ＪＩＳやＡＮＳＩ規格で標準化されたデータベース問い合わせ言語ＳＱＬを拡張したＥＳＱＬを装備している．ＥＳＱＬは，１レコード単位もしくはレコード集合単位の追加，読込，更新，削除を行うことができる．

このＥＳＱＬをＣ言語の中に直接記述しデータ操作を行う．

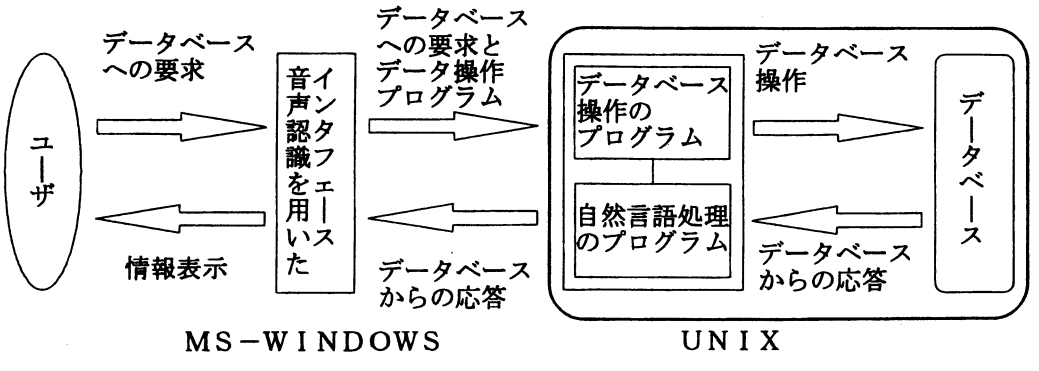


図3　各プログラムの役割

5．動作環境と処理の流れ

本研究で使用する音声認識システムは，ハードウェアとしてIBM PC/ATまたはその互換機（いわゆるDOS/Vマシン）を必要とし，ソフトウェアとして日本語 MS-DOS6.0 以上，MS-Windows3.1を必要とする．

また，Ｅ．ｂａｓｅはＵＮＩＸ上で動作する．

音声認識を使ってユーザとやり取りをする部分のプログラムはMS-Windows 上でプログラムを実行し，データベースにアクセスしデータの操作を行う部分と自然言語の処理を行う部分のプログラムはＵＮＩＸ上で実行した．処理の流れを図３に示す．

5.1 ＷＩＮＤＯＷＳ上のプログラム

ＷＩＮＤＯＷＳ上のプログラムが行うことは，ユーザからのデータベースに対する要求を，ＵＮＩＸ上のプログラムに渡すことである．ユーザが要求したデータベース操作に必要な情報はユーザとの対話により獲得する．さらに，ＥＳＱＬをＣ言語の中に直接記述したデータ操作のためのプログラムを作成し，ＵＮＩＸ側に渡す．また，ＵＮＩＸ上のプログラムから得たデータベース操作の結果の表示も行う．

5.2 ＵＮＩＸ上のプログラム

ＵＮＩＸ上のプログラムが行うことは，ＷＩＮＤＯＷＳ上のプログラムからのデータベースに対する要求を実行することである．さらに，データ操作用のプログラムが送られてきた時は，コンパイル，実行等を行う．また，データベース操作の結果をＷＩＮＤＯＷＳ上のプログラムへ渡す．さらに，データ検索の時は，自然言語処理を行う．

6．自然言語処理

データ検索に自然言語を用いる．但し，自然言語を音声入力できないのでキーボードによる入力とした．自然言語入力文は節 6.2，6.3 の処理により行い形式化される（参考文献[3]，[4]参照）．自然言語処理では形式言語中の単語が正確でない場合，正しい単語と置き換えなければならない．自然言語処理にこの単語置き換えを加える．

6.1 自然言語問い合わせ文

自然言語処理は，種々の大規模な辞書を用意すればかなりのことができる．しかし，本研究のように自然言語処理がデータベースインタフェースの一部となっている場合，大がかりな自然言語処理は，システム全体の操作性や応答性を損なうことになる．このような考慮の基に設計されている．

１）問い合わせ文は，漢字仮名交じりで書かれた倒置法などを用いない平易な文であり，以下の制約のみ課す．

一つの問い合わせ文は，句点「。」で終了を表す．重文による複合問い合わせは，接続語の前に必ず読点「、」を置く．従って，単文では読点を接続語として使わない．

２）検索属性は，その文字列の中に少なくとも一つの非平仮名文字列を含んでいる．すなわち，検索属性が平仮名のみの語であれば，検索できない．

6.2 問い合わせ文の形式化

自然言語で表現された問い合わせ文は，データベース検索には不向きである．そこで，自然言語で表現された問い合わせ文中に存在するデータベース検索のための情報になり得る語句を取り出して，データベース検索する必要がある．自然言語で表現された問い合わせ文の中に含まれる様々な検索情報を次のように定義する．

１）検索対象 (E)

検索要求によって特徴づけられ，最終的に出力される対象

２）検索属性 (T)

検索対象を特徴づける種々の属性

３）比較演算子 (R)

検索対象間の関係

４）比較の対象 (O)

比較演算子における比較の対象

５）ファジィ集合 (F)

検索属性上にで使われるあいまいな語

６）ファジィ修飾詞 (M)

比較演算子，ファジィ集合を修飾するあいまいな語

７）否定 (N)

否定を表す語

８）並列語 (LW)

検索属性，比較の対象を複数接続させる語

自然言語問い合わせ文からデータベース検索に必要な情報だけを抽出し，それらを形式化した中間表現を形式言語と呼ぶことにする．これは検索情報８項目の組

Q(E　T　R　O　F　M　N　LW)

で定義される．該当する情報が存在しなければ記号 Φ を代入する，例えば，自然言語問い合わせ文と形式言語は，

「交換数量が極めて多い部品名」

→Q(部品名，交換数量，Φ，Φ，極めて，多い，Φ，Φ)

のように対応する．

6.3 自然言語処理

一般に自然言語処理は，形態素解析，構文解析，意味解析から構成される．形態素解析は，漢字仮名混じり入力を前提としているため，字種の変わり目での切断という簡単な方法を用いている．

STEP1）字種区切り．問い合わせ文中の平仮名から非平仮名，非平仮名から平仮名の部分で文を区切る．

STEP2）複合文の単文分解．複合問い合わせ文は，単一問い合わせ文間の接続関係（連言，選言，含意）を調べ，複数の単一問い合わせ文に分解する．

STEP3）不要語除去．各単文について不要語を検索し，記号で置き換える．

STEP4）平仮名検索．問い合わせ文中の平仮名列の先頭の文字と一致する文字を平仮名検索辞書で検索し，辞書内に記述された処理に従って，形式言語中の各項目を決定する．この処理を問い合わせ文中の平仮名列がなくなるまで繰り返す．このとき，辞書のどの条件にも適合しない場合は，未知語として扱われる．

6.4 ＳＱＬ文の作成

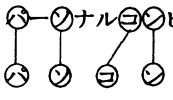
入力文が自然言語であるため検索情報の単語が，実際のデータベースに使われているとは限らない．そこで，検索情報の単語とデータベースに使われている単語がどれくらい一致しているかを調べ，検索情報の単語をデータベースに使われている単語に置き換えなければならない．一致度を求める方法として以下にあげるものを用いた．現在は，これらの一致度の平均を取って文字列の一致度としている．

（1）一致している文字数の割合

比較する文字列の文字がどれくらい一致しているかを調べる．

$$(\text{文字数一致度}) = \frac{4 \times (\text{一致した文字数})}{(\text{文字列Aの文字数}) \times (\text{文字列Bの文字数})}$$

例．



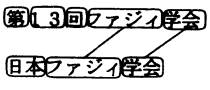
$$(\text{一致度}) = \frac{4 \times 4}{11 \times 4} = 0.364$$

（2）一致しているブロックの割合（字種の切れ目をブロックの切れ目とする）

（1）の基準では，文字の順番を考慮していないので，ブロック比較によりある程度の文字順を考慮に入れる．

$$(\text{ブロック一致度}) = \frac{4 \times (\text{一致したブロック数})}{(\text{文字列Aのブロック数}) \times (\text{文字列Bのブロック数})}$$

例．



$$(\text{一致度}) = \frac{4 \times 2}{4 \times 3} = 0.667$$

（3）文字列の長さの比較

文字列の長さが明らかに違うにも関わらず一致する文字数が多いものをチェックする．

$$(\text{長さ一致度}) = 1 - \frac{(\text{文字列ＡＢの文字数の差})}{(\text{文字列ＡＢの文字数の和})}$$

例．パーソナルコンピュータ，パソコン

$$(\text{一致度}) = 1 - \frac{11-4}{11+4} = 0.533$$

さらに，文字の表現が全く異なるにもかかわらず，同じことを意味する単語とも比較して，正しい単語と置き換える．ここまでの流れを図４に示す．例えば，問い合わせ文で「品名が冷却水サーモスタットである部品の更新日」を形式化すると図４の様に形式化される．次に，文字列置き換えで，「更新日」と「品名」はデータベース項目名リストと比較され，一致度が最大の単語に置き換えられる．つまり，「更新日」は「最終更新日」に，「品名」は「部品名」に置き換わる．ただし，「部品名」は別名登録されているので，代表名「名称」に置き換えられる．その他の検索情報についても同様なことを行い形式化の文字列置き換えを完了する．

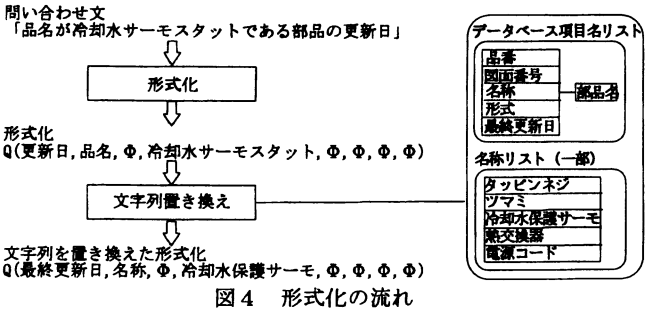


図４　形式化の流れ

最後に，単語置き換えを行った形式化した中間表現を，ＳＱＬ文に変換し，データ検索を行う．

7．おわりに

現在の音声認識技術に限界があるため，音声認識する文をメニュー表示する方法を用いた．しかし，データ検索は，様々な言い方がありメニュー表示には適してないので，キーボード入力による自然言語処理を用いた．自然言語による入力では，検索したい物の名前など検索情報の単語が，実際にデータベースに使われている単語と一致しないことが多い．そこで，単語置き換えを行ったが，現在のアルゴリズムでは，データの数に比例して検索時間が増加してしまい，大きなデータベースに対してそのまま適用するには問題があるように思われる．実用性を高めるには検索時間の短縮も考慮した，種々の工夫が必要となる．

謝辞

本研究のために音声認識装置，Ｅ．ｂａｓｅを貸与して頂きました（株）オージス総研，村山和夫氏．（株）パーソナルソフトウェア，境田雅明氏に深く感謝致します．

参考文献

[1]Ｐ・Ａ・ハンコック　Ｍ・Ｈ・チグネル：“知的インタフェイス“，海文堂出版株式会社 (1991)

[2]平川 正人，安村 通晃：“ビジュアルインタフェース”，共立出版株式会社 (1996)

[3]前田博，石飛康浩：“ファジィデータベース検索のための最適モデルを用いた自然言語インタフェース”，日本ファジィ学会誌，Vol.3 No.1 P108-119 (1991)

[4]前田博，茶園亮：“ファジィ表現を含んだ自然言語問い合わせによるリレーショナルデータベース検索”,計測自動制御学会九州支部第１２回学術講演会予稿集 P247,248 (1993)

連絡先　〒804　北九州市戸畑区仙水町１－１

九州工業大学工学部電気工学科

前田 博

Email:hmaeda@sys2.comp.kyutech.ac.jp

WEF2-1

ファジィ・ニューロモデルによる経路選択行動の分析

Analysis of Route Choice Behaviour by Fuzzy-Neural Network Models

秋山 孝正
Takamasa Akiyama

坪井 兵太
Hyota Tsuboi

松浦 貴宏
Takahiro Matsuura

岐阜大学工学部土木工学科
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Gifu University

岐阜大学大学院
Graduate school
Gifu University

大日コンサルタント（株）
Dainichi Consultant Inc.

In the analysis of travel behaviour, fuzzy reasoning and neural network have been introduced as recent applicable techniques for describing human decision process. These techniques are known to be useful to describe the non-linear relations in human perception. The fuzzy neuro models are introduced to produce the advanced model in this study. The survey of route choice is done to obtain sample data in the area of Gifu City. Three different types of the fuzzy neuro models are parallely used to describe the realistic travel behaviour. The comparison results show the advantages of the fuzzy neuro models and the recommendable types of the model. The intelligent transport information system on the roads can be discussed after the proper selection of the models.
Key words: Travel Behaviour, Fuzzy Neuro Model, Route Choice

1．はじめに

近年、交通管理において、交通情報の利用は重要な課題である。このため、提供された交通情報に対する利用者の交通行動の分析が重要となっている。

このような交通行動現象のモデル化に対して、ファジィ推論[1]やニューラルネットワークが用いられている。ファジィ推論は、ロジットモデルなどの統計的モデルとは異なる形式で、人間の思考過程を記述できる。またニューラルネットワーク（NN）は、高度な推計精度を持つモデルとして有効である。さらに、ファジィ推論とNN手法を融合したファジィ・ニューロモデルが提案されている。本研究では、とくにファジィ・ニューロモデルの交通行動分析への適用性を検討する。

2．ファジィ・ニューロモデル

ファジィ推論は、「IF～THEN…」形式の推論モデルに、言語変数（ファジィ数）を導入したものである。人間の認知に内在するファジィ性を考慮した判断の記述が可能となる。また、ニューラルネットワークは、人間の脳神経細胞の情報処理過程をモデル化したものである。

これまでに、交通行動の分析において、これらの考え方を用いたモデル作成法が数多く提案され成果を上げている。さらに、ファジィ推論とニューラルネットワークを融合したファジィ・ニューロモデルが提案されている。

これには多数のモデル化手法があるが、本研究ではファジィ－ニューロ、ニューロ化ファジィ、ニューロ的ファジィの各方法を用いる。これらについて順に説明する。

ファジィ－ニューロモデルとは、ファジィ推論とニューラルネットワークを直列に配置するモデルで、ファジィ推論ルールを用いて推論を行い、その推論結果をニューラルネットワークを用いて処理するものである。

図-1の概念図のようにファジィルールの出力が、ニューラルネットワークの入力となる。

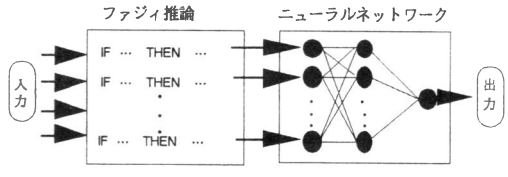


図-1　ファジィ－ニューロモデル概念図

ニューロ化ファジィモデルとして、ここではニューラルネット駆動型ファジィ推論[2]を利用する。このモデルは図-2のように、全体はファジィ推論である。前件部「IF～」で計算される入力値と推論条件との一致度μ_k（k：ファジィ推論のルール番号）をニューラルネットワークで求める。また、後件部「THEN…」の中の結論部の、入力値と帰結w_kとの関係をNNで表すものである。

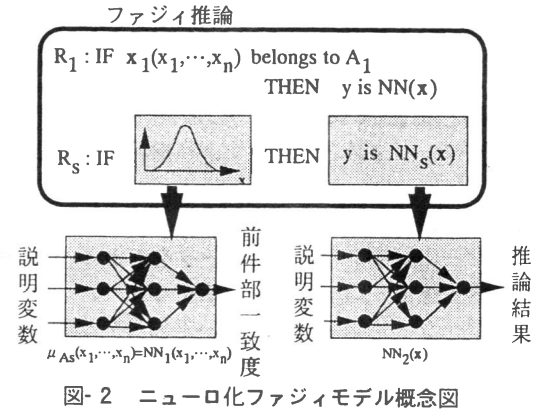


図-2　ニューロ化ファジィモデル概念図

またニューロ的ファジィモデルとして、ガウス基底を用いたファジィ推論[3]について説明する。これは図-3に示すように、簡略ファジィ推論のファジィ数を、式(1)で表現したものである。

$$A_{i,k}(x_i) = \exp\left\{-\frac{(x_i - a_{i,k})^2}{b_{i,k}}\right\} \qquad (1)$$

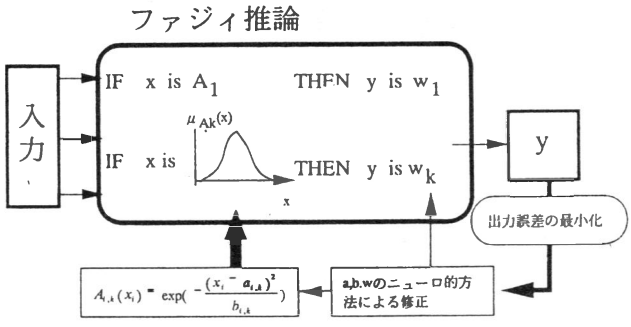


図- 3　ニューロ的ファジィモデル概念図

ここでa_{ik}とb_{ik}はルール毎（k：ルール番号）に設定し、教師データから各パラメータを修正する。

また、上記の３モデルにおける交通行動分析への適用を考える。「ファジィーニューロ」では、推論ルールによって交通行動の判断をするが、最終的な判断結果がNNで求められる。つぎに「ニューロ化ファジィ」では、サンプル特性による分類が可能である。そして、各グループごとに、推論条件との一致度や帰結部分との関係をNNで求め、交通行動に対する判断結果を得る。また「ニューロ的ファジィ」では、モデル構造が簡略ファジィ推論である。このモデルでは、推論ルールの各種パラメータをNNにより修正できる。

3．交通行動モデルの作成

3.1　交通行動における実調査

つぎに岐阜大学からJR岐阜駅までの経路選択行動について分析を行う。具体的な道路網は図- 4 に示すとおりである。ここでは、主要な利用経路３種類と、それらの所要時間(x_1)、混雑度(x_2)、安全度(x_3)の三項目を質問している。さらに各経路の総合得点、利用頻度を質問している。実際の調査対象者は93名である。ここで抽出された経路は27種類である。本研究ではこの27経路を、大縄場大橋・鏡島大橋経由、忠節橋経由、金華橋経由、長良橋経由、の4経路に分類した。忠節橋経路が最も利用される経路となっている。このアンケート調査では、各説明変数をファジィ数として表すよう指示している。

3.2　経路選択モデルの作成

アンケート調査で得られたデータをもとに、各経路の利用割合を推計するモデルを作成する。

まずファジィ - ニューロについて説明する。ここで、推論ルールの前件部言語変数は３種類、後件部の言語変数は５種類とした。また、ルール数は８ルールとした。各ルールごとの後件部言語変数に対応するファジィ出力をNNモデルの入力値として最終的な出力結果を算出する。このNNモデルは、入力層5、中間層4、出力層1の階層型ネットワークである。また4000回の学習の結果、教師データとモデル出力との誤差を全サンプルについて加算した推計誤差は 47.2／93 = 0.508 となった。

つぎにニューロ化ファジィモデルについて説明する。

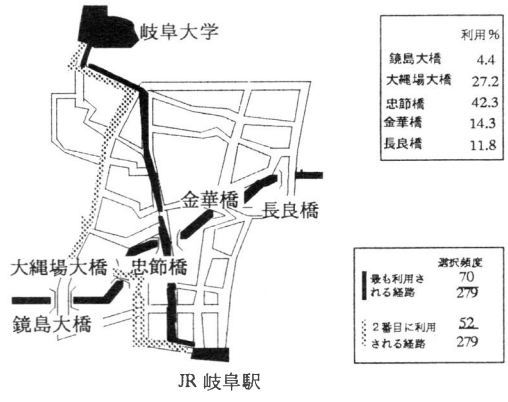


図 - 4　岐阜大学からJR岐阜駅までの経路

まず経路特性値についてファジィクラスター分析を行い、ルール構成を決定した。ここでは93サンプルを３グループにグループ分けした。前件部・後件部のニューラルネットワークの入力値は、各ファジィ数の最小値、中心値、最大値となる。よって入力層は27（3×3×3）となる。

モデル全体の推計誤差は 22.2／93 =0.239 となり比較的良好な結果を示している。

つぎに、ニューロ的ファジィについて説明する。ここでは２層構造とし、各層にファジィ推論モデルを3個配置する。各ファジィ推論モデルは3入力1出力となり、各出力ごとに3種類のメンバシップ関数を設定した。したがって各モデルのルール数は27（3×3×3）とした。このモデルではモデル全体のパラメータをニューロ的学習によって調整できる。2000回の学習の結果、サンプル全体の推計誤差は 24.3／93 =0.261 となった。

4.おわりに

本研究では、交通情報を用いた交通管理の基礎となる交通行動の分析を行った。ファジィ推論モデルでは、判断過程を記述し、現実にあった非線形関係を表現できる。またファジィ・ニューロモデルは、各モデルの特徴が検討可能であるとともにファジィ推論モデルの頑健性を保持しつつ、ニューロ的な学習を導入できる。さらに、推計精度の向上が期待でき有効なモデルであるといえる。

【参考文献】
1) 秋山孝正：ファジィ推論によるモデル構築手順とその応用的意義について，土木学会第45年次学術研究会講演概要集4，pp.454 - 455，1990.
2) 林勲,野村博義,若見昇：ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルールの獲得，日本ファジィ学会誌，Vol.2，No.4，pp.585 - 597，1990.
3) 市橋秀友：ニューロ・ファジィによる一対比較の数量化法，日本ファジィ学会誌，Vol.4，No.5，pp.958 - 967，1992.
4) 浅野光行：やさしい非線形モデルの計算手順，交通工学，Vol.26，No.5，pp.37 - 41，1991.

連絡先
〒501 - 11　岐阜県岐阜市柳戸1 - 1　岐阜大学工学部土木工学科
秋山孝正　TEL:058 - 293 - 2443
FAX:058 - 230 - 1528

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEF2-2

可能性指標を用いた交通量配分モデルの提案

Traffic Assignment Model by using Possibility Measure

秋山 孝正
Takamasa Akiyama

川原 徹也
Tetsuya Kawahara

岐阜大学工学部土木工学科
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Gifu University

株式会社森本組
Morimoto Corporation

The travel time is described as a crisp number in the conventional traffic assignment model for the transport networks. Recently, the random number has been introduced to express the distribution of the perceived travel times of individual drivers. This type of the model is known as a stochastic traffic assignment technique. On the other hand, the travel time for the route can be described as a fuzzy number in terms of human perception. The possibility measure can be used to compare the fuzzy numbers. The route choice behaviour is modelled with the values of possibilities between fuzzy goal and the fuzzy travel time for the individual routes. The fuzzy user equilibrium situation is proposed similarly to the successive average method in the stochastic traffic assignment.
Key words: Traffic Assignment, Possibility Measure, Fuzzy Travel Time

1．はじめに

従来の交通量配分法では、所要時間は確定値（クリスプ値）で表される。また交通情報の不完全さと経路所要時間の不確定性を考慮して、「ランダム数」（確率変数）が導入され、確率的均衡配分法が提案されている。

本研究では、個人の所要時間認知に対する主観的広がり（曖昧性）をもつ数「ファジィ数」を導入する[1)]。これにより、現実的な経路選択行動の記述と具体的な交通量配分モデルについて検討を行う。

2．ファジィ所要時間を用いた経路選択の記述

ファジィ数を用いた所要時間の表現方法としては、三角型ファジィ数(TriangularFuzzyNumber: T.F.N.)によるものが一般的である[1)]。このファジィ数は、三項対(t_l, t_0, t_r)によって定義できる。

ここで、二種類のT.F.N.sである**A**および**B**を、三項対を用いて、$\mathbf{A}=(a_1, a_2, a_3)$ および $\mathbf{B}=(b_1, b_2, b_3)$のように定義する。このとき、たとえばファジィ数の和はつぎのように定義できる。

$$\mathbf{A}(+)\mathbf{B} = (a_1, a_2, a_3)(+)(b_1, b_2, b_3) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \quad (1)$$

このような拡張計算を順次行うことにより、ファジィ経路所要時間を記述することができる。

ここでは、とくにファジィリンク所要時間を用いた経路選択現象の記述に「可能性指標」を利用する[2)]。

このとき可能性指標とは、2つのファジィ数**A,B**について「**A**が**B**以上である可能性の度合い」を示す指標であり、式(2)のように表される。

$$\prod_{\mathbf{A}}(\mathbf{B}) = \sup_x \min\{\mu_{\mathbf{A}}(x), \mu_{\mathbf{B}}(x)\} \quad (2)$$

具体的には、各ODごとにファジィ目標を設定して、可能性値（達成度）を算出する[2)]。さらにこの値を選択比率として配分する。これを『可能性法』とよぶ。

まずファジィ目標の設定方法について述べる。ここでは、各ODごとに最も望ましい所要時間としての基準値Tを設定する（この基準値Tは、たとえば各OD間のクリスプな最短経路の所要時間とする）。つぎに基準値Tをもとに、あらかじめ設定した左右の広がりのパラメータa,bよりファジィ目標を決定する。

具体的には、図-1のように表される。上記の設定に従えば、$T_{min}=a\times T$, $T_{max}=b\times T$ である。

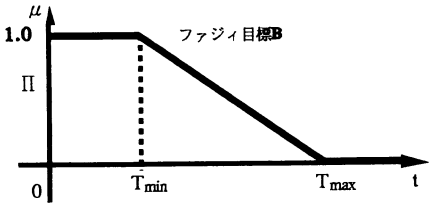


図-1 ファジィ目標

このように、ファジィ目標を用いた可能性法の計算アルゴリズムを示すとつぎのようである。

【アルゴリズム】

ステップ1：ファジィ目標を決定する。

ステップ2：各ODごとに、ファジィリンク所要時間よりファジィ経路所要時間を求める。ファジィリンク所要時間の和は、式(1)により求められる。つまり、

$$t_{pathk} = t_{linki}(+)t_{linkj}$$

ステップ3：つぎに、図-2のようにファジィ目標**B**とファジィ経路所要時間**A**との交点が求められる。この点のμ軸上の値Πが可能性指標値となる。

$$\prod_A(\mathbf{B}) = \sup_x \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

ステップ4：可能性指標値Πを選択比率としてOD交通量を配分をする。

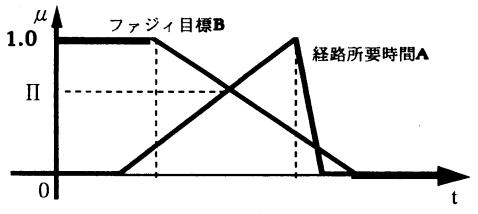


図-2 可能性指標

ここでは、フローインディペンデントな交通流での経路選択モデルの計算例を示す。図-3および表-1で示されるネットワークにおいて、ノード1からノード4に600トリップのOD交通量を設定する。

従来の配分法として、クリスプ数で最短経路を求める「ダイクストラ法」、各経路の選択比率を確率的に求める「ダイアル法」によって交通量配分を行う。さらにファジィ所要時間に対して「可能性法」を用いる。

各種配分法による、各経路の配分交通量を表-2にまとめる。ダイクストラ法では、クリスプな最短経路が得られ、この場合は経路1と経路2のいずれかに600トリップの交通量が配分される。つぎに、ダイアル法では全ての合理的経路に選択比率が与えられ、経路3に93トリップが配分される。さらにファジィ所要時間を用いた可能性法では、各経路に比較的分散して配分される。

3. ファジィ所要時間を用いた交通量配分

つぎに、フローディペンデントな交通流に対してファジィ所要時間を用いた均衡配分法を検討する。

ここで確定的均衡配分法として、ダイクストラ法を用いたF-W法をとりあげる[3]。また確率的均衡配分法としては、ダイアル法を用いた逐次平均化法を用いる[3]。これらの詳細なアルゴリズムは、参考文献3)を参照されたい。さらにファジィ均衡配分法として経路選択に可能性法を用いた逐次平均化法により計算を行う。

ここでは、一般的な交通量配分に対応して各方法を比較するため、複数ODに対する例を用いて計算を行う。

ここでも前述のネットワークに対して、配分を行う。計算にあたっては、あらかじめ各ODごとの経路を既知とする。すなわち経路交通量を変数とした交通量配分である。したがって経路交通量の決定後に、リンク交通量が得られる。各配分法での配分結果を表-3に示す。

この結果より、ファジィ均衡配分では他の配分法に比べ、リンク3の交通量が多いことがわかる。これは、リンク3を含む経路のファジィ所要時間の左辺値が設定されていることによると考えられる。このように、各リンクのファジィ所要時間の左辺値の相違により配分交通量の偏りが生じているものと考えられる。

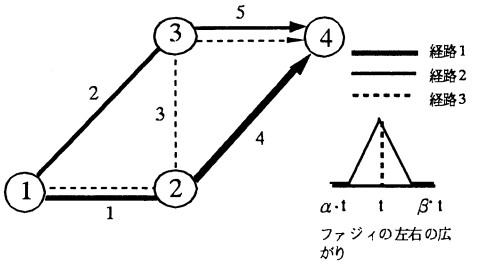


図-3 例題ネットワーク

表-1 リンクデータ

リンクNo.	t	α	β	交通容量C
1	4	0.3	1.2	100
2	5	0.8	1.8	100
3	3	0.8	1.6	100
4	5	0.2	1.1	100
5	4	0.6	1.7	100

OD交通量

O/D	1	2	3	4
1		100	100	100
2			100	100
3				100
4				

表-2 選択比率と配分交通量

	ダイクストラ法		ダイアル法 (θ=0.5)		可能性法 a=0.8,b=1.5		a=1.0,b=1.5	
	比率	交通量	w	交通量	Π	交通量	Π	交通量
経路1	1(0)	600(0)	0.422	253	0.715	230	1	215
経路2	0(1)	0(600)	0.422	253	0.612	197	1	215
経路3	0	0	0.155	93	0.536	173	0.789	170

表-3 各種配分法によるリンク配分交通量

	均衡配分	確率均衡配分 θ=0.5	ファジィ均衡配分 a=1.0,b=1.5	ファジィ均衡配分 a=0.8,b=1.5
リンク1	150	155	191	194
リンク2	150	145	109	106
リンク3	100	103	176	177
リンク4	150	152	115	117
リンク5	150	148	185	183

4. おわりに

本研究では、ファジィ数を比較するための指標値である可能性指標を利用した交通量配分モデルを提案した。この方法により現実的な経路選択現象の記述が可能となり、利用者認知にもとづく交通量予測の可能性が示された。また本研究の今後の課題としては、以下の諸点が挙げられる。

①可能性法では、右辺値の大きさが反映されない。したがって異なる評価指標の利用も検討すべきである。

②経路交通量を変数とする配分モデルをリンク交通量変数とするモデルに改良する必要がある。

参考文献

1) Arnord Kaufmann・Madan M.Gupta 共著、田中英夫 監訳・松岡浩 訳：ファジィ数学モデル、オーム社、1992.
2) 坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用、森北出版株式会社、1989.
3) 土木計画学研究委員会：第18回土木計画学講習会テキスト 交通ネットワークの分析と計画ー最新の理論と応用、土木学会、1987.

連絡先

〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部土木工学科
秋山孝正 TEL:058-293-2443
FAX:058-230-1528

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEF3-1

RBF ネットワークフィルタの量子化観測機構を持つシステムへの応用
Application of a RBF Network Filter to a System with a Quantized Observation Mechanism

内野 英治 § 中村 真 §§ 山川 烈 §

Eiji Uchino Shin Nakamura Takeshi Yamakawa

§ 九州工業大学 情報工学部

Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

§§ ダイダン株式会社 技術研究所

Technical Research Laboratory, DAI-DAN Co., LTD.

Abstract: The output data of a digital measurement apparatus is inevitably contaminated not only by an observation noise but also by a quantization noise. This paper describes a general nonlinear filter for a quantized noisy signal, which is based on a radial basis function network. The superiority of the present filter has been confirmed by computer simulations.

1 はじめに

信号をディジタル計測器を用いて観測する場合には, 観測雑音以外に量子化雑音も混入する. また, 多くのフィルタ理論は, システムの線形性と観測機構の線形性, および状態変数のガウス分布特性を仮定して導出されている. そのため, 従来の線形フィルタを, 本問題のような量子化観測機構を持つ非線形システムの状態推定問題に直接適用することは難しい.

一方, さまざまなタイプの非線形フィルタも提案され, その良好な推定性能が確認されている. 例えば, 文献 [2] は, 量子化観測信号のフィルタリング問題に対し, ベイズ定理の直交級数展開と量子化観測機構の決定論的なメカニズムに焦点を当て, 良好な推定結果を得ている. しかし, そのアルゴリズムは複雑であり, 実問題への適用は要求される推定精度とのトレードオフとなる.

本報告では, 現実の非線形システムに広く適用でき, より設計性の良い非線形フィルタを実用的観点から提案し, その応用例として, 量子化観測された信号のフィルタリング問題をとりあげる. 本フィルタの構造は簡単であり, Radial Basis Function network (RBFN) [3] の学習能力と汎化能力とに基盤を置いている (以下, 本非線形フィルタを RBF フィルタと呼ぶ).

2 RBF ネットワークフィルタ

以下のシステムと観測機構について考える.

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)), \quad (1)$$

$$y(k) = g(x(k), v(k)), \quad (2)$$

ここで $x(k)$ は時刻 k における状態ベクトル, $u(k)$ は入力ベクトル, もしくは任意のシステム雑音, $y(k)$ は観測値ベクトル, $v(k)$ は任意の分布を持つ観測雑音ベクトルである. $f(\cdot)$ は対象とするシステムを記述する任意の関数であり, $g(\cdot)$ は量子化観測機構である.

2.1 カルマンフィルタ

線形ガウスシステムに対するカルマンフィルタは良く知られており, 様々な応用に用いられている. 推定アルゴリズムは, 以下のように与えられる.

$$\hat{x}(k) = x^*(k) + K(k)(y(k) - y^*(k)), \quad (3)$$

ここで $K(k)$ はシステムの係数行列と雑音の統計量から決定されるカルマンゲイン, $\hat{x}(k)$ は真の状態値 $x(k)$ の推定値である. また, $x^*(k)$ は $x(k)$ の予測値, $y^*(k)$ は観測値 $y(k)$ の予測値である.

式 (3) は $x^*(k)$, $y(k)$, および $y^*(k)$ から $\hat{x}(k)$ への線形写像を表している. すなわち, カルマンフィルタは, システムのダイナミクスを反映する $x^*(k)$ と, 観測予測値 $y^*(k)$, そして実際の観測値 $y(k)$ から推定値 $\hat{x}(k)$ を与えるものである.

2.2 RBF フィルタの構造

提案する RBF フィルタの推定メカニズムの大枠は, カルマンフィルタの推定メカニズム (式 (3)) を基にし, 推定値 $\hat{x}(k)$ を以下のように $x^*(k)$ と $y(k)$ の非線形写像により与える機構である ($y^*(k)$ は $x^*(k)$ により得られるので, 次式は $y^*(k)$ を陰に含む).

$$\hat{x}(k) = h(y(k), x^*(k)). \quad (4)$$

ここで, $x^*(k)$ は次式により算出される.

$$x^*(k) = f(\hat{x}(k-1), \bar{u}(k-1)). \quad (5)$$

$\bar{u}(k)$ は $u(k)$ の平均値である. 本研究では, $h(\cdot)$ を RBF ネットワークで構成し, 学習により写像関数を決定する.

図 1 に, RBF フィルタの全体構造を示す.

2.3 RBF フィルタの設計法

RBF ネットワークは, 任意の写像を実現できるだけでなく, 中間層が 1 層であるため, 学習誤差が大域的最小値

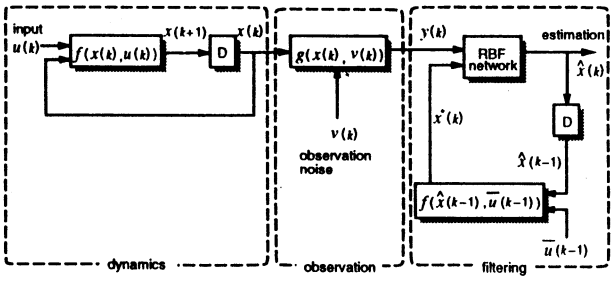


図 1: RBF フィルタの構造. D: 遅延素子.

に落ち着くことが保証される. RBF フィルタは, RBF ネットワークで構成された写像関数 $h(\cdot)$ により, 予測値 $x^*(k)$ と観測値 $y(k)$ から推定値 $\hat{x}(k)$ を求める. すなわち, RBF フィルタの性能は, RBF ネットワークにより実現された写像関数に依存する. 本研究では, RBF ネットワークの基底関数の結合荷重を, 誤差関数 $E = \left\{\sum_{k=1}^{l}(x(k)-\hat{x}(k))^2\right\}/2$ が最小となるように最急降下法により学習する. ここで, l は教師信号の数である.

学習は, $x(k)$, $y(k)$, $x^*(k)$ の教師信号系列を用いて行なう. 予測値 $x^*(k)$ は, 式 (1) のダイナミクスに基づき, 前時刻の推定値から生成する (式 (5)). 一方, $x(k)$ と $y(k)$ は以下の手順で, 前もって生成する.

(i) $\{x(k)\}$ $(k = 1,\cdots,l)$ を, システム方程式 (式 (1)) に基づき生成する (初期値は任意).

(ii) 観測雑音の分布 $P(v(k))$ に従う雑音系列 $\{v(k)\}$ $(k = 1,\cdots,l)$ を生成する.

(iii) $v(k)$ と $x(k)$ を観測方程式 (式 (2)) に代入し, 観測値系列 $y(k)$ を得る.

3 実験結果

以下の非線形システム式 (6) の状態 $x(k)$ を式 (7) に基づいて量子化観測する場合を考える.

$$x(k+1) = -\frac{11}{3}x^3(k) + \frac{8}{3}x(k) \qquad (6)$$

$$y(k) = g(z(k)),\ z(k) = x(k) + v(k), \qquad (7)$$

$g(\cdot)$ は $-2 \le z(k) \le 2$ を量子化幅 0.5 で切り捨てる量子化関数であり, $v(k)$ は平均 0, 分散 0.1 のガウス雑音である.

図 2 に, フィルタリング結果の一例を示す. 図より, RBF フィルタは複雑に振舞うシステムの状態を良好に追従している. また, システムの初期値や雑音の系列を変えた様々なシミュレーションによる自乗誤差平均値は, 拡張カルマンフィルタが 0.37, RBF フィルタが 0.26 であり, RBF フィルタの有効性が確認できた.

図 3 に, 真の信号と推定値の累積分布関数の一例を示す. 対象システムが非線形であり, また観測値が量子化のため非ガウス性を示すので, 従来の拡張カルマンフィルタでは良好な推定が行なわれていない. 一方, RBF フィルタは, 非線形システムと非ガウス雑音の性質を学習しているため, 良好なフィルタリング結果を与えている.

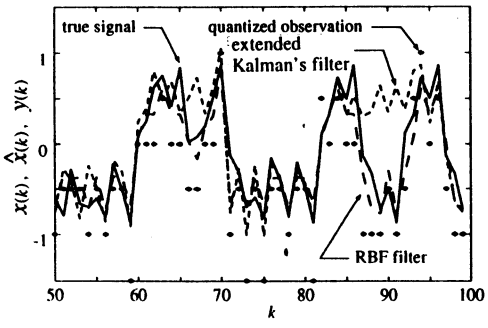


図 2: 量子化観測された信号のフィルタリング.

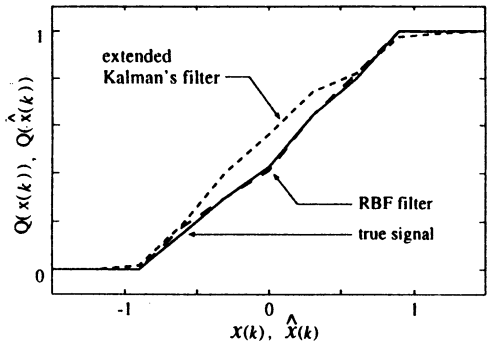


図 3: 推定値の分布.

4 おわりに

本報告では, RBF ネットワークの学習能力と汎化能力を利用した非線形フィルタについて述べ, その応用として, 量子化観測された信号のフィルタリング問題へ適用し, 良好な推定結果を得た.

本非線形フィルタは, RBF ネットワークの学習に基盤をおくため, 従来の非線形フィルタのような複雑な構造をしていない.

今後は, 本 RBF フィルタのより広範囲にわたる実用化を目指したい.

参考文献

[1] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Trans. ASME(D), Journal of Basic Engineering*, 82, pp.35-45, 1960.

[2] E. Uchino, M. Ohta, and H. Takata, "Neuer Entwurf eines allgemeinen digitalen Filters zur Zustandsschaetzung eines Geraeuschsystems bei quantisierter Beobachtung," *ACUSTICA* (International Journal on Acoustics), Vol.63, No.4, pp.297-299, 1987.

[3] M. J. D. Powell, "Radial Basis Functions Approximations to Polynomials," *Proc. 12th Biennial Numerical Analysis Conf.*, pp.223-241, 1987.

[問い合わせ先]
内野英治
〒 820 福岡県飯塚市川津 680-4
九州工業大学 情報工学部 制御システム工学科
Phone: 0948-29-7722, Fax: 0948-29-7709
E-mail: uchino@ces.kyutech.ac.jp

WEF3-2

スペクトル包絡のダイナミクスを考慮した音声のファジィベクトル量子化

A Fuzzy Vector Quantization for Speech Signals by Considering the Dynamics of Spectrum Envelopes

内野 英治* 仁泉 大輔** 山川 烈*
Eiji Uchino Daisuke Niizumi Takeshi Yamakawa
* 九州工業大学情報工学部制御システム工学科, ファジィシステム研究所
Department of Control Engineering and Science, Kyushu Institute of Technology, and Fuzzy Logic Systems Institute (FLSI)
** ローランド株式会社
Roland Corporation

Fuzzy vector quantization is currently used for speech coding, speech recognition, and so on, which is effective in this area. This paper presents, (1) an improved fuzzy vector quantization for speech signals considering the dynamics of spectrum envelopes, (2) a voice conversion by fuzzy vector quantization with a new fuzzy mapping code book. The effectiveness of the proposed method has been confirmed by psychological tests.

1 はじめに

音声の分野におけるベクトル量子化は，音声符号化，音声認識など様々な問題に有効な手法である．ベクトル量子化は，複数のコードベクトルから構成されるコードブックと呼ばれる辞書を用いて，入力ベクトル $\boldsymbol{x}$ を一番距離の近いコードベクトル $\boldsymbol{v}_m$ に量子化する手法である．例えば音声符号化に適用する場合，$\boldsymbol{v}_m$ のインデックス m を符号とすることにより，大幅な情報圧縮が可能となる．

近年，ファジィ集合の概念を取り入れたファジィベクトル量子化 (FVQ) が音声各分野で応用され，量子化誤差軽減やコードブックサイズ削減などの成果を上げている．本研究では，1) 音声スペクトル包絡 (周波数スペクトルの包絡線) の誤差・慣性を考慮した新たなFVQの提案，2)FVQによる声質変換に用いる新たなマッピングコードブックの提案を行いそれらの妥当性を検討した．

2 ファジィベクトル量子化

ファジィ集合の概念を取り入れることにより，入力ベクトルは，各コードベクトル $\boldsymbol{v}_m$ に対してどれだけ適合するかの度合い μ_m を持つ．これにより，量子化後のベクトル $\boldsymbol{y}$ は $\boldsymbol{v}_m$ の重み付き加算として式(1)のように表される．

$$\boldsymbol{y} = \sum_{m=1}^{M} \mu_m \boldsymbol{v}_m \Big/ \sum_{m=1}^{M} \mu_m \qquad (1)$$

3 誤差・慣性コードブックの適用

本研究ではコードベクトルとしてスペクトル包絡を用いる．スペクトル包絡はある音韻を表すため，コードベクトルは特定の音韻を示す入力ベクトルだけを表現する．しかし，たとえ同じ音韻のスペクトル包絡でも，前後の発声内容の違いやスペクトル包絡の揺らぎによって微妙に形状が変化する．そのためコードベクトルは，その発声内容によるスペクトル包絡の微妙な形状変化を表現しきれず，量子化誤差を生む．本研究ではこの量子化誤差の平均値をコードベクトル毎に $\boldsymbol{r}_m$ と定義する．これまでの研究により，音声スペクトルは各周波数成分に偏りのある揺らぎを持ち，また揺らぎの程度は話者毎に異なることが示されている．定義した $\boldsymbol{r}_m$ には，このような話者毎の特徴が現れる．

スペクトル包絡はまた，物理的要素である声道の特性を反映したものであり，その形状は連続的に変化する．そして形状の変化には変化しやすい部分，しにくい部分があり，このスペクトル包絡の変動のしにくさを定量的に扱うため，スペクトル包絡の慣性を $\boldsymbol{I}_m$ と定義する．この $\boldsymbol{I}_m$ は，コードベクトル $\boldsymbol{v}_m$ が表現するスペクトル包絡の時間変化が大きいほど，小さな値を取ると定義する．声道の形状は話者毎に異なるため，定義した $\boldsymbol{I}_m$ にはその違いが反映される．

以上の $\boldsymbol{r}_m$, $\boldsymbol{I}_m$ は，多数の音声データを与える事により，統計的なデータとして得られる．

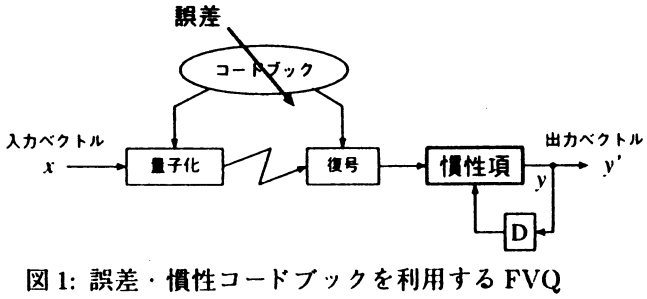


図 1: 誤差・慣性コードブックを利用する FVQ

本研究では，得られた誤差，慣性データを新たに誤差・慣性コードブックとして用意し，FVQに利用する．図1に，誤差・慣性コードブックを利用するFVQの構成を示す．符号化に先立ち，コードブックからは，あらかじめ予想される誤差 $\boldsymbol{r}_m$ を差し引く．その後，量子化 ⇒ 復号を経たスペクトル包絡は，量子化誤差により連続性が失われる．そこで，従来の復号を行った後，慣性 $\boldsymbol{I}_m$ が強い周波数成分ほど，一時刻前の出力ベクトルに近づける処理を行う．

3.1 音声符号化実験

誤差・慣性コードブックを用いたFVQにより音声の符号化を行い，量子化歪みを評価した結果は以下の通りである (50音声× 4人分の平均値).

[dB]

コードベクトルの数	128	256
従来のFVQ	2.29	2.10
提案したFVQ	2.20	2.04

4 FVQを用いた声質変換

声質変換は，話者Aの音声から得られたコードブック$\boldsymbol{V_A}$を用いて符号化し，話者Bの音声から得られたコードブック$\boldsymbol{V_B}$を用いて復号することで行われる．声質変換においては，$\boldsymbol{V_A}$と$\boldsymbol{V_B}$の対応表であるマッピングコードブックが声質変換の精度の鍵を握る本質である．従来はこの対応をコードベクトル同士の一対一写像としてきたが，本研究では複数のコードベクトルで出力を合成するFVQの特徴を生かし，コードベクトル同士の同時生起確率を用いて写像を行う．

従来のマッピングコードブックは，次の手順で作成される．話者A，Bの同じ音韻を示す音声データをそれぞれのコードブック$\boldsymbol{V_A}$, $\boldsymbol{V_B}$でFVQにより量子化を行う．そのとき得られるそれぞれの符号 μ_{Ai}, μ_{Bj} が，お互いに対応するコードベクトルとし，ヒストグラム H_{ij} に $\mu_{Ai}\mu_{Bj}$ を加算する．以上の操作を多数の音声データについて繰り返し行うとコードベクトル間の対応を記録したヒストグラム H_{ij} を得る．従来はこの H_{ij} をマッピングコードブックとして用い，$\boldsymbol{v}_{Ai}$ に対応する話者Bのコードベクトルを，$\boldsymbol{v}_{Bj}$ であるとしてきた．ここで j は $\max_j H_{ij}$ である．

本研究では，マッピングコードブックを

$$P_{ij} = H_{ij} / \max_k H_{ik} \qquad (2)$$

と定義する．P_{ij} は，話者Aの i 番目のコードベクトルに話者Bの j 番目のコードベクトルがどれだけ対応するかの統計量である．本研究では，話者Aの i_1, i_2, i_3 番目のコードベクトルがそれぞれ適合度 $\mu_{i_1}, \mu_{i_2}, \mu_{i_3}$ のとき，新たに

$$P_j = \mu_{i_1} P_{i_1 j} + \mu_{i_2} P_{i_2 j} + \mu_{i_3} P_{i_3 j} \qquad (3)$$

として P_j を求め，P_j の上位3位までを示す j_1, j_2, j_3 を話者Bのコードベクトルとして対応付ける．これにより，同時に生起するコードベクトルを考慮した，より確率の高い写像を実現することができる．

4.1 声質変換実験

実験データとして，男女二名ずつ，各話者50文の音声を用意し，男声→男声，女声→男声など様々な組み合わせで400文を変換した平均歪みは次のようになった．

[dB]

	同性間	異性間	全体
変換なし	4.97	7.67	6.32
VQ	4.52	5.69	5.10
FVQ	4.27	5.46	4.86
提案FVQ	4.18	5.39	4.78

次に，聴取実験として話者Aから話者Bへの変換音声をVQ, FVQ, 提案FVQ各々について用意し，どの変換音声が目的話者Bの音声に最も近いかを投票する心理実験を行った．被験者は24名で，同性間，異性間の変換を各手法8音声ずつ用意した．以下に各手法への平均投票率を示す．表は投票率が高いほど，人間の主観的判断において目的話者の音声に近いものに変換できたことを表す．

	同性間	異性間	全体
VQ	10%	13%	11%
FVQ	28%	20%	25%
提案FVQ	62%	67%	64%

5 おわりに

本研究では，音声のスペクトル包絡の動的特徴を考慮し，コードベクトルの誤差・慣性をFVQに適用した．この誤差・慣性コードブックを用いるFVQを音声符号化に応用することで，従来に比べて量子化歪みを押さえることができた．また声質変換において，マッピングコードブックを改善することにより，同時生起確率を考慮したコードブックの写像を実現し，これにより音声変換歪みを押さえることができた．双方ともに，歪みの減少は従来法に比べて約0.1 dB程度であったが，聴取実験により聴覚的に意味のある改善を行うことができ．しかし声質変換において合成された変換音声は，未だ目的話者の音声に十分納得のゆく変換が実現できているとはいえず，この点については今後の課題である．目的話者の音声に明瞭に聴こえない原因として，韻律について全く考慮していないという点が挙げられ，今後韻律および声質を同時に考慮した変換システムを構築する必要がある．

参考文献

[1] Masanobu Abe, Satoshi Nakamura, Kiyohiro Shikano, and Hisao Kuwabara. Voice conversion through vector quantization. *Journal of Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 11, No. 2, pp. 71 76, 1990.

[問い合わせ先]
内野英治
〒820 福岡県飯塚市川津 680-4
九州工業大学 情報工学部 制御システム工学科
Phone: 0948-29-7722, Fax: 0948-29-7709
E-mail: uchino@ces.kyutech.ac.jp

WEF3-3

ファジイ論理による非圧縮性非線形超弾性構造解析計算の制御

A Control of Nonlinear Structure Analysis for Incompressible Hyper Elastic Materials using Fuzzy Logic

菊池 愛子*
Aiko KIKUCHI

大西 巍**
Takashi ONISHI

＊ 三菱重工業 横浜研究所
Mitsubishi Heavy Ind Yokohama R&D Center

＊＊ 高松高専機械工学科
Takamatu National College of Technology

The accuracy and stability of the calculation for nonlinear structure analysi are frequentiyaffected by increment parameters in the model. We proposed adaptive control method for the numerical calculation system inwhich several parameters are modified by the fuzzy logic, and as an example, the present method is successfully applied to a rubber structure for the water seal of a dam gate.

1．はじめに

一般に非線形解析では計算の刻み幅を小さくするほど計算の安定性が得られるが、最終解をえるまでの繰り返し計算時間が増大する。現状では、解析者が計算の経緯を観察して計算パラメータを変更し再計算を繰り返すなど試行錯誤的に解析を進めることが多い。

本研究では静的非線形であるゴム大変形解析を対象として計算の安定化のために疑似減衰を導入するとともにファジイ論理を用いて計算パラメータを適応的に制御する方法について検討する。

2．計算制御

構造解析の結果に影響を及ぼす要因にはモデルの形状や境界条件、弾性係数などの構造部材の物性値など計算モデル固有の条件パラメータと、メッシュ分割の方法や連続問題を離散的問題に置換える場合の時間刻みなど計算方法固有のパラメータの２種類がある。ここでの「計算制御」とは計算の過程で途中経過を観察しながら、計算方法固有のパラメータを適応的に変更し、計算の不安定性や収束性を改善する制御をいう。計算制御の概念を図１に示す。

3．ゴムの大変形解析と不安定現象

一般にゴムの変形は大きく応力の高い範囲では非線形性の強い高い弾性係数となる。またポアソン比νはおよそ0.5 であり、非圧縮性の扱いが必要となる。

全体ポテンシャルをエネルギー、非圧縮ポテンシャル、接触力ポテンシャルとし混合法により定式化し、下記方程式を求解する。

$$K\Delta u+Q\Delta p+R\Delta\lambda=f-(Ku+Qp+R\lambda)$$

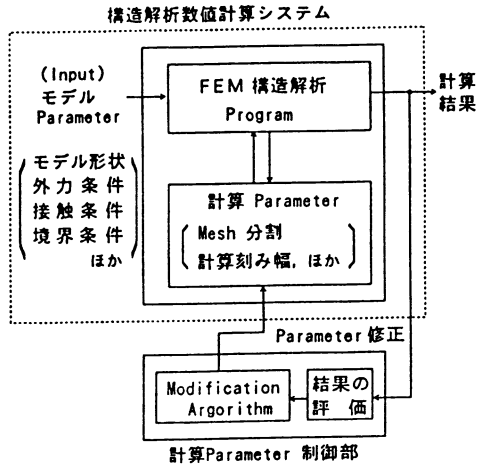


図1 計算制御の構成概念

$$Q'\ \Delta u=\int g(I_3)\,dv$$

$$R'\ \Delta u=\Delta d$$

ただし K，Q，R；構造，圧力，接触力剛性行列
u，p，λ；変位，圧力，接触力ベクトル
f，d ；外力，接触深さベクトル
I_3 ；変形テンソル不変量

計算過程で発生する計算の不安定さには計算パラメータの不適切さと構造モデル自体の不安定さの異なる２種類の原因が存在する。

4．非線形構造解析の計算制御

従来ゴム解析では計算が不安定になると荷重の増分をさらに細かくして再計算を行っていた。しかし不安定原因がモデル構造にある場合は、このような計算パラメータの変更のみで安定化をはかることはできない。

この不安定現象はある一定の荷重を越えたときに突発的に表れ解が発散する。しかし実現象では、減衰が存在し現象を安定化しているため多くの場合、ある一定の荷重状態に収束する。ここでは疑似的な粘性行列Cを次の求解方程式に導入する。

$$K\Delta u+Q\Delta p+R\Delta\lambda-C\Delta u/\Delta t=f-(Ku+Qp+R\lambda)$$

計算パラメータの制御入力情報には残差荷重、変位u、圧力p、接触力λ等を選び、状態量の評価は繰返しループの増分比の対数χ(-1)=S_n で評価した。

$$S_n=-\ln(\Delta u_i/\Delta u_{i-1})$$

被制御パラメータは静水圧の増分係数α、減衰倍率β、接触力増分係数γを採用した。これらの計算経過を観察して図2に示す推論規則により判定し不安定になる徴候が表れれば計算を減速し収束が遅滞するようなら加速した。推論の合成は結論部を定数とする簡略化推論法を用いた。

$$y=\frac{\Sigma\Sigma\mu_{ij}\sigma_{ij}y_{ij}}{\Sigma\Sigma\mu_{ij}\sigma_{ij}}$$

ここでyは被制御パラメータ、jは構造自由度、iは制御規則の番号を示す。μ_{ij}は自由度jの規則iに対する条件部の適合度、σ_{ij}は当該規則の相対的な重要度を表す。

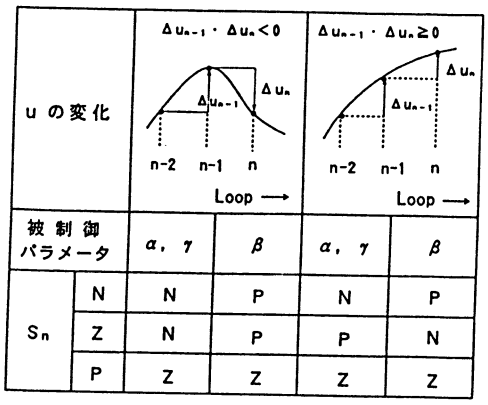


図2　計算パラメータ変更量yの推論規則

5．高圧ダムゲートの水密ゴム解析

120m水頭のダムのシール機構のゴム断面を切り出し、2次元平面歪み問題として解析を行った。ゴム背圧は1kgf/cm² ごとに12kgf/cm² まで上げ、各背圧ごとに変位と歪みを計算した。図3に変形解析結果及び背圧と変位の関係について解析と実験結果を示す。従来のプログラムでは背圧が7.6 kgf/cm² の時点で解が発散して収束解が得られなかった。。この時点のゴム頂部変位の計算過程を、提案の方法で疑似減衰等を付与して値を制御する場合と併せて図4に示す。

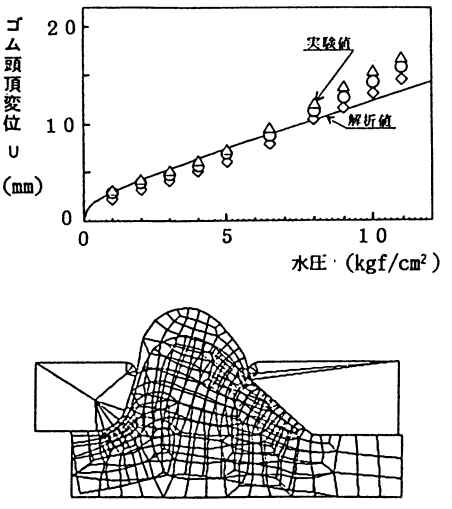


図3　ゴム背圧と変位の関係と変形状態

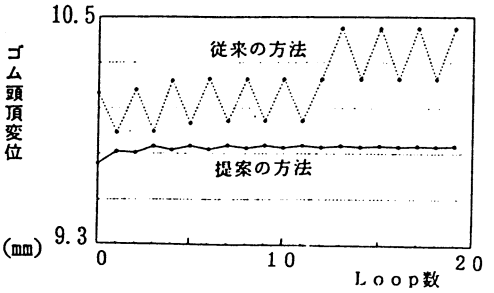


図4　ゴムの頭頂変位

6．おわりに

境界の接触や構造の座屈などを伴う非線形な構造解析の数値計算において、繰り返し計算により収束解を求める過程は一つの時系列的なプロセスと見なすことができる。この過程において、専門家が実施する非線形な介入動作はif~then~形式の制御規則として容易に表現することができ、ファジイ推論規則でこれらを構築すれば必要に応じて規則の変更や追加を行うことも比較的簡単に行うことができる。ここで示したファジイ論理を用いた数値計算の制御は、専門家の介在が必要ないろいろな数値解析問題に応用可能と思われる。

参考文献

1）吉村忍、ほか；構造工学数値解析シンポジウム、17,pp513/518(1993)

2）T.Muramatsu et.al.;Int.Numerical Methods in Eng.　37,pp3397/3415,1994

問合せ先；

三菱重工業横浜研究所　〒231横浜市中区錦町12番地

菊池愛子　　Tel.(045)629-1483

E.mail D10000@D.comm.mhi.co.jp

WEF4-1

ファジィ納期によるスケジューリング問題の定式化

Formulation of Scheduling Problems Using Fuzzy Due-Date

村田　忠彦*，石渕　久生**，李　揆亨**
Tadahiko Murata, Hisao Ishibuchi, and Kyu-Hung Lee

*足利工業大学工学部経営工学科，**大阪府立大学工学部経営工学科
*Department of Systems and Industrial Engineering, Ashikaga Institute of Technology
**Department of Industrial Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract: *In this paper, we show how non-fuzzy scheduling problems can be reformulated in the framework of fuzzy due-date. The membership function of a fuzzy due-date assigned to each job shows the human user's satisfaction grade for the completion time of that job. We first describe the concept of the fuzzy due-date. Next we show that various scheduling criteria can be represented in terms of the membership function of the fuzzy due-date assigned to each job. That is, we show that many non-fuzzy scheduling problems can be reformulated through the concept of the fuzzy due-date. By computer simulations, we show the relations between the fuzzy scheduling problems and the conventional scheduling criteria.*

1．はじめに

本研究では，ファジィ納期[1-3]を用いてスケジューリング問題の定式化を行い，従来のスケジューリング問題との関係を議論する．ファジィ納期とは，意思決定者の満足度を実数軸上のファジィ集合を用いて表現したものである．本研究では，ジョブ j の加工終了時間 C_j に対する満足度を，次のようなメンバーシップ関数 $\mu_j(C_j)$ で表現する（図１参照）．

$$\mu_j(C_j)=\begin{cases}0, \text{ if } C_j \le e_j^L,\\ 1-(e_j^U-C_j)/(e_j^U-e_j^L), \text{ if } e_j^L<C_j<e_j^U,\\ 1, \text{ if } e_j^U \le C_j \le d_j^L,\\ 1-(C_j-d_j^L)/(d_j^U-d_j^L), \text{ if } d_j^L<C_j<d_j^U,\\ 0, \text{ if} d_j^U \le C_j,\end{cases} \tag{1}$$

ここで，e_j^L，e_j^U，d_j^L，d_j^U はメンバーシップ関数を決定するパラメータである．

2．ファジィスケジューリング問題の定式化

各ジョブの加工終了時間に対する満足度を用いて，二つのファジィスケジューリング問題を以下のように定式化する．

問題１：$\text{Maximize } f_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^{n}\mu_j(C_j)$ (2)

問題２：$\text{Maximize } f_{\min} = \min_j\{\mu_j(C_j)\}$ (3)

本研究では，以下に示す７つのスケジューリング評価基準がファジィスケジューリングの特別な場合に帰着されることを示す．

- 総納期ずれ最小化　$\text{Minimize } \sum_{j=1}^{n}|C_j-d_j|$
- 最大納期ずれ最小化 $\text{Minimize } \max_j\{|C_j-d_j|\}$
- 総納期遅れ最小化　$\text{Minimize } \sum_{j=1}^{n}(C_j-d_j)^+$

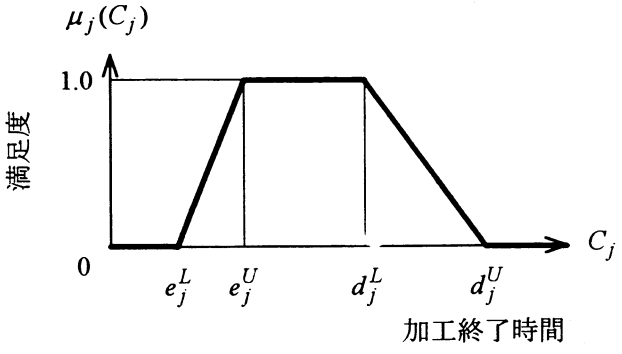


図１　台形型メンバーシップ関数

- 最大納期遅れ最小化
  $\text{Minimize } \max_j\{(C_j-d_j)^+\}$
- 納期遅れジョブ数最小化
  $\text{Minimize} \sum_{j=1}^{n}1, \ (\text{if } C_j-d_j>0)$
- 総滞留時間最小化　$\text{Minimize} \sum_{j=1}^{n}C_j$
- 総処理時間最小化　$\text{Minimize } \max_j\{C_j\}$

ここで，d_j はジョブ j のクリスプな納期（通常のスケジューリング問題の納期）である．なお，$(C_j-d_j)^+$ は，$C_j-d_j \ge 0$ のときには (C_j-d_j)，$C_j-d_j<0$ のときには０となる関数である．

2．1　総納期ずれ・最大納期ずれ最小化問題

式(1)のメンバーシップ関数 $\mu_j(C_j)$ におけるパラメータを次のように設定する．

$$e_j^L=d_j-\rho,\ e_j^U=d_j^L=d_j,\ d_j^U=d_j+\rho \tag{4}$$

ここで，ρ は十分大きな正数である．このとき，$\mu_j(C_j)$ は三角型メンバーシップ関数となり，問題１は，総納期ずれ最小化問題に帰着される．また，問題２は，最大納期ずれ最小化問題に帰着される．

2．2　総納期遅れ・最大納期遅れ・納期遅れジョブ数最小化問題

式(1)のパラメータを次のように設定し，各ジョブのファジィ納期を定義する．

$$e_j^L = e_j^U = 0,\ d_j^L = d_j,\ d_j^U = d_j + \rho \qquad (5)$$

このようなファジィ納期を用いることにより，問題１と問題２は，それぞれ総納期遅れ最小化問題と最大納期遅れ最小化問題に帰着される．

また，式(5)において，全てのジョブについて，$d_j^L = d_j^U = d_j$のとき，問題１は，納期遅れジョブ数最小化問題に帰着される．

2．3　総滞留時間・最大滞留時間最小化問題

式(1)において，次のようにパラメータを設定し，三角型メンバーシップ関数を定義することにより，ファジィスケジューリング問題を滞留時間最小化問題に帰着することができる．

$$e_j^L = e_j^U = d_j^L = 0,\ d_j^U = \rho \qquad (6)$$

3．　数値実験

10ジョブ５機械フローショップ・スケジューリング問題を用いて数値実験を行った．各ジョブの加工時間は区間[1, 99]の一様乱数で与えた．また，各ジョブのクリスプな納期d_jは，乱数を用いることにより設定した．

まず，２章で述べた７種類のスケジューリング問題の最適解を完全列挙法により調べた．この結果，２章で述べたように，通常のスケジューリング問題とファジィスケジューリング問題の最適解が$\rho \geq 800$のときに一致した．なお，問題TP，MP，TT，MTについては，$\rho \geq 200$のときに最適解が一致した．通常のスケジューリング問題の最適値と$\rho = 1000$と設定したときのファジィスケジューリング問題の最適値を表１に示す．

次に，ファジィスケジューリング問題に対して，遺伝アルゴリズムを適用した．ジョブ順列を個体として扱い，２点交叉，シフト交換をそれぞれ交叉，突然変異として遺伝アルゴリズムを構成した．各個体の適応度には，式(2)または式(3)の目的関数値をそのまま用いた．交叉確率を0.6，突然変異確率を0.5，探索世代数を300世代，各世代の個体数を10，20，50，100個体とした．

各々のファジィスケジューリング問題に対して，初期個体群を変えて10回の数値実験を行った結果を表２に示す．なお，表中の○は，10回の試行全てに対して最適解が得られたことを示している．表２より，個体数が20個体以上のときに，ほとんどの問題で最適解が得られていることがわかる．

表１　10ジョブ問題の最適解の評価基準値とファジィ満足度

Criterion	Score	Satisfaction
Total Penalties (TP)	416	0.9584
Maximum Penalties (MP)	80	0.9200
Total Tardiness Penalty (TT)	60	9.9400
Maximum Tardiness Penalty (MT)	36	0.9640
Number of Late Jobs (NL)	1	9.0000
Total Flowtime (TF)	4609	5.3910
Maximum Flowtime (MF)	747	0.2530

表２　遺伝アルゴリズムにより得られた解における目的関数値の平均

Type of problem	The number of individuals			
	10	20	50	100
TP	○	○	○	○
MP	○	○	○	○
TT	9.9398	○	○	○
MT	0.9633	0.9638	0.9638	○
NL	8.8000	○	○	○
TF	○	○	○	○
MF	○	○	○	○

4．結言

本研究では，ファジィ納期を用いてスケジューリング問題の定式化を行った．まず，総満足度最大化問題と最小満足度最大化問題の定式化を行った．次に，ファジィ納期を表すメンバーシップ関数の形状を変化させることにより，従来のスケジューリング問題の多くが，ファジィスケジューリング問題の特別な場合に帰着することを示した．最後に，10ジョブ問題に対して遺伝アルゴリズムを適用し，ファジィスケジューリング問題を解くことにより，従来のスケジューリング問題の最適解が求められることを示した．

参考文献

[1] R.Cheng, M.Gen and T.Tozawa: Vehicle routing problem with fuzzy due-time using genetic algorithms, *Journal of Japan Society for Fuzzy Systems*, Vol.7, No.5, pp.1050-1061, 1995.

[2] H.Ishibuchi, N.Yamamoto, T.Murata and H.Tanaka: Genetic algorithms and neighborhood search algorithms for fuzzy flowshop scheduling problems, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.67, No.1, pp.81-100, 1994.

[3] H.Ishii, M.Tada and T.Masuda: Two scheduling problems with fuzzy due-dates, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.46, pp.339-347, 1992.

問い合わせ先

〒５９３　大阪府堺市学園町１－１
大阪府立大学工学部経営工学科　　石渕久生
Phone: 0722-52-1161　FAX: 0722-59-3340
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

Fuzzy Inference Guided Multi-criteria Job-shop Scheduling

Lian Yu (Yokohama National University)E-mail: yulian@sekiguchilab.dnj.ynu.ac.jp
Heloisa M. Shih (The Hong Kong University of Science and Technology)
Takashi Sekiguchi (Yokohama National University)

Abstract: This paper is concerned with multi-criteria scheduling problems encountered in FMS. We proposed a Fuzzy Inference-guided approach to dynamically aggregate objectives which have differing degrees of impotence according to the characteristics of production system and to the real-time status of production resources. A number of simulation is carried out to verify the validity of the proposed method.
Keywords: Fuzzy inference; Fuzzy set; multiple criteria; job-shop scheduling.

1 Introduction

In the flexible manufacturing systems (FMS), finding one good objective to maximize or minimize can be difficult for two reasons (Morton [1]). First, such important objectives as customer satisfaction with quality or promptness are difficult to quantify. Second, a shop is usually dealing with two types of objectives, which are quite different: (1) maximize utilization of resources; and (2) satisfy customer desires for quality and promptness. Conventionally two kinds of typical approaches are possible: (a) solve problems with one objective at a time; (b) combine objectives by assigning weights to them.

In this paper we proposed a Fuzzy Inference-guided approach to dynamically aggregate objectives which have differing degrees of impotence according to the characteristics of production system and to the real-time status of production resources.

This paper is composed of 4 sections. In section 2 the framework of multiple criterion decision making is reviewed, the scheduling problem of unequal objectives is formulated. Section 3 is devoted to the dynamic scheduling of FMS which is characterized by: multi-product, jobs demand multiple operations , flexible routing with different process times in alternative machines. A number of simulation are conducted to verify the validity of the proposed method. Lastly, in section 4 we get the conclusion which contains the summary of our work.

2 Multi-criterion decision making of scheduling

Multiple criteria decision making refers to making decision in the presence of multiple, usually conflicting, objectives which can be evaluated according to any qualitative, political, social, or other objectives. Bellman and Zadeh [2] suggested fuzzy set theory as a suitable conceptual framework for decision-making under several goals and constraints to take into account subjective factors. However, finding multi-criteria aggregation operators remained open. This research is intended to investigate the aggregation operators for a job-shop scheduling with respect to multiple objectives.

2.1 Representing the problem

Let A be a set of jobs, one of which may be scheduled. G is the set of system objectives, each objective $g_i \in G(i = 1, \cdots, k)$ is associated with a real valued measurement scale $S_{g_i} : G \rightarrow S \subseteq \Re^+$, in a non-subjective fashion (Figure 1). Each job $a \in A$ can be ordering according to G, through a mapping $U_G : A \rightarrow S \subseteq \Re^+$, in a subjective fashion - decision makers utilization function which maps multi-criteria into the real line $R^k \rightarrow R$. U_G is such that , according to G: a must be preferred or indifferent to $a' \Longleftrightarrow U_G(a) \geq U_G(a')$ (Dubois [3]).

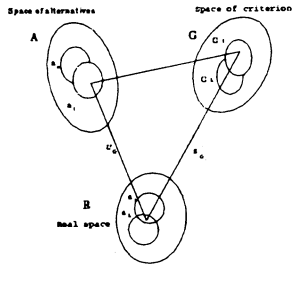


Figure 1: Relation between Space

The difficulty is that with many problems it is not possible to obtain a mathematical representation of the decision makers utility function U_G. In this research, U_G is obtained by combining the sets of $g_1, ..., g_k$ in following way:

$$U_G = max \quad \{D(S_{g_1}(a), S_{g_2}(a), \cdots, S_{g_k}(a))\}$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & S_{g_i}(a) \in S_i, \quad i = 1, \cdots, k \\ & a \in A \end{aligned} \tag{1}$$

The set of alternatives which are compatible with G can be viewed as a fuzzy set of A. The membership function of the fuzzy set is defined as:

$$\mu_{S_{g_i}}(a) = \frac{S_{g_i}(a)}{sup_A S_{g_i}}, \qquad a \in A, \quad i = 1, \cdots, k \tag{2}$$

Here, $sup_A S_{g_i}$ is $L_\infty - norms$, the maximum of absolute value of S_{g_i}. The formulation above can be represented as:

$$\begin{aligned} U(a) &= max \quad \{D(\mu_{S_{g_1}(a)}, \mu_{S_{g_2}(a)}, \cdots, \mu_{S_{g_k}(a)})\} \\ s.t. \quad & \mu_{S_{G_i}(a)} \in [0,1], \quad i = 1, \cdots, k \\ & a \in A \end{aligned} \tag{3}$$

Clearly, it means that the global ordering $U(a)$ only depends upon the alternative a and is not influenced by the partial orderings of the other jobs.

2.2 Symmetrical operators for criteria aggregation

In what follows we devote to aggregate two objectives, say x, y. When goals have equal importance, it is natural to think that the global evaluation U should be expressed as a symmetrical function of partial evaluation μ_{g_i}.

In a decision process the idea of a trade-off corresponds to viewing the global evaluation of an action as lying between the worst and the best local orderings. Mathematically, this condition translates into:
$D(x,y) \in [min(x,y), max(x,y)] \quad \forall x, y \in [0,1]$
We choose arithmetic mean as the averaging operator.

2.3 Unequal objectives

In many cases, objectives are not required to be attained at the same level according to the situation of system in the sense of preference $\alpha_1 \neq \alpha_2$. This can be done through a modification of each objective function $\mu_{g_i}(i = 1, 2)$, which maintains the symmetry of the structure of the aggregation function, allows us to keep a symmetric operator.

We propose that the goal g_i is changed into a $\alpha - firing$ constraint by assigning a firing level equal to 1, to elements of $g'_{i\alpha} = \{a \in A, \mu_{g_i}(a) \geq \alpha\}$, and firing level equal to $\mu_{g_i}(a)/\alpha$ to other elements. Hence the goal membership functions are changed respectively into:

$$\begin{aligned} \mu_{g'_1}(a) &= min(1 \cdot \mu_{g_1}, \tfrac{\mu_{g_1}}{\alpha_1} \cdot \mu_{g_1}) \\ \mu_{g'_2}(a) &= min(1 \cdot \mu_{g_2}, \tfrac{\mu_{g_2}}{\alpha_2} \cdot \mu_{g_2}) \end{aligned} \tag{4}$$

Equation 4 shows that if μ_{g_i} has the ability strong enough, it will be fired directly, otherwise, it will be scaled down by the factor $\mu_{g_i}(a)/\alpha$. The aggregation performed on these new objectives will be symmetric:

$$\begin{aligned} U(a) &= max\{D(\mu_{g'_1}(a), \mu_{g'_2}(a))\} \\ &= max_{a \in A} \sum \mu_{g'_i}(a) \end{aligned} \tag{5}$$

3 Fuzzy Inference-Guided Multi-criteria Scheduling

Aiming a more practical and flexible scheduling system, we design a fuzzy inference guided multi-criteria job shop scheduling. We concern with two objectives: flowtime based resource utilization and due date based Just-in-Time (JIT).The flow-time of a production is closely related to its work-in-process (WIP) cost. The objective of JIT is to end the order of production exactly on its due dates, i.e. both tardiness and earliness are penalized.

3.1 Scheduling System

We consider a FMS where 6 kinds of jobs arrive continuously during the scheduling period. Each job is composed of 3 operations, and the sequence of operations for each product is fixed. The scheduling decision includes both the assignment of the jobs to the machines and the sequencing of all the jobs assigned to a given machine.

In this study, the FMS is composed of 4 machines, each of them has dedicated a storage, a common waiting pool. The newly arrived jobs and the in-process jobs waiting for their next operation wait for a suitable machine in the waiting pool. The dynamic scheduling system is triggered every time the input buffer of a machine becomes free or a new arrival occurs while there is any input buffer free.

The scheduling system above is characterized by: multi-product, multi-operation, flexible routing, and dynamic job-shop scheduling. It is a strongly NP-hard problem (Pinedo [4]), where the computation time required to achieve optimal solutions increases exponentially with the size of the problem. The best-know heuristic method to deal with this kind of problem is dispatching rules, by which a priority or urgency is

calculated for each task, sequencing or scheduling the tasks according to this priority.

Here two dispatching rules are established: one based on the due date and one based on the process time of jobs.

(1)*Shortest Absolute Slack(SAS):* utilized mainly to face due date based objectives, like Just-in-time. This rule selects the job with the shortest absolute difference between the remaining time until the task's due date and the task's remaining process time which is considered as the time to process current operation in that machine plus the minimum process time of the remaining operations.

(2)*Earliest Finishing Time(EFT):* utilized mainly to tackle flow time based goals. This rule selects the job that yields a (partial) schedule with the earliest finishing time. EFT is a modification of the popular Shortest Process Time(SPT) rule with respect to flexible route, takes into consideration both the current load of the machines and the shortest process time .

3.2 Fuzzy Inference System

Figure 2 illustrates the histograms for mean and standard deviation of the absolute value of slack and flowtime in 50 simulation runs, simulation time 500 each run, with SAS or EFT. The arrivals are generated randomly according to an exponential distribution, the mean for the interval between arrivals is from 8 to 22 units of time. The figure shows both SAS and EFT do not keep consistent quality along with the change of workload. The characters of SAS & EFT are related to the workload of the production system. We can see that EFT has a good results both for short slack and flow-time when the workload is heavy, while SAS has a relative good results both for short slack and flow-time when the workload is light. This is more obvious when the process time of productions is different. When the process time is similar, the decision maker tends to choose the SAS as objective for expensive penalty, otherwise to choose the EFT.

We propose to use fuzzy inference to detect the production environment and infer importance α_1, α_2, respectively for the two objectives which are unequal in the sense of $\alpha_1 \neq \alpha_2$.

Fuzzy inference is the actual process of mapping from a given input to an output using fuzzy logic. The parallel nature of the rules is one of the more important aspects of fuzzy logic systems. Instead of sharp switching between objectives based on breakpoints, we will glide smoothly from regions where the system's behavior is dominated now by this rule, now by

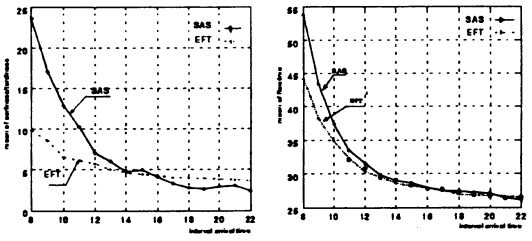


Figure 2: SAS & EFT Related to Workload

that one.

Usually, there are five parts of the fuzzy inference process: (1)fuzzyification of the input variables, (2)application of the fuzzy operator (AND or OR) in the antecedent, (3)implication from the antecedent to the consequent, (4)aggregation of the consequence across the rules, and (5)defuzzification. We will go the step 1 through step 4 as usual to get the firing strengths of objectives, then use formula (4),(5) in section 2.3 to get the defuzzification results.

Input membership function: In order to construct the fuzzy inference rules, we have to define the fuzzy variables.

(1)*Shop workload:* The shop workload is measured by the mean of the interval between arrivals with exponential distribution. Figure 3(a) shows the membership functions for the shop workload.

(2)*Similarity of total process time:* To access the similarity, the standard deviation of the process times of all the products is utilized. Figure 3(b) shows the membership function for the similarity of total process time.

(3)*Penalty for tardiness and earliness:* Both tardiness and earliness will be penaltied. Figure 3(c) shows the membership function for the penalty due to tardy or early.

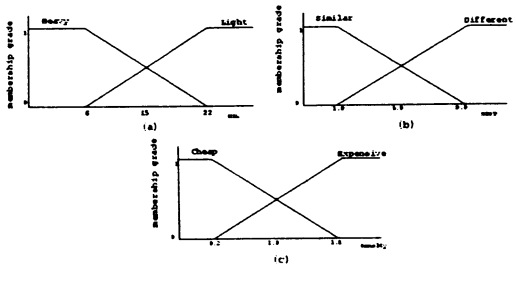


Figure 3: Membership functions for input

Output membership function: The SAS and EFT rules are as the output function of fuzzy inference. They have different firing

strength according to the real situation of production system.

Linguistic fuzzy rules: Based on the result of a number of simulation, we specify the following sets of rules to create the fuzzy model.

Rule 1: If workload is *light* and processing time is *different* favor SAS

Rule 2: If workload is *heavy* and(processing time is *different* favor EFT

Rule 3: If penalty is *expensive* and processing time is *similar* favor SAS

Rule 4: If penalty is *normal* and processing time is *similar* favor EFT

Reasoning: Using the proposed method in Section 2, we get the new membership functions and the decision makers' utilization functionas follows:

$$\mu_{g_1'}(a) = min(\mu_{g_1}, \frac{1}{\alpha_1}\mu_{g_1}^2) \quad (6)$$

$$\mu_{g_2'}(a) = min(\mu_{g_2}, \frac{1}{\alpha_2}\mu_{g_2}^2)$$

$$U(a) = \mu_{g_1'}(a) + \mu_{g_2'}(a) \quad (7)$$

3.3 Simulation

A number of simulations were conducted to evaluate the proposed fuzzy scheduling system. Figure 4 shows a typical set of results when the products have a standard deviation of process time difference of 5.87, three penalty patterns: expensive (fuzzy-a), more or less (fuzzy-b), no penalty (fuzzy-c), along with the various workloads from 8 through 22. In the figure we compare the results obtained by the proposed method for mean of the absolute value of the earliness/tardiness, and mean of flowtime of all jobs with the results obtained by simply using EFT and SAS.

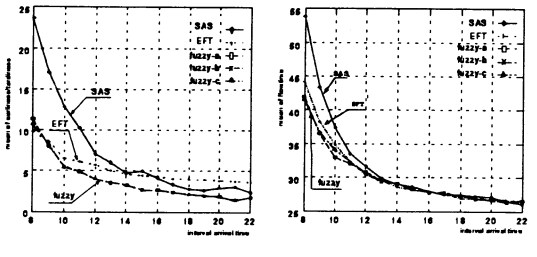


Figure 4: Mean of absolute slack and flowtime for a typical simulation group

The main results are from all simulation:
(1) The fuzzy inference guided procedure produced, in general, better results than any of simple dispatching rule considered in separate;
(2) Both of the differences of abolute slack and flowtime, between the results obtained by proposed method and the results otherwise is more significative for the group of simulations when the shop workload is heavy. We attribute this result to the fact that the fuzzy variables considered play a more sigificative role in rush hours;
(3) The differences between the results obtained by the proposed method and the results otherwise is almost negligible when the shop workload is light, that is with higher mean for the interval between arrivals. This is an expected result, and any reasonable rule may obtain optimal results when there is enough time to spare;
(4) Three patterns of fuzzy method present almost the same results. This is led by the fact that at any situation, utilization of decision makers gets the maximum.

4 Conclusions

The following conclusions can be drawn:
(1) The proposed method can solve quite easily multiple criteion scheduling problems, of which the results are much better in the situation of heavy workload, diverse process times.
(2) The knowledge acquisition and construction of scheduling rules is considerably easier with fuzzy inference.
(3) The solution always turns to be an efficient one which optimises dynamically the satisfaction of decision maker as much as possible in real-time production system.
(4) Using the $\alpha - firing$ constraint, the unequl preference of decision maker can be emphisized distinctly by playing down the degree of importance of the objectives which have less firing strength.

References

[1] T. E. Morton, D. W. Pentico: *Heuristic Scheduling Systems* John Wiley & Sons, (1993)

[2] R. E. Bellman, L. A. Zadeh: " Decision-Making in a Fuzzy Environment", *Management Science* **17** B141-B164, (1970)

[3] D. Dubois, H. Prade: "Criteria Aggregation and Ranking of Alternatives in the Framework of Fuzzy Set Theory", *TIMS Studies in the Management Sciences, Elsevier Science Publishers B.V.(North-Holland)* **20** 209-240,(1984)

[4] M. Pinedo: *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems* Prentice hall, (1995)

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WEF4-3

ファジィ推論によるワイヤボンディングの最適パラメータの設定手法

The Optimal Parameters Setting For Wire Bonding Using Fuzzy Reasoning

コウ　チン・シン

○ Chin Siong KHOR

Hitachi Semiconducter (Malaysia)

Bayan Lepas Free Inductrial Zone, 11900 Pg, Malaysia.

根津　紀久雄

Kikuo NEZU

Faculty of Engineering, Guma University.

1-5-1, Tensin-Cho, Kiryu-City, Gunma Pref. Japan.

本研究ではワイヤボンディング工程は全製造の歩留まりと品質保証に関わっていることがあり、ミクロン世界の組立工程もある。本研究は、ワイヤボンディングに影響しやすい機械の条件は多数状態の条件を直交法で実施し、母集合から取り出す計数値データをファジィ関数に格配する手法が提案される。そしてファジィ理論で扱えるワイヤボンディングの最適値を推定する。最後には、実験により検証し、提案した手法の有効性と最適性を評価する。

1．緒言

半導体チップ表面上に形成された電極端子と外部端子となるリードフリームの間を、直径数２０μｍ程度の金属細い線で結線する作業をワイヤボンディングという。ワイヤボンディングは、半導体素子の電気信号を外部へ伝えるという極めて重要な役割を担っているため、ワイヤボンディング技術の良否が半導体製品の特性及び信頼性に大きく関わっていることは言うまでもない。しかし、ワイヤボンディングに求められる特徴はいろいろな重要的な事項がかかることである。ボンディング工程における、熱的、機械的、負荷にたよえうるだけの接着強度である。したがって、ワイヤボンディングの品質確認には、寸法、形状等に関する製品検査とワイヤボンディング強度（金ボールの強度）に関する検査、及び製品清潔度に関する検査に大きく別れている。しかしながら、ワイヤボンディング強度が総合評価はボンディングされたワイヤにテンショングーシを引っ掛けて、ワイヤが破断するまで持ち上げ、破断強度と破断箇所を評価する。本研究は従来にワイヤボンディングになかなか決められないボンディング条件を計数値データの解析にして、その要因効果をファジィメンバシップ関数に利用して、最適パラメータを算出できることが提案する。

2．ファジィ推理及びロジット関数

ワイヤボンディング工程における破断強度に影響を及ぼすと考えられる制御因子を選定する。因子はボンディング装置へ指示する値を用いている。機械のボンテング条件は標示因子すなわち準制御因子で、ボンテング条件の形状を３種選んだ、また、誤差因子はボンディングするチップ内の位置、１０箇所を選ぶ。特性値は破断強度で、この強度はある規格を満足しなければないものであり、望目特性として解析を行う。

直交表 Lに制御因子のデータに対して、ＳＮ比および感度は以下のように求められる。

全変動は$S_r = y_1^2 + y_2^2 + \cdots + y_{10}^2$

$$S_m = (\Sigma y_i)^2 / n$$

誤差分散は$V_e = S_e / (n-1)$と求められる。

ＳＮ比及ぶ感度は上記の値により、以下の式のように　$\eta = 10\log(1/n(S_m - V_e) / V_e$

以上の式から直交表 Lの各実験データより、ＳＮ比および感動を求められる。各制御因子の各水準別の平均ＳＮ比及び平均感度を求め、図示したのように、統計から累積にメンバシップ関数 X_iと確実密度分布 $f(x)$が与えられば、ファジィメンバシップ関数を設定することができる。ファジイ推論では、直接的に用いる方法を採用し、ファジィルールを記述する。推論アルゴリズムはifの前件部とthen後件部形式のプロダクションルールで表す。すなわち、各プロダクションルールによる推論が実行され、その結果は総合、デファジィ化される。この場合の推論方式としてはMaxMin論理積を用いる。

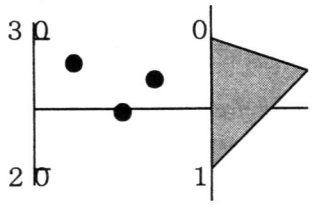


図１実験によるＳＮ比結果図

３．シミュレーションと結果

ワイヤボンディングの破断強度改善実験でとりあげる制御因子と誤差因子を表１に示すフローで検討する。その結果は生産ラインではＳＮ比を使ってメンバーシップ関数方法はコストや時間の¥短縮することができる。実験で選んだ制御因子の水準の範囲内に最適条件の推定値は製品の種類が変わっても安定した品質が要求だれるので、この製品の種類を誤差因子とした。

４．結言

一般的なパラメータの設定は全ての予備データを揃ってから、機械の調子状態から最適パラメータを選ぶ。それなら実験時間と状態設定の確認を手間がかかる。ＳＮ比によりメンバーシップ関数に含まれるパラメータの推定のほうは良いパラメータを選定することができる。最後、従来に解決しにくい自動パラメータの設定が容易になる。

参考文献：

（１）C.S.Khor.“ファジィネズにおける計数値データの推論に関する研究.”ファジィ学会関東支会.第５回ノンエンジンアリング・ファジィワークショップ.5A3140.1995.

（２）土谷将明.天坂格郎。“計数値データの解析“品質管理、Vol.44.No4、361-367、1993

Table1: Data of Gold ball Strength Expiment

Factor	Power	Force	Time	D	Total	Avg	Errer	SN ratio	
No:	1	2	3	4	Alter	Alter	variand	n (db)	S (db)
1	1	1	1		1248.01	1246.44	0.08	28.78	41.79
2	1	2	2		1249.48	1248.48	0.05	30.74	43.75
3	1	3	3		1351.13	1350.44	0.04	32.70	45.71
4	2	1	2		1243.39	1242.37	0.05	30.63	43.64
5	2	2	3		1457.40	1456.40	0.05	31.43	44.44
6	2	3	1		1385.29	1384.60	0.04	32.81	45.82
7	3	1	3		1573.13	1570.94	0.12	28.34	41.35
8	3	2	1		1436.58	1434.45	0.11	28.07	41.08
9	3	3	2		1616.25	1612.40	0.20	26.01	39.02
Likelihood		0					Total	269.51	386.61
							Avg	29.95	42.96

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WES1-1

対話型システムのユーザビリティ設計とその評価

Evaluating Usability of Human Interface on Conversational Type Systems

小松原明哲
Akinori Komatsubara

金沢工業大学　人間・情報・経営系　生活環境デザインコア
Kanazawa Institute of Technology

Usability evaluation methods for human interfaces on conversational type systems are reviewed. Concept and features of such methods as human interface design guidelines, KLM and PDS analyses based on user cognitive behavior models, and several user test evaluation methods are discussed.

1　はじめに

各種の計算機端末、情報家電機器などでは、得てして「どう使ってよいのか分からない」「わけが分からなくなってしまう」、挙げ句の果てにパニックになり「コードをひっこぬいて壊してしまう」こともある。これは「操作方法」それ自体のユーザビリティ問題である。本稿では「操作手順ユーザビリティ評価」のための代表的アプローチをいくつか紹介する。

2　設計原則による評価

諸家[1][2][3]がそれぞれ「使いやすいシステム作りの設計原則」示しているが、大体は共通しており、例えば「一貫性」「明瞭性」「寛容性」「近道の準備」「ガイダンス提示」「フィードバックによる段階的達成感の付与」「エラー防御と容易な処理」「逆操作可能化」「主体的制御権の付与」「短期記憶を最小に」などが上げられている。設計者の心得として利用されるほか、ガイドラインに展開して、設計段階、試作段階でのチェックポイントとして利用される。定性的評価であり、評価者の技量により評価結果が違って来ることは否めない。しかし、社内での評価視点を統一することが出来る、複数人がそれぞれ同一機種を評価し、結果を持ち寄りディスカッションすることで、評価漏れを防ぐことが出来る、またディスカッションを通じて設計者教育を行えるなどのメリットがある。

これらの原則の多くは経験則であるが、その由来は次のようなところにあると思われる。当該機器の想定ユーザによっては、当該機器に適用されない原則もあるので、原則を用いるときには、由来から理解する必要がある。

●認知特質に由来するもの

人間の認知特質に由来するもので、「一貫性」「短期記憶を最小に」などが該当する。全てのユーザに共通して適用される。

●情緒的な特質に由来するもの

「フィードバックによる段階的達成感の付与」「主体的制御権の付与」等は、快感、安心感を与えるもので、ほぼ全ユーザに共通して望まれる原則といえる。

●習熟による行動特質に由来するもの

当該システムの想定ユーザ習熟度により適用を変えるべきもの。具体的には初心者は「ガイダンス」が重要であるが、熟練するとガイダンスはうっとうしくなり、「近道」を要求する。並級者には、探索学習行動を促すために、「エラー防御と容易な処理」「逆操作」がとりわけ重要となる。

●想定ユーザのメンタルモデル形成度に由来するもの

「ガイダンス」「寛容性」が該当する。この二つの原則は裏表の関係にある。当該システムの想定ユーザに、操作方法に関するメンタルモデルが存在していないと見込まれる場合には、強力な「ガイダンス」で操作を誘導すべきである。しかし類似機器の操作経験等で、ユーザによりまちまちなメンタルモデルがすでに存在していると見込まれる場合には、多くの場合ガイダンスは無視されるので、どの様な操作でも受け付けるよう「寛容性」をもたせるべきである。

3　ユーザ行動モデルによる評価

ユーザの認知行動を予想し、その予想される行動をもとにして、逆にシステムのユーザビリティ評価を行うというもの。主に設計段階で用いる。ユーザの認知行動の記述モデルとして、いくつかのものがある。

（1）KLMとPTS法

S.K.Card らは、当該システムを正しく操作する際の認知行動を記述し（GOMS goals, operators, methods and selection rules）、さらに操作時間予測法として、KLM（key stroke level model）を提案している[4]。KLMでは、比較照合等、内的に進行する認知行動を予想記述し、各認知時間の基本周期時間を足し合わせることで、操作時間予測をする。実際の時間との整合性は±21%程度であり[5]、精度はよいとも言えないが、複数の設計案の時間的相互比較や[6][7]、自動販売機の様に行列が出来てしまうシステムの場合の行列時間を、そこそこ予測出来るなどのメリットがある。また認知行動を記述するので、認知負荷の評価も可能である[8]。ただ、いざ、あるシステム使用時のユーザの認知行動をKLM表現しようとすると、意外と難しい。

もっぱら身体的動作により操作される機器では、経営工学で用いられているPTS（Pre-determined Time Standards）法を、ハードのユーザビリティ評価に転用できる[8]。PTS法は、一連の作業行動は、基本となる動作に分解することが出来るという前提に立ち、その基本動作の難易度評価により、ハード条件改善の指針を与え、さらに基本動作時間を総計することで、管理基準としての作業行動時間を予測する。

（2）PDS解析

D.A.Norman の行為の７段階理論[9]に基づくもので、手順操作をするシステムにおいては、ユーザは操作の各段階を通過するときに、必ず「意図形成:Plan」「実行:Do」「評価:See」の３段階を踏むと仮定する[10]。ここで使いやすいシステムでは、ユーザが一連の手順をスムーズに通過出来る、つまりPDSサイクルがスムーズに回ると考えると、Pのための「ガイダンス」、Dのための「ハード条件」、Sのための「フィードバック」が、システム側から適切に提示されていることが重要と考えられる[10]。従って、一連の操作の各ステップを、PDSに展開し、それを促すためのガイダンス、ハード、フィードバックを評価することで、ユーザは操作手順のどこで詰まる可能性があるか、それを回避するには、どの様なインタフェイスの改善をすればよいかが、明確になって来る。

この解析法の利点としては、一連の操作手順全体について、ユーザビリティの問題点の所在を漏れなく拾い上げることが出来ることが挙げられる。ただし、限界としては、操作ステップそのものの並べ方が適当か、自然か、ということは評価できない。つまり初心者に、所定の操作手順をスムーズに通過させるためのインタフェイス条件を評価するものといえる。

4　ユーザテストの評価

試作機（実機）を被験者に操作させ、操作行動をプロトコル解析し、エラーや戸惑い、達成時間などを評価することが一般的である。ただしプロトコル解析は非常に手間を喰うので、少数事例研究とならざるを得ない。そこで丁寧なプロトコル解析をせず、ユーザインタビュー、グループディスカッションを行うこともある。ただしこの場合は、得られた意見が本質をついているという保証はなく、回答者の気分的な意見も混じる。従って得られた意見の再評価が必要となる。また自覚できる意見しか得られないから、実際はエラーをしているのだが、本人がそのエラーを自覚しない様な場合は、エラーは拾われてこない。

ところで筆者らは、設計案（デザインイメージ）をユーザに示してのユーザテストを含め、ポイントを絞ってユーザテストを行い、結果を評価することを考えている。いくつか研究例を紹介したい。

（1）操作手順評価法[11]

操作盤イメージが出来た段階でのユーザテストをねらっているもので、「操作手順評価チャート」「ボタンイメージアンケート」からなる。

①操作手順評価チャート

あるボタンを押した後、次にどのボタンを押すと思うか、その遷移関係を From To Chartに確信度でウエイト付けをした上で集計し、遷移図化するもの。ユーザの操作が、どこでどれだけばらつく可能性があるかを視覚的に把握することが出来る。

②ボタンイメージアンケート

操作盤イメージを被験者に示し、各ボタンの機能を予想記入させるもの。正答率、誤答種類数を評価する。

③適用例

筆者らはエアコンタイマー（リモコン操作）を例に、実機テストと、リモコンのカラーコピーによるイメージ段階テストを行った。得られた遷移図を図1に示す。以下のことが分かった。

●モードレスにも係わらず、ユーザは、まず予約モードに入ろうとする。

●ボタンイメージアンケートで成績が低いボタンにおいて、正しい手順から外れる傾向がある。

●実機を前にすると、ユーザは局所観察的であり、目についたボタンにサッと手を伸ばすかの行動がみられた。従って、操作盤イメージ段階での評価で正しい操作が確認できたからといって、実機でも逸脱しないとは言えない。

●実機で誤操作を行ったときには、被験者は何回か再操作を行い、その機能を学習するものと思われた。この行動までは、操作盤イメージ段階では予想できない。

このようにいくつかの予想限界はあるものの、いずれにせよ操作盤イメージを示した時に正答からの逸脱が見られるのであれば、実機でも正しい操作は期待できないわけで、操作盤の設計段階では最低限、正答操作手順から逸脱しないことを確認する必要がある。また、ボタンイメージアンケートにおいて正答率を高めるような、ボタンネーミングを行わなくてはならないと、そこで操作が逸脱する可能性があるといえる。

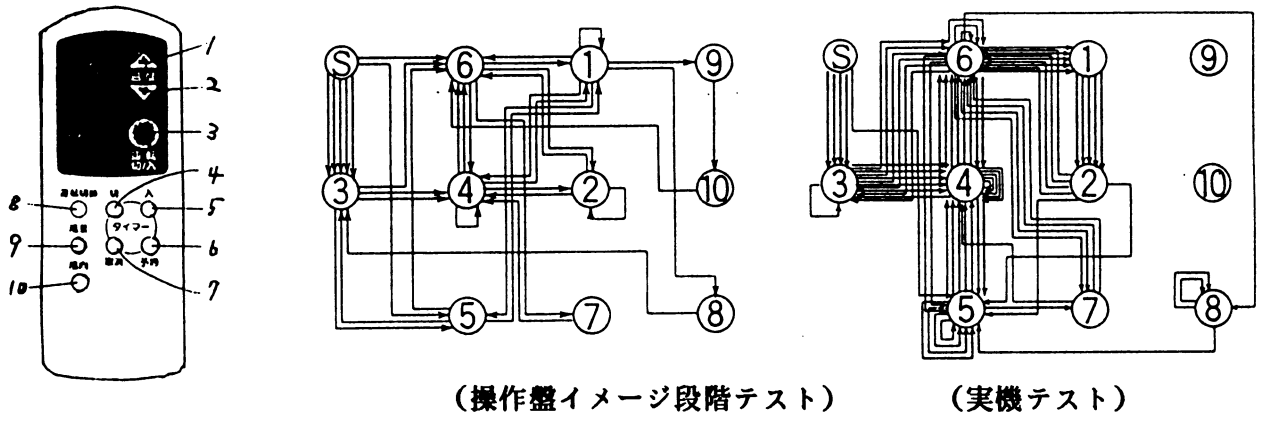


図1　実験機リモコンと、得られた操作手順遷移図

（2）パニック防止対策と効果評価[12]

①考え方

ハンディターミナルのような、操作が複雑でかつガイダンスが出しにくいシステムでは、分厚いマニュアルを読ませるより、多少のエラーには目をつぶり、ユーザの探索学習行動に期待し、自分でシステムの使い方を見い出してもらうことに期待した方が得策だろう。ただしそうはいっても、全く知識を与えないのでは、得てしてパニックに陥る。探索学習を支援する最低限の知識を与える必要があるだろう。

この考えに基づき、筆者は、電子メールハンディターミナル（NEC ﾓﾊﾞｲﾙｷﾞｱ MC-P1）を例に、「画面の基本的なフレーム」「決定のためのキー」「脱出（中止、中断）のためのキー」を一枚の説明図にまとめて、操作開始前に示した場合と、示さない場合とで、初心者ユーザの操作行動の相違を調べた。Hollnagel のＣＯＣＯＭ[13]に基づき、被験者の状態判定を行った（ただし、判定は判定者の主観による）。なおＣＯＣＯＭは、ある状態の人間の制御状態の区分モデルであり、人間の制御状態は、主観的時間的制約により「strategic（意識的戦略的操作）」「tactical（ﾙｰﾙﾍﾞｰｽ的戦術的操作）」「opportunisitic（偶然期待的操作）」「scrambled（支離滅裂操作）」の、４つの control mode に別れるとしている。scrambled 及び opportunisitic mode が、いわゆるパニック状態に該当すると思われる。

②結果

ＣＯＣＯＭの４モード別のタスク達成時間を図２に、操作回数を図３に示す。知識を与えることで操作時間、及び操作回数が低減し、特にscrambled及び opportunisitic mode の発生が押さえられていることがわかる。操作時間については、知識を与えることで、strategic mode の時間が若干増加している。与えられた知識を参照しながら、じっくり考えつつ操作をしているということであろう。

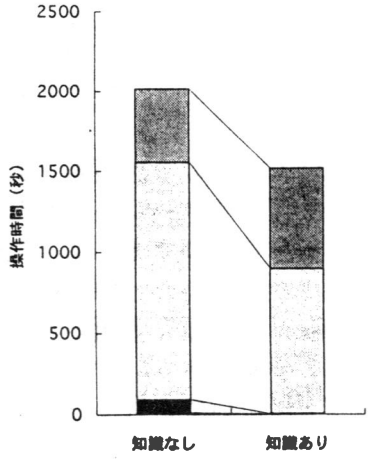


図2　タスク達成時間
（被験者一人当り）

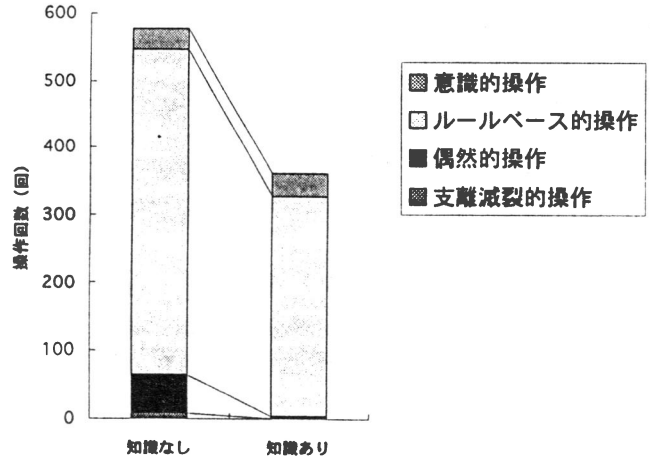


図3　タスク達成に要した操作回数
（被験者一人当り）

5　まとめ

本稿ではユーザビリティ設計評価法について紹介してきたのだが、そもそも「ユーザビリティ」とは？　といわれると、答に窮してしまう。エラー、時間、満足感（非不満感）などに帰着できる、「ある種の概念」ということになるのだろうか。

ところでこの曖昧な概念を何等かの形でまとめ、「ユーザビリティ満足度○○%」などと、一つの尺度で定量表現できないか、ということが時として言われる。しかしこうした尺度は、実務的に見ると必ずしもメリットはない様な気もする。また気をつけないと数値だけが一人歩きすることもある。評価目的を明確にした上で、対策を見いだす様な評価を行わねば、ユーザビリティ評価の本来の目的が達成されない様に思う。そのためには、一つの大きなユーザビリティ評価法（尺度）が作られるより、小回りの効く小さな評価法からなる、ユーザビリティ評価法バッテリーが整備され、評価目的に応じて使い分けられていくべきではないかと思う。

＜参考文献＞
(1)例えば B.Shneiderman、東他訳：
ﾕｰｻﾞｰｲﾝﾀﾌｪｰｽの設計、日経ＢＰ社、1993
(2)例えば S.Ravden他、小松原訳：
ﾕｰｻﾞｲﾝﾀﾌｪｲｽの実践的評価法、海文堂、1993
(3)例えば J.S.Dumas、宮井他訳：ｿﾌﾄｳｴｱ開発のためのﾕｰｻﾞｲﾝﾀﾌｪｰｽ、日経ＢＰ社、1989
(4)S.K.Card他：The Psychology of Human-Computer Interaction、LEA Pub.、1983
(5)木村泉：打鍵ﾚﾍﾞﾙ模型について、情報処理学会計算機ｼｽﾃﾑのﾋｭｰﾏﾝｲﾝﾀﾌｪｰｽ「ﾓﾃﾞﾙ・評価・展望・ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ」論文集、11-24、1988
(6)小松原明哲：単層階層ﾒﾆｭｰ選択ｼｽﾃﾑにおけるｸﾞﾙｰﾌﾟｻｲｽﾞの決定方法について、人間工学27(2)、73-82、1991
(7)小松原明哲：KLM と PDS 解析を統合したﾕｰｻﾞﾋﾞﾘﾃｨ評価ﾁｬｰﾄ、ﾃﾞｻﾞｲﾝ学研究、日本ﾃﾞｻﾞｲﾝ学会第42回研究発表大会概要集、15、1995
(8)小松原明哲：PDS解析とKLM(PTS)法による操作手順上のﾕｰｻﾞﾋﾞﾘﾃｨ評価、日本人間工学会関東支部大会講演集、12-15、1995
(9)D.A.Norman、野島久雄訳：誰のためのデザイン？　74-80，新曜社、東京、1990
(10)小松原明哲他：「意図形成」「実行」「評価」展開による手順的使いやすさの評価について、人間工学31(4)、259-267、1995
(11)森田直子他：操作手順ｲﾒｰｼﾞｱﾝｹｰﾄによる手順操作の使いやすさ評価について、人間工学34（特別号）、1997
(12)小松原明哲：全く初めてのｼｽﾃﾑ使用時の人間行動とﾕｰｻﾞﾋﾞﾘﾃｨ確保について、人間工学34（特別号）、1997
(13)E.Hollnagel,Humn Reliability Analysis, Academic Press, 1993

＜連絡先＞
小松原明哲
〒921　石川県石川郡野々市町扇ガ丘７－１
金沢工業大学
人間・情報・経営系
生活環境デザインコア
TEL(0762)94-6710　FAX(0762)94-6711
baraken@manage.kanazawa-it.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WES2-1

リスクの概念と評価方法

An Inquiry into Concepts of Risk and Methods of Assessing Risk

武井 勲

Isao Takei

青山学院大学 経営学部 教授

Professor, Aoyama Gakuin University —School of Business Administration

Risk Management is essential for all of us —not to mention environmentalists, engineers, doctors, lawyers, financial investors, insurance professionals, safety officers. For its improvement, common concepts and definition of risk plus common risk measurement methods must be essential.

1．リスクの概念

1．1 リスクの概念および定義

1．1．1 フランク・ナイトのリスクの二元論[1]

フランク・H・ナイトは、『リスク、不確実性及び利潤』(1921)において、当時一般的に使われていた“リスク”という用語のなかに、“リスク”と“不確実性”という二つの概念が混在していることを見抜いた。リスクとは、“測定可能な”不確実性であり、不確実性とは、“測定不可能な”不確実性である。リスクは、大数観察によって結果の確率分布を客観的に予知することができるため、実際には不確実性とはいえない。リスクも不確実性も、「結果に対してもつ疑い」という意味で共通であるが、前者は客観的確率により測定できるのに対し、後者はそれができない点で区別される。

「すべての真の利潤は不確実性と結びついている」という危険説を明示したナイトは、リスクは、保険化（コスト化）できる概念であり、不確実性こそ、企業家利潤の源泉であることを立証した。

1．1．2 リスクの定説の不在

正しいリスクの定義というものは存在しないといわれる[2]。なぜか。ナイトの二元論に関係がありそうである。

アメリカではリスクを「変動（***variation of possible outcomes***）」ととらえるのに対し、イギリスではリスクを「確率（***probability***）」ととらえているところに問題がありそうである。

1．2 アメリカにおけるリスク論争

Williams and Heins, Risk management and Insurance (McGraw-Hill, 1964) と ***J.D.Hammond*** 編 ***Essays of the Theory of Risk and Insurance (Glenview, 1968)*** 所収の ***"The Meaning and Measurement of Risk"*** において、リスクの議論が本格的に行われた。その後約３０年の展開を経て、リスク研究は多様化、高度化している。いまだ統一されたリスクの定義というものはないが、フランク・H・ナイトの『リスク、不確実性及び利潤』によるリスクの二元論は正鵠をうがっていると思われる。

純粋リスクの研究を中心とする ***Journal of Risk and Insurance***, 投資リスク、オプション、デリバティブなどを含めた投機的リスクを研究する ***Risk***, リスクおよび不確実性を包括する ***Journal of Risk and Uncertainty***, 実務家向けの ***Risk Management*** などの学術雑誌にこの傾向をみることができる。

1．3 イギリスにおけるリスク論争[3]

１９８３年に英国王立協会[4]は『リスク・アセスメント』という報告書を出版した。国家の最高科学研究機関としての英国王立協会の立場を守ったその調子は、権威があり、自信に満ち、そして目的意識があった。報告書はリスク問題に関する当代の国際的権威を集め、列べていたので、主たる参考文献となった。１９９２年に王立協会は、再びこのテーマをとりあげ、『リスク：分析、感知および管理』と題する新しい報告書を出版した。王立協会は、出版をしたのにもかかわらず、その中身に大いに当惑し

た。まえがきの中で、それが「王立協会の報告書ではない」こと、「そこで表明されている見解は著者たちだけのものである」こと、そして、それが単に「継続中のリスクの討議に寄与するものである」ことを強調した。１９９２年までに王立協会はリスクについてもはや団体として統一見解をとれなくなっていたのである。王立協会はリスクという課題について単なる一つの討議の場になってしまった。何が起こったのか。この「継続中の討議」とは何か、そして、リスクという課題に対する探求はどのようにして脱線してしまったのか。

１９９２年の報告書作成に当り、王立協会は、社会科学者たち ― 心理学者、文化人類学者、社会学者、経済学者、そして地理学者 ― に参加を呼びかけた。社会科学者たちは、経済学者を除き、王立協会の自然科学者たちと意見を合わせることができなかった。１９９２年版報告書の中の意見の不一致は、安全と危険に関する論争のあらゆるところにみられる。それは「リスク」の性質と意味についての不一致である。この不一致を解決すれば、すべての人間生活におけるリスクのコントロールと分散に対し深い意味をもつことになろう。

２．リスクの概念および定義 ― リスク・マネジメントの見地から[5]

２．１ リスクの特徴

「リスク（***Risk***）」はあまりにも多様な使い方がされる[6]ため、定義しにくい単語である。たとえば保険業界の人にとって、同じ言葉が、保険に付けられる物、それを脅かす危険（ペリル）、そして損失が発生する危険を意味するはずである。

しかし、どのリスクの定義の中にも二つの主要な要素がある。すなわち、

― 不確実性 と

― 望ましくない結果 である。

この二つに対し、我々は三つ目の要素をつけ加えることができる。

― もしリスクに影響を与えるとするならば、何らかの「既存状態の変化」が必要である

この要素は重要である。リスクそのものは人間の支配外であるため、しばしばマネジメントできない。しかし、我々は変化する要素に影響を与えることができる。大災害が起こる前にリスク・マネジメントを可能にするためには何かが変化しなければならないことは事実である。たとえば、もしあるビルに地震のリスクがあるならば、そのビルの安定性が崩れない限り、リスクは何ら影響をもたないであろう。地震が発生するリスクを制御するために我々は何もできないが、しかし、ビルを補強することによって、我々は地震による損害の度合を制御することができる。

２．２ リスク・マネジメントにおけるリスクの学問的定義に関する武井説

筆者はリスク・マネジメントおよび保険の見地から、上述した米英日のリスク概念を分析した結果、リスクを「起こりうる損失の変動とその結果生ずる損失」と定義する[7]。より本質的、抽象的には、「ある一定の状況において一定期間中に起こりうる結果（事象）の変動」[8]とする定義をとる。

２．３ リスクの定義の注釈

リスク・マネジメントの学問上、下記のリスクに関する三つの定義に留意すべきである。

(1) リスクは期待された結果からの潜在的変動である。

これは、ある事象の結果が変動する額が大きいほど、その事象がリスキーであることを意味する。

実際的目標にこの定義を使う場合の問題は、この定義がプラスの結果とマイナスの結果の区別を全くしていないことである。したがってこの定義によれば、財務用語で結果の起こりうる範囲が－１，０００ポンドから＋１００，０００ポンドである事象は、－１０，０００ポンドから－５，０００ポンドの範囲になる事象より「もっとリスキー」であることになってしまうであろう。これではリスクに対する実際の見方と対立する。ほとんど利潤を保証した事象の方が一定の損失が出ることの分かっている事象より、リスクが高いという見方が支持されることはない。

リスクのこの定義の欠点は、「下方リスク（***downside risk***）」という有名なビジネス概念を適用することによって克服できる。「下方リスク（***downside risk***）」は、「あらかじめ決められた許容最低限度の結果を下回る」潜在的変動だけを考慮するものだからである。

(2) リスクは損失の危険（チャンス）または確率である。

この定義によれば、損失の確率が大きいほど、リスクも大きい。

この定義に対しては以下の反論がある。

- 損失の確率が増加するにつれ、「不確実性」は減少するので、リスクは予知がしやすくなることになり、それ故管理もしやすくなる。
- この定義は損失の規模、すなわち潜在的深刻度を考慮していない。このことは、リスクが許容できるかできないかに関する個々人の見方に影響する。たとえば多くの人々は、もし数ペンスのわずかな金額しかかからないならば、確率の高いリスクをよろこんで引き受けるであろう。しかし、何千ポンドもの損失に耐えるということになれば、確率が同じ事象であっても明らかにリスキーすぎると思うであろう。
- この定義は、許容リスクを決定する上で主観的要因を無視している。

(3) リスクとは、目標指向システムの積極的期待が実現されない可能性である。

M. ハラー博士が提唱したこの定義は、次の理由から、リスク・マネジメントの諸目的には役立つものである。

- この定義は望ましくない結果に集中している。ほとんどの実務家のように、それはものごとが期待以上にうまくいくかもしれないという積極面の「リスク」とは係わらない。
- この定義は、「積極的な期待」は金銭では表示できないという立場をとる。中断のない操業あるいは有用なサービスの継続的供給はそれ自体が「積極的な期待」である。
- この定義はあらゆる「目標指向システム」に適用する。そのシステムが個人であれ、一部門、一会社、会社グループ、国または世界自体であっても。

3. リスクの評価

3．1 リスク・アセスメント

リスク問題の解決には、リスクの感知→リスク・アセスメント→リスク・マネジメントの順路がある。リスクの感知は主観的側面が強い。リスク・アセスメントは、感知したリスクを客観的に確認し、測定し、解決（リスク・マネジメント）のためのリスク処理技術を選択し、優先順位を決定するためにリスクを評価するプロセスである。

3．2 リスク測定の３次元

リスク・マネジメント論では、リスクを次の３次元で測定することがほぼ定説（***orthodoxy***）になっている。[9]

(1) ある期間中（たとえば来年度中）に発生するリスク（または損失）の発生確率（***probability***）

(2) それらのリスク（または損失）の１件当りの平均損失規模（***severity*** または ***size of loss***）

(3) ある期間中（たとえば来年度中）のリスク（または損失）の衝撃度（***impact***）

4．現実のリスクは測定が可能か？

4．1 現実のリスクとは何か？

王立協会の１９８３年報告は、「客観的」リスク（***objective risk***）— いわゆる「専門家」が知っていること — と「感知されたリスク」（***perceived risk***）— 将来の事象に関する素人の抱くしばしば大変見当ちがいな予想 — とを区別した。報告の由来が分かったところで、それがその課題に「科学的に」接近をしたことは驚くに当らない。１９８３年報告は、こうして、リスクという研究課題を次のように定義した。

> 当研究グループは「リスク」を規定された期間中にある特定の不利な事象が発生またはある特定の挑戦の結果生じる確率とみなす。統計理論という意味における確率として、リスクは確率を結合させるすべての公式的法則に従う。

研究グループはまた、損害（***detriment***）を次のように定義した。

> 不利な事象に伴って予想される損傷または損失の数量的尺度……それは一般にリスクおよび損失の一体化した尺度であり、保証のコスト、予想余命年数まで生きられないこと、または生産性の喪失などでしばしば表現され、費用対効果分析あるいはリスク対便益分析などの計量的分析に必要とされる。

4．2 リスクは測定が可能か？

ケルビン卿はかつて、「存在するものは何ものでも何らかの数量で存在するから、したがって、測定が可能である」と言った（***Beer, Management Science, 1967***）。

自然科学者たちはその存在が客観的な反復可能な測定によって証明できない現象について猜疑心をもつ傾向がある。そして、ケルビンの言明はリスクの課題に取り組む人々の立場の典型である。彼らの客観的科学を実証する金言はそれ自体証明できないことからして、彼らは「客観主義者」とか、あるいは彼らの主張の神学的性格に合わせて「ケルビニスト」とも呼べるであろう。

王立協会の１９９２年版報告書の第５章は、ケルビニストに対する反対が当時いかに根強かったかを記述している。「統計理論の公式的法則に従う実際的、現実的、客観的、測定可能なリスク」と「専門家でない者によって厳正に感知されたとは言えない主観的リスク」との間には、一線を画すべきであるという見方が、今なお英国における安全とリスク・マネジメントに関する研究と文献のほとんどにみられる主流的立場である。王立協会のメンバーの中では、「客観的リスク」などというものはないという人と、リスクは「文化によって構築される」ものという見方は理解できないという人とに分かれるようである。

4．3 リスク・マネジメントの既成概念への挑戦[10]

事故に遭いたい人はだれもいないが、リスクを負わないでいられたらとはだれもが思う。私たちはリスクを大きくする一方で、それを軽減するために官僚軍団を雇うという両面の文化の中に暮らしている。ジョン・アダムズ著『リスク』は、自転車のヘルメットから温室効果や持続可能な開発に至るまで、リスクという課題に関する論議に光を照射している。同書は今まで別の道を行った「リスクに対する補償」と「文化の理論」という概念の結合である。

アダムズは危険（***danger***）についての二面性を探り、リスク・マネジメントの既成概念（***established orthodoxy***）に挑戦するリスクの理論を展開する。彼はリスクを客観的に測定しようとする試みの不毛さを示し、なぜ善意で作られた法律、規制および物理的手段がうまくいかない宿命を帯びるかを説明する。彼はリスク軽減の目標そのものに疑問を投げかけ、私たちのリスクを負担する傾向を軽減しない安全対策は、国民が元来満足していたリスク水準を再び主張しようとするにつれて、納得できなくなるであろうと主張する。アダムズは興味をそそる（***intriguing***）質問をし、驚くべき答えを出す。

- 危険な道路の方が交通事故が少ないのはなぜか？
- シートベルト法はなぜ人命を救えないのか？
- 保険があるために事故の危険が増えるのはなぜか？
- なぜリスクは測定できないのか？
- なぜ人々はそれぞれに異なったリスクについて心配をしているのか？
- 科学者たちはなぜ地球環境の警告について意見が合わないのか？
- なぜグリーンピースと原子力産業は原子力発電のリスクと便益について合意できないのか？

5．リスクの定義と評価の研究の重要性

リスクは学際的特徴をもつ。しかし、以上の考察から、リスクの定義が定まらないため、リスクの評価の方法も、リスク・アセスメントの結果も学問の専門分野が同一であろうと異なろうと定まらないと考えられる。リスクは、環境問題に関心のある人々、技術者、医師、弁護士、投資家、保険の専門家、安全担当者、安全に係る公務員、政治家、学者などリスク・マネジメントに関わるすべての人に関係が深い。リスク・アセスメントは、環境、医療、保健、老人介護、職場の安全、道路行政、運輸・交通行政などの政治・経済・社会・外交・危機管理等の問題解決 ― リスク・マネジメント ― の前提になる。学際的なリスク研究を深め精緻化する必要性があり、その緊急性と重要性は高い。

（１９９７．４．１９）

問合せ先
〒150 東京都渋谷区渋谷4-4-25 青山学院大学 経営学部
武井 勲 Voice&Fax Mail Box & Transfer 03-5780-3050

WES3-1

ＤＥＡモデルにファジィ目標の概念を導入することに対する一考察
A Study of introducung a Fuzzy Goal into DEA

植村芳樹
Yoshiki Uemura

三重大学教育学部情報教育課程
Fac. of Education, Mie University

ABSTRACT: The evaluation of efficiency of the DMUs(Decision Making Units) in some company is very important. From this point of view, the study of evaluation of efficiency is very active, on the basis of the formulation for the production function, for example Cobb-Doug las production function and fuzzy loglinear production function (fuzzy Cobb-Douglas model). Recently, DEA (Data Envelopment Analysis) is focused on the evaluation of efficiency, in the sence of bench-making evaluation. After having evaluated DMUs by DEA, we obtain the im provement plan for every input in some inefficient DMUs. Though we can not decrease inputs one time according to the DEA plan, it is natural to construct some phased improvement pl ans for decreasing inputs. First, we propose to support the construction of some phased i mprovement plans by the sensitivity analysis for the evaluated efficiency by the limit of the decrease of inputs. Second, we evaluate this method by the applying it into Bank Data. Therefore, we often obtain DEA efficiency for DMU_o from the efficiency of one output. Th is means DEA analyzes one output by some inputs and ignores another outputs. Futhermore, D EA efficiency is bigger than the max efficiency among one object solutions for an individu al output. From above-mentioned two problem in DEA, as we need to obtain the total efficie ncy analyzed from all outputs by all inputs, it is natural that the total efficiency exist s between min efficiency and max efficiency among one object solutions for an individual o utput. In this view point, we try to introduce the concept of a Fuzzy Goal into DEA. But, the satisfactional efficiency is allways the max efficiency, because the max efficiency is in the possibility solution area with satisfactional rate which is one. Therefore, as DEA efficiency is the linear weighted sum of individual efficiency for every output, we try t o change DEA model to the multi-objective problem, and propose the satisfactional method f or DMU_o along the maximizing decision defined by Bellman and Zadeh, and propose the impro vement method for the satisfactinal solution along the dialogue to DM by trad/off rate for two efficiencies which is developed by Sakawa.

１．はじめに

企業体の効率性評価を行うにあたり，生産関数を用いて評価を行うことが以前から提案されており，その代表的なものとしてＣｏｂｂ－Ｄｏｇｕｌａｓモデル[1]が位置づけされる．このモデルは，対数線形回帰分析に帰着され，統計的な効率性評価である．従来は，平均的な立場からこのようなモデルを使用して偏差値的な評価を行ってきたわけであるが，最近ではベンチマーキングと呼ばれる「トップの効率の企業体をめざす．」ことに評価主眼が移行してきている．この一つの試みとして，Ｆｕｚｚｙ　Ｃｏｂｂ－Ｄｏｇｕｌａｓモデル[2]が提案され，このモデルはファジィ対数線形回帰分析に帰着され，その銀行問題への適用研究として文献[3]が報告されている．さらに，ＤＥＡ（包絡分析法）[4]が，提案され，ＤＥＡの初期の定式化が，双対形を考慮すれば生産可能領域を制約条件とした線形計画法に帰着され[5]，生産可能領域に基づく評価方法として，ファジィ対数線形回帰分析との対比研究[3]もなされている．また，これらの評価を行えば，Ｄ－非効率な企業体をＤ－効率的な企業体にするための入力改善計画が自動的に求められる．しかしながら，非常に効率が悪い企業体を一度にＤ－効率的にすることは非常に困難であり，意思決定者との対話手法により妥協的な入力改善計画を作成支援する手法が提案され[6],銀行問題に適用し，その手法の有効性・妥当性が検討されている[7]．

他方，線形計画法にファジィ目標を導入したファジィ線形計画問題や，多目的線形計画問題にファジィ目標を導入したファジィ多目的線形計画問題がモデル化されている[8, 9]．本論文では，ＤＥＡ手法の問題点について考察を行い，ファジィ目標の概念を導入することの意義を論じる．

２．ＤＥＡ手法の問題点

まず，モデル上の問題点として，出力や入力に重要度の概念が導入されておらず，仮に意思決定者が重要度を重み付けして，定式化して効率値を求めても，重み付けしないで求めた効率値になる．

次に，分析上の問題点として，多入力多出力システムの分析方法であるのにも関わらず，１出力だけが考慮されその他の出力が無視され，効率性評価がなされる場合が多々生じる．

以上の２点の問題点が，ＤＥＡ手法の最大の問題であり，たとえば，出力として「純利益」と「売上高」を取り上げた場合，出力の重要度は同等とみなされ，最悪のケースとして「売上高だけ考慮され純利益は無視された評価がなされる」危険性がある．

さらに，ＤＥＡ手法で求めた効率値は，多入力１出力システムとして，個別の出力を目的関数として定式化した際の効率値の中の最大効率値より大きな値になる性質を持つ．これは，ＤＥＡモデルの目的関数が，各出力に関する効率値の線形和となっていることが原因であり，逆に思考すれば，個別の出力の効率値を多目的に持たせた多目的計画問題のスカラー化手法であるとみなすことができる．

３．ファジィ目標の導入１

２節で述べた問題点の解決策として，ＤＥＡモデルにファジィ目標を導入した．ファジィ目標としては，個別の出力を目的関数として定式化した際の効率値の中の最小効率値（満足度０）と最大効率値（満足度１）を線形関数で直角三角形型のメンバシップ関数で規定し，ファジィ線形計画問題に帰着させた[10]．その結果，ファジィ満足解は，すべて最大効率値となり，単にファジィ目標をＤＥＡモデルに導入することには，無理が生じることが分かった[11]．

４．ファジィ目標の導入２

ＤＥＡモデルを多目的計画問題に定式化し直し，各目的にファジィ目標を導入し，ファジィ多目的計画問題に帰着させ，坂和[9]の基準メンバシップ関数の概念をベースとした意思決定者との対話手法を活用して，銀行問題の企業効率性評価問題に適用した．その結果，出力の重要度を考慮でき，出力同士の重要度の兼ね合いを基準にして，対話的に効率値を求められることが分かった[11]．

参考文献

[1]佐藤，生産関数の理論，創文社，1975

[2]和多田，森本，可能性生産関数に基づく産業分析，日本ファジィ学会第２回ノンエンジニアリング・ファジィワークショップ，1992

[3]植村，小林，ファジィ対数線形回帰を用いた企業効率性の評価，日本ファジィ学会第５回ノンエンジニアリング・ファジィワークショップ，1995

[4]Charnes, A., W. W. Cooper and E. Rhodes, Measuring the Efficiency of Decision Making Units, European J. of OR, 3, 339, 1979

[5]刀根，経営効率性の測定と改善，日科技連，1993

[6]植村，廣，ＤＥＡにおける効率性の感度分析による入力改善計画支援方法，第４０回システム制御情報学会研究発表講演会，1996

[7]植村，泉谷，ＤＥＡによる企業効率性評価における入力改善計画支援手法の都市銀行データへの適用，情報処理学会第５４回全国大会，1997

[8]田中，ファジィモデリングとその応用，朝倉書店，1990

[9]M. Sakawa, Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization,Plenum Press, 1993

[10]植村，廣，ファジィ目標・ファジィ制約の概念をＤＥＡに導入したファジィ満足化手法，第３９回自動制御連合講演会，1996

[11]植村，田端，ファジィ目標の概念をＤＥＡに導入したファジィ満足化手法の銀行問題への適用，日本ファジィ学会第７回ノンエンジニアリングファジィワークショップ，1997

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

WES3-2

ファジィ理論の経済指標への応用

Application to Economic Indices using the fuzzy theory

松田　充夫
Nobuo　MATSUDA
樟蔭女子短期大学
Shoin　Junior College

Abstract: The purpose of this study is to enhance accuracy and the reliability of the diffusion index(DI) by the method of using the fuzzy theory which uses both fuzzy measure and fuzzy integral. The values which had been obtained from this making method were compared with the values which had been obtained from the method which kept being used up to now in the sample datum generated from an individual turning point of the business cycle. It is shown that the proposing method is effective from two comparison results. In addition, it is emphasized that the making method using the fuzzy theory is more effective in the case of opaqueness .

Key Words :Fuzzy theory ,Rule based fuzzy inference, Fuzzy measure, Fuzzy integral, Diffusion index

1．はじめに

最近，産業界や経済・経営活動においては，きわめて困難な企業経営や経済運営を余儀なくされている。その一因に９０年代に入ってなかなか経済予測が困難かつ当たりにくいという指摘がある。その原因に①予測技術の未整備または未発達であること②予測者の能力の問題が挙げられている。しかし現状は政府の経済予測や有力な民間機関の経済予測に販売計画や生産計画，人員計画の立案・実施は頼らざるを得ない。この経済予測の重要な判断の基礎となっているのが経済企画庁の発表する景気動向指数（DI）である。景気動向指数[1]は，生産，雇用などのさまざまな経済活動での重要かつ景気に敏感な指標の動きを統合することによって，景気の現状把握および将来予測に資するために作成された総合的な景気指標である。この指標は企画庁が景気判断を行う場合にもっとも重視している指数である。

しかしこの景気動向指数については指標の選定基準の不明確さを始めとするさまざまな問題点が指摘されている[2]。その主な点は以下の

①指標の選択基準に明確な理論はない。

②経済や産業変化が選択基準に反映されているかどうかの疑問

である。しかしこのような問題点とともに作成方法自体にもいくつかの問題があるといえる。

1）同じ系列の個々の構成指標はそのあてはまり度に軽重があるにも拘わらず同等に扱われている。

2）プラス，マイナスまたはゼロかの判定が指標の数値が一致するか否かによってなされるために数値の丸め誤差や統計の確度，季節調整の手法などに敏感に影響されることである。

3）指標には毎月発表されず四半期ごとの数値も存在する。それによって指標の全体数（すなわち分母自体）が変動する問題がある。

このように予測技術の未成熟な状況下で景気の現状判断や見通しを誤らせないようにするには少なくとも景気動向指数などの経済指標の精度と信頼性を向上させることは少なからぬ効果を持つ。このようなあいまいさや不確実な様相をもつ現象に役立つのがファジィ理論である。これまでに景気動向指数の作成方法にファジィ測度・ファジィ積分を使ったファジィ理論を適用することを既に提案し[3]その有効性を示してきたが，さらにこの方法の有効性を詳細に検討する。

2．指数の作成方法へのファジイ理論の適用方法

各系列の個別の指標から各系列の景気動向指数を作成に提案の方法は次の２ステップを経て求める。

（ステップ１）
個別指標の増加（減少）率を入力値としてファジィ推論から個別指標に対する評価値を求める。

（ステップ２）
個別指標ごとに得られた評価値を総合して各系列の総合評価値を計算する。この総合評価値が各系列の景気動向指数（DI）に相応するとみなす。

ステップ１では個別指標ごとにファジィルールを準備し，個別指標の増加（減少）率を入力値として，各ルールに対する前件部の度合いにより，後件部のメンバーシップ関数の値をカットして各ルールの指標の評価値を Max-Min 法により出力する。その後各ルールから得た評価値を重心合成法により重心を求めて個別の指標の評価値を計算する。

ステップ２において総合評価値を求める方法では，個別の指標の評価値の単純な加法的な加重和でなく，各指標が全て独立的である保証はないので非加法的な加重和とするのが妥当である。そこで個別指標の評価値からファジィ測度とファジィ積分により総合評価値を求める。なお，ファジィ測度としてλ－ファジィ測度[4]をファジィ積分にはショケ(Choquet) 積分[5]を使用する。評価項目となる指標の重み付けは個別の指標間で一対比較し得られた一対比較行列を固有値法により解きその固有ベクトルを利用する。

ここで $\{X, F\}$ を可測空間とするとき，

$\mu(\phi) = 0,$

$A, B \in F, A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$

なる集合関数をファジィ測度といい

$\mu : F \rightarrow [0, \infty)$ への関数で

$A \cap B = \phi$ のとき

$$\mu_\lambda(A \cup B) = \mu_\lambda(A) + \mu_\lambda(B) + \lambda\mu_\lambda(A)\mu_\lambda(B) \quad (1)$$

ただし $-1 < \lambda < \infty$

となるファジィ測度をλ－ファジィ測度と呼ぶ。

ここで $\lambda > 0$ なら

$\mu_\lambda(A \cup B) \geq \mu_\lambda(A) + \mu_\lambda(B)$ ……（相乗的）

$\lambda < 0$ なら

$\mu_\lambda(A \cup B) \leq \mu_\lambda(A) + \mu_\lambda(B)$ ……（代替的）

また $\lambda = 0$ なら

$\mu_\lambda(A \cup B) = \mu_\lambda(A) + \mu_\lambda(B)$ ……（加法的）

となる。

ファジィ測度に関する積分をファジィ積分といい

可測関数 $f : X \rightarrow [0, 1]$ の μ に関するショケ積分は

$$(C)\int f(x)d\mu \triangleq \int_0^1 (x \mid f(x) > r)dr \quad (2)$$

で定義される。

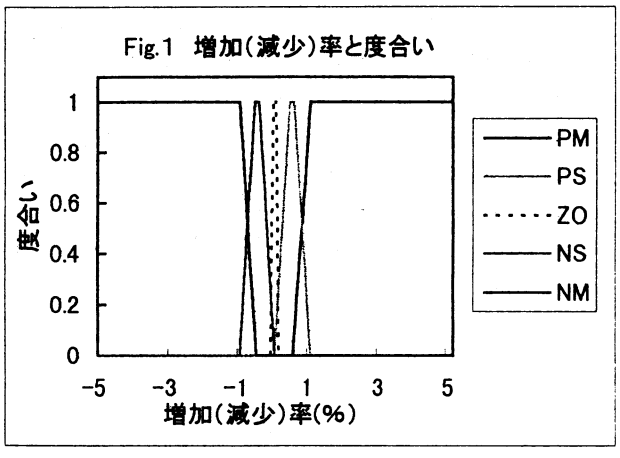
単関数 $f : X \rightarrow [0, 1]$ のショケ積分は

$$(C)\int f(x)d\mu = \sum_{i=1}^{n}(r_i - r_{i-1})\mu(A_i) \quad (3)$$

となる。

３．計算例と結果

ファジィ推論（Min-Max 合成重心法）に使用した前件部のメンバーシップ関数を図１に，また後件部の評価値のファジィラベルを図２に示す。PM,PS,ZO,NS,NM はそれぞれ“増加が大きい”，“増加が少ない”，“増加も減少もない”，“減少が少ない”，“減少が大きい”を表す。表１にファジィ推論で使用したルールを示す。



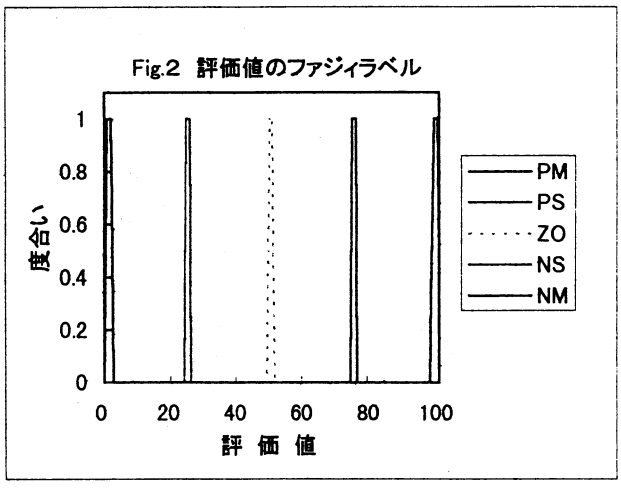
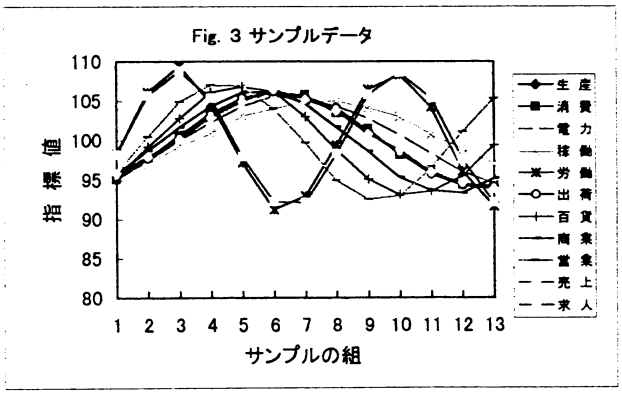


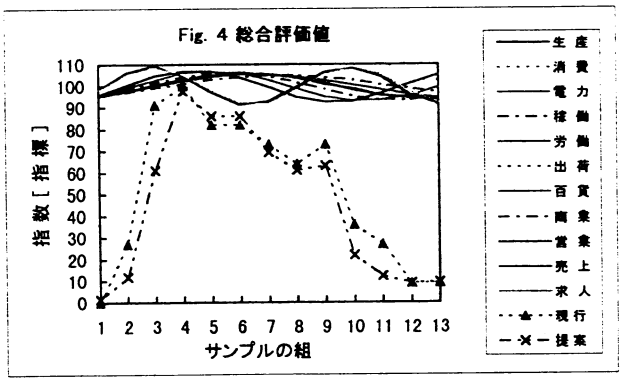
Table 1．ファジィ推論のルール

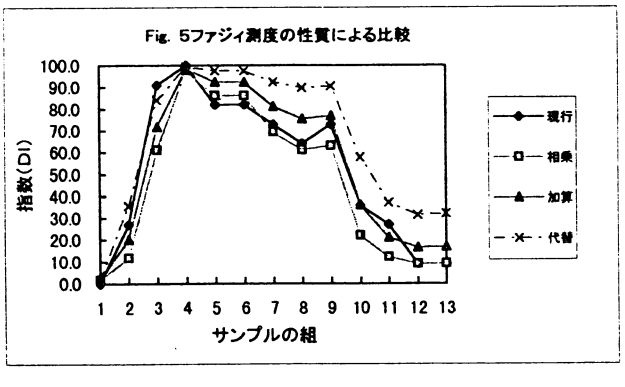
1	もし増加率が大きければ，評価値は高い。
2	もし増加率が少なければ，評価値は少し高い。
3	もし増加も減少もないならば，評価値は中位いである。
4	もし減少率が少なければ，評価値は少し低い。
5	もし減少率が大きければ，評価値は低い。

3.1 サンプルデータによる両者の作成方法による比較

ここでは一致指数を例に取り上げる。景気の第11循環の個別転換点のデータから生成したサンプルデータを図3に示す。このサンプルデータに対して現行の作成方法で求めた指数と本提案による作成方法で相乗的な場合（パラメータλ=3.0560）として得られた結果を図4に示す。両者ともほぼ一致した動きをしており，提案の方法が景気の動きを捉えていることを示している。図5にλ－ファジ測度のパラメータλを変えた場合の変化を示す。図5から判断すると現行の作成方法で求められる数値は幾分相乗的な傾向を持っていると考えられる。すなわち一致指数を形成する指標は景気の動きに対して指標間で相乗的に働くことを意味するものと解釈できる。







3.2 従来の方法で区別できない計算例について

今度は従来の作成方法で区別ができないかまたは問題点となるケースについて示す。

表2にその計算ケースの構成指標と増加（減少）率を，表3は現在採用されている作成方法と提案している方法との結果の比較である。

これまの基準に照らせばケース1～3は全てDI値は2／5で40%となり，いずれも景気は悪化もしくは低迷状態となる。しかし，ファジィ理論による提案の方法で求めた結果は，景気の状態はケース1＞ケース3＞ケース2の順となり景気の動向状態を区別することを可能にしている。

またケース4と5は両者とも増加（減少）率がほとんど変わらないので景気の方向が上向きか下向きかまたは保合いかは本来判断しにくいはずである。しかし現在の作成方法ではどちらかに極端に振れてしまいその結果長期に経過を観察する必要が生じるのに対して，提案の方法ではほぼ両方とも50%に近く妥当な結果を得ている。ケース5とケース6はこれまでの方法では同一視せざるを得ないがこのようなケースに対して区別することができる。このようにファジィ理論に基づく方法は現在の方法に比して現状の感覚に近い評価値を得ることを可能にし，判定に苦しむような微妙なケースにもかなり妥当と思われる計算値を得ることができる。

Table 2.構成指標と指標の増加（減少）率

構成指標	一致性	ケース1	ケース2
生産指標	◎	2.0	-2.0
稼働率指標	◎	2.0	2.0
百貨店販売額	×	-2.0	2.0
営業利益	○	0.0	0.0
有効求人率	○	0.0	0.0
構成指標	一致性	ケース3	ケース4
生産指標	◎	0.0	-0.01
稼働率指標	◎	0.0	-0.01
百貨店販売額	×	-2.0	-0.01
営業利益	○	2.0	-0.01
有効求人率	○	2.0	-.001
構成指標	一致性	ケース5	ケース6
生産指標	◎	0.01	1.5
稼働率指標	◎	0.01	1.5
百貨店販売額	×	0.01	1.5
営業利益	○	0.01	1.5
有効求人率	○	0.01	1.5

（単位：%）　◎:高い，○：普通　×：低い

Table 3.現在の作成方法と提案の方法の比較

ケース	現在の方法	提案の方法		
		相乗的	加法的	代替的
1	40.0	65.1	78.0	79.7
2	40.0	36.5	53.3	55.5
3	40.0	48.5	60.7	61.9
4	0.0	47.7	47.7	47.7
5	100.0	52.0	52.0	52.0
6	100.0	100.0	100.0	100.0

3.3 系列の指標の個数が変動する場合の影響について

指標データは本来全て揃うことが前提であるが現実には景気動向指数の採用系列の指標の中には四半期ごとに出される指標が一致系列の営業利益を含めて４つ含まれている。このような指標の個数の変動に対する影響を３．２で取り上げた計算ケースを使い営業利益のデータがないと仮定した場合に評価した結果を表４に示す。なお提案している作成方法で評価した結果は営業利益が評価値の最高値を示したと仮定したケースから最下位までのケースの５通りについてショケ積分を施しそれらの代表値を示している。なお代表値として一般には平均値や中央値が考えられる。しかし，個数が減少した場合異常値などの影響を受けやすいことを考慮して高萩[6]の提案しているλ－ファジィ測度・ショケ積分による平均値と中央値の中間の評価により計算される値を代表値とした。なおξ＝０．７５とした。表４は提案する方法が絶対誤差及び影響幅とも小さいことを示している。

Table 4.採用指標の個数の変動の影響比較

	現在の方法			
ケース	(完全)	(欠落)	変化率	方向
1	40.0	50.0	25.0	↑
2	40.0	50.0	25.0	↑
3	40.0	25.0	37.5	↓
4	0.0	0.0	0.0	－
5	100.0	100.0	0.0	－
6	100.0	100.0	0.0	－
絶対誤差平均			14.6	
	提案している方法			
ケース	(完全)	(欠落)	変化率	方向
1	65.1	69.8	7.3	↑
2	36.5	39.6	8.6	↑
3	48.5	46.6	3.8	↓
4	48.7	46.9	3.7	↓
5	52.0	51.1	1.7	↓
6	100.0	98.3	1.7	↓
絶対誤差平均			4.5	

単位（%）

4．結 論

経済指標の評価にファジィ理論を適用した作成方法はまさに選択基準に対する重み付けを考えることであるから選択基準が明確でないとの批判や景気動向指数が経済や産業変化を反映していないのではという疑問へ応える手段を提供していることとなる。さらにあやふやさを含む数値情報や数値化しにくいものを指数作成に反映できるので

①景気の動向との一致の高低を景気動向指数の作成に数量的に組み入れることができる。
②指数自体の大小が景気回復（後退）の度合いを示さないのに較べて景気の方向とその度合いも表現できる。
③景気が拡張していくのか（いるのか）後退しているのか判断しにくい微妙なケースに対し数量的は評価を下せる。
④数値の丸め誤差や統計の確度，季節調整の手法などの影響が吸収される。
⑤四半期毎の公表による構成指標数の変動に対しその影響を減ずることができる。

参考文献

1）経済企画庁調査局編：「景気動向指数の利用の手引き」
2）鈴木正俊：「経済予測」，岩波新書，１９９５年
3）松田充夫：ファジィ積分の経済指標への適用，日本ファジィ学会ノンエンジニアリングファジィ研究会第７回ワークショップ講演論文集，３２－３５（１９９７）
4）菅野道夫：ファジィ測度とファジィ積分，計測自動制御学会論文集８，218-222（１９７２）
5）日本ファジィ学会編：「ファジィ測度」，日刊工業新聞社，１９９３年
6）高萩栄一郎：λ－ファジィ測度とショケ積分を利用した中央値，平均値の中間の評価，第１１回ファジィシンポジュウ講演論文集，４３５－４３８（１９９５）

問い合せ先
松田 充夫
〒639-02 奈良県香芝市関屋９５８
TEL:07457-6-9907，FAX:07457-6-9917
e-mail: ur7n-mtd@asahi-net.or.jp

WES3-3

DEAのクロス効率値とファジィ測度-ショケ積分モデルによるDMUの評価

An evaluation method using DEA's cross-effienency and fuzzy measure Choquet integral model

高萩栄一郎
Eiichiro TAKAHAGI
専修大学商学部
SENSHU UNIV.

DEA (Data Envelopment Analysis) evaluates a DMU using most favorable input and output weights for the DMU. Cross-Efficiency use the other DMU's weights. If a DMU is evaluated by maximum values of the cross-efficiency , the value is the same as D-efficiency. So, we propose new DMU's efficiency using cross-efficiency and fuzzy measure and Choquet integral model, enable intermediate evaluation among D-efficiency and average of cross-efficiency. If a DMU is D-efficiency, its weights are not unique, cross-efficiency can not be calculated. So we propose new method to determine the cross-efficiency uniquely using fuzzy measure Choquet integral model.

1 はじめに

DEAは，あるDMUにとって最も都合の良い入出力係数でそのDMUを評価するものである．(最良評価) そのとき得られた入出力係数は，そのDMUが目指している入出力関係の方向と考え，そのDMUの評価方法と考えられる．したがって，ある種の自己評価とも考えられる．また，あるDMUの評価方法で他のDMUの効率値を測定したものはクロス効率値と呼ばれている[1]．そこで，あるDMUについて，すべてのDMUの入出力係数で評価した効率値の平均は，その対象となるDMU内（業界内）の平均の評価といえるだろう．また，最小値でのでは，DMU内でもっとも厳しい評価法といえる．本稿では，ファジィ測度-ショケ積分モデルを使い，パラメータξによる最良評価と平均の評価および最悪評価の中間の評価方法を提案する．

2 DEA

DMU_o :o番目のDMU，$o = 1, 2, \ldots, n$
x_{io} :DMU_oのi番目の入力値(非負)，$i = 1, \ldots, m$
y_{jo} :DMU_oのj番目の出力値(非負)，$j = 1, \ldots, k$
v_{io} :DMU_oのi番目の入力項目への係数
u_{jo} :DMU_oのj番目の出力項目への係数
θ_{ao} :DMU_oの入出力係数でのDMU_aのクロス効率値
通常のDEAのD効率値(θ_{oo})およびDMU_oの入出力係数(v_{io}, u_{jo})は，各oについて，次の数理計画法の問題を解くことにより得られる．

$$\text{最大化} : \theta_{oo} = (\sum_{j=1}^{k} u_{jo}y_{jo})/(\sum_{i=1}^{m} v_{io}x_{io}) \tag{1}$$

$$\text{制約条件} : (\sum_{j=1}^{k} u_{jo}y_{ja})/(\sum_{i=1}^{m} v_{io}x_{ia}) \leq 1, a = 1, \ldots, n \tag{2}$$

$$v_{io}, u_{jo} \geq 0, \forall i, j \tag{3}$$

クロス効率値θaoは，次式で得られる．

$$\theta_{ao} = (\sum_{j=1}^{k} u_{jo}y_{ja})/(\sum_{i=1}^{m} v_{io}x_{ia}) \tag{4}$$

3 ファジィ測度-ショケ積分モデルによるクロス効率値の集計

ファジィ測度-ショケ積分モデルを使うことにより，最大値，平均値，最小値の中間の評価[4]ができる．

ξ	意味
1	最大値による評価(D効率値)
⋮	最大値と平均値の中間の評価
0.5	平均値による評価
⋮	平均値と最小値の中間の評価
0	最小値による評価

表 1: 評価の態度ξに意味

そこで，DMU_aの個々のクロス効率値$\theta_{a1}, \ldots, \theta_{an}$をファジィ測度-ショケ積分モデルの集計関数$f_{\xi,n} : [0,1]^n \to [0,1]$を用いて，$DMU_a$の（総合）評価値$\theta_a^*$を求める．(式(5)) ξは，評価のパラメータで，表1のように，ξを変化させることにより，最大値，平均値，最小値の中間の評価を行うことができる．$h(i)$は，$\theta_{a1}, \ldots, \theta_{an}$の中で，$i$番目に大きい値である．

$$\theta_{\xi,a}^* = f_{\xi,n}(\theta_{a1}, \ldots, \theta_{an}) = (\mathrm{C}) \int h d\mu \tag{5}$$

$$\mu(A) = \phi_s(|A|/n), |A| \text{は，集合} A \text{の要素の数} \tag{6}$$

$$\phi_s : [0,1] \to [0,1],\ s \in [0, +\infty] \tag{7}$$

$$\phi_s(u) = \begin{cases} [u] & \text{if } s = 0 \\ u & \text{if } s = 1 \\ 1 - [1-u] & \text{if } s = +\infty \\ (s^u - 1)/(s-1) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

$$\text{where} \quad [u] = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 < u \leq 1 \\ 0 & \text{if } u = 0 \end{cases}$$

$$s = ((1/\xi) - 1)^2 \tag{9}$$

4 入出力係数の一意性

DMU_oが，D効率的になった場合，u_{jo}, v_{jo}は，ユニークに定まらず，したがって，クロス効率値$\theta_{ao}, \forall a \in \{1, \ldots, n\} \setminus \{o\}$も一意には定まらない．[1][3]等でいくつかの解決法が提案されているが，本モデルでは，以下の方法を提案する．

DMU_oの効率値が1という条件を入れた，下記のようなサブ問題Sを解き，各DMUのD効率値θ_{aa}^Sとその入出力係数v_{ja}^S, u_{ja}^Sを求める．サブモデルの変数には，肩字Sを付ける．

$$\text{最大化} : \theta_{aa}^S = (\sum_{j=1}^{k} v_{ja}^S y_{ja})/(\sum_{i=1}^{m} u_{ia}^S x_{ia}) \tag{10}$$

$$\text{制約条件}:(\sum_{j=1}^{k} v_{ja}^S y_{jb})/(\sum_{i=1}^{m} u_{ia}^S x_{ib}) \leq 1, \tag{11}$$

$$\forall b \in \{1,\ldots,n\} \setminus \{o\}$$

$$(\sum_{j=1}^{s} v_{ja}^S y_{jo})/(\sum_{i=1}^{m} u_{ia}^S x_{io}) = 1 \tag{12}$$

$$v_{ia}^S, u_{ja}^S \geq 0, \forall i,j \tag{13}$$

θ_{aa}は，[2]の最大値により修正クロス効率値を求めることに対応している．得られた入出力係数v_{ja}^S, u_{ja}^Sは，DMU_oが効率的としたとき，DMU_aにとってもっとも都合のよい評価方法と考えられる．したがって，DMU_oが効率的なときのDMU_bの係数でのDMU_aのクロス効率値θ_{ab}^Sを求めることができる．

$$\theta_{ab}^S = (\sum_{j=1}^{s} u_{jb}^S y_{ja})/(\sum_{i=1}^{m} v_{ib}^S y_{ia}), \forall a \in \{1,\ldots,n\} \setminus \{o\} \tag{14}$$

θ_{ab}^Sは，DMU_oが効率的であるという条件を入れたとき，DMU_bにとってもっとも都合のよい評価方法でのDMU_a評価値である．そこで，サブ問題Sのクロス評価値を§3と同じξを用い，ファジイ測度-ショケ積分モデルで，θ_{ao}を求める．

$$\theta_{ao} = f_{\xi,n-1}(\theta_{a1}^S,\ldots,\theta_{ao-1}^S,\theta_{ao+1}^S,\ldots,\theta_{an}^S) \tag{15}$$

もし，サブ問題Sで，$\theta_{pp}^S = 1$となる$DMU_p(p \neq o)$が現れたら，v_{ja}^S, u_{ja}^S，したがって，θ_{ap}^Sは，一意に定まらない．その場合，次のようなサブ問題Sのサブ問題Tを作成し，同様な方法で，θ_{ap}^Sを求める．

$$\text{最大化}:\theta_{aa}^T = (\sum_{j=1}^{k} v_{ja}^T y_{ja})/(\sum_{i=1}^{m} u_{ia}^T x_{ia}) \tag{16}$$

$$\text{制約条件}:(\sum_{j=1}^{k} v_{ja}^T y_{jb})/(\sum_{i=1}^{m} u_{ia}^T x_{ib}) \leq 1, \tag{17}$$

$$\forall b \in \{1,\ldots,n\} \setminus \{o,p\}$$

$$(\sum_{j=1}^{s} v_{ja}^T y_{jo})/(\sum_{i=1}^{m} u_{ia}^T x_{io}) = 1 \tag{18}$$

$$(\sum_{j=1}^{s} v_{ja}^T y_{jp})/(\sum_{i=1}^{m} u_{ia}^T x_{ip}) = 1 \tag{19}$$

$$v_{ia}^T, u_{ja}^T \geq 0, \forall i,j \tag{20}$$

さらに，$\theta_{qq} = 1$というDMU_qがあった場合，上記プロセスを再帰的に適用する．

5 数値例

数値例として，図1に，[2]の東京都の区立図書館の例を示す．入力変数は，床面積，蔵書数，職員数，人口で出力変数は，登録者数，貸出冊数である．このように，横軸に評価の態度ξ，縦軸に効率値をとることにより，各DMUの効率性の特徴を見ることができる．同じD効率的である目黒，港，文京でも，目黒は，どのような評価法の態度を取ろうともほぼ効率的であるが，港は，評価の態度により大きな変化があることがわかる．また，中央の評価方法(ξ)により大きな差異があることなどが読み取れる．

参考文献

[1] T.R. Sexton et al. Data Envelopment Analysis: Critique and Extensions, in R.H. Silkman (ed.) Measuring Efficiency: An Assessment of Data Envelopment Analysis, 73-105(1986).

[2] 枇々木則雄,DEAにおける修正クロス効率値を1つに決める方法,慶應義塾大学理工学部管理工学科テクニカルレポート,No.95004(1995).

[3] 枇々木則雄,DEAにおけるクロス効率値を用いた評価法,慶應義塾大学理工学部管理工学科テクニカルレポート,No.95005(1995).

[4] 高萩栄一郎, λファジィ測度とショケ積分を利用した最大値・平均値・最小値の中間の方法 -重要度を考慮した3つの方法-, 第11回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 日本ファジィ学会,439-442, 沖縄,1995.

[5] 刀根薫, 経営効率性の測定と改善-包絡分析法DEAによる-, 日科技連,1993.

[6] 塚本弥八郎, 不確実性を伴う意思決定問題のファジィ測度論による分析,「ファジィ理論と人文社会科学」(講座ファジィ 14), 日刊工業新聞社,1994.

[問い合わせ先]
高萩栄一郎 (専修大学商学部)
E-MAIL:takahagi@isc.senshu-u.ac.jp
〒214-80 川崎市多摩区東三田2-1-1 FAX:044-911-1241

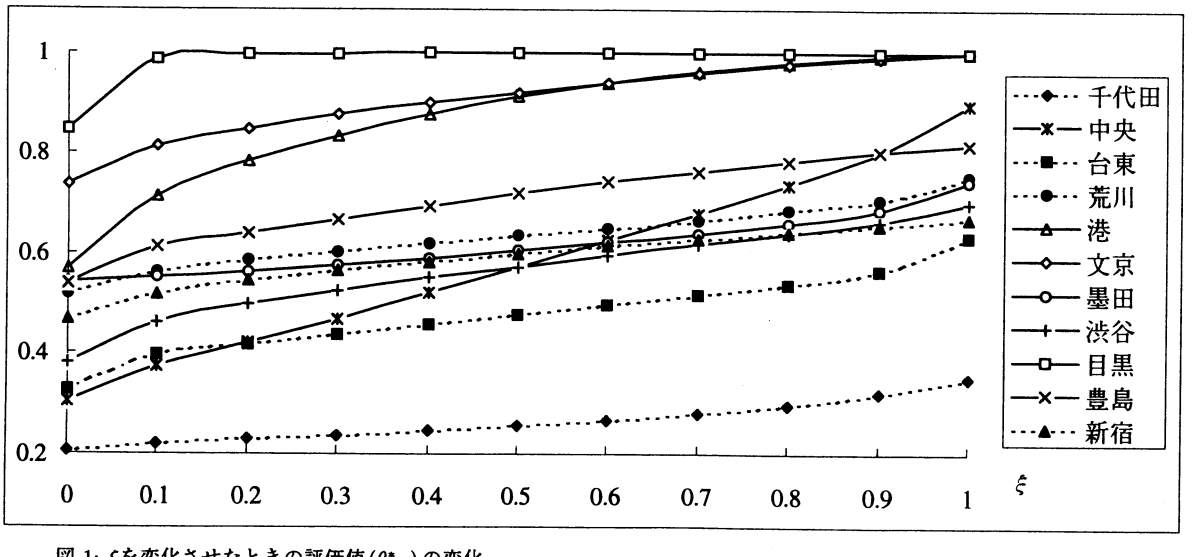


図 1: ξを変化させたときの評価値($\theta_{\xi,a}^*$)の変化

WES3-4

遺伝的機械学習を用いた交渉支援システムの構築
Genetic Based Machine Learning Approach to a Negotiation Support System

和多田　淳三，奥野　豊，渡邉　輝幸
Junzo WATADA, Yutaka OKUNO, Teruyuki WATANABE
大阪工業大学，株式会社オージス総研，大阪工業大学
Osaka Institute of Technology, OGIS-RI, Osaka Institute of Technology

Abstract — The objective in this paper, is to abstract, on the basis of a genetic based machine learning, the rules by which people negociate with other persons.

A classifier system is employed as the genetic based machine learning in this paper. This system can provide with a method which satisfys the conditions of dealers. The simulation results show the effectiveness of our method.

1　はじめに

社会で生活していく中で，判断の多くが暗黙のルールによって行われている．人の行う判断を計算機で実施する場合，このような暗黙に行われているルールの獲得が必須である．人間が機械を制御する場合については，遺伝的機械学習によって，その制御に用いるルールを抽出し，制御の自動化を行う研究が進んでいる．一方，人間同志で行う交渉などの場合には，ほとんどがその状況や経験によって，人間が判断し，処理しており，そのような意思決定のルールを抽出する研究[4] [5] は進んでいるとはいえない．

本研究では，遺伝的アルゴリズム[2]の学習機能を用いた，遺伝的機械学習(GBML: Genetic Based Machine Learning)を適用し，人が行っている交渉のルール発見を行うシステムを構築することを目的としている．

遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)は，主に，パターン最適化の一手法として用いられ，配分問題，スケジューリング，画像処理等に用いられている[1]．このパターンをルールに置き換えて，ルールベースを抽出する手法が，遺伝的機械学習である．この手法は，機械の自動制御のために，制御ルール抽出方法として研究されたものである．

本研究では，特に，交渉において人が用いるルールを，遺伝的機械学習を用いて抽出することを目的とする．売買交渉に着目し，交渉において生ずる販売者ルールを抽出し，販売者，購買者の満足感を同時に満たす案を提案するための支援システムを構築し，その有効性と問題点を論ずる．

2　遺伝的機械学習

2.1　遺伝的アルゴリズム

GAは，生物進化（選択淘汰・突然変異）の原理に基づいたアルゴリズムである．GAは，確率的探索・学習・最適化の一手法と考えることができる．その最大の特長は，最適化の対象となる目的関数に，連続性や微分可能性といった制約がほとんど必要ないことと，定義域の制約がないことである．これらのことが，GAの適用範囲の広さの一因である．

GAは，問題となる環境の情報を遺伝子にコーディングして，生物進化と同じように競争させて最適解を求める．そこで，生物進化の遺伝子の組み替え（交叉），突然変異，環境に対する適応度（fitness value）に基づいて，適応度の高い遺伝子を次世代に残していく（**選択淘汰**）．この操作を，**遺伝的操作**（genetic operators）という（**図2.1参照**）．

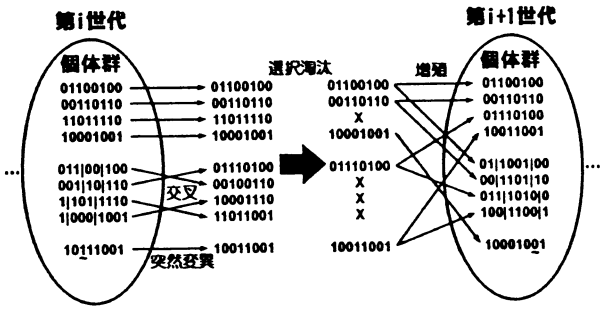


図2.1 遺伝的アルゴリズムの処理手順

2.2 GAの学習機能

遺伝的アルゴリズムを用いた機械学習を，遺伝的機械学習(GBML)とよぶ．この学習方法は，遺伝子空間上にコーディングされたプログラムを，GAを用いて，自動的に生成することを目的として研究された．GBMLは大きく分けて，ミシガン・アプローチとピッツ・アプローチの2つの手法が提案された．本研究では，ミシガン・アプローチを用いて，経営工学問題に適用したシステムを構築している．

3 分類システム

3.1 分類システムの処理機構

分類システム(classifier system)はルールの集合を持ち，各ルールは，学習される対象の環境から刺激を受けたとき，刺激に対する特定の行動を出力し，実行するように設定されている．その出力が環境に適しているか否かによって，ルール学習していくものである．その中で，GAは，ルールの学習型生成を担っている[3]．**図3.1**に，分類システムの構成を示す．

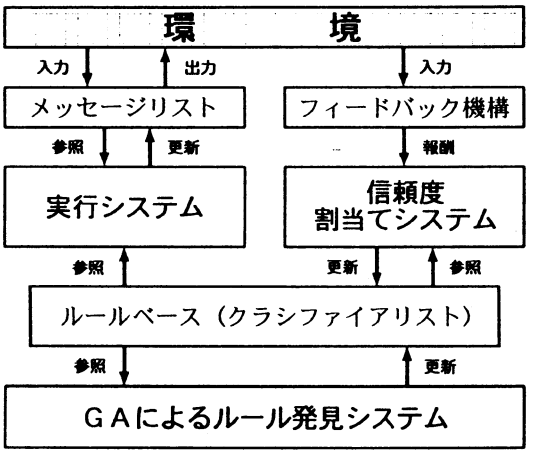


図3.1 分類システムの構成

3.2 分類システムにおける遺伝的操作

クラシファイアシステムの学習効率を向上させるために，本論文では，一般に用いられている遺伝的操作（選択淘汰・交叉・突然変異）に加え，突然変異を拡張した**再生成・局所変異操作**（図3.2参照）を加えることを提案する．

再生成操作は，あるクラシファイアを初期化する操作であり，他方向からルールを生みだし，局所解に収束するのを防ぐ．再生成操作は初期世代の条件部の学習を助けるために加えた．

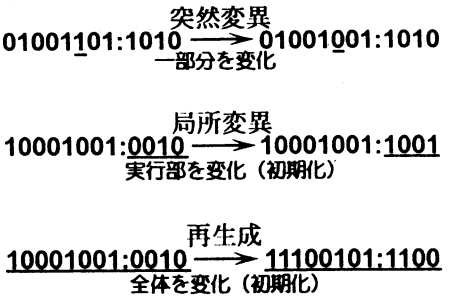


図3.2 各種変異操作

局所変異操作は，あるクラシファイアの実行部（行動を決定する遺伝子部）のみを初期化する操作である．局所変異操作は，条件部が学習された後の実行部の学習を助けるために加えた．

4 交渉支援システムの構築

4.1 問題設定

住宅建設会社（販売者）と顧客（購買者）の価格交渉を模擬する．購買者は5つの評価項目（住宅の材質，デザイン，安全性，工期，規模）と考慮しており，なるべく希望価格内で住宅を購入することが目的である．この評価項目によって，購買者の満足度が決定される．一方，販売者は，購買者の評価項目に応じて価格を決定しており，価格の割引率が許容範囲に入れば交渉を成立させ，入らなければ代替案を提示する．**表4.1**に，各項目のランク別の価格を示す．

表4.1 各項目の価格設定

項目	ランク				
	A	B	C	D	E
材質	1000	700	500	300	200
デザイン	600	400	250	100	50
安全性	1000	750	400	300	250
工期	1200	900	500	400	300
規模	3.00	2.00	1.50	1.00	0.80

価格は万円．ただし，規模のみ倍率．

4.2 シミュレーション方法

4.2.1 購買者の行動設定

売買交渉システムの構築し，販売者ルールの抽出を行うためには，販売者のルールベースが必要である．このため，シミュレーションを行うときに，顧客の要

望をあらかじめ聞き，ある程度の購買者の行動のパラメータから，いくつかの数式を作り，購買者の行動を決定させることにした．入力する項目は次の通りである．

- 購買者の各項目の希望ランク
- 購買者の各ランクに対する重視度
- 購買者の希望価格の範囲
- 購買者の交渉態度
- 販売者の交渉態度
- 販売者が希望する交渉回数

これらの情報を，シミュレーション前に入力し，購買者の行動を決定すると同時に，販売者の希望に沿った交渉を行えるようにする．

4.2.2 分類子へのコーディング

販売者のルールベースを学習するために用いる分類子に，以下のような出入力のパラメータを設定する．

入力（条件部）
- ・販売者（自分）が前回提案した案
- ・購買者（相手）が提案した案
- ・購買者が要求する価格と定価の価格差

出力（実行部）
- ・販売者が今回提案した案
- ・販売者が要求する価格

4.3 シミュレーション

まず，売買交渉支援システムの構築するために，2つの実験を行う．その実験は以下の通りである．

- 遺伝的操作パラメータの最適設定の実験
- 抽出したルールの実用性を判定する実験

1つ目の実験は，分類システムの学習機構で用いる遺伝的アルゴリズムのパラメータ（個体数，交叉率，突然変異率等）を，ルールの収束状況から，最適なパラメータ設定を見つけ出す実験を行い，2つ目の実験で，先に行った実験の遺伝的操作のパラメータを用い，抽出したルールが意味的に正しいものであるか，また，実用性の有無を考察する．

4.3.1 遺伝的操作パラメータの最適設定の実験

本小節では，分類システムの学習機構で用いる遺伝的アルゴリズムのパラメータを，ルールの収束状況から，最適なパラメータ設定を見つけ出す実験を行う．この実験で用いる，初期パラメータを交渉支援システムに入力し（図4.1参照），売買交渉シミュレーションを行う．シミュレーションを行った結果を表4.2に示す．

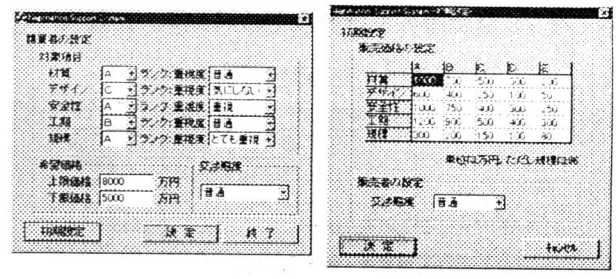


図4.1 初期パラメータ入力画面例

このシミュレーション結果から，最適な遺伝的操作パラメータを判断するのは難しいが，個体数1,000前後，増殖率0.10，交叉率0.60，再生成率0.20，局所変異率0.10で，比較的安定してルール抽出を行っている．特に，個体数900で，ルール抽出した平均世代，および抽出回数ともに，良い結果が得られた．また，局所変異操作を用いたことで，若干ではあるが，学習速度の向上が結果として表われた．

表4.2 シミュレーション結果例

個体数	増殖率	交叉率	再生成率	局所変異率	到達解回数	平均世代数
900	0.20	0.80	0	0	3	216.0
1000	0.20	0.80	0	0	6	281.0
1100	0.20	0.80	0	0	5	265.8
900	0.10	0.80	0.10	0	4	357.0
1000	0.10	0.80	0.10	0	4	168.8
1100	0.10	0.80	0.10	0	8	369.5
900	0.10	0.60	0.20	0.10	7	207.3
1000	0.10	0.60	0.20	0.10	7	234.3
1100	0.10	0.60	0.20	0.10	6	260.2
900	0.05	0.80	0.10	0.05	4	95.0
1000	0.05	0.80	0.10	0.05	5	130.4
1100	0.05	0.80	0.10	0.05	4	253.3

突然変異率=0.05，各シミュレーション回数=10回

4.3.2 抽出したルールの実用性を判定する実験

先に実験した結果だけでは，抽出したルールが，実用性があるものであるかどうかは，判断できない．よって，初期入力パラメータを変更して，複数の状況のシミュレーションを行い，得られた解（ルールベース）の変化から判断することにした．シミュレートした結果の最終案を表4.3に示す．

購買者の交渉態度が友好的であると，交渉価格が低くなり，威圧的であると高くなる結果が得られた．これは，購買者が友好的であるほど，評価項目ランクが低い販売者の代替案を受け入れる傾向が，強いためであると考えられる．

表4.3 購買者の交渉態度別の最終案の比較例

(a) 購買者：非常に威圧的，販売者：普通

項目					価格（万円）
材質	デザイン	安全性	工期	規模	
A	C	A	D	A	7,155
D	D	A	B	A	6,072
A	E	A	A	A	8,580
D	C	A	D	A	5,031
平均価格					6,710

(b) 購買者：普通，販売者：普通

項目					価格（万円）
材質	デザイン	安全性	工期	規模	
A	E	A	D	A	6,615
C	C	A	B	A	6,917
A	D	A	E	A	6,480
A	D	A	C	A	6,942
C	C	A	D	A	5,547
C	C	A	E	A	5,535
A	D	A	A	A	8,810
平均価格					6,692

(c) 購買者：非常に友好的，販売者：普通

項目					価格（万円）
材質	デザイン	安全性	工期	規模	
C	B	A	C	A	6,408
B	C	A	E	A	5,400
B	C	A	E	A	5,340
C	D	A	D	A	5,016
C	D	A	E	A	4,902
D	B	A	D	A	5,544
C	E	A	B	A	6,615
平均価格					5,604

以上のことから，有効なルールが抽出できたと思われる．しかし，この結果によって得られたルールベースは，実際の交渉で実行しないと，実際の場での有効性の判定は難しい．また，得られた販売者のルールベースは，購買者の行動の設定に依存するので，慎重な購買者の設定が望まれる．

4.4 考察

売買交渉ルール抽出システムを構築し，シミュレーション実験を行った結果，有効なルールが抽出できた．しかし構築したシステムには次のような問題点が挙げられる．それは以下の通りである．

- **不安定なルール抽出結果**
  問題点：遺伝的操作に用いるパラメータの最適設定が困難な点と，交渉者の希望する提案が不明確な点．
  対処法：多くのシミュレーションを行い，遺伝的操作パラメータを設定し，システムを安定させる．交渉者の希望する提案の最低基準（例えば，最低価格（最高割引率））を設定する．
- **抽出した案の説得力の低さ**
  問題点：交渉ルール抽出システムによって得られたルールの導出方法に，明確な根拠がないことによって，交渉相手と，なぜこのような提案をするのかといった議論を行うときに，とても不利である点．
  対処法：数多くのシミュレーションを行い，安定したルールベースをつくり，実際の交渉に用いて実績を上げる．または，交渉を行いにくい環境（例えば，インターネット上の仮想商店など）で自動的に交渉を行うシステムに改良する．
- **システムの交渉支援の困難さ**
  問題点：得られた結果の柔軟性が乏しく，システムに入力する初期パラメータを変更すると，はじめからシミュレーションしなければならない点．
  対処法：いろいろな初期パラメータの入力をしてシミュレーションを行い，抽出したルールを保存し，さまざまな売買交渉に対応させる．

5 おわりに

売買交渉支援システムを構築し，シミュレーション実験を行った結果，何らかの意味を持ったルールが抽出できた．今後の研究として，購買者の設定，遺伝的操作のパラメータの設定を十分考慮すれば，インターネット上の仮想デパート・商店などで，自動的に売買交渉を行うシステムの構築が可能であると考えている．

参考文献

[1] 北野　宏明編：遺伝的アルゴリズム，産業図書株式会社，1993

[2] D.E.Goldberg：Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989

[3] 竹内　勝：遺伝的アルゴリズムによる機械学習，計測と制御，Vol.32, No.1, pp.24–30, 1993

[4] Stan Matwin, Tom Szapiro, Karen Haigh：Genetic Algorithms Approach to a Negotiation Support System, IEEE Transactions On Systems, Man And Cybernetics, Vol.21, No.1, pp.102–113, 1991

[5] 奥野　豊，和多田　淳三：クラシファイアシステムによる交渉ルールの抽出，第7回ノンエンジニアリングファジィ研究会，1997.3

問い合わせ先

〒535　大阪市旭区大宮5-16-1
大阪工業大学　経営工学科
和多田　淳三
TEL: 06-954-4327(dial-in)
FAX: 06-952-6197
Email: watada@dim.oit.ac.jp

一般講演論文
6月5日（木）

A室

THA1	制御応用（1）	司会 谷哲次（出光興産）
THA2	制御応用（2）	司会 前田幹夫（九州工業大学）
THA3	パネル：工学以外の分野へファジィ理論を普及するには？	司会 小田哲久（愛知工業大学）
THA4	若手研究者企画：感性と言語	司会 白濱成希（北九州高専）

B室

THB1	若手研究者企画：進化的計算	司会 橋山智訓（名古屋大学）
THB2	進化システム	司会 下原勝憲（ＡＴＲ）
THB3	ファジィとエボルーショナリコンピュテーション（1）	司会 古橋武（名古屋大学）
THB4	ファジィとエボルーショナリコンピュテーション（2）	司会 菊池浩明（東海大学）

C室

THC1	ファジィデータ解析（3）	司会 宮本定明（筑波大学）
THC2	ファジィデータ解析（4）	司会 田中英夫（大阪府立大学）
THC3	ファジィデータ解析（5）	司会 吉川歩（京都工芸繊維大学）
THC4	ファジィデータ解析（6）	司会 和多田淳三（大阪工業大学）

D室

THD1	知的情報処理（1）	司会 江澤義典（関西大学）
THD2	知的情報処理（2）	司会 中津山幹男（秋田公立美術工芸短期大学）
THD3	モデリング（1）	司会 柴野俊弘（新菱冷熱工業）
THD4	モデリング（2）	司会 林陽一（明治大学）

E室

THE1	感性情報処理（1）	司会 菅野直敏（玉川大学）
THE2	感性情報処理（2）	司会 山口亨（宇都宮大学）
THE3	感性情報処理（3）	司会 横川壽彦（帝京平成大学）
THE4	ファジィＯＲ（1）	司会 玄光男（足利工業大学）

F室

THF1	ファジィ理論の建築分野への応用	司会 新宮清志（日本大学）
THF2	ファジィ理論の土木分野への応用	司会 宮本文穂（山口大学）
THF3	論理・数学（1）	司会 河口万由香（北海道大学）
THF4	論理・数学（2）	司会 向殿政男（明治大学）

S室

THS1	パネル：ファジィ知識の学習・獲得・発見	司会 林勲（阪南大学）
THS2	ファジィ知識の学習・獲得・発見（1）	司会 田野俊一（電通大）
THS3	ファジィ知識の学習・獲得・発見（2）	司会 馬野元秀（大阪府立大学）
THS4	ファジィ知識の学習・獲得・発見（3）	司会 小澤順（松下電器産業）

THA1-1

フレキシブルアームのファジィ制御

Fuzzy Control of Flexible Arm

増井重弘　寺野寿郎　○加藤亮

Shigehoro MASUI　Toshiro TERANO　○Makoto KATO

法政大学工学部

Faculty of Engineering , Hosei University

Abstract

There are many research of control for flexible arm. However, a few research are performed flexible arm control design based on human action. In this paper, we suggest construction of flexible arm fuzzy controller that used rules of manual control. As the experiment result, this fuzzy controller system control flexible arm well.

1　はじめに

フレキシブルアームの振動抑制の研究は数多く行われている。1リンクアームの振動抑制研究の多くはアーム根本のひずみ量を利用して制御している。しかし、安全性や軽量化等から1リンクアーム自身の弾性特性が多少変化しているような場合は制御が困難となる。このような場合でも人間は経験による学習や統合判断力などにより訓練することにより上手に振動させずかつ迅速に目標角度に移動させることができる。

本研究は、このような手動制御の人間行動による状況に応じた制御則を抽出し、この制御則に基づいてフレキシブルアームのファジィコントローラを構築する。

2　制御対象

制御対象は図1に示すような1リンクフレキシブルアームである。フレキシブルアームの運動方程式はつぎの2式で表される。

$$\tau = M_{11}\ddot{\theta} + M_{12}\ddot{\phi} + h_1(\theta,\dot{\theta},\phi,\dot{\phi}) + g_1(\theta,\phi) \quad (1)$$

$$0 = M_{21}\ddot{\theta} + M_{22}\ddot{\phi} + K\phi + h_2(\theta,\dot{\theta},\phi,\dot{\phi}) + g_2(\theta,\phi) \quad (2)$$

ここで $\theta \in R^{n\times 1}$ はジョイント角度ベクトル、$\phi \in R^{m\times 1}$ は弾性たわみベクトル、$M_{11} \in R^{n\times n}$、$M_{12} \in R^{n\times m}$、$M_{21} \in R^{m\times n}$、$M_{22} \in R^{m\times m}$ は慣性行列、$h_1 \in R^{n\times 1}$、$h_2 \in R^{m\times 1}$ は遠心力、コリオリ力などの速度依存項、$g_1 \in R^{n\times 1}$、$g_2 \in R^{m\times 1}$ は重力項、$K \in R^{m\times m}$ はばね定数を表す行列である。

弾性たわみベクトル ϕ は無限の次元を持つが、ここではある次元 m で打ち切られているものとする。その次元 m はフレキシブルアームのモデルに依存し、本研究では $m=1$ とする。

フレキシブルアームの運動方程式において(1)式が全体の挙動を(2)式が振動を記述した式となっている。

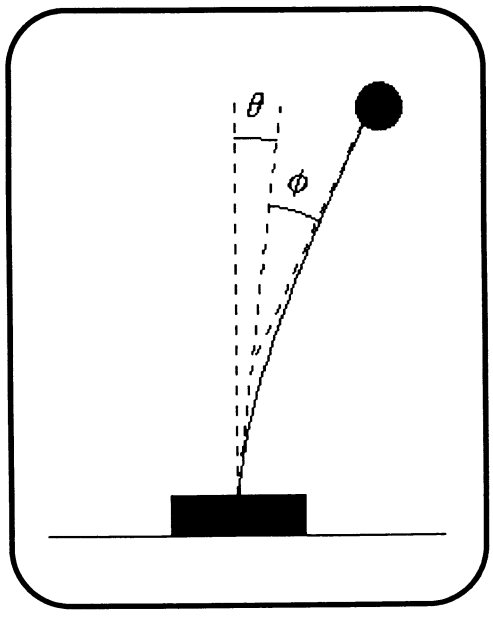


図1　制御対象

弾性挙動を示す(2)式に関して、動的な項をすべて0とおくと、

$$K\phi_0 + g_2(\theta,\phi_0) = 0 \quad (3)$$

が成り立つ。ϕ_0 は重力による静的なたわみである。

この振動の平衡点 ϕ_0 周りの運動を考えることにし、$\phi - \phi_0$ を新たに ϕ とおくことにする。また、簡単のため、遠心力、コリオリ力などの速度依存項は無視できるものとする。このとき式(2)は、

$$M_{22}\ddot{\phi} + K\phi = -M_{21}\ddot{\theta} \quad (4)$$

となる。式(4)からわかるように、フレキシブル

アームの弾性振動は関節角加速度を制御入力と考えると非常に理解しやすい。式(4)を状態空間で表現すると、

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\phi\\ \dot{\phi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & I\\ -M_{22}^{-1} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\phi\\ \dot{\phi}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ -M_{22}^{-1}M_{21}\end{bmatrix}\ddot{\theta} \qquad (5)$$

となる。この式(5)を用いてシミュレーションを行った。

3　手動制御によるシミュレーション

式(5)を用いて、手動制御によるシミュレーションを行った。

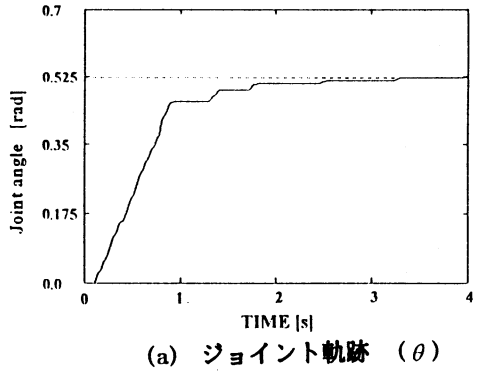
フレキシブルアームにおいては、振動の制御と合わせてジョイント角度の制御が必要である。したがって、全体の系への入力角加速度 $\ddot{\theta}_c$ は、ジョイント角度制御のための入力角加速度 $\ddot{\theta}_t$ に振動抑制制御のための入力角加速度 $\ddot{\theta}_e$ を加えた

$$\ddot{\theta}_c=\ddot{\theta}_t+\ddot{\theta}_e \qquad (6)$$

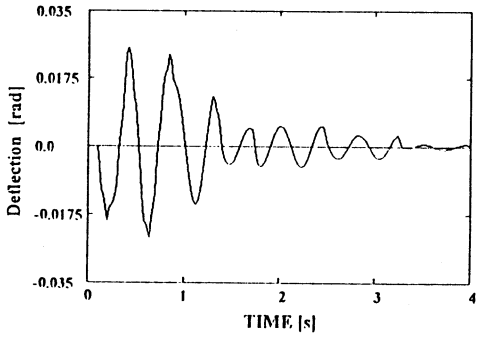
となる。この $\ddot{\theta}_c$ を実現させるパルス波 u をステップ関数状に手動入力できるように設定した。

そのシミュレーション結果を図２に示す。

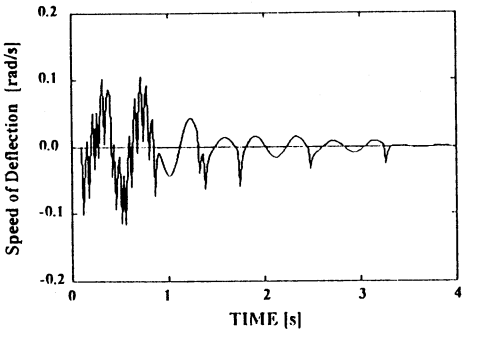
また、このシミュレーションにおいてアームのパラメータは表１のように設定し、目標角度を30°（約 0.5236 [rad])とした。



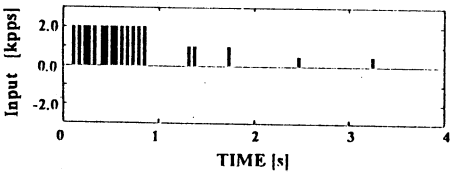
(a) ジョイント軌跡 （θ）



(b) たわみ変位 （ϕ）



(c) たわみ速度 （$\dot{\phi}$）



(d) 入力パルス波 （u）

図２　熟練者によるシミュレーション結果（３変数表示）

表１　アームのパラメータ

Length	0.5 [m]
EI	3.0 [N m^2]
Diameter	0.003 [m]
Mass	0.5 [kg]

4　シミュレーションにおける人間行動の解析

このシミュレーションを約５０人に、「アームを振動させず、そしてできるだけ早く目標角度に移動させる。」という条件のもとに手動制御を行ってもらった。その結果から、熟練者は θ,ϕ または $\theta,\dot{\phi}$ または $\theta,\phi,\dot{\phi}$ の情報のみを利用し、アームを振動させず、できるだけ早く目標角度に移動させることに成功している。

熟練者たちが如何に制御を行っているか統計を取ったところ、図２からも見てとれるように最初、熟練者は目標角度付近までアームが振動するのを無視してアームを移動させている。次に目標角度に近づけるのと振動を抑制するためにタイミングを計りながらパルス波の入力を行っている。このことから熟練者は、目標角度移動制御と振動抑制制御のどちらか片方を重視し、アームの状態に応じて制御ルールを切り替え手動制御を行っている。

また、振動抑制を制御するとき熟練者はϕか$\dot{\phi}$またはϕ,$\dot{\phi}$の両方など違った視点の情報（動き）を利用して制御しているが、これは図２を見てもわかるようにϕと$\dot{\phi}$は積分関係にあり、それぞれどちらかを制御していればもう片方も制御しているといえ、パルス波を入力しているタイミングは同じであった。両方の情報を利用している場合も同じタイミングであった。

以上のような解析の結果から、以下のファジィコントローラの作成へと移る。

5　ファジィコントローラ

前節の解析の結果から目標角度をＧとしたとき、

$$\theta_G = G - \theta \tag{7}$$

$$\triangle\theta_G(t) = \theta_G(t) - \theta_G(t-1) \tag{8}$$

と設定し、θ_G,$\triangle\theta_G$,ϕ,$\dot{\phi}$の４情報を使用したファジィコントローラの構造を決定した。それを図３に示す。

上位ルールについてRule 1は目標角度移動だけを行わせるか、振動抑制をしながら移動を行わせるかを判断させるものである。Rule 2は、Control 2により振動抑制制御のために算出されたパルス波がアームを現在の角度より目標角度から遠ざける場合のとき、そのパルス波をカットするものである。これにより振動を抑制させながら目標角度にアームを移動させることができるのである。これら上位ルールを表２に示す。

また、下位ルールについてControl 1は振動抑制制御の操作量を決めるものであり、Control 2は目標角度移動制御の操作量を決めるものである。

操作を決めるためのファジィルールの一例（Control 1 の場合）を表３に示す。また、ルールに対応するメンバーシップ関数は図４に示す。図４において、(a)は前件部ϕのメンバーシップ関数であり、(b)は前件部$\dot{\phi}$のメンバーシップ関数である。同様に(c)は後件部uのメンバーシップ関数である。

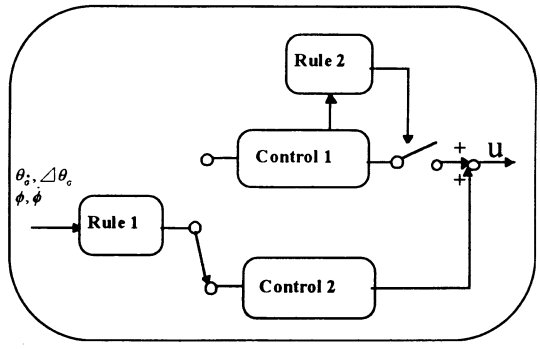


図３　ファジィコントローラの構造

表２　上位ルール

Rule 1 : If $|\theta_G|$ > A Then Control 2 else Control 1
Rule 2 : If (θ_G < 0 and u > 0) or (θ_G > 0 and u < 0)
Then switch off

A : Constant

表３　ファジィルールの一例
(Control 1 の場合)

If $\phi = P$ and $\dot{\phi} = P$ Then $u = P$
If $\phi = P$ and $\dot{\phi} = ZO$ Then $u = P$
If $\phi = P$ and $\dot{\phi} = N$ Then $u = ZO$
If $\phi = ZO$ and $\dot{\phi} = P$ Then $u = P$
If $\phi = ZO$ and $\dot{\phi} = ZO$ Then $u = ZO$
If $\phi = ZO$ and $\dot{\phi} = N$ Then $u = N$
If $\phi = N$ and $\dot{\phi} = P$ Then $u = ZO$
If $\phi = N$ and $\dot{\phi} = ZO$ Then $u = N$
If $\phi = N$ and $\dot{\phi} = N$ Then $u = N$

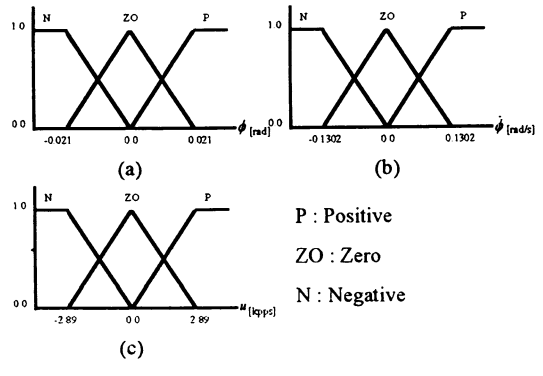
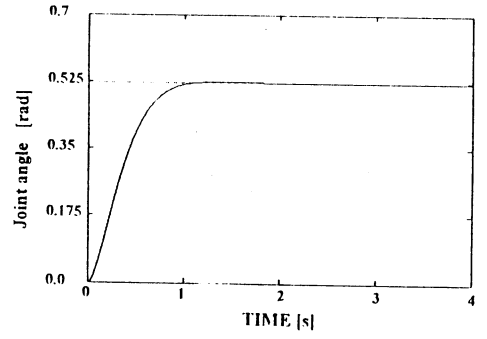
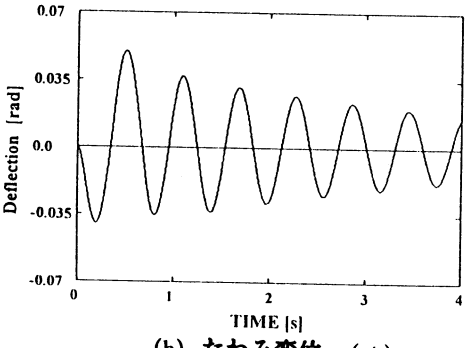


図４　メンバーシップ関数の一例
(Control 1 の場合)

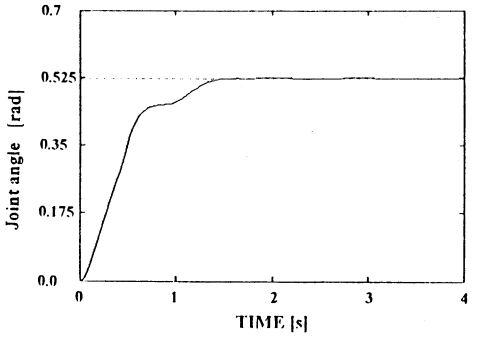


(a) ジョイント軌跡 (θ)

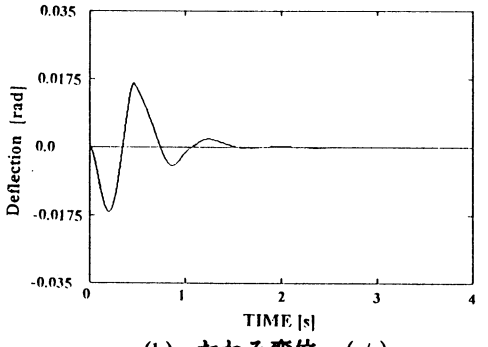


(b) たわみ変位 (ϕ)

図5 制御結果
(目標角度移動制御のみの場合)



(a) ジョイント軌跡 (θ)



(b) たわみ変位 (ϕ)

図6 制御結果
(振動抑制制御を加えた場合)

6 ファジィコントローラによる制御結果

ファジィコントローラを用いてシミュレーションを行った結果を以下に示す。

また、比較のために目標角度移動制御のみの場合、つまり図3においてControl 2だけを使用した場合(図5)と、振動抑制制御を加えた場合(図3のファジィコントローラ)を図6に示す。

図5,6からもわかるように目標角度移動制御のみでは、アームは早く目標角度に移動させることはできるが振動抑制は自然減衰を待たなければならなかった。一方、振動抑制制御を加えた場合は目標角度に移動させるのに多少時間はかかっているものの、振動抑制については非常によい結果を得られた。

これにより、作成したファジィコントローラは有効であると思われる。

7 おわりに

本論文では、シミュレーションによる制御実験ではあるが、人間の行動に基づく制御則を適格に利用することができた。これは、上位ルールである切り替えルールと下位ルールであるファジィコントローラの整合がうまくとれた結果である。

今後、このシステムを実機による多種類の実験を行って、この有効性の検証を行うつもりである。

参考文献

[1] 増井重弘、寺野寿郎、井田博哉、加藤亮「ファジィとGAを用いた三重倒立振子におけるマンマシンシステム」第11回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、(1995)

[2] 内山勝、近野敦「ホルツァ法に基づくフレキシブルアームの動力学モデリング」日本ロボット学会第1回ロボットシンポジウム予稿集、pp.247-252 (1991)

[3] N.O.マイクルスタッド著、小堀与一訳「機械振動解析」ブレイン図書出版、(1968)

[連絡先]

〒184 東京都小金井市梶野町3-7-2

法政大学工学部システム制御工学科

増井重弘

Tel : 0423-87-6249

Fax : 0423-87-6123

E-mail : masui@sghr.sc.hosei.ac.jp

THA1-2

救急車の架台の防揺・防振ファジィ制御
Fuzzy Control for Protection of Sway and Swing of the Stretcher on an Ambulance

前田 幹夫*, 村上 周太*, 成松 聖也*, 韓 虎剛**
Mikio MAEDA*, Shuta MURAKAMI*, Seiya NARIMATSU*, Hugang HAN**

九州工業大学工学部*, 広島県立大学**
Kyushu Institute of Technology*, Hiroshima Prefectural College**

Abstract: In a case which a car carries the dangerous objects or the patient in critical condition, those must be safely transported without swaying. But while the car is running, the sways of those can't be reduced by the passive control for the protection of swaying. Therefore we use a fuzzy control to protect the sways of the objects.

1. はじめに

救急医療では，すばやく，重傷患者を車で負担なく搬送するとともに，車上においての救急処置が要求される．また，危険物を運搬する場合においても安全にかつ速やかに行われなければならない．今回の研究では，重傷患者や危険物の搬送に焦点を絞り，搬送時の患者の負担を軽くする目的や危険物の安全運搬のための防揺・防振搬送制御システムを開発する．これは，患者が架台に一時的に固定されたカートあるいは座席上で横たわっている事を想定し，患者が，路面から受ける振動や，方向転換，停止などから受ける衝撃をやわらげるのを目的としている．危険物についても同様である．この目的を達成するためには，架台あるは座席に振動，衝撃吸収用のスプリング，ダンパー等を取り付ける研究も行われ，いくつかの成果が発表されている[1],[2]．それらは，搬送車が，種々の速度で走行中，架台の振動や揺れを軽減する構造になっている．

また，医学的な面から救急車内のカート上の患者の受ける振動，揺れを測定し，それを分析した研究も発表されている[3]．しかし，これらの機械的な仕組み（パッシブ制御）や研究成果のみでは，振動や衝撃をやわらげる事は難しい．そのため，状況に応じた，アクティブな防揺，防振制御が必要とされる．

本研究では，防揺・防振制御のために，アクティブファジィ制御方式[4]を採用する．このファジィ制御によって，路面や，搬送車の加速と減速から受ける振動や衝撃を軽減しながら，カートの位置を基準点近くに保持するように制御する．最後に，シミュレーションによってファジイ制御ルールを検討する．

2. 防揺・防振ファジィ制御系

2.1 防揺・防振制御系の概要

本研究におけるカート架台と搬送車との位置関係をFig. 1に示す．図は搬送車が速度 v_1[Km/h]で走行中の搬送車に搭載されているカート架台と搬送車との位置関係を簡略図示したものであり，架台は対地速度 v_0[km/h]で移動しているものとする．車両と架台の各重量は，それぞれ，M[kg], m[kg]である．架台は車両内部の基準位置を中心にある値範囲内で進行方向に対して，前後，左右に自由に移動できるものとする．制御目標は，アクチュエータ（モータあるいはシリンダ）を駆動し，カート架台を基準点になるべく保持することである．Fig. 2は制御システムの構成を示したものである．架台の前後，左右，上下の揺れや振動，衝撃は加速度センサーあるいは位置センサー（電圧）によってA/D変換器を通して制御コンピュータに取り込まれる．取り込まれた信号（値）はファジイ制御方式によって，架台の位置あるいは速度指令信号（値；電圧）としてD/A変換器を通してモータ駆動部へ出力される．モータ駆動部では架台の位置を制御する．

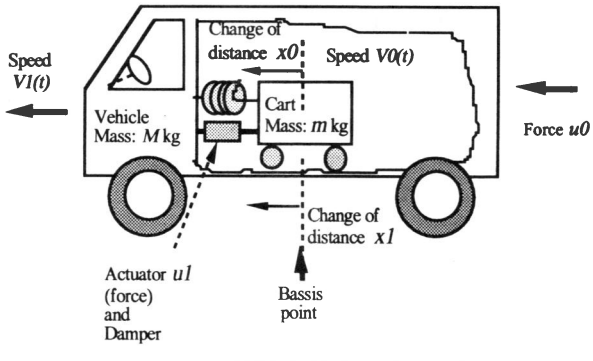


Fig. 1 搬送車載カートモデル

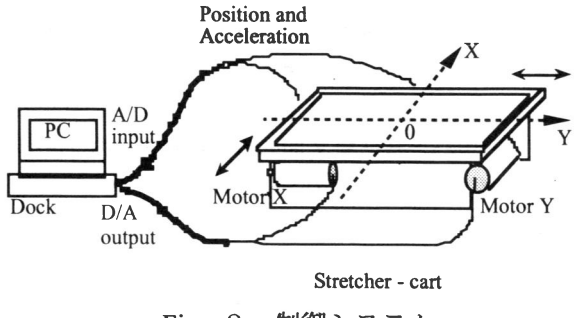


Fig. 2 制御システム

これらを踏まえた上でのカート架台の防揺・防振のファジィ制御系をFig. 3に示す.

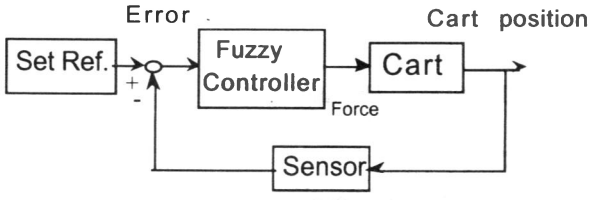


Fig. 3 ファジィ制御系

2.2 ファジィ制御装置

本研究では，ファジィ制御装置は2種類設計され，コンピュータ上のソフトウェアで実現する．この2種類の制御装置は，対象変数の使用方法，推論計算（操作量計算）方法が異なり，間接法による制御装置[4],[5]，直接法による制御装置[6-8]と呼ぶこともある．

1) 間接法によるファジィ制御装置

この制御装置は前田によって提案されたもので，次のルールで構成される．

前後位置調整ルール（Y軸ルール）：

If e^p_k is P_1 then u^p_k is Pu_1
If e^p_k is N_1 then u^p_k is Nu_1
If Δe^p_k is P_2 then u^p_k is Pu_2
If Δe^p_k is N_2 then u^p_k is Nu_2 (1)
If $\Delta^2 e^p_k$ is P_3 then u^p_k is Pu_3
If $\Delta^2 e^p_k$ is N_3 then u^p_k is Nu_3

横方向位置調整ルール（X軸ルール）：

If e^l_k is P_4 then u^l_k is Pu_4
If e^l_k is N_4 then u^l_k is Nu_4
If Δe^l_k is P_5 then u^l_k is Pu_5
If Δe^l_k is N_5 then u^l_k is Nu_5 (2)
If $\Delta^2 e^l_k$ is P_6 then u^l_k is Pu_6
If $\Delta^2 e^l_k$ is N_6 then u^l_k is Nu_6

ただし，

$$\Delta e^p_k = e^p_k - e^p_{k-1},$$
$$\Delta^2 e^p_k = \Delta e^p_k - \Delta e^p_{k-1}, \quad (3)$$
$$\Delta e^l_k = e^l_k - e^l_{k-1},$$
$$\Delta^2 e^l_k = \Delta e^l_k - \Delta e^l_{k-1}$$

e^p_k：架台中心と基準線X間の車両前後方向の位置偏差
Δe^p_k：前後位置偏差の一階差分
$\Delta^2 e^p_k$：前後位置偏差の二階差分
e^l_k：架台中心と基準線Y間の車両左右方向の位置偏差
Δe^l_k：横方向位置偏差の一階差分
$\Delta^2 e^l_k$：横方向位置偏差の二階差分

である．ここで，P_i, N_i, Pu_i, Nu_i はファジィラベルで，その形は，条件部，逆正接関数，結論部，直線である．各位置偏差は，Fig. 4に示すように，架台が搬送車両内の基準線Xから車両の前進方向に位置する場合は負，後進方向では正とする．また，横方向では，基準線Yの右側を正，左側を負とする．

2) 直接法によるファジィ制御装置

直接法によるカートの前後，左右方向の防揺制御ルールは以下のファジィ言語ルールである．

前後方向位置調整ルール：

If e^p_k is PB and Δe^p_k is PB then u^p_k is PB

と記述され，ルール集合は，Table 1に示されている．

横方向位置調整ルール：

If e^l_k is PB and Δe^l_k is PB then u^l_k is PB

と記述され，ルール集合はTable 2に示されている．

Table 1 前後方向位置調整ルール

u		e^p						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Δe^p	PB	ZO	NS	PM	PB	PB	PB	PM
	PM	PM	ZO	PS	PM	PM	PB	PS
	PS	PB	NS	ZO	PS	PS	PM	PS
	ZO	NS	NM	NS	ZO	PS	PM	PS
	NS	NS	NM	NS	NS	ZO	PS	NB
	NM	NS	NB	NM	NM	ZO	ZO	NM
	NB	NB	NB	NB	NB	NS	PS	ZO

Table 2 横方向位置調整ルール

u		e^l						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Δe^l	PB	ZO	PS	PM	PM	PM	PB	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
	NB	NB	NB	NM	NM	NM	NS	ZO

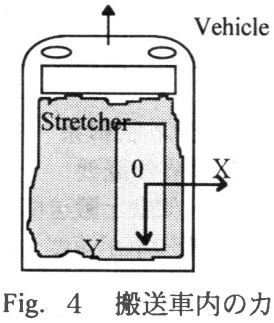


Fig. 4 搬送車内のカート

制御ルールのファジィラベルは，条件部が7分割三角型，結論部が7個のシングルトンである．

以上の二つのルール集合の特徴は，ルールの条件部が複数の変数で記述されていることである．すなわち，条件部が変数のラベルの組み合わせによって記述されている．したがって，この条件部は制御対象の状態をパターン記述するものであるから，可能性のある状態は必ず記す必要がある．結論部のファジィラベルはシングルトンであり，つまり，実数値で表される．これらのルールのファジィ推論には，前田の提案した簡略推論法[4]が使用される．この方法は，従来の方法より推論計算を高速化するとともに，制御性能を改善できる．また，Table 1，Table 2のルールは独立しており，干渉がないのでルールのチューニングが容易である．

3． 制御シミュレーション

カート架台の防揺・防振制御のための搬送車両と架台の数学モデルを定式化すると以下のようになる．ただし，シミュレーションでは，搬送車は原則的にオートマチック車とする．

搬送車の数学モデル[5],[8]：

[速度モデル]

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= -0.634\dot{x}(t) - 0.034x(t) + 1.228u_1(t), \\ y(t) &= \int_0^t x(t)dt, \\ V_1(t) &= x(t) \end{aligned} \tag{4}$$

x(t): 時刻 t の車両速度
u(t): 〃　スロットル開度（燃料）
y(t): 基本位置からの車両の変位

[操舵モデル]　参考文献[8] を参照.

架台の数学モデル：

$$\begin{aligned} m\ddot{z}(t) - b[\dot{y}(t) - \dot{z}(t)] - k[y(t) - z(t)] &= T_0 u_0 \\ e(t) &= y(t) - z(t) \end{aligned} \tag{5}$$

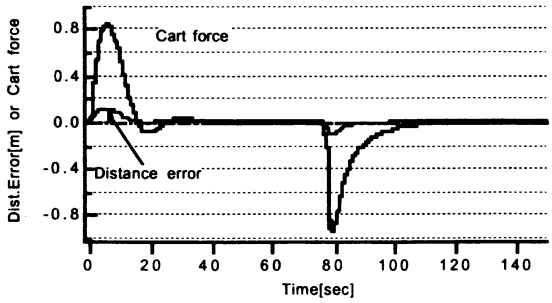
$z(t)$: 基本位置からのカートの変位
$e(t)$: 基準点からのカートの位置偏差
u_0: カートフォース（モータ駆動電流）
T_0: カートフォース係数(=1)
m: 200 [kg]
k: スプリング定数
b: ダンパー係数

(5)式の架台のモデルは，車両進行方向の速度，加速度をX軸，Y軸成分に分解した時のそれぞれの成分を状態変数化したものである．

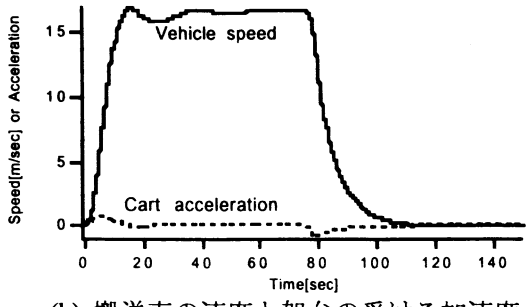
Fig. 5は，スプリング定数100[Kg]，ダンパー係数10の時，搬送車両が停止（速度0 Km/h）から速度60 Km/h へ達した場合と，定速走行から停止までの架台の前後方向の位置制御の結果である[9]．どの変化に対しても前後の位置は±150cm 以内に維持され，架台が基準点に緩やかに近づくことによって，架台の加速度もスムーズある．従って，乗り心地の良い架台制御が達成されている．また，スプリングを使用しない場合の制御も同じような傾向の結果が得られた．異なるのは，カートにかかるフォースが小さくなることである．しかしながら，実際の車両は，手動のギヤチェンジを必要とするものや，ブレーキ制動の効きすぎるものもある．そこで，実際の車両運転環境へ近づけるために，仮想的にギヤチェンジの外乱やブレーキ加速を加えた制御を行った．その結果をFig. 6に示す．図からもわかるように，ギヤチェンジを想定した外乱によって，搬送車の速度が少し乱れ，その分カートにかかるパワーが変動している．しかしながら，位置偏差は，この場合でも±150cm 以内に収まっており，かなり頑健性のある制御装置が設計できている．また，架台の受ける加速度も固定したものより小さくなっている．

次に，直接法によるシミュレーションの結果をFig. 7，8に示す．Fig. 7は，停止から約速度60[km/h]へ達した場合と，定速走行から約40[km/h]へ減速した場合の，前後方向の位置制御の結果である．Fig. 8は，半径40[m]の左カーブを約速度40[km/h]から30[km/h]位まで減速した場合の位置制御の結果である．

間接法に比べるとかなり悪い結果となり，まだまだ改良の余地がある．

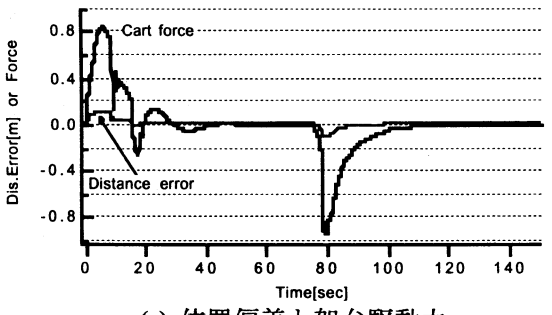


(a) 位置偏差と架台駆動力

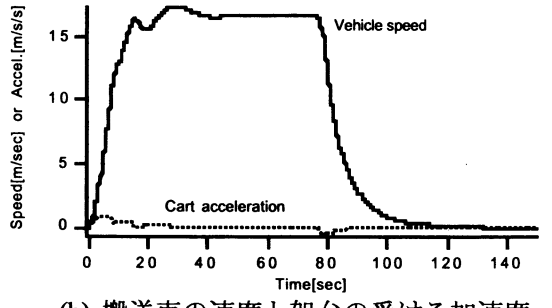


(b) 搬送車の速度と架台の受ける加速度

Fig. 5　シミュレーション実験1



(a) 位置偏差と架台駆動力



(b) 搬送車の速度と架台の受ける加速度

Fig. 6　シミュレーション実験２

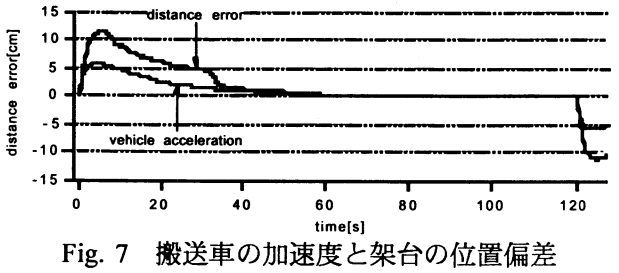
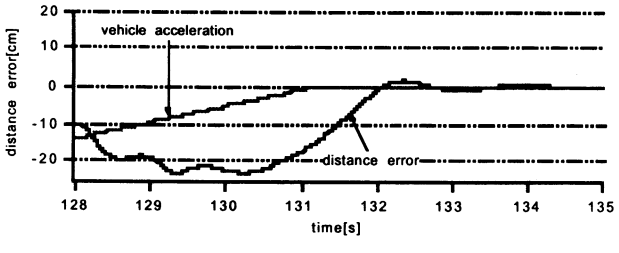
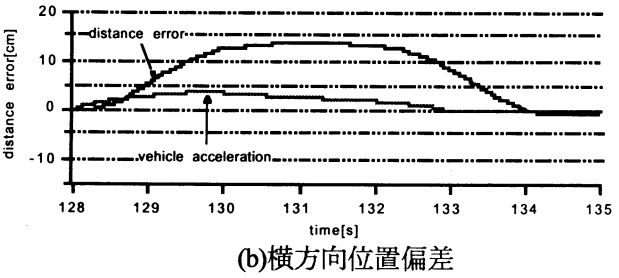


Fig. 7　搬送車の加速度と架台の位置偏差



(a)前後方向位置偏差



(b)横方向位置偏差

Fig. 8　搬送車の加速度と位置偏差

５．おわりに

本研究では，搬送車に設置した可動型カート架台の防揺・防振のため２軸ファジィ制御装置を設計した．そして，このファジィ制御装置を用いて，前後，左右方向のシミュレーション結果から架台の受ける加速度を極力減少させながら，架台を可動範囲で基準値になるべく保持できる事を示した．また，架台の測定実験の結果から，ギアチェンジやブーレキングによる加速度あるいは速度変化の影響を抑えるように制御ルールを修正した．更に，プロトタイプの架台上で人間が感じる速度変化の影響を架台を可動型にすることによって減少せしめることがわかった．それによって，実機への応用の可能性がますます大となった．ここに至って，ファジィ制御を用いた可動型カート架台の実現は大いに期待でき，試作機が待ち望まれる．

参考文献

[1]石田，他：防振ストレッチャーの振動測定実験，日救急医誌，Vol.1, No.2, p. 103/109 (1990)
[2]D. R. Leyshow, C. W. Stammers:The development and performance of an ambulance stretcher, Proc. of Instn. Mech. Eng. Part D, Vol.200, No.4, p. 249/257 (1986)
[3]袴田：振動評価手法と振動吸収機構のあり方に対する一考察，消防研究室年報，No.21, p. 1/28 (1992)
[4]前田，他： Fuzzy Logic コントローラの設計，九州工業大学研究報告（工学），No.49, p.43/51 (1984)
[5]前田，村上： Fuzzy Logic コントローラによる自動車の速度制御，計測自動制御学会論文集，Vol.21, No.9, p.984/989 (1985)
[6]M.Maeda, S. Murakami: Steering Control and Speed Control for an Automobile with a Fuzzy Logic, Proc. of the 3rd IFSA Congress, p.75/78 (1989)
[7]M. Maeda, et.al.: A Self-Tuning Fuzzy Controller, Fuzzy Sets and Systems, Vol.51, No.1, p.29/40 (1992)
[8]M. Maeda: Fuzzy Drive Expert System for an Automobile, Information Sciences, Applications, Vol.4, No.1, p.29/48 (1995)
[9]前田，他：車載物あるいは座席の防揺ファジィ制御，第15回九州SICE学術講演会予稿集，p.29/32 (1996)

連絡先：
〒804 北九州市戸畑区仙水町１－１
九州工業大学 工学部 電気工学科
情報工学教室
前田　幹夫
Tel: 093-884-3249　Fax: 093-871-5835
Email: mmaeda@comp.kyutech.ac.jp

THA1-3

人間の制御戦略による倒立振子の振り上げ安定化制御

Swing up and Stabilization Control of an Inverted Pendulum Based on a Human Control Strategy

安信　誠二　　森　宗仁
Seiji Yasunobu　　Munehito Mori

筑波大学　構造工学系
Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba

Abstract

In this research, human control strategy is considered and fuzzy controller based on this strategy is composed. This is applied to an inverted pendulum that have unknown characteristics such as the length and the mass of the pendulum. The swing up control and the stabilization control are simulated and are experimented with using a real machine. These results show the effectiveness of the control based on a human control strategy.

1. はじめに

倒立振子は代表的な非線形システムであり、構造が簡単ではあるが不安定であるため、安定化制御、振り上げ制御の研究、実験等に幅広く用いられている.

安定化制御では、古くから線形制御理論[1]による研究が行なわれてきた. 線形制御理論では、制御対象の正確なパラメータ値を必要とし、振子が大きく傾くと線形モデルは成立しない. 一方、ニューラルネットワーク制御[2]では、試行により制御則を獲得する学習制御が行なわれ、ファジィ制御[3]では、経験則による制御等が行われている.

振り上げ制御は、振子を垂下状態から、台車を左右に動かすことにより加振し、振り上げ、倒立安定化させるものである. この振り上げ制御は、振子の角度に対して強い非線形性を持つため、線形制御理論で取り扱うことが難しい. そのため現在では、倒立振子の持つ非線形性を考慮した数多くの制御手法が提案されている.

また、制御対象である振子の特性が変化すると制御が難しくなる. しかし、人間は状況が変化しても、それに対応して、うまく振り上げることができる.

本報告では人間の制御戦略を考慮し[4]、定式化することによりファジィ制御器を構成する. これを、振子の長さ、質量等の特性が未知の倒立振子に適用し、振り上げ、倒立安定化制御をシミュレーション、実機により行なう. その結果より、人間の制御戦略に基づく制御方式の有効性を確認する.

2. 倒立振子の制御戦略

振り上げ制御の考察により、人間の制御戦略を以下のようにまとめた.

2.1 振子の特性の把握

人間が倒立振子を制御する場合、制御開始時では、台車を動かし振子を振らせることで、台車・振子の特性を把握する. また、加振した後において、振子の振れ特性を調整しながら徐々に習熟する.

2.2 振り上げ・倒立安定化

人間は、振子の振れを見て、タイミングをとり、台車を左右に動かすことにより、振り上げ制御を行う. また、振子のバランスをとりながら、台車の位置制御も行うことにより倒立安定化を行う. 制御戦略は次のように表される.

(1) 振子が倒立してないときには、振子の振れにあわせ、振子の運動方向と逆向きに一定速度で台車を移動し、適切に加振する.

(2) 倒立しているときには、振子が倒れそうな方向に台車を移動させることにより、倒立安定化制御を行なう. 台車が目標位置から離れているときには、振子をわざと目標位置側に倒すことにより、台車の位置制御を行なう.

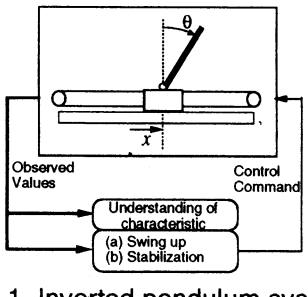


Fig.1 Inverted pendulum system

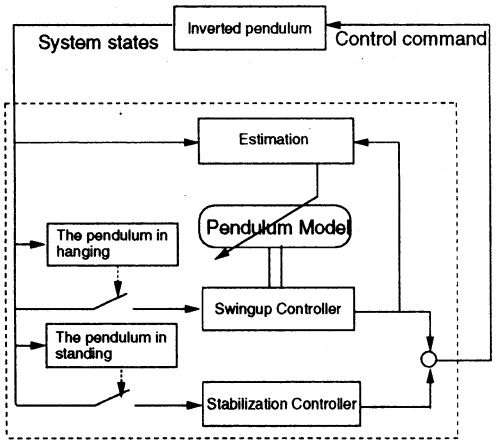
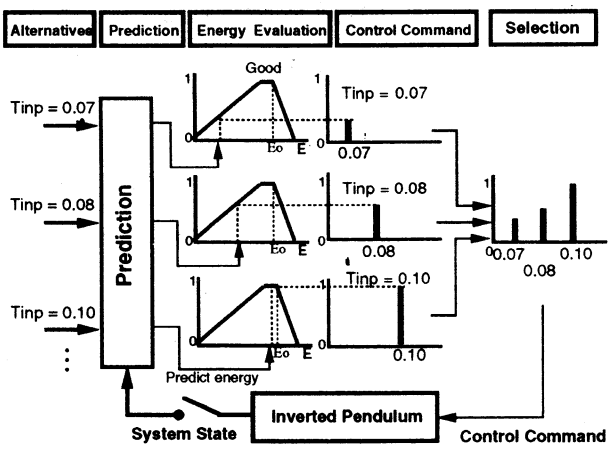


Fig.2 Structure of controller



Eo : Target energy

Fig.3 Inference process of swing up control

3. 振り上げ・安定化制御器の構築

人間は速度指令を調節し、適切な加振を行なうことでうまく振子を振り上げ、倒立安定化させることができる．この一連の制御を行うためにコントローラを構築する．

3.1 制御器の概要

本研究で開発した制御器の構造をFig.2に示す．この制御器は、推定部、振り上げ制御部、倒立安定化部の三つから構成されている．振り上げ制御と倒立安定化を、振子の状況を判断して用いる．倒立点を含むその近傍で振子の角速度が微小であるとき、振子が倒立していると判断し、倒立安定化部を用いる．

3.2 振子の特性の把握

制御開始時、振子が静止した状態から、台車を少し動かし振子を振動させることで、長さ、質量からなるパラメータが推定できる．振子が持つエネルギーは、振子の長さ、質量に依存するので、このパラメータを、振子が持つ運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを考慮した部分モデルとして、後述の振り上げ制御部に組み込み、制御結果の予測、制御指令の決定に用いる．

3.3 振り上げ制御

振り上げ制御則は、前述の振り上げに関する制御戦略を、予見ファジィ制御方式 [4]の考えに基づき定式化したものである．予見ファジィ制御方式は、制御則に仮定された入力候補値について、それぞれの制御結果を予測し、ファジィ推論により制御目的の評価を行い、最適な制御指令を選択するものである．

振り上げ制御部では、コントローラは一定速度指令値をモーターに入力し、速度指令の長さにより制御を行うものとする．

制御指令を決定するために、制御則を次のように設定する．あらかじめ決められた速度指令候補を用いて、振子を加振したと仮定する．以前に把握した振れ特性より、加振後の振子が持つエネルギーを予測する．予測エネルギーはファジィ集合を用いて評価される．そして、評価が最も良い速度指令を制御指令として選択する (Fig.3).

言語則は次のように表される．

『もし、$\theta = \pi$ で速度指令の長さ（Tinp）をtiとしたとき、加振後の振子の持つエネルギーがEoに近い(Good)ならば、速度指令の長さ(Tinp)をtiとする．』

IF (Tinp = ti → E is GOOD) THEN (Tinp = ti)

(i = 1, 2, ···, 9、 ti = 0.0, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14)

Eo : 目標エネルギー（振子が倒立したときのエネルギー）

3.4 倒立安定化制御

倒立安定化制御では、２つの簡易ファジィ推論を用いる．目標位置で安定化制御を行うために、(1)台車の位置 x 、速度 v より仮想的な目標角度 θtを決定し、(2)仮想目標角度 θt と振子角度 θ との偏差 θe、と振子角速度 ω より入力電圧 u を決定する (Fig.4).

４状態変数は-1.0～1.0 に正規化される．前件部ではそれぞれNB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB の７つのファジィラベルを用い、49のルールにより制御を行う．

(1)仮想目標角度推論部

台車位置 x と速度 v の値により目標位置側にわざと振子を倒すように θt を決定する．Table.1 (a) にルールを示す．

(2)制御入力推論部

角度誤差θe（$=\theta t - \theta$）と角速度ωを２入力とし、入力電圧 u を決定する．Table.1 (b) にルールを示す．

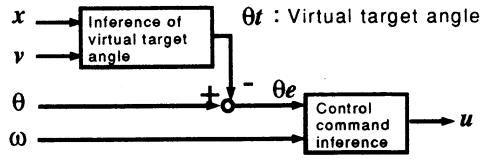


Fig.4 Stabilization controller

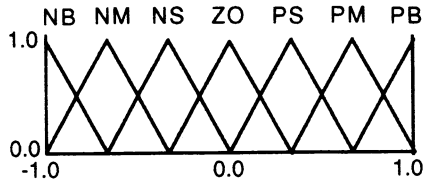


Fig.5 Menbership function for stabilization control

Table.1 Fuzzy rules

(a) Inference part of virtual target angle

θt		v						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
x	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NS
	NM	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	NS	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NM
	ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
	PS	PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
	PB	PS	ZO	NS	NM	NM	NB	NB

(b) Inference part of control command

u		ω						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
θ	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
	NS	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS
	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NS	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB
	PM	ZO	PS	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PB

4. シミュレーションによる評価

制御系設計支援ツールSIMULINK(The MathWorks Inc.)を用いて、シミュレーションを行う．台車・振子系を非線形モデルとしてモデル化し、振子の軸から重心までの距離 l = 0.12[m]、質量 m = 0.041[kg] とする．サンプリング時間は10[msec]である．初期条件は (x, θ, v, ω) = (0, π, 0, 0) である．

Fig.6 に台車位置、Fig.7 に振子の角度、Fig.8 に振子の位相平面図を示す．

この制御結果では、(a)台車を 1 回動かし振子を自由振動させ2.2[sec] までの間、振子の特性を把握している．そして、(b)台車の移動に伴い加振される振子の振れ特性を把握しながら、振り上げを行っている．5.0[sec]付近で台車の移動が調整され、うまく振子が振り上げられている．その後、台車が原点上に移動し振子が倒立安定化されている．

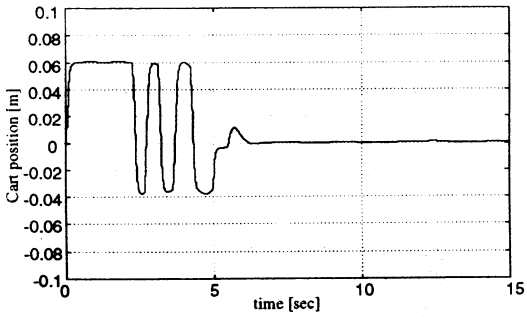


Fig.6 Cart position

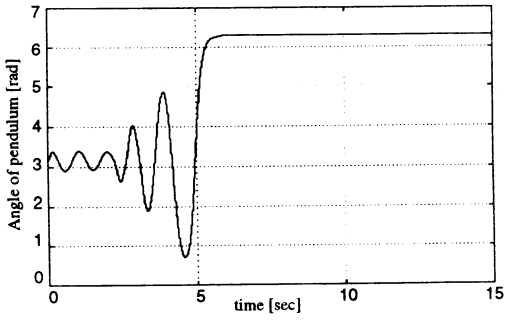


Fig.7 Angle of pendulum

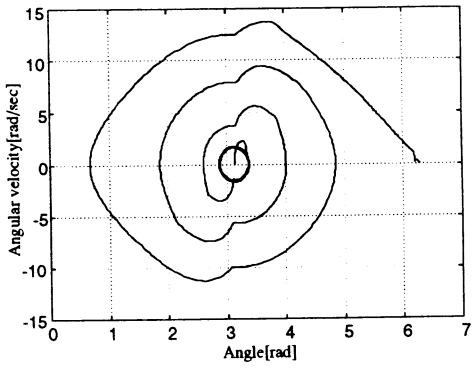


Fig.8 Rotational phase of pendulum

5. 実機実験による評価

Fig.9 に本研究で使用した実験装置の外観、Fig.10 に実験システムの構成を示す．倒立振子は、レール上を動く台車と、台車上の軸を中心にして回転する振子と、台車を駆動するモータ・プーリー・ベルト系から構成されている．台車上の軸とベルトの端に取り付けられたエンコーダより、台車位置x、振子の角度 θ が測定され、それらがコントローラに入力される．コントローラが決定した制御指令 u は、パワーアンプを通して、ベルトの一端に取り付けられたモーターに入力される．なお台車の速度v、振子の角速度ω は、それぞれ x, θ の差分をとることにより求められる．

シミュレーションと同様に初期条件を (x, θ, v, ω) = (0, π, 0, 0) とし、実機による実験を行った．Fig.11, Fig.12, Fig.13 に、それぞれ台車位置、振子の角度、位相平面図を示す．

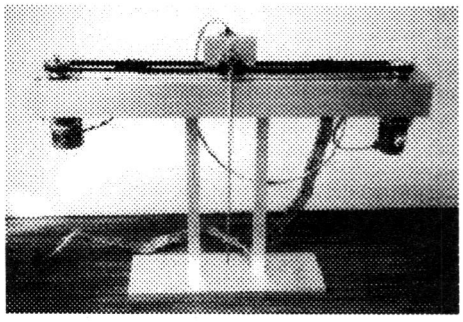


Fig.9 View of inverted pendulum

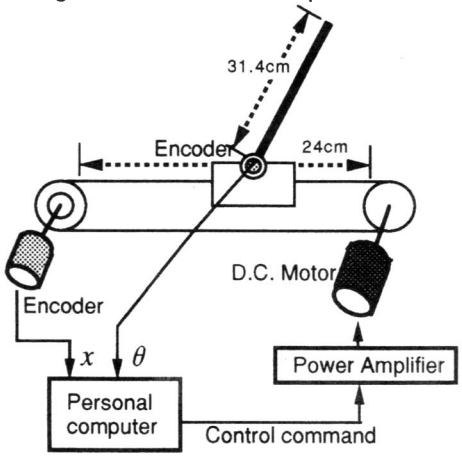


Fig.10 Experimental system

実験結果より、実機においてもシミュレーション同様に制御が行われていることを確認した．台車、レール間の摩擦等の不確定な要素や、制御入力の不感帯が存在するため、実験結果はシミュレーション結果と少し異なっている．

6. 結論

本研究では、人間の制御戦略を定式化したファジィ制御器を構築した．これを、振子の長さや質量の値が未知の状態の倒立振子に適用した．シミュレーション、実機により、振子を振らせながらその特性を把握し、垂下状態から振子をうまく振り上げる制御を行った．これより、人間の制御戦略による制御方式の有効性を確認した．

参考文献

[1]森，西原，古田，”倒立振子制御用ハイブリッド制御系”，計測自動制御学会論文集，Vol.12, No.4, pp.482-487(1976)
[2]池田，斎藤，北村，”多層ネットワークによる倒立振子の安定化学習制御”，システム制御情報学会論文誌， Vol.3, No.12, pp.405-413(1990)
[3]松浦，”カート位置制御を含めた倒立ポールの振り上げ、安定化ファジィ制御”，日本ファジィ学会誌，Vol.5, No.2, pp.397-408(1993)
[4]安信，”人間の制御戦略に基づく Fuzzy 制御方式の一提案”，計測自動制御学会論文集，Vol.23, No.9, pp.969-976(1987)
[5]安信，”ファジィ工学”，昭晃堂 (1991)

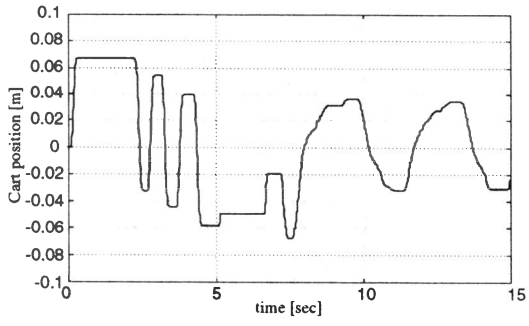


Fig.11 CartPosition

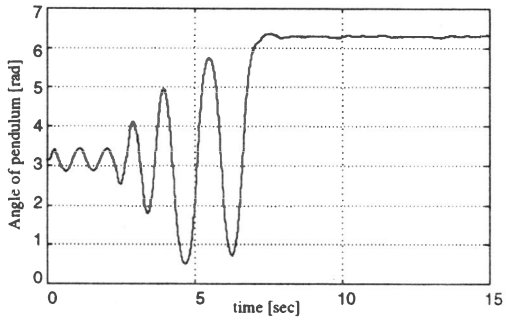


Fig.12 Angle of pendulum

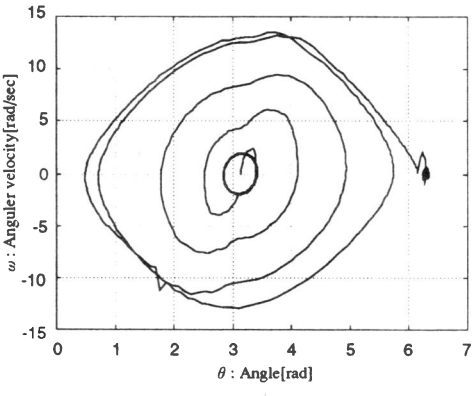


Fig.13 Rotational phase of pendulum

問い合わせ先
〒305 つくば市天王台1-1-1
筑波大学構造工学系安信研究室
森 宗仁
TEL 0298-53-6186 or 5019
FAX 0298-53-5207
E-mail mori@esys.tsukuba.ac.jp

ルール自動生成機能を有するカスケード形ファジィ学習制御を用いたＡＣサーボシステムのオートチューニング

An Auto-tuning Method for AC Servo System using a Cascade Type of Fuzzy Learning Control with Automatically Generating Rules

井上堅治（神鋼電機） 中岡睦雄（山口大学）
Kenji Inoue (Shinko Electric Co.,Ltd.) Mutsuo Nakaoka (Yamaguchi University)

Abstract

In this paper, the control method of advanced system parameter auto-tuning implementation for AC servo system using fuzzy reasoning logic with automatic learning control function is described.

This method has three features;

(i)It is not necessary to input any kinds of fuzzy rules to the servo system before starting auto-tuning operation. Because, fuzzy rules can be produced automatically in learning process.

(ii)Any kinds of knowledge about system parameter tuning technique are not required.

(iii)High speed response and robustness can be derived because of estimating load parameters.

The effectivenesses of this method are confirmed through experimental results.

1．まえがき

扱いやすさの観点からＡＣサーボゲインのオートチューニング技術が注目されている。本稿ではサーボゲイン調整則知識を一切必要としないルール自動生成形ファジィ学習制御方式オートチューニングを提案し、本方式を２質点系機械共振負荷をもつＡＣサーボへ適用した場合の実験結果について報告する。

2．オートチューニング方式

図１に本オートチューニング方式の動作フローチャートを示す。オートチューニングを起動すると、先ずステップ状外乱指令に対するモータのトルクおよび速度の応答より、サーボモータに接続されている機械負荷のパラメータを推定する。ここでは２質点系共振負荷として推定している。次にオートチューニングに必要なファジィルールをデータベース内データに基づいて求める。

図２にデータベースを負荷パラメータ平面で表した概念図を示す。データベース内には、過去ｎ回のファジィ学習制御で獲得したＰＩパラメータセットＧＳ１～ｎおよびファジィルールセットＲＳ１～ｎが格納されている。新しく求めた負荷パラメータ推定値をＰｎ＋１点とすると次のオートチューニングで使用するファジィルールセットはＰｎ＋１点と各点との距離に基づいて以下のファジィルールより求められる。

Σｉｆ ｒｉ＝近い ｔｈｅｎ ＲＳｉ　　（１）

但し、ｉ＝１～ｎ

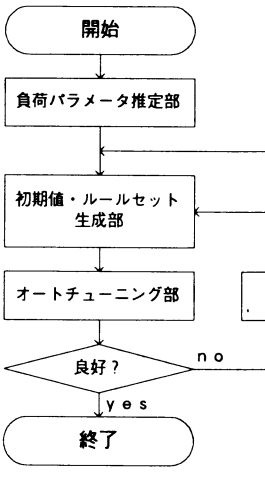


図 １．動作フローチャート

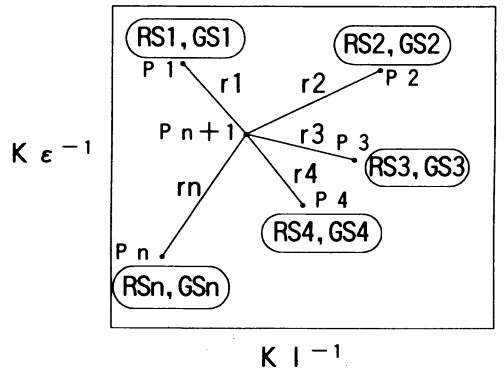


図２．Ｋε⁻¹－Ｋｌ⁻¹平面

オートチューニング部ではステップ状外乱指令を周期的に速度制御系に加え、その時の応答よりダンピングＤおよび応答速度Ｉを求め、これら特徴量とファジィルールに基づいてＰＩパラメータを調整するが、一定時間内に目標応答特性が得られない場合は学習制御が起動する。

学習制御部では、先ず、ＰＩパラメータを調整領域全域で複数ポイント変動させた時のステップ応答よりＤおよびＩを求める。次にこの結果よりＰＩパラメータに対するＤおよびＩの変化傾向を求め、この傾向をファジィルールに変換することにより、ファジィルールセットを自動生成している。生成したファジィルールセットは

データベース内にＲＳｎ＋１として記憶される。

３．実験結果

図３に実験装置の構成を示す。オートチューニング関連の演算はすべてパソコンで実行している。演算結果であるＰＩパラメータは外乱指令とともに通信経由でＡＣサーボドライバへ出力している。モータ速度はモータ側エンコーダ出力パルスをＦ／Ｖ変換することにより求めている。また、モータトルクはサーボドライバ内ＰＩ演算の結果を１６ビットＤ／Ａでアナログ変換することにより求めている。これらの信号をパソコン拡張ユニット内Ａ／Ｄ変換ボードにて数値データに変換し、５００μｓｅｃ周期５００ポイント単位でパソコン内のメモリに記憶される。このデータより負荷パラメータの推定およびＤおよびＩの値を計算している。

図４に本装置を使って実施した実験の負荷条件を示す。Ｋεはカップリングのばね定数、Ｋｌは負荷イナーシャを示す。表１にＤの実験結果値を示す。ルールセット数１、２、３とは、各々、図４の負荷条件における①のみの場合、①＋②の場合、①＋②＋③の場合に相当する。ルールセット数が２以上になるとＤの値が小さくなっており、学習効果が現れていることがわかる。

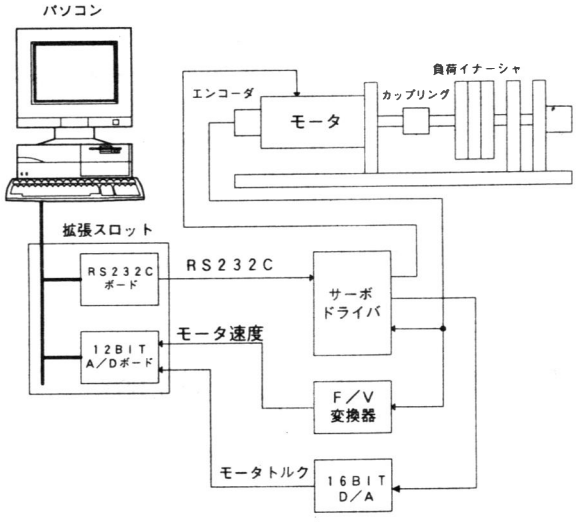


図３．　実験装置

図５に②点におけるオートチューニング動作を示す。動作開始時に共振によるハンチングが発生しているが、数回オートチューニング操作を繰り返した後、安定な応答状態に収束していることがわかる。

４．むすび

サーボゲイン調整則に対する知識を一切必要としないルール自動生成形ファジィ学習制御法の制御方式について説明した。機械共振負荷をもつＡＣサーボを用いて、本制御方式の有効性を実験により検証し,自動生成したファジィルールセットの妥当性および学習効果について確認できた。

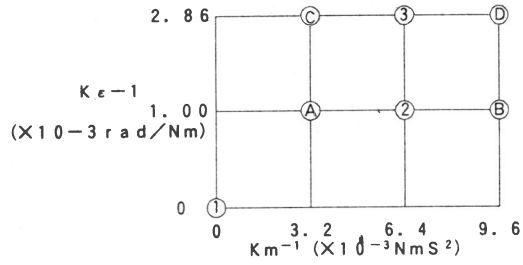


図４．オートチューニングポイント

表１．　Ｄの実験結果値

Measuring Point	Number of Rule Set （N）		
	1	2	3
1	0.189	0.189	0.189
2	1.46	0.270	0.255
3	0.403	0.255	0.338
A	1.32	0.166	0.160
B	1.13	0.272	0.328
C	0.396	0.170	0.204
D	0.387	0.323	0.271

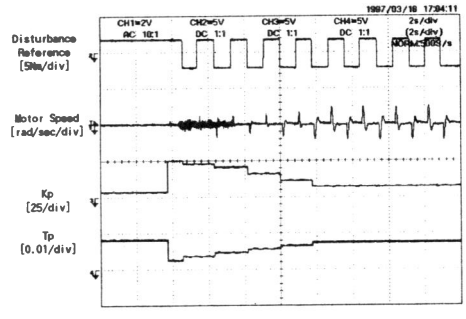


図５．　オートチューニング動作波形

参考文献

［１］山崎、菅野：「ファジィ制御」、システムと制御、Vol.28,No.7,P442-446,1984.

問い合わせ先

〒５１６　三重県伊勢市竹ヶ鼻町１００
神鋼電機株式会社　商品開発部
井上堅治
ＴＥＬ：　（０５９６）３６－３１８０
ＦＡＸ：　（０５９６）３６－３９７４
Ｅ－ｍａｉｌ：　inoue@servo.shinko-elec.co.jp

THA2-1

飛行モニタを用いた無人ヘリコプタのFBW制御
FBW Control of an Unmanned Helicopter using a Flight Monitor

影山 暁久　　菅野道夫
Akihisa Kageyama　　Michio Sugeno

東京工業大学 知能システム科学専攻
Dept. of Computational Intelligence and Systems Science ,Tokyo Inst. of Tech.

Abstract:
This study aims at designing a remote control system of an unmanned helicopter out of sight. For this purpose, the Fly-By-Wire developed so far is improved. Also a Flight monitoring system is constructed by which we can monitor the flight situation out of sight at the ground control station.

1 はじめに

ヘリコプタは、回転翼機ならではの優れた飛行特性を持つことから、広く利用されているが、危険な状況下での飛行を強いられることが多く、操作の複雑さとあいまって、操縦者には過度の負担がかかる。そこで本研究では、無人ヘリコプタを用いてその操縦を容易なものにするために、以前に開発されたFly-By-Wire(FBW)コントローラの改良を行なった。その他に、機体が視界外の場合を想定し、機体の状態を把握することのできる飛行モニタリングシステムを作成し、FBWコントローラと組み合わせて、視界外での遠隔操作を行なった。

2 ヘリコプタ

本研究で使用したのはシングルローター・ヘリコプタで、以下のような特徴をもつ。

- 非線形特性を持つ
- 多入力の多変数系である
- 軸間干渉がある
- 環境条件により特性が変化する（外乱の影響を受けやすい）
- 多くの飛行モードを持つ

3 コントローラ

コントローラは図1のように、上位層・下位層から

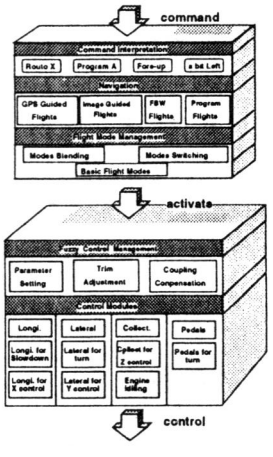


図 1: 制御構造

成る2層構造をしている。上位層はオペレータとヘリコプタとのインタフェース機能を成し、次のような操縦を行っている。

- コマンドの解釈
  - FBWと最も密接なつながりを持つ部分で、操縦者からの送信信号を解釈し、それに従い目標値の変更、飛行モードの選択などを行なう。

- 飛行モード選択・駆動
- 下位コントローラの選択・駆動
- 下位コントローラのパラメータ設定
- カップリング補償

一方、下位層には、エレベータ、エルロン、ラダー、スロットルの各コントローラが数種類づつ用意されており、センサ情報をもとに目標速度・姿勢角・高度に追従するように、それぞれの制御出力をファジイ推論する。ファジィ推論のためのルールは、前件部3つ（Negative・Zero・Positive）およびシングルトンの後件部からなる。

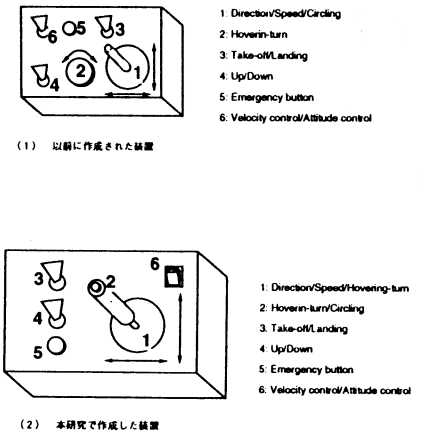


図 2: 新旧の FBW 入力装置

4 FBW システムの改良

4.1 背景と目的

ヘリコプタを操縦するには、常に4入力を加えなければならない。これは、各々の操作が互いに影響を及ぼしあうからである。そのためその操縦は非熟練者にとっては困難なものであり、だれでも容易に操縦できるコントローラが必要とされる。その一つに FBW システムがある。FBW システムとは、操縦者が行なわなければならない操作をコンピュータに行なわせることによって、操縦者の負担を軽減させるシステムである。本研究では以前開発されたシステム [5] の改良を行なった。

4.2 FBW 入力装置

操縦者が直観的に理解しやすい入力装置として、以前に作成された FBW 入力装置を図2の（1）に、本研究で作成した FBW 入力装置を図2の（2）に示す。

4.3 FBW 入力装置とファジィ制御器間のインターフェイス

実機では FBW 入力装置からの入力信号は、コマンド送信用プロポを通じて無線でヘリコプタに搭載されているファジィ制御器に送られる。1回の送信で8ビットのデータの送信が可能である。本研究では必要な情報を飛行モードと操作量の2回に分けて、交互に送っている。

4.4 以前の FBW システムとの比較

以前開発された FBW システム [5] からの改良点を挙げてみる。

- 方向や速度を与えるスティックを親指で操作するものから片手で握って操作するものに変更した。それに伴い、コントローラ自体も大きくなり、安定性が増した。
- ホバリングターン用のダイヤルをなくし、スティックの先端のスイッチを押すことによりホバリングターンを行なえるようにした。これにより2次元での動きは全て片手で行なえるようになった。
- スティックの先端のスイッチを押しているか否かによって旋回と斜め前進を切替えられるようになった。
- 旋回半径を変えられるようになった。
- 速度目標値や姿勢角目標値は以前は5段階でしか与えられなかったが、本研究では13段階で与えられるようになり、細かい操作を行なえるようになった。

特にニュートラルの位置が認識しずらかったホバリングターン用のダイヤルをなくし、その機能をスティックとスイッチに置き換えたことにより操作性は格段に向上し、様々な複合飛行を可能にした。

5 飛行モニタリングシステム

5.1 目的

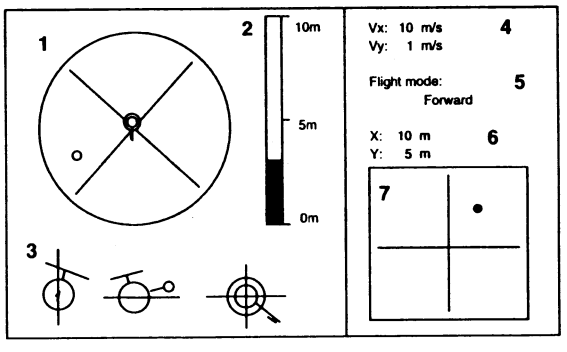
ヘリコプタは危険な状況下での飛行を強いられることが多く、無人ヘリコプタの実用化が急務となっている。しかし、無人ヘリコプタの視界外での飛行は、ほぼ不可能なのが現状である。そこで飛行モニタリングシステムが必要となる。飛行モニタリングシステムとは、ヘリコプタから送られてくるセンサ情報などをもとに、ヘリコプタの状態を地上のモニタ画面上で視覚的に表現したものである。そこで本研究では、FBWコントローラと飛行モニタリングシステムを用いて、視界外で無人ヘリコプタを遠隔操作できるようなシステムを構築することを目的とする。

5.2 センサ情報の伝達方式

センサ情報は１２ビットであるのに対し、ヘリコプタから地上に送信可能なデータは８ビットであるので、ここでは１２ビットのデータを上位６ビットと下位６ビットとに分けて、送っている。ここでは、１５個のセンサの値と飛行モードとを地上に送信しており、そのサンプリング周期は約0.2秒である。

5.3 表示部の説明

飛行モニタリングシステムの表示部は図3のようになっている。



1： ヘリコプタ座標
2： 高度
3： 姿勢角
4： 速度
5： 飛行モード
6、7： 地上座標

図 3: 飛行モニタリングシステムの表示部

このようにヘリコプタ座標、機体の高度、姿勢角、速度、飛行モード、地上座標を表示させている。このうち１に示すヘリコプタ座標では、機体は中央部から動かず、周りの軸や目的地点が移動・回転をする。このヘリコプタ座標により操縦者は対面飛行時の危険を回避し、目標地点にたどり着くことができる。また高度や姿勢角を視覚的に表現したことにより、機体の状態をより理解しやすくなった。

5.4 考察

FBWコントローラと飛行モニタリングシステムを用いて、視界外での操縦を行なった際の考察を、シミュレータと実機の両方から加えてみる。

まずシミュレータにおいては、誤差なども生じずに意図したものは全て表示させることができた。そして視界外での遠隔操作を行なうことにも成功した。

しかし実機においては、機体の高度や姿勢角などは正しく表示されたが、位置を計測するGPSセンサの誤差が大きかったことなどから、ヘリコプタ座標と地上座標が正しく表示されなかった。それゆえ、実機においては視界外での遠隔操作は実現できなかった。今後実機での視界外での飛行を可能にするためには

- GPSセンサの精度の向上といったハード部分の改善
- 地図情報やカメラ情報の追加

といったことが挙げられる。

6 実験系

実機での実験系の構成は図4のようになっている。

本研究で使用した実機ヘリコプタは、主に農薬散布を目的とする産業用無人ヘリコプタで、機体にセンサ、オンボード・コンピュータ（OBC）、バッテリなどを搭載している。ヘリコプタの状態変数は、３次元空間x,y.zの位置、速度、加速度と、各々の軸回りの角度、角速度の計１５個である。

また本研究で用いたシミュレータは、

- ヘリコプタの機体運動の計算式
- コントロール部

からなり、その実験系は実機におけるそれとだいたい同じだが、コマンドやセンサ情報などの送受信は有線で行なっている。

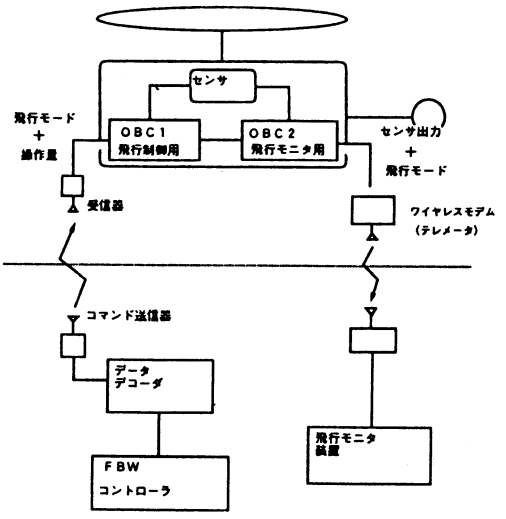


図 4: 実機での実験系

7 実験結果

本研究で作成した FBW コントローラと飛行モニタリングシステムを用いて、視界外での遠隔操作をシミュレータ上で行なった。その時のデータを図 5に示す。

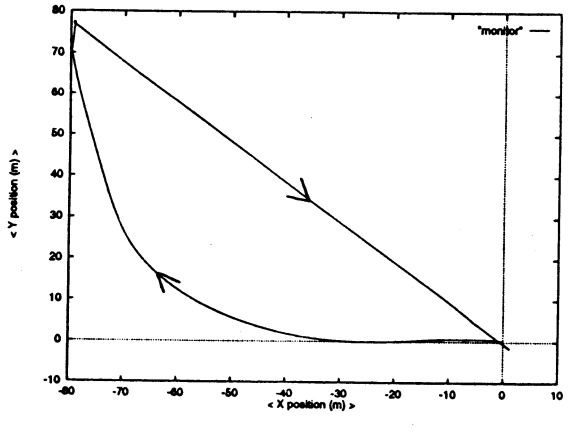


図 5: 飛行モニタリングシステムを用いての飛行 (軌跡)

これは原点 (0,0) を出発地点として目標地点 (-80,80) まで行き、再び出発地点に戻ってくるという飛行を行なったものである。この過程においてどの飛行モードにはいっているかというと

前進→右旋回→前進→停止→ホバリングターン→前進→停止

という流れになっている。なお目標地点の近傍では停止や低速移動を繰り返して位置を合わせている。

8 結論

本研究では視界外での無人ヘリコプタの遠隔操作を目的に

- FBW システムの改良
- 飛行モニタリングシステムの構築

を行なった。FBW システムの改良については、方向や速度を与えるスティックを改良したことにより操作時の安定性が増し、ホバリングターン用のダイヤルも使用せずにすむようになり、操作性が向上した。またソフト面でも目標値の分解能を 5 段階から 1 3 段階に増やしたことにより、より細かい操作が可能になった。

飛行モニタリングシステムに関しては、シミュレータ上ではそのモニタを見れば、視界外での単純な飛行を行なうことが可能になった。

今後の課題としては、実機における飛行モニタリングシステムを確立するということが挙げられる。

参考文献

[1] 菅野道夫, 「ファジィ制御」, 日刊工業新聞社, 1988

[2] 加藤、今永, 「ヘリコプタ入門」, 東京大学出版会, 1985

[3] 斉藤 祐士、平野 勲、菅野 道夫, 「ファジィ理論を用いた無人ヘリコプタの飛行制御」, 第 9 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 p.p37-40

[4] 赤木 宏文、谷 繁幸、菅野 道夫, 「無人ヘリコプタによる知的飛行制御」, 第 1 0 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 p.p745-748

[5] 谷 繁幸、中村 宗徳、菅野 道夫, 「無人ヘリコプタの知的ナビゲーション」, 第 1 2 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 p.p589-592

問い合わせ先：〒2 2 6
横浜市 緑区 長津田町 4 2 5 9
東京工業大学 知能システム科学専攻
菅野研究室 影山 暁久
Tel 045-924-5645 (内 5645)
Email: kageyama@fz.dis.titech.ac.jp

THA2-2

GPS及び、画像情報を用いた無人ヘリコプタの知的誘導制御

Intelligent Navigation for an Unmanned Helicopter Using GPS and Image Imformation

中村　心哉　　上地　正昭　　菅野　道夫

Shinya Nakamura　Masaaki Uechi　Michio Sugeno

東京工業大学総合理工学研究科知能システム科学専攻

Department of Computational Intelligence System Science of Tokyo Institute of Technology

Abstract: This paper first gives a compensation method for nonlinearity of helicopter with fuzzy controler. Then it suggests GPS-guided navigation system that leads an unmanned helicopter to its destiantion. It olso suggests a control method of an unmanned helicopter to track a moving object.

1. 序論

ヘリコプタはその操縦の難しさからパイロットにかける負担が大きい。そこで、菅野研究室では1988年以来無人ヘリコプタの研究が行われてきた[1,2,3,4,5]。

昨年度までに前後進、旋回離着陸等の基本的な飛行はほぼ完成し、本年度はより滑らで、正確な制御を可能にすること、またこれに加えて、より上位の目的に対応することを目的とした。

実機実験で用いたヘリコプタはヤマハ発動機（株）社製シングルロータヘリコプタのR-50である。全長はおよそ3.7mであり、主に農薬散布などに日本全国宏く使われている。現在、このR-50に速度センサ、加速度センサ、高度計、D-GPS位置センサ等をとりつけ、X,Y,Z軸方向の位置、速度、加速度、および、3軸回りの角度、角速度の、制御に必要な15個の状態変数を観測できるようになっている。ヘリコプタの操作には、前後方向を操作するエレベータ、左右方向を操作するエルロン、上下方向を操作するコレクティブまた、機首を左右に向けるラダー、エンジンの出力を調整するスロットルの計5つの操作が必要である。

本実験では、各種センサから得た15個の状態変数から5つの操作量全てを計算し、与えている。その際、菅野研究室で開発されている無人ヘリコプタには独特の階層構造用いられ、各々の飛行モードに対する適当な飛行制御構造が呼びだされるようになっている[1,2]。

2. ファジイ制御によるヘリコプタの非対称性補償[6]

ヘリコプタは外乱の影響を受けやすく、その形状による外乱の影響の非対称性と、動的に不安定であること、さらに、軸干渉があることから非線形特性をもつ。本研究では、ヘリコプタの各制御器にには理想的なトリム値を与え、各ファジイ制御器のルールによってのみ、非対称性補償を行うことを試みた。本論では、紙面の都合によりラダー制御器についてのみ説明し、その他のエレベータ、エルロン、スロットルについては文献　を参照して欲しい。また、実験はすべてシミュレータ上で行った。

2.1 ファジイ制御器について

ヘリコプタのZ軸回りのヨー角の回転制御を行うRudder制御器は図2.1のような構造をしている。R_ψは目標角度でありψ, $\dot{\psi}$はそれぞれセンサから送られてきたヨー角、ヨー角速度の値である。またGYAW,GDYAWはそれぞれ角度、角速度に関するスケーリングファクタであり、ファジイ制御器への入力を正規化している。GRUDは出力ゲインであり、Trudはラダーに関するトリムである。トリムの値はシミュレーション実験を繰り返し行い完全に調節してある。

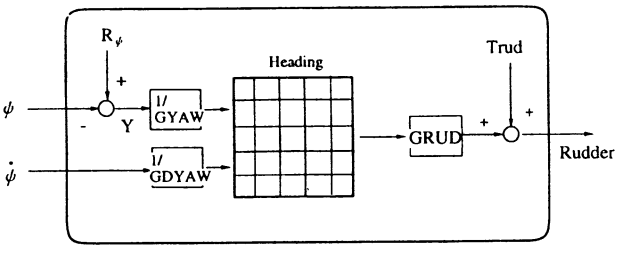


図2.1　Rudder 制御器

2.2 ファジイ制御器の改良

まず、制御器の中味を完全な線形制御を行うようにルールを定め、PD制御の場合と同じにする。

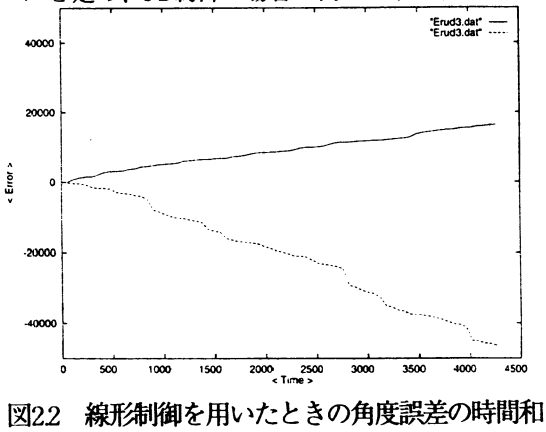


図2.2　線形制御を用いたときの角度誤差の時間和

その状態でランダムな強さ、方向の風をシミュレータ上で発生させ、ホバリング状態で飛行しているヘリコプタに与える。その時の、一定時間ごとの角度のずれを左右それぞれの方向に分けて和をとる。線形制御を行った場合に、約10時間飛行させた時の左右方向の角度のずれの時間和を、図2.2に示す。次に、ルールに非線形性を入れ、入出力特性を図2.3のようにした場合について、先の実験と同じことを行い、角度のずれの時間和をとる。その結果を図2.4に示す。

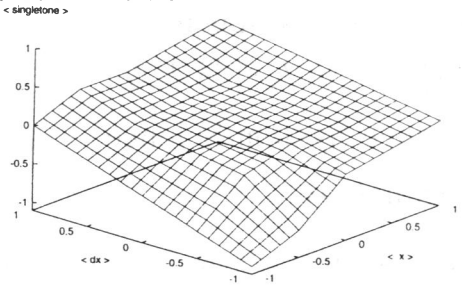


図2.3　新しいRudder 制御器の入出力特性

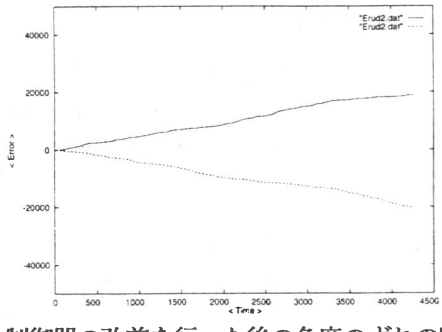


図2.4 制御器の改善を行った後の角度のずれの時間和

2.3　シミュレーション結果の検証

図2.2と図2.4を比べて見ると、制御器の改善を行ったことで、Rudderの左右のぶれがほぼ均等になったことがわかる。これにより、ファジイ制御器の非線形制御に対する有効性が示された。

3. GPSナビゲーション飛行システムの構築[6]

3.1　GPSナビゲーションについて

昨年度、谷の研究[5]により、GPSナビゲーションの基本的な枠組みとその可能性が示された。本章では、実際の飛行でメインとなる前進飛行と旋回飛行を中心とした実用的なGPSナビゲーション飛行システムを構築し、その有効性の検証を行う。本稿ではシステムの概要および、シミュレータによる実験結果の一部を示す。

3.2　システム概要

本稿では、新しいGPSナビゲーションシステムとして図3.1で示すナビゲーションシステムを構築した。

本年度構築したシステムの基本要素は

①補間高度制御

②減速制御

③自律旋回飛行

の３つである。まず、①によって今までの２次元のナビゲーション飛行から、実用的な３次元ナビゲーション飛行が可能になった。また、菅野研究室が独自にもつ階層型制御構造を有効に生かすために、大まかなナビゲーションは③の旋回飛行を用い、目標地点にさしかかったときには②の減速制御を自動的に判断し行う。さらに、最終的な位置調整は従来の前後進、左右進を組み合わせた飛行を用いる。本研究では、手動で与えられた経由点と、目標地点に対し、自動的に高度制御、および、旋回→減速→微調整　を判断し飛行するところまでを行った。評価基準は主に目標地点までの到達時間とした。よって、風の向き、乗り心地、経済性等は考慮に入れていない。

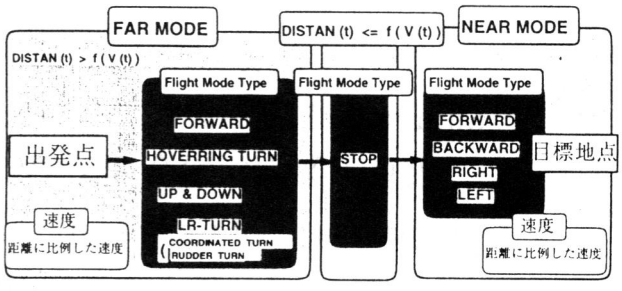


図3.1　GPSナビゲーションシステムの構成

減速制御を始めるタイミングは、残りの距離D、現在の速度V、および、定数a,b,cを用いた次の条件を満たしたときである。

$$(\text{残りの距離}) < aV^2 + bV + c$$

この関係は、シミュレーション実験を繰り返す中で経験的に求めたものである。

GPSナビゲーション飛行時の目標飛行経路は出発地点、経由点、および、目標地点の関係から推論される。経由点を通過する旋回時の旋回半径は、前進目標速度から求める。また、旋回開始点は出発点、経由点、目標地点、および、目標旋回半径から求めれれる。自律旋回飛行時には、これらのパラメータをもとに旋回飛行に切り替えられ、目標飛行経路に沿った飛行が可能になる。

3.3　実験結果

出発地点、経由点、目標地点、および、巡航速度を与えた時のシミュレータ上の飛行結果を図3.2に示す。実機実験も同様の実験を行い一応の成果を収めているが、現在用いているGPSの精度が飛行中に悪くなり、およそ１０ｍの精度しか保証できない中で、実験場が70m四方と狭く十分な実験ができずこれからの課題となっている。

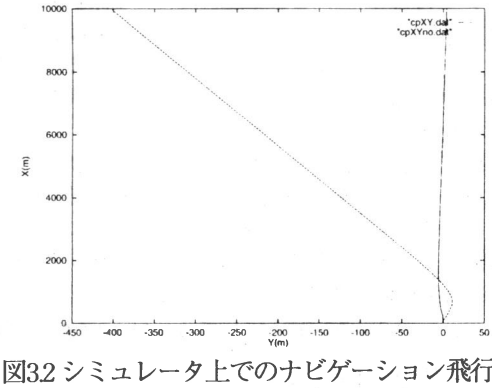


図3.2 シミュレータ上でのナビゲーション飛行結果

4.　カップリング補償[6]

ヘリコプタは

①ある操作がそれ以外の軸に対しても影響を及ぼす

②速度が出てきた場合相対風が大きくなり、メインロータ・テールロータに入る空気の量が変化し、その結果揚力も変化するために目的としない運動が起こる

というカップリングを起こす。パイロットは予備知識に基づきあらかじめフィードフォーワード操作により対処しているが、菅野研究室の無人ヘリコプタは、加速度、

角速度のフィーバック制御を行っているため、カップリングの考慮の必要はないと考えられきた。しかし、赤木の研究[2]、谷の研究[5]により、コントローラによるフィードバック制御においてもその考慮の必要があることが示唆された。本研究では通常の前進飛行と上昇飛行に対する新たなカップリング補償の手法の提案を行う。本稿では前進時のカップリング補償の手法について、シミュレーション結果の一部とともに示す。

4.1 前進飛行時のカップリング補償

本研究では前進時のAileron,Rudderに対するカップリングと、Throttleに対するカップリングの補償を別の手法で行うことを考えた。

4.1.1 ElevatorからThrottleへのカップリング補償

昨年度までの前進時の補償手法[5]を見直し、新たなカップリング手法として、Pitch角を用いることを試みた。その構造を図4.1.1に示す。

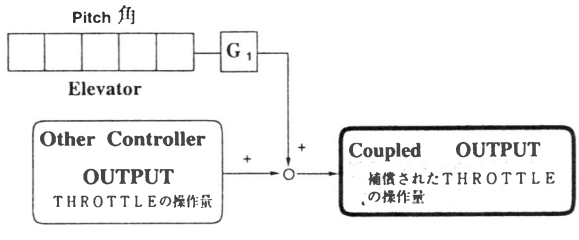


図4.1.1 前進飛行時のThrottleへのカップリング補償の構造

4.1.2 ElevatorからAilron,Rudderへのカップリング補償

今回提案する制御構造を図4.2.1に示す。昨年までは前進速度に比例する補償を行ってきたが、実験を繰り返すなかで、むしろ、速度の２乗に比例させた補償のほうが効果的なことが分かった。また、Throttleの影響も受けていることがわかり、構造に加えている。このカップリング補償を用いた前進飛行のシミュレーション結果を、補償なしの場合とともに図4.2.2に示す。

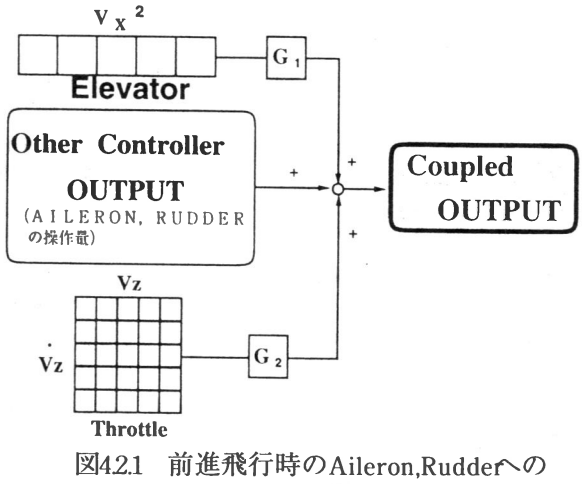


図4.2.1 前進飛行時のAileron,Rudderへのカップリング補償の構造

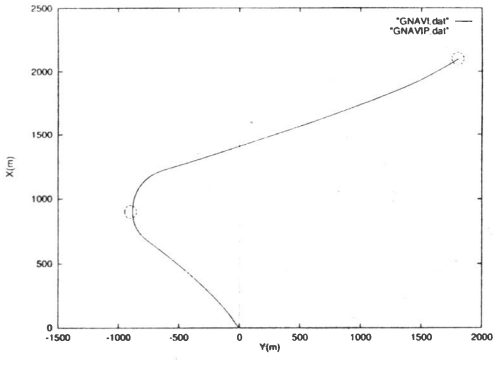


図4.2.2 前進時のカップリング補償の評価

5. 画像情報を用いた誘導制御

昨年度の研究[4]では、地上からヘリコプタに追従に必要なヘリコプタの目標速度を指示し、その目標速度に対してヘリコプタ機上で速度制御を行っていた。しかし、その制御構造が複雑であったたため、ゲインの調整が難しく、あまり良好な結果を得ることができなかった。本年度は地上から目標姿勢角を指示することで、定点ホバリング、および移動物体に対する追従制御を行った。

5.1 システム概要

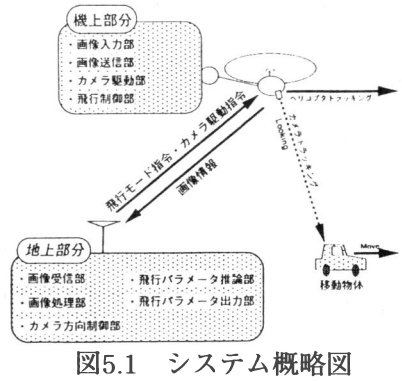


図5.1 システム概略図

図5.1にシステム概略図を示す。本システムの目的は、地上を移動する物体を上空から認識し、その移動物体にヘリコプタを追従するよう制御することである。

CCDカメラは２つのサーボによって駆動される。それぞれのサーボはカメラの向きを、パン、ティルト方向に独立に動かすことができる。このサーボの駆動指令は地上のコンピュータから行われる。実際の実験では抽出された面積が500ピクセル以上の時目標物を抽出していると判断している。このとき、上空8mの位置から2m四方の物体が見える範囲は、ヘリコプタの真下を中心としたおよそ半径12mの円内である。この境界は実験中の電波状況、日光の向き等によって影響を受けるため、一応の目安である。

地上移動物体には、キャスター付きの台車の上部に２m四方の板を取り付けたものを用いた。今回この板に2m四方の蛍光のピンク色をした布を張り付けた。

5.2 制御系

本研究に用いた手法の特徴は、移動物体の位置の検出に移動物体に自動追従しているカメラの角度から物体の相対位置を求め、その値をヘリコプタの位置制御に利用する点である。この相対位置を0にするように制御することで、移動物体に対しヘリコプタを追従させることができる。本研究で構成した制御系のブロック線図を図

5.2に示す。

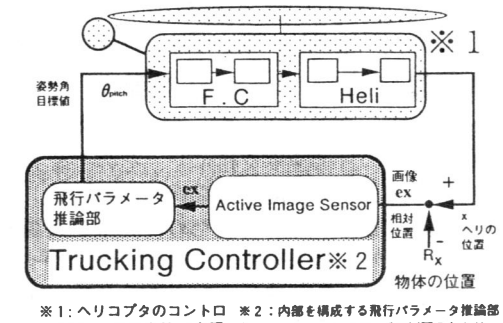
5.3 目標物に対するカメラのトラッキング制御（カメラ方向制御部）[4]

目標物に対するCCDカメラのトラッキング制御は

① 目標物の抽出および位置の検出

② 目標物に対するカメラの向きの制御

の繰り返しで行われる。本研究において目標物の抽出は目標物の色抽出により行った。カメラの向きは、常にカメラが捕えている画像の中央に目標物の面積重心がくるように制御される。制御周期は毎秒約10回である。



※1：ヘリコプタのコントローラについては文献1,2参照　※2：内部を構成する飛行パラメータ推論部とImage Sensornいついては以下のとおり

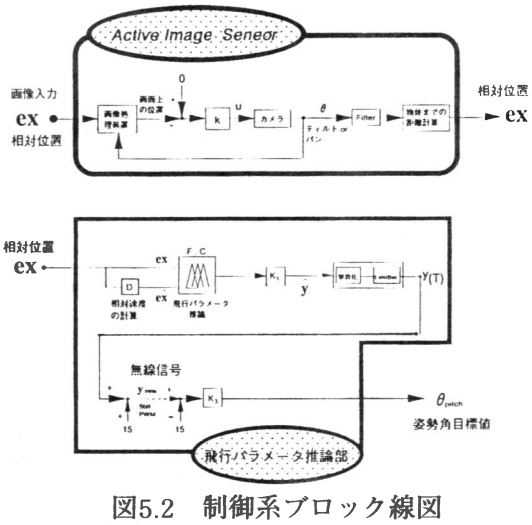


図5.2　制御系ブロック線図

5.4 飛行パラメータ推論部

5.4.1 相対速度の計算

本研究では単純に、最近3回のデータの平均値と6回前における同じデータの平均値との差分を相対速度として計算している。この方法だと約0.6秒の時間遅れが発生する。望ましくはないが、時間間隔をあまりとらないとノイズに対して弱くなる。今回の制御系において、相対速度は制御出力に対して大きな影響を与えるため、時間間隔を長めにとった。

5.4.2 目標姿勢角の計算

移動物体にヘリコプタを追従させるために、

$$\mathbf{ex}, \dot{\mathbf{ex}} \rightarrow 0$$

となるような制御系を設計する。昨年の研究[4]では、入力に $\mathbf{ex}, \dot{\mathbf{ex}}$ を用い、操作量の変化量を出力とた。これにより、速度型ファジイPI制御系を構成し、リコプタの目標速度を地上で計算しヘリコプタに指令を送っていた。しかし、この方法では調整しなければならないパラメータの数が多く、また、制御系が複雑であったため、あまり良好な結果が得られなかった。そこで、本年度の研究では入力に $\mathbf{ex}, \dot{\mathbf{ex}}$ を用い、姿勢角目標値yを出力として操作部に与えた。

5.5 移動物体に対するヘリコプタの追従制御実験

5.5.1 実験手順

ヘリコプタを自動離陸させた後、地上から8mの高さでホバリングさせる。次に、移動物体をヘリコプタの下方に移動させ、ヘリコプタに搭載されているCCDカメラにより移動物体を捉え、カメラを移動物体に対して追従制御を開始する。次に、ヘリコプタの追従制御に必要な目標姿勢角をカメラの位置情報から計算する。計算されたパラメータはヘリコプタに送られ、ヘリコプタはその指示に従って飛行する。本研究ではまず移動物体を静止させその上空での定点ホバリングを行う。続けて約20秒後に、移動物体を直進させ40m動かしたところで停止させた。このときの、移動物体に対する追従実験を行った。

5.5.2 実験結果・考察

空中を飛行するヘリコプタと地上を移動する物体との相対距離が簡単に計測できるような方法はなかったため、カメラの角度、高度から求めた物体に対する追従実験の相対位置ex,eyを図5.3に示す。このデータはカメラの追従制御の際に生じる誤差および、高度の誤差を含む。

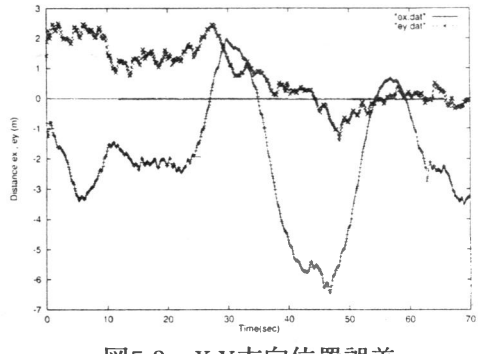


図5.3　X,Y方向位置誤差

目標姿勢角を指示するように改善したことによって、昨年度の同様の実験より大幅に制御精度が向上した。特に、昨年できなかった定点ホバリングの実験では長時間一定の位置でホバリングすることができた。

6. 参考文献

[1]斎藤　祐士、平野　勲、菅野　道夫「ファジイ理論を用いた無人ヘリコプタの飛行制御」第9回ファジイシステムシンポジウム　講演論文集p.p37-40

[2]赤木　宏文、谷　繁幸、菅野　道夫「無人ヘリコプタによる知的飛行制御」第10回ファジイシステムシンポジウム　講演論文集p.p745-748

[3]平野　勲、古津　悟、菅野　道夫「GPSおよび画像情報を用いたヘリコプタの着陸制御」第11回ファジイシステムシンポジウム　講演論文集p.p389-392

[4]中村　心哉、菅野　道夫「画像情報を用いた無人ヘリコプタのトラッキング制御」第12回ファジイシステムシンポジウム　講演論文集p.p585-588

[5]谷　繁幸、中村　宗徳、菅野　道夫「無人ヘリコプタの知的ナビゲーション」第12回ファジイシステムシンポジウム　講演論文集p.p589-592

[6]上地　正昭「無人ヘリコプタのファジイ飛行制御」平成8年度　修士論文

連絡先: 〒226 横浜市緑区長津田町4259
東京工業大学総合理工学研究科地能システム科学専攻
菅野研究室　中村　心哉
TEL: (045)924-5645 FAX:(045)924-5691
e-mail address　nakamura@sys.titech.ac.jp

THA2-3

知的運転支援による飛行機操縦システム
An Airplane Operation System by Intelligent Drive Support

安信　誠二　　足立　剛史
Seiji YASUNOBU　　Tsuyoshi ADACHI
筑波大学　構造工学系
Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba

Abstract-The existence of the system that has the function of many instruments and teaches "What is necessary to be done very now" is hoped. In this paper, the intelligent drive support system constructed by building the knowledge of the expert who drives the airplane in the computer by using evaluate fuzzy control is proposed.

1　はじめに

飛行機操縦などの大規模複雑なシステムでは，計器が多く，状況に応じた多くの動作が要求される，といった特徴がある．また，制御対象の動特性を考慮した運転が不可欠であり，特に初心者には困難である．そのために多数の計器の機能を併せ持ち，「現在量を示す」現在の計器から「今，いかに何をすべきかを指示する」知的運転支援システムの実現が望まれている．

本報告では，飛行機の運転を支援する熟練者の知識を，状態評価ファジィを使用して計算機に組み込むことにより構築した知的運転支援システムを提案する．

2　運転支援システム

2．1 運転支援システムについて

飛行機などの時間の遅れが大きいシステムほど，制御者は制御量の将来値を予測して修正を早め早めに行わなければならなければ系の安定性を保つ事ができない．この予測演算は制御動作を表す伝達関数の微分動作として表現され，制御者の負担を増す原因にもなる．補償演算を入れても一巡伝達関数は変わらないが，操作装置に微分演算を加えると，人間の発生するノイズ成分を拡大してしまう恐れがあるためにあまり使用されない[2]．この事を考慮し，知的運転支援システムを提案する．

提案する知的運転支援システムの構成を Fig.1.に示す．この図において下部は，一般的な人間—飛行機制御ループである．図のように知的運転支援システムをおく事により，人間コントローラであるパイロットに運転支援情報を与える事ができる．ここで，制御対象としての航空機をコントロールする基本的なコントロール・レベルは Navigation（航法），Guidance（誘導），Stabilization（安定化）の3レベルに分類される[3]．通常航空機には，SAS（安定増大装置）がついているので，運転支援に関して航法，誘導の2つのレベルについて支援する．

このシステムは，制御対象から状況を認識する機能を所持し，熟練運転者の知識に基づき判断した運転支援情報を，運転者に表示する．その支援情報を受け，運転者は制御対象に操作を加えていく．

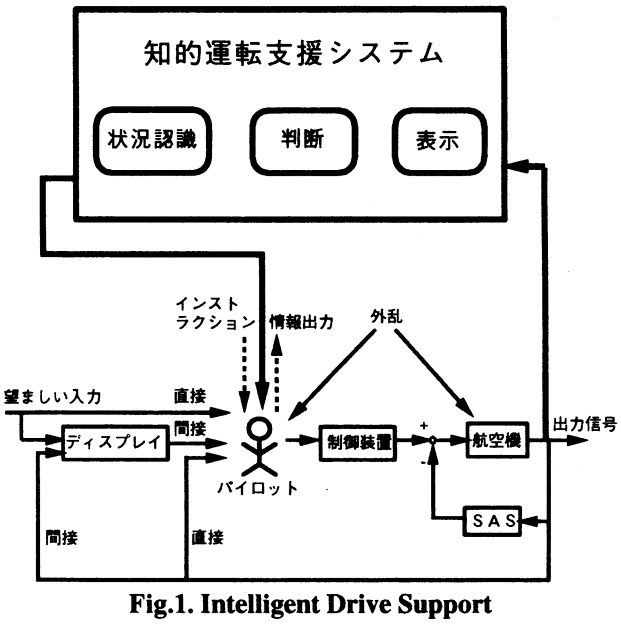


Fig.1. Intelligent Drive Support

2．2 水平飛行

2．2．1 自己位置把握

ここでは，通常航空機の誘導に使用される近くの2つの電波灯台(VOR)を使用した自己位置把握法を使用する．Fig.2.において，自分の位置 A(x3, y3) は，次式の関係がある．

$$\begin{cases} x_3 = r_1 \sin\theta_1 + x_1 \\ y_3 = -r_1 \cos\theta_1 + y_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_3 = r_2 \sin\theta_2 + x_2 \\ y_3 = -r_2 \cos\theta_2 + y_2 \end{cases}$$

飛行機は、VOR から飛行機までの絶対角度θ 1, θ 2 を得る事ができる．また，各 VOR の絶対位置(x1,y1)(x2,y2)は既知であるので，上式より(x3,y3)は把握できる．

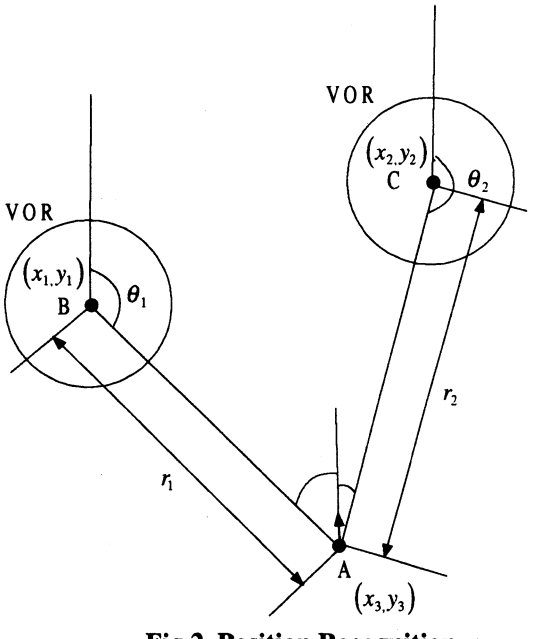


Fig.2. Position Recognition

2．2．2 途中目標の設定

電波の届く範囲は限りがあり，出発地点から直接最終目標地点に向けて飛ぶ事ができない．また，飛行機の航路は，全ての電波灯台の間に存在するものではなく，いくつかの航路は決まっている．よって，航路を外れない事を最優先に考え，また出来るだけ無駄なく行く事も同時に考える．これらの事を考慮に入れ，次の基準で途中目標を決定する．

(a)電波の届く範囲内である事
(b)現在位置から近い事
(c)最終目標に近い事
(d)動きやすい事

(b)については，出来るだけ航路どおりに行く事を考慮しており，(c)については最終目標にできるだけ近い VOR に途中目標を置く事を考えている．(d)については，なるべく動きやすいところを選ぶようにしている．

途中目標決定の手順図を Fig.3.に示す．現在位置を 2.2.1 の方法で把握し，そこから最短距離にある VOR を選択し，それを途中目標候補 1 とする．次に，ダイクストラ法を用いて途中目標候補 1 より，

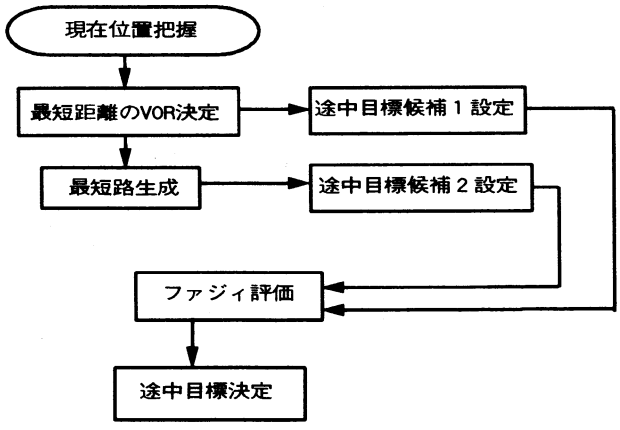
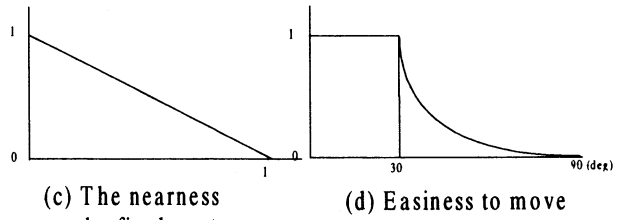


Fig.3. Structure of Temporary Target Setting

最終目標地点までの最短路を形成する．そして，途中目標候補 1 より，最終目標地までの径路上の VOR のうち，途中目標候補 1 の次の VOR を途中目標候補 2 と設定する．そして，この 2 つの VOR について以下のファジィ評価を行う．

(c)最終目標への近さ:最終目標に出来るだけ近い所｛途中目標から最終目標までの距離/現在位置から最終目標までの距離｝に途中目標を置く事を考える．
(d)動きやすさ:なるべく動きやすいところ｛飛行機の進路方向と，途中目標との角度差｝を考える．

これらの評価値の論理積(minimum)により，途中目標候補を評価し、途中目標を決定する．用いたメンバーシップ関数を Fig.4.に示す．



(c) The nearness to the final target　　(d) Easiness to move

Fig.4. Membership Function of Fuzzy Inference for Temporary Target

2．2．3 航法について

出発空港の離陸終了の地点を出発点とし，目的空港の着陸進入地点を最終目標点とする．出発点から，次のステップを用いて最終目標点まで到達する．

① 自己位置把握の設定.
② 途中目標の設定.
③ 最終目標地点（着陸開始地点）到達まで，①に戻る.

運転者が運転支援の指示に従わない場合についても，適切に柔軟な指示を出すことが可能になっている．

2．3　着陸

着陸のモデルを，Fig.5.に示す．通常，空港にはILS(Instrument Landing System)と呼ばれる精密進入用援助施設が設置されている．ILS の地上設備は，滑走路の中心線の延長面を示す VHF 帯の電波を利用したローカライザ装置(Localizer)，降下路を作り

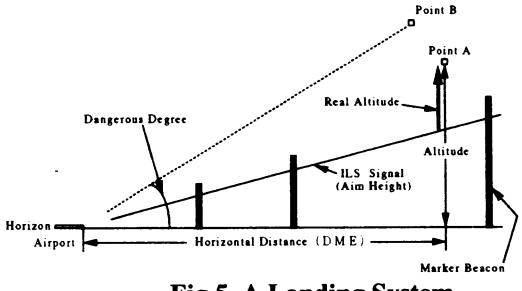


Fig.5. A Landing System

出す UHF 帯の電波を利用するグライド・パス装置(Glide Path)，および滑走路末端までの距離を示すマーカ・ビーコン(Marker Beacon)から成り立っており，それぞれが飛行機に機体が降下路に対してどの位置にあるかということを示している．

熟練パイロットの着陸戦略として，次のように言語則を決定した．

例えば，Fig.5.の A 点における言語則としては，

- もし，目標の高度よりも実際の高度が高く，垂直速度が低いならば，昇降舵はそのまま．
- もし，目標の高度よりも実際の高度が高く，垂直速度が中位ならば，昇降舵を小さく下げる．
- もし，目標の高度よりも実際の高度が高く，垂直速度が高いならば，昇降舵を大きく下げる．
- もし，高度が高いならば，フラップを３０°にする．

などが挙げられる．

これを基にして，着陸に関して制御則を立てた．

・ If Real Alt-Desirable Alt is P and Differential Alt is L then Apply Elevator M

・ If Real Alt-Desirable Alt is P and Differential Alt is M then Apply Elevator NS

・ If Real Alt-Desirable Alt is P and Differential Alt is H then Apply Elevator NB

・ If Altitude is High then Flap is 30°

(A 点におけるもの，全ルールは 13 個)

のようになる．

これについて垂直速度，目標高度までの高度差について，メンバシップ関数に書き下すと，Fig.6.のようになる．これにより，状態評価ファジィ推論(min-max.重心法）を使用し，操作量を決定していった．

このように，ILS 信号を目標の高度とし，現在の

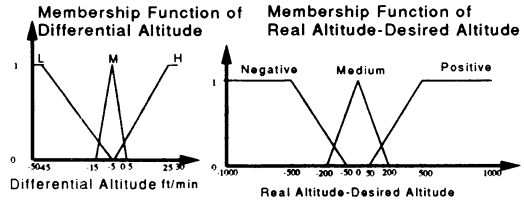


Fig.6. Membership Function

高度から目標の高度を減算した実際の高度の情報と，高度の１回微分である垂直速度(Vertical Speed)から，適切な操作量をファジィ推論により求め表示する．垂直速度については，垂直速度計が負の時であっても，それが定常的に負なのか，振動の過程の負なのかによって意味がちがう．よって，垂直速度についても，１つ前の垂直速度計の値と現在の垂直速度計の値(垂直加速度)を比較することによって，より振動を増幅する事のないような設計にしてある．これにより，本システムは計器情報の表示から一歩進んだ支援を操作者に与えることができる．

また Fig.5.のＢ点のように，着陸に危険な位置にいる時には，着陸回避 (Go-Around) を促すことを行う．

2．4　システム構成

知的運転支援システムの構成図を，Fig.7.に示す．知的運転支援システムは，状況認識機能，判断機能，表示機能を所持している．フライトシミュレータに

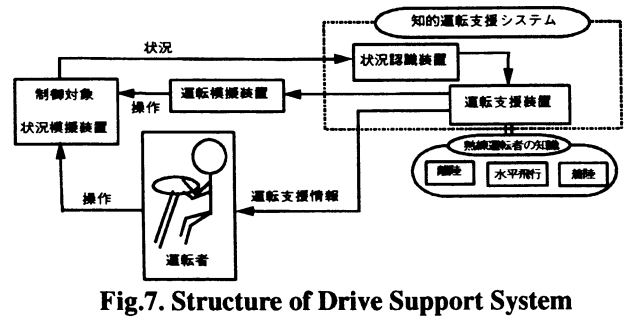


Fig.7. Structure of Drive Support System

より状況を模擬し，状況認識は画像認識を用いる事によって行われる．また運転模擬装置により，運転者が運転支援指示通りに操作した場合の運転模擬を再現できるようになっている．

4　実験と考察

4．1　実験

パーソナルコンピュータ上のフライトシミュレータ（マイクロソフト社製）を用いて，以下の実験を行った．

（1）誘導実験：飛行機操縦の初心者の離陸から，所定の空港の滑走路へ着陸するまでを，本支援システムにより誘導する．

（2）着陸実験：

(a)運転模擬実験：運転模擬装置を用いて，知的運転支援システムの支援情報通りに運転した場合の着陸実験を行う．

(b)運転実験：知的運転支援システムを用いて、人間による着陸実験を行う．

4．2　実験結果の検討

（1）誘導実験では，運転支援の指示に従った操縦により，初心者でも容易に目標空港まで到達し，着陸ができることを確認した．

（2）(a)着陸の運転模擬実験については，Fig.8.に示すように滑らかな軌跡を描いて着陸できる事を確認した．また，Fig.9.に示す垂直速度の図からも適切な範囲に垂直速度が収まっている事がわかる．これにより，提案する知的運転支援システムの有効性が確認できた．

(b)知的運転支援システムを使用した人間による着陸実験についても，滑らかな軌跡を描き着陸できる事を確認した．

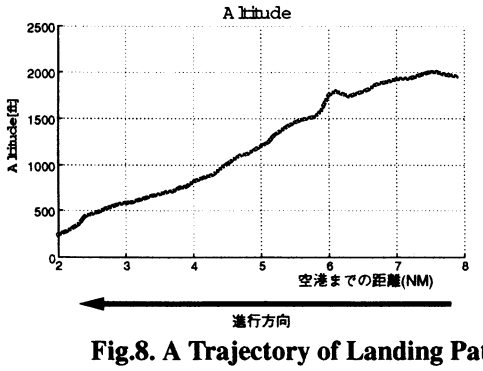


Fig.8. A Trajectory of Landing Path

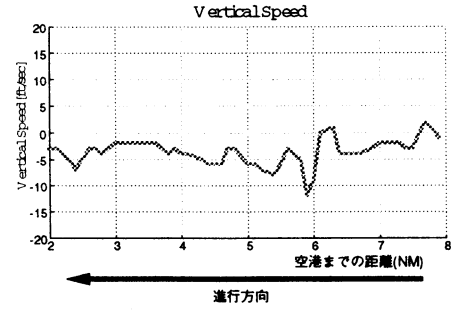


Fig.9. A Trajectory of Vertical Speed

5　おわりに

本報告では，パイロットの運転に関する知識を，状態評価ファジィ推論を用いて計算機に組みこみ，支援情報を出力する知的運転支援システムを提案した．そしてフライトシミュレータを用いた運転模擬実験，実際の支援実験によって，本システムが離陸から着陸までもれなく支援する事が可能であり，その有効性を確認した．

提案した知的運転支援システムは，様々な場面において適切な支援情報提供が可能であり，飛行機などの運転の難しい対象における人間-機械系の実現として有効である．

参考文献

[1] 安信，”ファジィ工学”，昭晃堂(1991)

[2] 林他，“人間・機械システムの設計”，人間と技術社(1971)

[3] 金井，”フライトコントロール”，槙書店(1985)

[4] 岡田，ケッペン，”ニューロ，ファジィ融合システムによる飛行機の自動着陸システム”，11th Fuzzy System Symposium(1995)

[5] F.H.Hawkins，”ヒューマンファクター航空の分野を中心として”，成山堂書店(1992)

[6] 安信,足立，“知的運転支援による飛行機操縦システムの提案　”，12th Fuzzy System Symposium,pp803-804,(1996)

[7] Seiji Yasunobu and Naoki Minamiyama. “A Proposal of intelligent vehicle control system by predictive fuzzy control with hierarchical temporary target setting.” *In The Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems(FUZZ-IEEE'96),pp.873-878,1996*

[連絡先]

〒３０５　茨城県つくば市天王台１－１－１

筑波大学構造工学系安信研究室　足立剛史

TEL 0298-53-6186

E-mail:adachi@esys.tsukuba.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THA2-4

複数の水素発生装置と消費装置における水素消費モデルとファジィの複合による水素バランス制御

Multiple Control Systems Using Hydrogen Consumption Models Compensated with Fuzzy Reasoning in Petroleum Plant

福山 雅弘*1　江山 優*1　小林 隆広*1　一色 真吾*1　谷 哲次*2

Masahiro Fukuyama　Masaru Eyama　Takahiro Kobayashi　Shingo Isshiki　Tetsuji Tani

*1 出光興産株式会社　兵庫製油所

Hyogo Refinery, Idemitsu Kosan Co., Ltd.

*2 出光興産株式会社　製造部

Manufacturing Department, Idemitsu Kosan Co., Ltd.

Abstract : We describe multiple hybrid control systems using fuzzy control technique. The control systems consist of two components; (1) the hydrogen purity control system, (2) the hydrogen pressure control system. The hydrogen purity control system consists of two parts; (1) one calculates average hydrogen-supply amount for a process unit according to the statistical hydrogen consumption model, and (2) the other compensates the average hydrogen-supply amount using fuzzy reasoning. Applying the multiple hybr d control systems to the actual plant, the systems show good advantages of (1) reducing operator's interaction, (2) reducing energy consumption, and (3) reducing CO_2 generation, as a result.

1. はじめに

石油精製では、品質向上のために、ガソリン原料、灯油・軽油や重油から、硫黄分を水素を使用して硫化水素の形で脱硫する操作が、同時並行的に行われている。これら水素を消費する装置群と低純度水素を発生する装置や不足する水素を製造する装置とがパイプラインで複雑に結ばれている。

望まれる運転とは、最低限度の水素を製造して、必要水素純度と必要水素量を確保することである。ところが、対象が大規模であり、（1）発生水素純度や必要水素量の把握が困難である、（2）操作に対する結果の把握に時間遅れがあるなどの理由から、依然として熟練運転員の手動運転に頼って、水素の発生・製造と消費バランスを調整していた。

そこで、この熟練運転員の運転方法を観察し、統計手法によるモデルとファジィ制御を組み合わせた制御方法を開発し、各水素消費装置ごとに設置することにより自動化を行った。制御システムの開発にあたっては、石油精製は典型的なプラント産業であり、PID制御を多く保有してるため、既存のPID制御との調和を考慮した[1,2,3]。

2. 装置の概要と問題点

2.1 装置の概要

製油所の水素ガスに関連する装置は複雑に結ばれているが、発生側2装置と消費側2装置を代表として選択する（図1）。図1において、水素発生装置には、低純度水素発生装置と高純度水素製造装置があり、主な消費装置は脱硫装置Aと脱硫装置Bである。低純度水素発生装置からの水素は、ガソリン生産の副産物として発生するため、純度は低いが、安価である。一方、高純度水素製造装置からの水素は、純度は一定で高いが、多大な製造コストが必要となる。

低純度水素は純度が低く、他の不純物を含んでいることなどから、低純度水素単独では、脱硫装置Aや脱硫装置Bを運転することはできない。そこで、各装置を必要とする純度以上に保つために、高純度水素も併用する。

各脱硫装置では（1）水素をある純度以上に保つ、（2）水素の圧力をある所定の値に保つことが要求される。さらに、（3）過剰な水素は、燃料ガスとして各脱硫装置から抜き出され消費される。

コストから見ると、割高な順に、高純度水素、低純度水素、燃料ガスであり、水素を燃料ガス

として使用することはロスとなる。したがって、水素バランスの最適化制御とは、種々の装置制約を加味しながら、低純度水素を最大限に脱硫装置Aや脱硫装置Bへ供給し、高純度水素の製造量を低減することである。

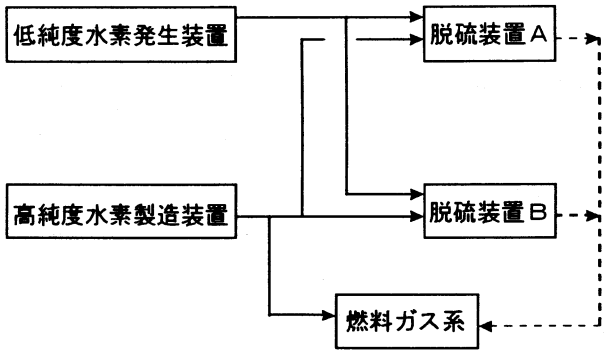


図1 水素バランス関連装置

2.2 制御上の問題点

前節で述べた水素の供給を自動化するためには、次のような問題点がある。

1）消費側装置群の処理量や処理原料の組成が変わり、そのため必要水素量が変化するが、この必要水素量の正確な予測が困難である。

2）低純度水素発生装置の運転の変更に伴い、低純度水素の純度が大きく変わる。系が大きいために、供給水素の純度は時間遅れを持って変化する。しかし、その純度変化を事前には予測できない。

3）消費側装置への高純度水素や低純度水素の供給量を変更しても、その結果（装置での水素純度と圧力）を観測できるまでに数時間の時間遅れがある。

4）複数の水素発生装置、消費装置が複雑に関係しており、その制約を加味しながら全体のバランスを制御する必要がある。

したがって、自動化が難しく、熟練運転員の手動運転に頼っており、過剰の高純度水素を製造していた。

3. 制御の構築

前節で述べたような問題があるにもかかわらず、熟練運転員は装置の状態を認識し、経験、ノウハウを活かして制御を行っている。そこで現場の熟練運転員の運転方法を観察して、制御方法を構築することを試みた[4,5,6]。

3.1 運転員の制御方法

脱硫装置Aでの調整を例にとると、処理量の増加などで必要水素が増えた場合、

手順1： 装置の水素純度を保つため、低純度水素の装置Aへの供給量を経験を基に増加させる。

手順2：このままでは装置の圧力が低下する。そこで、圧力を保つ分だけ高純度水素の供給量を増加させる。圧力は保持できるが、今度は純度が上がりすぎる。

手順3：手順2での結果を観て、純度を下げるべく低純度水素を供給する。それに合わせて、高純度水素の供給量を下げる。

さらに、低純度水素の純度が低下した場合は、

手順4： 装置への影響を事前に加味して、低純度水素の供給量を下方修正する。

このような手順を、刻々繰り返していた。

したがって、これらの手順をまとめると

1）純度調整と圧力調整が同時に必要である。

2）純度調整は、常に所定の値に保ち得る範囲で、低純度水素を供給する。

3）圧力調整は、高純度水素の供給量を調節し、常に所定の値に保つ。

特に、水素純度を制御するためのノウハウは、次の2点である。

1）概略の低純度水素の供給量を予測すること。

2）消費装置の水素純度や低純度水素の純度変化を見て、概略の低純度水素の供給量を適切に修正すること。

3.2 構築したシステムの概要

水素バランス制御システムの全体は、各脱硫（水素消費）装置に配置した純度制御システムと圧力制御システムから成る（図2）。

純度制御システムは、装置の純度が保持できる範囲で、低純度水素を脱硫装置に供給する。圧力制御システムは、装置の圧力が保持できる範囲で、高純度水素の製造量を制御して、脱硫装置に供給する。圧力制御システムは、分散計

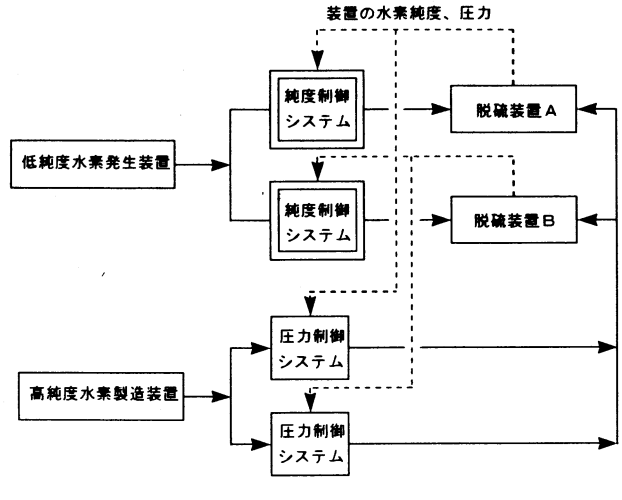


図2 制御システム全体図

装計算機（DCS） レベルの一般的な圧力制御（PID制御）を使用した。

以下、特徴的な純度制御システムについて述べる。

3．3 純度制御システムの概要

脱硫装置Aの純度制御を例示する。純度制御システムは、装置Aでの水素消費量全体を予測し、その全水素消費量のうち低純度水素でまかなうべき標準的な量を算出する基準量算出器と、水素純度などの変化を観測して標準的な低純度水素供給量を適切に修正する補正量算出器から成る[7,8,9]（図3）。そして、この低純度水素供給量を算出して、PID制御の制御目標値（セットポイント）とする。

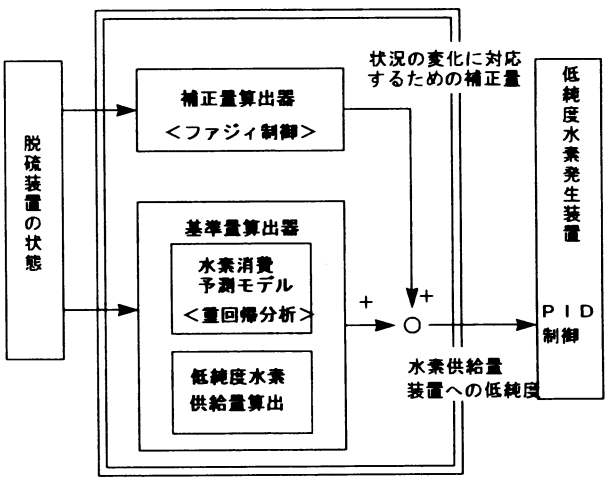


図3 純度制御システム

3．4 純度制御システムの各ブロックの機能

1）水素消費予測モデル部：時刻 t における、単位処理量当たりの平均水素消費量 $x(t)$ を算出する。式（1）は、定常状態の運転データから重回帰分析を用いて算出する。

$$x(t) = aX(t) + \cdots + bY(t) + c \qquad (1)$$

ただし、変数 $X(t)$, $Y(t)$ は、処理量、原料の含有硫黄分などの運転変数であり、a, b, c は重回帰分析から求めた定数である。

2）低純度水素供給量算出部：時刻 t における低純度水素供給量 $y(t)$ は、必要水素量から観測可能な高純度水素供給量を差し引いて求める。

$$y(t) = x(t)\ r(t) - s(t) \qquad (2)$$

ただし、$r(t)$ は処理量、$s(t)$ は高純度水素供給量である。

3）補正量算出器： 供給する低純度水素の純度が低下（上昇）した場合は、装置に送る低純度水素の量を、ファジィ推論を用いてフィードフォワード的に減少（増加）させ、供給水素の純度を一定に保つ。さらに、装置の水素純度が低下（上昇）した場合は、低純度水素の供給量を減少（増加）させ、装置の水素純度を一定に保つ。

補正量算出器でのファジィ制御ルールは熟練運転員とのヒヤリングを基に作成した。作成したファジィ制御ルールを表1に、そのメンバーシップ関数を図4に示す。推論方法は、簡略化法を用いた[1,10,11]。

時刻 $t+\Delta t$ の低純度水素供給量 $s(t+\Delta t)$ は、次のように求める。

$$s(t+\Delta t) = y(t) + z(t) \qquad (3)$$

ただし、$z(t)$ は時刻 t でのファジィ推論結果の値である。また、Δt は経験を基に5分毎とした。

MH \ PH	PB	ZE	NB
PB	PB	NS	ZE
ZE	PS	ZE	NS
NB	ZE	NS	NB

PH：脱硫装置の水素純度

MH：低純度水素の純度変化

表1 ファジィ制御ルール

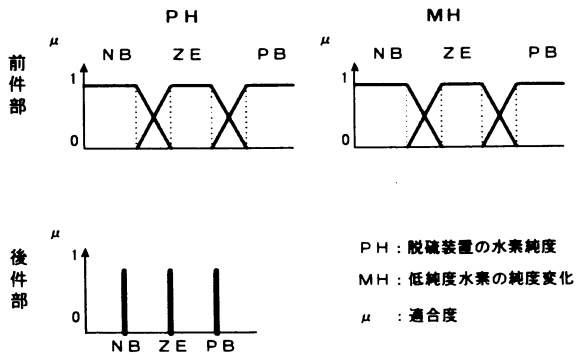


図4 メンバーシップ関数

4．制御結果

この制御システムを出光興産(株) 兵庫製油所の水素バランス制御に適用した。図5は、脱硫装置Aにおける制御導入前後の水素純度の状況である。

制御システムを導入後、従来熟練運転員が行っていた以上に、水素純度を目標値に張り付ける事が可能となり、低純度水素の使用量を増加することができた。その結果、高純度水素の製造量を低減することができ、大きな省エネルギー効果と環境保全に貢献ができた。

結果を比較すると、制御システム導入前後の目標水素純度に対する偏差は

・導入前水素純度偏差：＋0.8 ～ ＋6.6 %

・導入後水素純度偏差：－0.3 ～ ＋0.3 %

となった。

さらに、脱硫装置Ｂにおいても同様な結果を得ることができた。

この制御システム導入の効果[12]をまとめると、

1）調整が自動化でき、熟練運転員の介入が無くなった。

・省力化効果：操作回数　2,000回／年

操作時間　170時間／年

2）安価な低純度水素を有効活用した。

・省エネルギー効果：重油換算2,400kl／年

3）高純度水素製造装置の稼動を低減した。

・CO_2ガス発生減：7,000ton／年

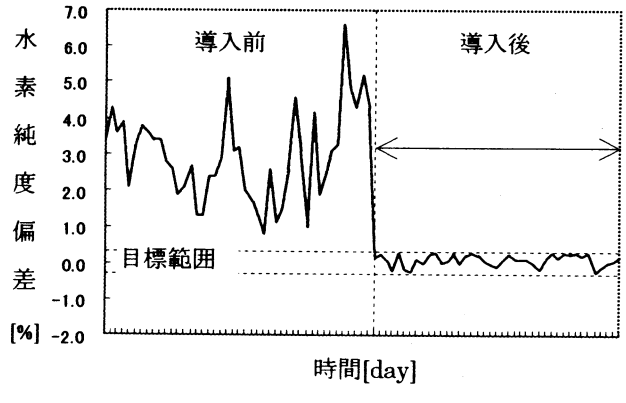


図５　制御システム導入前後の状況

５．　おわりに

統計モデルに対して、ファジィ推論を用いてそれをフィードフォワード的に補正し、結果をPID制御の目標値にする方法を開発し、熟練運転員の手動調整に頼っていた水素バランス制御を自動化した。

PID制御を、ファジィ制御と組み合わせることにより、大規模で、時間遅れが大きく、非線形の強い対象に活用できた。さらに、省力化、省エネルギー、環境保全（CO_2ガス発生の抑制）に効果があった。

参考文献

[1] 市橋、田中：ＰＩＤとファジィのハイブリッド型コントローラ、第４回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp. 97-102 (1988)

[2] 谷、田中：ファジィ制御とＰＩＤ制御の複合系の構成とその加熱炉温度制御への適用、計測自動制御学会論文集、Vol. 27、No. 11、pp. 1274-1280 (1991)

[3] 安信、殖栗：未来の目標値を考慮した予見ファジィ制御方式の提案、第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp. 577-580 (1996)

[4] 鎌田憲幸編：応用事例部門第２編　化学工業、ニューロ・ファジィ・ＡＩハンドブック、計測自動制御学会編、pp. 935-998、オーム社 (1994)

[5] 伊藤修：プロセス制御分野におけるファジィ制御の意義と役割、日本ファジィ学会誌、Vol. 7、No. 1、 pp. 19-34 (1995)

[6] 計測自動制御学会：制御技術動向調査報告書、制御技術部会制御技術調査ＷＧ (1996)

[7] 柳下、伊藤、菅野：ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用、システムと制御、Vol. 28、No. 10、pp. 597-604 (1984)

[8] 芹澤貴清：ファジィ制御と最適制御のコンビネーション制御について、オートメーション、Vol. 33、No. 6、pp. 61-66 (1988)

[9] T. Tani, S. Murakoshi, M. Umano: Neuro-Fuzzy Hybrid Control System of Tank Level in Petroleum Plant, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 360-368 (1996)

[10] 水本：ファジィ制御に対する改善法(5, 6, 7)、第3回、第4回、第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp. 153-158 (1987)、pp. 91-96 (1988)、pp. 499-504 (1989)

[11] 前田、村上：自己調整ファジィコントローラ、計測自動制御学会論文誌、Vol. 27、No. 2、pp. 191-197 (1988)

[12] 小林、他：制御性改善による省エネルギー、省エネルギー、Vol. 49、No. 3、pp. 48-52 (1997)

連絡先

〒299 千葉県市原市姉ケ崎海岸２－１、出光興産(株)

製造部システム技術センター　谷 哲次

TEL 0436-61-6965　FAX 0436-61-0885

THA3-1

パネルディスカッション「工学以外の分野にファジィ理論を普及するには」

What can we do to spread the fuzzy-set theory as a research tool in humanity or social sciences?

コーディネータ：小田哲久
Tetsuhisa Oda:Coordinator
愛知工業大学
Aichi Institute of Technology

Fuzzy-set theory has been considered to provide some new models for humanities and social sciences. Although many researchers of fuzzy-set theory have believed so, it would not have been so easy for most researchers in humanities and social sciences to apply it to their problems. This panel discussion is planned to clarify the possible factors which may have prevented these researchers from applying the theory. The panelists are: Prof. Mitsuru Kuroda (Aoyama Gakuin Univ.) , Prof. Michie Doi (Nara Woman's Univ.) and Prof. Kenji Kosaka (Kwansei Gakuin Univ.).

パネルディスカッションへの期待

ファジィ理論は，元来，人間の思考や行動をモデル化することを意図して開発されたはずである．しかしながら，様々な原因で，工学以外への普及が遅れている．人文社会科学の研究者にファジィ理論をとりあげてもらえない，という側面と，実際問題への応用の為の条件が整っていないなど，様々な要因が予想できるが，いずれにせよ，導入する上で，何らかの障害があるものと思われる．

今回，富山大学を会場として，ファジィシステムシンポジウムが開催される運びとなった．ノンエンジニアリングファジィ研究会では，この機会を捉え，「工学以外の分野に，ファジィ理論を普及するには，どういう方策をとるべきか」を議論する場を設けることになった．形式はパネルディスカッションとし，３人のパネラーに１５分間づつ話題提供をしていただき，その後，約３０分，フロアから自由に発言していただく，という企画をたてた．パネラーの方には，人文社会科学あるいは境界領域の専門家の方で，しかも，ファジィについての造詣が深い方をお迎えした．パネラーには，なぜ，自己の専門領域にファジィ理論（ないし手法）が導入されにくいか，それを解決する為には，ファジィ理論研究者が具体的に何をどうすべきか，等を全体共通テーマとしてお話しいただけるよう，お願いした．問題点の指摘だけでも議論のスタート点となるし，各専門領域独自の話題，例えば，自己の専門領域では，こんなあいまいさがある，とか，現在の方法論では，どういうあいまいさが取り扱えない，あるいは，こんな手法があれば，こういう種類の問題が解決できるのだが，等々，ファジィ理論の専門的な研究者では気がつかない問題を指摘いただく事も有意義である．

人間そのものと，人間の構成する社会に適用の幅をひろげることが可能となって初めて，ファジィ理論本来の機能が発揮できるはずである．活発な討論を跳躍のバネとして，この未知の領域に挑む方策を模索して行きたい．

パネラーのプロフィール

「生産管理への応用の視点から」
黒田　充（くろだ　みつる），
(勤務先) 青山学院大学　理工学部　経営工学科
教授　(工学博士)
(所属学会) 日本オペレーションズ・リサーチ学会，
日本経営工学会等

(研究分野) 生産スケジューリング, 生産システムの設計論
(代表的研究論文, 著書等)
・"Optimal Input Cotrol for Job-Shop Type Production Systems Using Inverse Queueing Network Analysis, " International Journal of Production Economics,Vol.33,No.1-3 (1994)
・" Adaptiv Input Cotrol for Job-Shop Type Production Systems with Varing Demands Using Inverse Queueing Network Analysis," International Journal of Production Economics,Vol.41 (1995)
・"Fuzzy Job Shop Scheduling, International Journal of Production Economics," Vol.44,No.1,2 (1996)
・「ショップフロア・コントロールの情報論的考察」, ＩＥレビュー, Vol.34, No.4 (1993)
・「ライン・バランシングとその応用」, 日刊工業新聞社 (1984)
(連絡先) 〒157　東京都世田谷区千歳台6-16-1
TEL 03-5384-1111　　FAX 03-5384-6516
E-mail kuroda@cim-lab.ise.aoyama.ac.jp

「心理学の視点から」
土居道栄 (どい　みちえ),
(勤務先) 奈良女子大学　文学部　人間関係行動科学講座心理学教室　教授　(教育学修士)
(所属学会) 日本心理学会, 日本教育心理学会, 認知科学会, 発達心理学会
(研究分野) 概念形成とそれに関連する認知過程を中心テーマにしている. 概念の獲得における認知・記憶や学習, さらに発達の諸要因から, 人の概念の性質を明らかにしたいと考えている.

ここ2－3年は, 発達初期の乳幼児期における類似性・同一性の認知について, 乳児期の分類行動や照合反応から検討している.
(主要著作)
・「概念のプロトタイプ」, 奈良女子大学文学部研究年報, 第２２号 (1979)
・「類概念における階層構造の発達—命名におけるカテゴリ水準の等位化の分析—」, 教育心理学研究, ３４巻 (1986)
・「逆連想語の分析による連想機構の発達的研究」, 奈良女子大学文学部研究年報, ３１号 (1988)
・「乳児期の関係的類似の認知—模倣分類課題による分析—」, 文部省科学研究費補助金重点領域研究「認知・言語の成立」報告書 (1994)
・"Developmental Trends in Object-to Picture Matching by One-toTwo Year Old Childern," The Exergence of Human Cognition and Language, Vol.3(Annual Report), Grant-inAid for Scientific Research(1996)
(連絡先) 〒630　奈良県奈良市北魚屋東町
TEL 0742-20-3339　　FAX 0742-20-3341

「社会学の視点から」
高坂健次 (こうさか　けんじ),
(勤務先) 関西学院大学　社会学部　社会学科　教授 (Ph.D)
(所属学会) 日本社会学会・数理社会学会・社会経済システム学会
(研究分野) 数学的モデル (社会階層のイメージ形成やE-state structuralismなどに関する) の構築と分析
(代表的研究論文, 著書等)
・「社会学研究法」, 日本放送出版協会(1989)
・"Social Stratification in Contemporary Japan," Kegan Paul International(1994)
・"Self-location in a class system:A formal theoretical analysis,"
E.Lawler et al.,(eds.), Advances in Group Processes 9, JAI Press(1991)
・「アクセルロッド理論再考—インブリーディング・バイアスが集団安定性に及ぼす影響について—」, 『理論と方法』 8(2), 数理社会学会(1993)
・"Towards a Further Analysis of Narratives," Journal of Mathematical Sociology 18(23), Gordon & Breach(1993)
(連絡先) 〒662 兵庫県西宮市上ヶ原1-1-115
TEL 0798-54-6167　　FAX 0798-51-0955
E-mail Z85007@kgupyr.kwansei.ac.jp

(コーディネータ問合わせ先)
〒662 愛知県豊田市八草町八千草１２４７
愛知工業大学　経営工学科
小田哲久
Tel 0565-48-8121　　Fax 0565-48-0077
E-mail　　t-oda@ie.aitech.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THA4-1

ファジィ言語処理システムに関する一考察

A Study on fuzzy natural language processing systems

藤本太郎　　菅野道夫

FUJIMOTO Taro　　SUGENO Michio

東京工業大学 システム科学専攻

Department of Systems Science, Tokyo Institute of Technology

Abstract : This paper propose an approach to apply fuzzy logic and fuzzy sets to Linguistics. There are many kinds of fuzziness in every linguistic class, such as vocabulary class, clause class, sentence class, sentences class, meaning class and context class. But not enough research has been done. So, We propose the idea of Everyday Language Computing and Situation Database as a framework of Natural Language Processing system which can manage various fuzzy linguistic phenomenon.

1 はじめに

従来、自然言語は言語学者、心理学者、哲学者によって研究されてきたが、1960 年代から機械翻訳など計算機を用いた自然研究が行なわれるようになり、計算言語学が興ってきた。計算言語学においては形式言語理論に基づいて、統語解析・形態素解析などの文章を語単位に分割する研究が行なわれ、すでに実用化されている [13][12]。

他方、ファジィ理論は zadeh の"Computing with word"という言葉に象徴されるように言語と密接な関係がある。言語はあらゆるクラスにおいて曖昧性をもつために曖昧を含んだまま記述可能なファジィとは相性が良いと考えられてきた。しかし、ファジィ理論において zadeh が提唱する言語ラベル [4]、テストスコア [5] 等だけでは言語の意味のレンジを特定することはできても、本質的なモデルが不十分なために自然言語処理を扱うことができない。

自然言語処理においては、語彙レベル、句 (clause) レベル、文レベル、文章レベル、談話レベルの 5 つのクラスの処理が必要である。従来の形式的言語処理システムによって、文章を語彙に分割し [12]、その構造を解析することまではほぼ成功している。しかし、その上の句 (clause) レベル、文レベル、文章レベルにおける解析・処理を行なうためには別のアプローチが必要である。そこで、文章の談話的言語事実を重視する談話文法などが出てきた。しかし、これら談話文法の研究の多くが言語学者、認知科学者によってなされてきたために、計算機上に実装するには曖昧な理論になっている。その中でも例えば、視点、省略についての研究 [9] や、格構造の研究 [11] などはファジィを意識した研究である。これらのモデルを記述するためにはファジィは不可欠であると考えられる。

本研究では、柔軟なインターフェイスを構築しやすいファジィの特性を生かした曖昧な言語理論を計算機上に実装する一手法について述べる。本研究では菅野が提案する日常言語コンピューティング [1] を基礎として、その構成要素である状況データベースとあわせて概略を説明し、その応用例を示す。また、実際に用いられる言語の機能に関し考察する選択体系機能文法理論 [2][3] の立場から、実際の使用をコーパス [8][18] に求め、その出現頻度などを基にした言語処理研究 [7][10] を行なっている。手法として特定の分野の文章から抽出した意味ネットワークから状況データベースを構築し、このデータベースを用いて人間の文章理解のプロセスをシミュレートする。

2 選択体系機能文法

日常言語コンピューティング [1] および、状況データベース [16][14] において基礎となる理論が選択体系機能文法理論 [2][3] である。

選択体系機能文法理論は社会的-記号論的視点から見た言語理論である。従来の記号論は記号は原子論的に「記号-意味」というの考え方が一般的であったが、選択体系機能文法理論は記号の制約・選択体系 (system netowork) の理論である。また、この体系に基づき、人間は社会的経験を言語の体系で解釈し、思考してい

るものと考えられる。さらに、この体系内に「状況」を積極的に取り込むことにより、形式的言語学では処理が不可能な談話中の多義性や論理的矛盾を解決し、形式的言語学の限界を打破するべく提案されている様々な言語理論を統合していく可能性を持つと考えられる。

選択体系機能文法では、テクストを補間する状況のコンテクストという考え方を積極的に扱い、それぞれ談話のフィールド（言語活動領域）、談話のモード（伝達様式）、談話のテナー（役割関係）という3つの状況の要素を扱う。また、言語の機能として観念構成部門[1]、テクスト形成部門、対人関係部門の3つを考える。

System Cartography Model System Cartography Model[6] では図1のように、言語全体のシステムが内側から (1) 語彙 (lexicogrammar)、(2) 意味 (semantics)[2]、(3) 状況のコンテクスト (Context of Situation)、(4) 文化のコンテクスト (Context of Culture) の4つの円で表され、4円は1点で接する。

さらに、この中の状況のコンテクスト以内の3つの円が言語体系において、対人的 (interpersonal)、観念的 (ideational)、テクスト性 (textual) の3つの部分に分けられる。一般に文章は状況に依存しない部分があり、それらはテクストだけでも意味が一意に決まるが、多義性や漠然性を持つ部分は状況によって意味が選択・特定される。図1に示されるように状況のコンテクスト (Context of Situation) のうち、フィールド (field) は意味 (Meaning) の中でも観念構成的 (ideational) 意味に深く関わり、同様にモード (mode) はテクスト構成的 (textual) 意味に、テナー (tenor) は対人的 (interpersonal) 意味に深く関わる。

3 日常言語コンピューティング

社会言語学の基本的なコンセプトでは「言語体系は社会規範を反映した社会記号の一つであり、それゆえに周囲の社会環境の中で他の記号体系と相互に作用しあうことにより発展していくものである」と考える。このことに基づき菅野は社会記号としての言語を通じて人間の知的活動を扱う計算機処理の枠組として「日常言語コンピューティング」を提案した [1]。このアイデアでは人間が言語を用いて思考するのと同様に、

[1]論理的、経験的という2つに下位区分される
[2]言語の機能

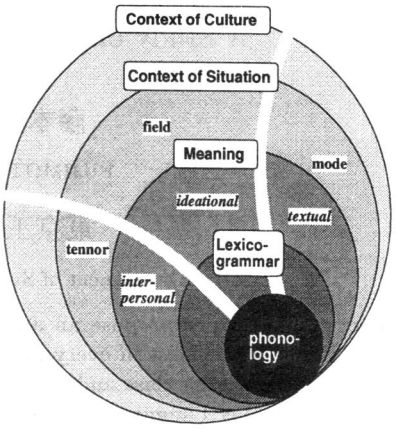


図 1: System Cartography model

計算機処理においても言語を媒体に情報処理を行なっていくことを提案している。

処理のアプローチ 言語の働きが人間の知的活動を支えていることから、人間の思考、知的活動には言語体系の働きが反映していると考えられる。また、情報の運用・操作が日常言語の論理性に従っていることにより、日常言語の論理性は言語体系の特徴に依存する。そこで以下の2方向からのアプローチを行なう。このアプローチは [14] で述べた bottom-up、top-down の2方向からのアプローチと類似している。

文法的情報操作 これは従来の自然言語処理手法 [13] に加え、

- 語彙的連想
- 情報の範疇化

という機能文法的アプローチを加える。このうち、語彙的連想は [15] で扱っている。

コンテクストからの情報操作 日常言語はその適用範囲の広さゆえ、矛盾を引き起こし、論理的定式化が困難である。そこで、文の意味を判別するためには適用範囲の制限のある状況の考慮が必要である。つまり、ある適切な状況を設定してやることにより、その範囲内では論理的矛盾を起こさないようなクラスを作ることが望ましい。この矛盾を

起こさない単位を「状況データ」に設定し、これをデータベース化する必要がある [16][14]。

4 状況データベース

[16][14] で提案した状況データベースでは、従来の人間可読辞書・機械可読辞書の情報に加えて、選択体系機能文法 [2][3] を基にした状況データを付加したものを「状況データベース」と定義した。

日常言語はその適用範囲の広さゆえ、形式言語理論のように用いられる状況を切り捨てた場合には論理的矛盾を引き起こしたり、多義であったりする。例えば、「私は鰻だ」という文も「私＝鰻」という意味であることは少なく、「料理屋において注文する」という状況があれば「私が注文するもの＝鰻」という意味がとれる。また、個々の論理的矛盾はある程度ファジィ理論を用いることで緩和することが可能であるが、この場合においても解を1つ求めるためにはより適合度の高いものを求める工夫が必要である。

日常言語を用いて演算を行なう上で、個々の言語が矛盾を引き起こさないようにするためにその言葉の使用域を限定・制限する「状況」を考察する。まず、ある単語があった場合に多義であるかどうかを調査し、多義である場合はその多義性を緩和するために、以下のような制限構造を考える。これは System Cartography Model[6] の図 1において、それぞれコンテクストの field が意味の ideational の部分を、mode が textual の部分を制限していることに対応している。

意味的制限 意味的な共起関係である。これは更に以下のように分割される。

文章外 モード、新聞記事における見出しなど

文章内 語彙的共起（用言間、名詞-用言共起など）

テクスト構成的制限 文章を形作る構成要素による制限である。これには格構造 [11]、文章構造、フレーム構造 [13] などがある。

EDR 日本語コーパス [8] から、語彙的連想を基に文書を分類し、ある程度コンテクストの field が得られている [15]。

5 応用例

日常言語コンピューティングの応用例として気圧配置予測 [17] や碁の戦略などがあるが、自然言語処理に応用し人間の思考過程をシミュレートする。

新聞見出しの解析 日経新聞 1994 年 12 月 31 日に名古屋朝刊社会面 [18] に掲載された、

> 中村のＪＲ線踏切、原付きの高校生が電車に接触し死亡。

という見出しについて考察する。この文に形態素解析器 [12] で解析を行なうと以下のようになる。

> 中村 (名詞) の (助詞) ＪＲ (名詞) 線 (名詞) 踏切 (名詞)、(特殊) 原付き (名詞) の (助詞) 高校生 (名詞) が (助詞) 電車 (名詞) に (助詞) 接触 (名詞) し (動詞) 死亡 (名詞)。(特殊)

ここで最初の形態素「中村 (名詞)」に関して、日経新聞 1994 年 [18] の見出しだけで 385 回出現している。そのうち人名が 365 回（中村喜四郎氏が多い）、店名・社名が 12 回、地名が 8 回（うち名古屋市中村区は 5 回）である。これらの意味を選択体系網を用いて表現すると図 2のようになる。

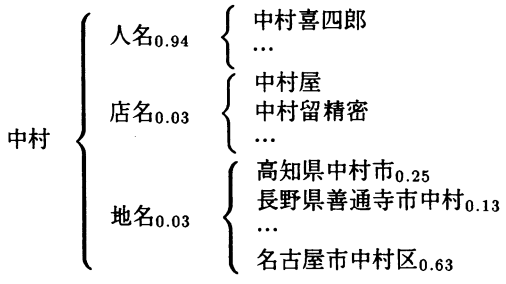


図 2: 意味の system network の例：添字は出現確率

まず、この中から「中村」が地名であることを同定するためには 4 つ目の形態素「踏切」に関して「～の踏切」という場合「～」に当てはまるものが地名であることを証明できなければならない。図 3に示すように日経新聞 1994 年 [18] の見出し中「～の踏切」が例を除いて 11 回出現し、地名が 7 回、路線名が 2 回、鉄道会社名が 1 回であった。ここに、人名、店名が出てこないため、「中村」は地名であることが分かる。次に

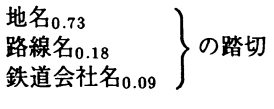


図 3: テクスト構成の system network の例：添字は出現確率

「中村」に関して「名古屋朝刊社会面」という文章外のコンテクストによって地名の中から高知県中村市、長野県善通寺市中村よりは地理的エリアによって「名古屋市中村区」が望ましいと判断される。

次に「接触」について考察する。日経新聞見出し中[18]に「接触」という語を持つ項目は69あり、そのうち、表1に示す7種類のパターンについてそれぞれ再現率、適合率この格構造は表1に示すように分類でき[3]を求めたものである。、75%の構造を同定できる。この例では「AがBに接触」の構造を持ち、「高校生-(接触)→電車」という構造が導き出せる。

表現	再現率	適合率
「A、Bに接触」	0.11	0.31
「AがBに接触」	0.06	1
「AがBと接触」	0.06	1
「AとBの接触」	0.06	1
「Bに接触」	0.19	0.56
「Aが接触」	0.18	1
「Aと接触」	0.73	1
「~同士が接触」	0.25	1
全体	0.75	1

表 1: 「接触」に関するテクスト構造

最後に「(名詞) し死亡」という形は (名詞) の部分に、コーパスに出現する7項目全てで死因が述べられている。そのため「接触」が死因であることが分かる。

これらを 5W1H 形式でまとめると図 4に示すような文章の構造が得られる。

where : 中村のＪＲ線踏切
when : —
who : 原付の高校生
why : 高校生-(接触) →電車
what : 死亡
how : —

図 4: 5W1H 形式の理解の構造

6 おわりに

本研究では従来の自然言語処理で扱われてこなかった「状況」に焦点をあて、その中でも特に、意味とテクスト構造を理解を補助する「状況」として用い、文章理解の過程を再現した。これをコーパス中の文例から得られる状況知識によって意味が限定・制約できることを示した。今後は言語学者などが深く洞察を行ない、定性的に構築してきた言語体系を、コーパスから得られた情報によって客観的・定量的に立証・補間・訂正できるシステムの研究を行なっていく。同時に状況データベースのプロトタイプを完成させ、実用化に向けた研究も行なっていきたい。

[3] ここで、再現率 $= \frac{\text{獲得結果に含まれる正解数}}{\text{正解数}}$、適合率 $= \frac{\text{獲得結果に含まれる正解数}}{\text{獲得数}}$ である。

参考文献

[1] M. Sugeno. **TOWARD INTELLIGENT COMPUTING**. in: Y. Yam K. S. Leung eds., FUTURE DIRECTIONS of FUZZY THEORY AND SYSTEMS, World Scientific, Singapore, 1995.

[2] M. A. K. Halliday. **AN INTRODUCTION TO FUNCTIONAL GRAMMAR**. Edward Arnold, London, second edition, 1994.

[3] M. A. K. Halliday and Ruqaiya Hassan (筧壽雄 訳) . **機能文法のすすめ**. 大修館書店, 1 edition, Jul 1991.

[4] L.A.Zadeh. **A Fuzzy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges.** *Journal of Cybernetics*, Vol.2, 1972.

[5] L.A.Zadeh. **A Computational Approach to Fuzzy Quantifiers in Natural Language**. *Comp. and Maths with Appls*, Vol.9, 1983.

[6] Chrisian Matthiessen. **Systemic Cartography**. *JASFL*, Nov. 1995.

[7] 松本 裕治 宇津呂 武仁. **コーパスを用いた言語知識の獲得**. 人工知能学会誌, Vol .10, Mar. 1995.

[8] (株) 日本電子化辞書研究所. **EDR 電子化辞書仕様説明書**. Technical report, (株) 日本電子化辞書研究所, Mar. 1993.

[9] 久野. **談話の文法**. 大修館書店, 1978.

[10] 井ノ上 直己 工藤 育男. **コーパスに基づく共起知識の獲得とその応用**. 人工知能学会誌, Vol .10, Mar. 1995.

[11] 山梨正昭. **日常言語の認知格モデル**. 言語, Vol.23 No.1-12, 1994.

[12] 松本裕治, 北内啓, 山下達夫, 今一修, and 今村友明. **日本語形態素解析システム chasen 使用説明書**. Technical report, 奈良先端科学技術大学院大学 松本研究室, Feb. 1997.

[13] 田中穂積. **自然言語解析の基礎**. 産業図書, 1 edition, November 1989.

[14] 藤本 太郎 菅野 道夫. **状況データベース構築のための 2 つのアプローチ**. 第 *12* 回 ファジィシステムシンポジウム, Jun. 1996.

[15] 藤本 太郎 菅野 道夫. **名詞概念との共起関係を用いた用言概念の分類**. 言語処理学会 第 *3* 回年次大会 予稿集, Mar. 1997.

[16] 藤本太郎. **状況データベース構築に関する一考察**. Master's thesis, 東京工業大学 大学院総合理工学研究科, Feb 1995.

[17] 小林 一郎 菅野 道夫. **言語情報を用いたコンピューティングへのアプローチ**. 第 *12* 回 ファジィシステムシンポジウム 予稿集, 1996.

[18] 日本経済新聞社. **日本経済新聞 *CD-ROM* 版**. 日本経済新聞社, Mar. 1995.

問い合わせ先：
〒 226
横浜市 緑区 長津田町 4259
東京工業大学システム科学専攻
菅野研究室内 藤本太郎
Tel 045-924-5645
Fax 045-924-5681
Email: tarof@fz.dis.titech.ac.jp

THA4-2

状況に依存した情報の選択に関する一考察

岩崎 正宏 (名古屋大学)　橋山 智訓 (名古屋大学)　大熊 繁 (名古屋大学)

A Study on selecting features depending on the context

Masahiro Iwasaki(Nagoya Univ.) ,
Tomonori Hashiyama(Nagoya Univ.) , Shigeru Okuma(Nagoya Univ.)

Abstract : This paper presents a new architecture of hierarchical neural networks. To realize cognitive process in human beings, proposed the interaction between the "bottom-up" and "top-down" procedure is effective. This system consists of 3 layers, input, feature extraction and symbol layer. The interaction between layers are built automatically. To show the feasibility of proposed system, some simulations has been done. The result showed that the interaction makes the performance much better with simple structure in the proposed system.

1　はじめに

近年、人間の高度な情報処理機構の計算機上での実現をめざし、ソフトコンピューティングに関する研究が盛んに行なわれている。人間は同時に進行する複数事象の中から、関心のある一つの事象に注意を向けることで、実世界における膨大な情報から必要な情報を取り出し、効率的な情報処理を行なっている。例えば人間は、様々な騒音が交錯する群衆の中でも特定の人と小さな声で会話をすることができる。これはカクテルパーティー効果として知られる"注意"の現象の一つである [1]。

"注意"は、心理学において主に研究がなされ、工学的な計算モデルは近年研究の途についたばかりである。これらを工学的に実現することにより、氾濫する情報の中から必要な部分だけを取り出すことが可能となり、ソフトコンピューティングが目指す、不正確、不確実さを許容しながらも、低計算コストで取り扱いやすいシステムを構成することが期待できる。

このようなシステムの実現のためには、感覚情報（センサ入力）からの特徴抽出（ボトムアップ処理）と、抽出された特徴を用いて状況判断などを行ない、その状況に基づいて行動生成を行なう処理（トップダウン処理）との相互作用による階層構造が有効であり、近年盛んに研究が行なわれている [2]-[4]。しかしながら、これらのシステムの多くにおいて、入力データから抽出すべき特徴は、設計者によって設定されているため、システムの能力は設計者の知識に大きく左右される。また、構成されたシステムには、対象とする問題に固有な情報を必要とするために、柔軟なシステムを構成することが難しい。また、さまざまな文脈において複数ある情報のどこに注意を向ければ良いかを判断する機構を有したシステムの構成も難しい。

本稿では、相互結合型ニューラルネットワークの一つであり、連想記憶装置として提案されているアソシアトロン [5] を例として、簡単な画像認識システムを構成する。アソシアトロンは、その素子数に対して記憶できるパターン数が 15 %程度と低く偽記憶に陥ることが多く、工学的に利用する際の問題となっている。記憶容量を増やすために部分的結合を用いるスパースコーディングが有用であることが知られているが、結合及び切断の基準を与えることは難しい。

提案システムは、アソシアトロンから必要な部分情報を取り出すことを試みる。アソシアトロンは特徴層と、特徴層は記号層と、それぞれ部分結合され、システム全体として 3 層構造をなし、自律的に生成される部分結合を用い入力パターンを判別する。アソシアトロン→特徴層→記号層のボトムアップ処理過程によって得られた結果を用いて、記号層→特徴層→アソシアトロンと、結合を自律的に変化させるトップダウン処理により、入力パターンの特徴部分に注意を向けることができる。このようにして、アソシアトロンのみでは想起が困難な入力パターンに対しても、所望のパターンへの想起を可能にした。簡単な連想記憶実験シミュレーションを行ない、ボトムアップ処理・トップダウン処理の相互作用により効果的な想起を行なうことが可能となることを示す。

2　提案システム

2.1　ボトムアップ処理とトップダウン処理

人間の高度な情報処理過程を工学的に実現するためには、ボトムアップ処理とトップダウン処理との相互作用を用いた階層構造が有効である。Russmussen[6] は、人間の認知機構に関して、(1) スキルベース、(2) ルールベース、(3) 知識ベースの 3 階層からなるモデルを提案した。

本システムは、Russmussen のモデルを基本としているが、特に (1)-(2) の階層間の相互作用に着目している。図 1 に提案モデルの概略図を示す。

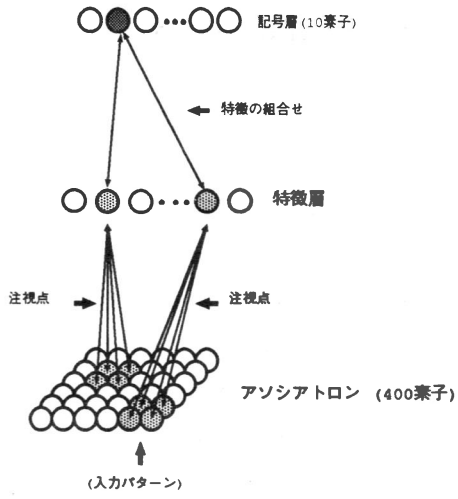


図 1: 提案システム

本モデルは、アソシアトロン、特徴層、記号層の 3 層からなる。アソシアトロンに曖昧なパターンが入力されると、しばしば記憶したパターンに収束できない場合が見られる。このような場合、カオスなどを用いて現在の挙動を不安定化させ、偽記憶から抜け出し、関連する記憶をサーチしながら必要な記憶を探索する方法がある [7]-[9]。これに対し人間は、単なるボトムアップ処理では判断が難しい場合には、過去の記憶を参照するなどして、トップダウン的に特定の部分に着目しその特徴を用いて判断を下すと考えられる。

このように、状況に応じて注視点を変更することにより、情報の選択が可能となり、効率が良く、柔軟なシステムが構築できる。注視点を変更しながら作動するモデルはいくつか提案されているが [10]、注視点をどのように決定するかが重要な問題である。注視点は入力データからのボトムアップ情報と、記憶及び環境情報からのトップダウン情報により決定される。これを図 1 に沿って説明すると、アソシアトロンの想起したパターンから特徴を抽出する。次に、特徴層ー記号層間の結合にしたがい、記号層出力を得る。この結果を用い層間の部分結合を限定することで注視点を変更し、状況に柔軟に対応したパターンを得ることができる。

従来、特徴は、「線分の傾き」などとして設計者によって設定されていたが、本システムにおいては、「線分の傾きを用いることにより、入力パターンは識別可能である」といった問題依存の事前知識が不要である。

2.2 アソシアトロン

アソシアトロンは、1969 年中野馨氏が提案した相互結合型の連想記憶装置である。記憶の性質が脳に類似しており、パターンをあらかじめ記憶させておくと、曖昧な入力に対し、記憶したパターンを連想的に想起することが可能である。

提案するシステムにおいて、アソシアトロンは４００素子で構成する。また、あらかじめ０から９のパターン１０種類を記憶させておき、曖昧な情報や、欠落した情報などに対して連想を行なう。

2.3 特徴層

特徴層は、層内の結合は無く、アソシアトロンからの入力の加重線形和を出力する。図 1 に示すように、各素子はアソシアトロンと部分的に結合している。また、この結合はシステムにより自律的に作成される。

2.4 記号層

記号層は、特徴層と部分的に結合しており、その組合せにより入力パターンの特徴を表す。記号層はあらかじめ記憶させた 10 パターンに対応させるため、10 素子で構成する。本システムでは、記号層と結合した特徴部分を注視点として用いることで、トップダウン的に入力パターンの特徴と思われる部分を注視する。また、層間の結合荷重は学習により更新される。

2.5 アソシアトロンー特徴層

本システムの動作を以下に示す。入力層と特徴層との初期結合をランダムに生成する。特徴層との結合を持つ入力層の想起を行ない所望の結果が得られた場合、その層間結合を入力パターンの特徴とする。本システムによれば、事前に特徴を仮定する必要がなくシステムが自律的に特徴を獲得する。

以下に具体的なシステムの動作を説明する。

1) アソシアトロンに、記憶パターンを入力する。
2) アソシアトロンが出力したパターンのうち、発火した素子をランダムに一素子選び、その素子を中心として 5*5 の 25 素子を選択し注視点とする。
3) 入力層において (2) で選ばれた注視点 (25 素子) のみの結合を用いアソシアトロンで想起を行なう。
4) 想起結果が入力パターンと異なれば、(2) の手順を繰り返し、注視点を現在の注視点に追加して、再びアソシアトロンの想起を行なう。
5) 想起結果が入力パターンと等しければ、一つの注視点を特徴として特徴層 1 素子に対応させる。
6) (1) から (5) を繰り返し、あらかじめ記憶したパターン分の特徴を特徴層の各素子に対応させて結合荷重とする。このようにして、特徴層素子は自動的に作成される。

2.6 特徴層ー記号層

特徴層、記号層間は初めは全結合とする。この層間結合において結合は、Hebb の学習則によって増加、抑制される。

1) アソシアトロン、特徴層間の結合荷重を作成した後、アソシアトロンに、記憶パターンを入力し、特徴層出力、記号層出力を得る。
2) 特徴層出力および記号層出力で、正の値を持ったものを+1、負の値を持ったものを-1として特徴層出力と記号層出力からHebb則による層間結合の学習をおこなう。
3) (1)、(2)を繰り返すことにより、各パターンを判別するために必要な注視点を学習する。

3 シミュレーション

3.1 初期設定

以上の操作により、提案システムに0〜9の10パターンを記憶させたところ、特徴層素子は、17素子作成された。また、記憶パターンを入力として用いた場合に、10パターン中、5パターンにおいて、そのパターンに対してのみ発火する特徴層素子があった。

3.2 想起実験

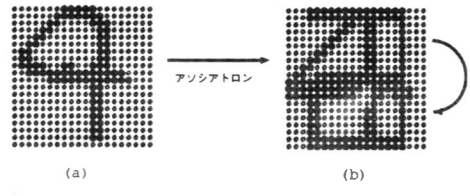


図 2: アソシアトロンのみによる想起結果1

アソシアトロンへ図2(a)を入力する。すると、アソシアトロンは図2(b)のような偽パターンを出力し収束する。
アソシアトロンは、しばしばこのような偽パターンを想起する。

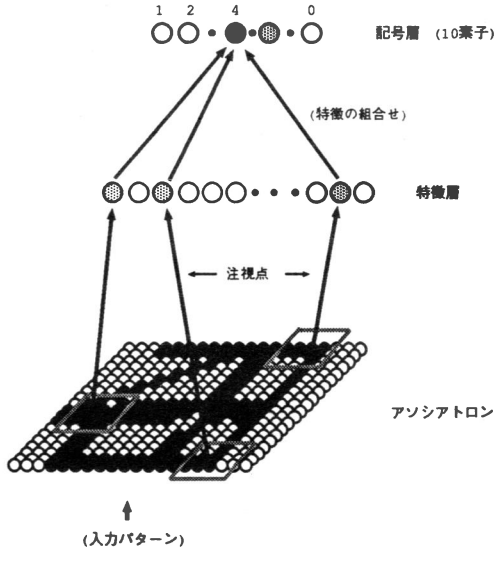


図 3: ボトムアップ処理による結果1

本システムでは、入力情報に対してアソシアトロンが記憶パターンを想起できない場合には、ボトムアップ処理により特徴層出力、記号層出力を得る。次に記号層で最大の出力を持つ素子のみの層間結合を用いて、トップダウン的に特徴層出力を得る。特徴層の出力値の大きい順に、アソシアトロンに注視点として伝播する（トップダウン処理）。具体的には、図2のように曖昧な入力に対して、アソシアトロンが所望のパターンを想起できない場合に、ボトムアップ処理では図3のように“4”に対応する記号層素子が発火した。この発火した素子の記号層素子と特徴層の結合を用いてトップダウン的にアソシアトロンの想起を行なう。図4に本システムのトップダウン処理を行なった場合の動作を示す。記号層において、“4”と結合している素子のみを活性化し、その他の結合を切断することで特徴層出力を得て、特徴層出力値の大きい順に図4の(1)、(2)の順で結合を生成し、そのつどアソシアトロンで想起を行なう。記憶パターンを想起したら動作を終了する。

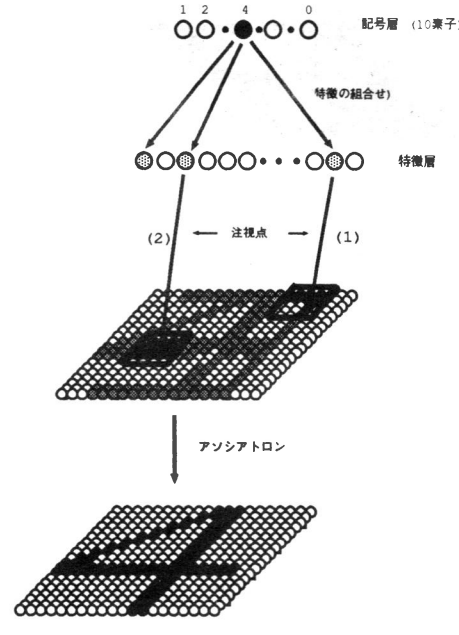


図 4: トップダウン処理による結果1

図2(a)の曖昧な入力パターンに対して、アソシアトロンは図2(b)を出力して停止した。この時、記号層素子は“4”が最大値を持ったため、その層間結合（注視点）を用いてトップダウン処理を行なったところ、記憶パターン“4”を想起した。

同様に図5〜7に他の入力パターンに対する本システムの動作結果を示す。

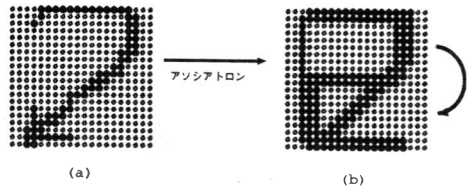


図 5: アソシアトロンのみによる想起結果 2

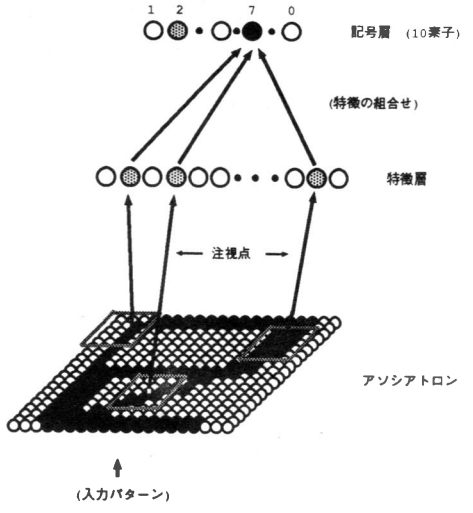


図 6: ボトムアップ処理による結果 2

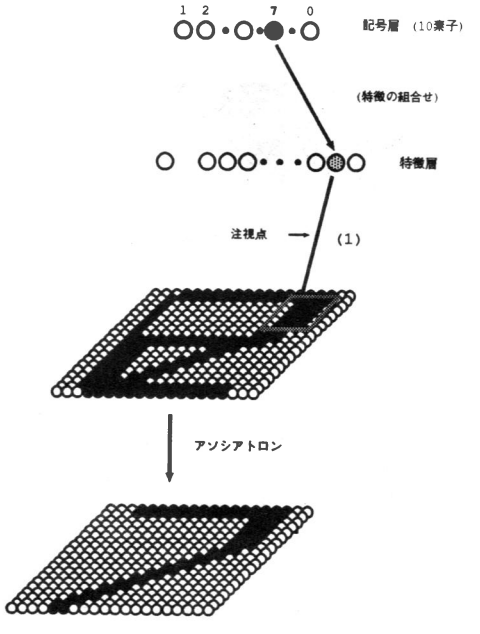


図 7 : トップダウン処理による結果 2

4 おわりに

本システムは、人間の注意機構を参考にした情報選択を考慮に入れて、部分結合を特徴として用いることで、アソシアトロンが偽記憶を想起して想起結果を記憶パターンと特定できない場合に、そのパターンがどのような特徴を有しているかをボトムアップ的に調べ、さらにトップダウン的に情報を選択できることを示した。また、特徴層において特定の入力パターンにのみ発火する素子が得られた。生理学的に特定の形にのみ発火するニューロンがあることが知られているので、今後考察を行なう予定である。

参考文献

[1] P.H. リンゼイ,D.A. ノーマン : 「情報処理心理学入門 2 -注意と記憶」, サイエンス社

[2] 古橋 武, 服部陽一郎, 内川嘉樹 : 「パターンと記号を扱う連想記憶モデルとカオス的想起」, 第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.749-752(1995)

[3] 佐藤友彦, 山口亨, 吉原道宏 : 「階層的知識構造に基づく学習／適応機能を持った知的ロボット」, 電気学会論文誌 C, Vol.116-C, No.12, pp.1396-1406(1996)

[4] 山口亨, 関根智,D.Montgomery, 遠藤経一 : 「ファジィ連想推論に基づく知的インターフェースとそのコマンドスペル修正器への適用」, 電気学会論文誌 C, Vol.113-C, No9, pp.709-718(1993)

[5] 中野 馨 : 「脳をつくる」 , 共立出版株式会社 (1995)

[6] J.Russmussen : " Skills, Rules, and Knowledge : Signals, Signs, and Symbols,and Other Distinctions in Human Performance Models," IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, SMC-13-3,pp.257-266(1983)

[7] 奈良重俊,Peter Davis : 「カオスと知的情報処理」, ジャストシステム (1994)

[8] 合原一幸 他 : 「ニューロ・ファジィ・カオス」, オーム社 (1993)

[9] Nina Hall : 「カオスの素顔」, 講談社 (1994)

[10] 横澤一彦, 熊田孝恒 :視覚探索-現象とプロセス, 認知科学, 第 3 巻, 第 4 号, pp.119-138(1996)

連絡先 : 〒 464-01 名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻
岩崎 正宏
Tel:052-789-2777 Fax:052-789-3140
E-mail: iwasaki@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp

THA4-3

感性語処理システムについて
A KANSEI Words Processing System

白濱 成希* 東原 正和** 矢鳴 虎夫**
SHIRAHAMA, Naruki HIGASHIBARU, Masakazu YANARU, Torao

北九州工業高等専門学校* 九州工業大学**
Kitakyushu National College of Technology Kyushu Institute of Technology

Abstract

Our main purpose is to propose how to deal KANSEI words which express human's sensibility. At first we classify KANSEI words into some categories and set attributes to each category referring to a lexicon. Secondly, we explain a methodology for constructing vector data which can express KANSEI information using multivariate analysis. We acquire the vector data using principal component analysis from our questionnaire and deal KANSEI words as vector data in a space of each category.

Next, we explain a mapping function between two spaces. The mapping function can convert a KANSEI words onto different category space. And we show a possibility to construct a human's sensibility oriented word processing system. Lastly we show an attractive result of computer simulation.

1. はじめに

感性情報処理の目的は，よりヒューマンフレンドリなインターフェイスを実現するために，感性情報を担う信号の入出力特性を決定し，コンピューティングモデルを実現することである．ここで注意したいのは人間の感性を解き明かすことが目的ではなく，人間と同様な応答をするモデルを構築することが目的であるという点である．

本稿では，特に感性情報を含む単語，感性語を取り上げその数量化，及び空間表現に関しての基本的なモデルを提案する．また感性語をカテゴリごとの空間で表現し，写像関数を定義することで，感性語を別のカテゴリ内での感性語で表現する機構についても述べる．

2. 感性語

感性語とは感性情報を含む単語をさす．具体的には，詩歌等に用いられるような単語で，何らかの感情や心理的な状態を喚起するようなものである．たとえば「黒雲」という単語からは「不安感」が喚起されるが「全般」という単語からはほとんど何も喚起されない．したがって「黒雲」という単語は「不安感」という感性情報が付随した感性語といえ，「全般」という単語は感性語ではないといえる．

感性情報は主観的であるため，どれが感性語であり，どれが感性語でないかを明確に区別することはできないが，ある程度万人に共通に存在すると思われる感性情報をもった感性語について扱うことにする．

3. 感性空間の数学的処理

感性語などの感性情報を持つオブジェクトに対して，そのカテゴリと属性を定める方法を述べる．

カテゴリ分けは，分類語彙表を参照し，感性情報を持つような感性語のみについて取り扱うことにする．

例として「風」というカテゴリに属する感性語を以下に示す．

無風, そよ風, 軟風, 大風, 強風, 烈風, 疾風, 突風, 神風

図 1 カテゴリ「風」に属する感性語群

一方感性語の属性であるが，ここでは知覚しやすいものを用いることにした．これは人間が直接感じることが出来るものほど，感性情報が多く含まれているのではという考えからである．例えば，「風」の風速や渦の大きさにから得られる知覚情報と，それによって得られる感性情報との間には大きな関連があると考えられる．

カテゴリ「風」について，一般に我々が知覚でき，感性情報をうまく表現出来そうな属性を考えてみると，**風速**，**渦**，**湿度**，**温度**などが挙げられる．これをもとに以下のアンケート用紙を作成する．このアンケートから各項目の数値データを得る．

	風速	渦	湿度	温度	空間
無風	0 0.5 1	0 0.5 1	0 0.5 1	0 0.5 1	0 0.5 1
微風	0 0.5 1	0 0.5 1	0 0.5 1	0 0.5 1	0 0.5 1
そよ風	0 0.5 1	0 0.5 1	0 0.5 1	0 0.5 1	0 0.5 1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

図 2 アンケート用紙

各属性が互いに独立なものであれば，このアンケートから得られた数値をそのまま空間上でのデータとして取り扱うことができる．しかし，独立でない場合を考慮し，また次元を落とすことで，より特徴を表す空

間に数学的に取り扱うことができる.

そこで, 感性語を表す空間を主成分分析法を用いて生成することにした. 本来主成分分析法とは, 互いに相関のある多種類の特性値を持つ情報を, 無相関な少数個の総合特性値に要約する手法である. 今回この手法に着目した理由としては,

- アンケート等で数値を与えられた感性語群を次元数を落としてユークリッド空間へ位置づけできること.
- 少数個の総合特性値へ要約されるため, 処理スピードの高速化やデータ記憶容量の節約ができること.

等が挙げられる.

ここで用いた主成分分析について簡単に述べる. 多変量データ x_{ij} $(1 \leqq i \leqq n, 1 \leqq j \leqq m)$ を m 次元の n 個の点の座標と考える. これらの点を原点を中心にいっせいに

$$x'_{ik} = \sum_{j=1}^{m} x_{ij} q_{jk} \tag{1}$$

のように回転させ, 次のような意味で見やすい位置に移動する.

- 各変数が直交すること

$$\sum_{i=1}^{n} x'_{ij} x'_{ik} = 0 \quad (j \neq k) \tag{2}$$

- 二乗和が大きな順に並ぶこと

$$\sum_{j=1}^{n} x'^{2}_{i1} \geq \cdots \geq \sum_{j=1}^{n} x'^{2}_{im} \tag{3}$$

そうして回転した後の座標 x'_{ik} を i 目のデータの第 k 主成分という. これらの処理を感性語群の数値データに対して行う. その結果, 算出された主成分を感性空間内での新たな座標として扱うことにする.

4. 写像による他空間への変換

アフィン変換[3]を用いた写像関数を定義することで異なる空間での変換が可能となる. これを応用して各カテゴリの感性空間で定義される感性語を他の様々な空間で表現することが可能となる. 図 3にそのイメージを示す.

2 つの空間

空間 1 $\left(x_1, \vec{V}_1^{\,m} | O_1 : \vec{e}_1, \vec{e}_2 \cdots \vec{e}_m\right)$

空間 2 $\left(x_2, \vec{V}_2^{\,n} | O_2 : \vec{h}_1, \vec{h}_2 \cdots \vec{h}_n\right)$

に対して, 空間 1 から空間 2 への線形変換関数 Φ を以下のようにで仮定する.

$$\Phi(\vec{e}_i) = a_{i1}\vec{h}_1 + a_{i2}\vec{h}_2 + \cdots + a_{in}\vec{h}_n \tag{4}$$
$$(i = 1,2,\cdots,m)$$

空間 1 の中で, l 個のサンプルベクトルの集合 $\vec{\zeta}_k \in \vec{V}_1^{\,m}$ $(k = 1,2,\cdots,l)$ が以下の式で表され,

$$\vec{\zeta}_k = \zeta_{k1}\vec{e}_1 + \zeta_{k2}\vec{e}_2 + \cdots + \zeta_{km}\vec{e}_m \tag{5}$$

空間 2 へ変換される場合, 以下の式で表すことができる.

$$\left(\Phi(\vec{\zeta}_k)\right) = \left(\zeta_{ki}\right)\left(a_{ij}\right)\left(\vec{h}_j\right) \quad (j = 1,2,\cdots,n) \tag{6}$$

一方, 空間 2 へ写像された任意のベクトル $\vec{\eta}_j \in \vec{V}_2^{\,n}$ は空間 2 の基底ベクトルに対して, 以下の式で表される.

$$\left(\Phi(\vec{\zeta}_k)\right) = \left(\eta_{kj}\right)\left(\vec{h}_j\right) \tag{7}$$

(6)式と(7)式が等価であるので,

$$\left(a_{ij}\right) = \left(\zeta_{ki}\right)^{-1}\left(\eta_{kj}\right) \tag{8}$$

空間 1 のベクトルを空間 2 に写像する写像関数 A は

$$A = \left(a_{ij}\right)^{T} \tag{9}$$

で表される.

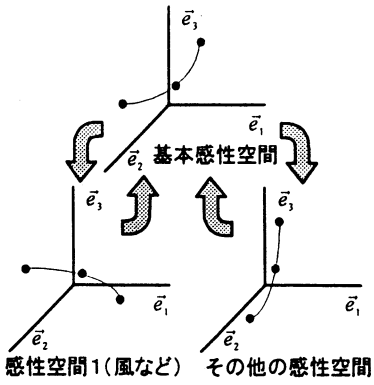


図 3 写像関数による空間の変換イメージ

5. 基本感性空間

各カテゴリの感性空間において, 対応付けられる感性語の数が十分でない場合は, 写像関数を求めることができない. また, 各感性語を人間の基本的な感情を表す単語に対応付けることで, 本システムの有効性を検証することができる. 上記の理由から基本感性空間を設定した. 「何が感性の基本となり得るか?」という問題については議論を要するであろうが, ここでは人間の基本的な情動を採用した.

情動の多因子分析理論を参考に, 各属性を

喜び-悲しみ，怒り-恐れ，期待-驚き，受容-嫌悪
とし，その中に日常使われる情動を表す感性語を配置した．

6. シミュレーション

6.1. 方法

(9)式で示す写像関数が存在するためには，まず，空間 1 の感性語群 $\vec{\zeta}_k \in \vec{V}_1^m$ に対応付けられた空間 2 での感性語 $\vec{\eta}_k \in \vec{V}_2^n$ が存在しなければならない．さらに(8)式に見られるように $\{\zeta_{ki}\}$ の逆行列が存在しなければならない．

シミュレーションにあたっては，両空間に同じ感性語が配置されなければならない．そこで，各カテゴリの感性語群に対し，基本空間に写像されるためのアンケートを行った．

また，二つの空間に対応する感性語の数は両空間の次元数の MAX を超えることも必要条件となる．

数が多い場合は組み合わせの問題となるが，今回は，評価式を設定し全ての組み合わせの中から最良となる組み合わせから生成された写像関数を使用した．その評価式を以下に示す．

$$\sqrt{\frac{1}{l'}\sum_{k=1}^{l}\mathrm{norm}\left(\Phi\left(\vec{\zeta}_k\right),\vec{\eta}_k\right)} \qquad (10)$$

ここで l は両空間に共通する感性語の数とし l' は l から両空間のうち大きな方の次元数を引いた数とする．$\Phi\left(\vec{\zeta}_k\right)$ は共通する感性語のを写像関数によって得られたベクトルであり，$\vec{\eta}_k$ は $\vec{\zeta}_k$ に対応している写像先の空間に存在するベクトルである．また(10)式の値をもとに写像関数の変換誤差率を求め，写像関数の評価を行った．

6.2. 結果

計算機実験に用いた各カテゴリとその感性語群，属性について表 1に示す．

表 1 各カテゴリの感性語群

カテゴリ	感性語
風・嵐	無風，そよ風，軟風，大風，強風，烈風，疾風，突風，神風 嵐，暴風，疾風，野分，台風，颶風，旋風，つむじ風，竜巻
雨・雪	一雨，本降り，吹き降り，大降り，小降り，大雨，小雨， 豪雨，にわか雨，通り雨，夕立，村雨，長雨，五月雨 みぞれ，霙，霰，雪，大雪，ぼたん雪，粉雪，淡雪
川	河川，小川，清流，濁流，急流，激流，奔流，淀み，瀬， 沢，河口，河原

表 2 各カテゴリの属性

カテゴリ	属性
風・嵐	風速，渦，湿度，温度，空間的広がり
雨・雪	雨量，粒の大きさ，時間，温度，風の強さ
川	大きさ，うるささ，速さ，透明度，深さ

このカテゴリ分類に対し，8 人の被験者にアンケートに答えてもらった．各カテゴリごとの最良の写像関数の変換誤差率(%)のグラフを以下に示す．

表 3 変換誤差率(その1)

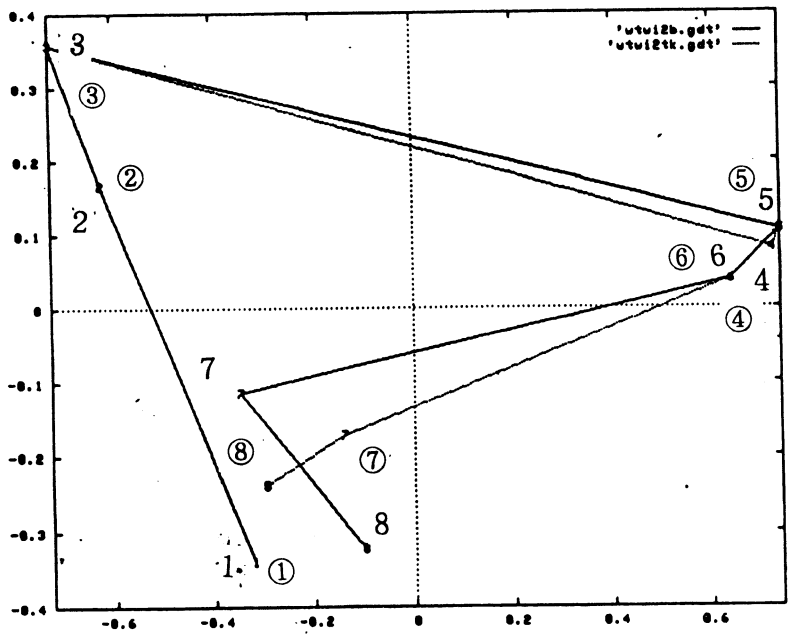
	風・嵐	雨・雪	川
被験者1	35.6	39.8	28.8
被験者2	24.4	35.9	27.6
被験者3	50.5	47.8	42.8
被験者4	33.2	28.8	16.4
被験者5	49.9		27.7
被験者6	34.3	40.8	16.8
被験者7	41.9	44.0	17.8
被験者8	36.8	34.7	24.8

次に「風・嵐」のカテゴリを「風」と「嵐」に，「雨・雪」のカテゴリを「雨」と「雪」に分類しなおした場合の変換誤差率を表 4に示す．

表 4 変換誤差率(その2)

	風	嵐	雨	雪
被験者1	45.8	28.8	31.6	0.0
被験者2	0.0	0.0	27.4	0.0
被験者3	40.8	43.6	48.2	0.0
被験者4	28.9	0.0	27.5	0.0
被験者5	37.5	30.5	-	-
被験者6	18.8	24.3	22.6	0.0
被験者7	22.1	73.3	39.0	0.0
被験者8	19.7	34.9	37.1	0.0

各空間内に配置される感性語の数が少なくなったことが反映され大きく誤差が減少していることがわかる．特に効果的であった被験者 6 の「風」の位置関係を以下に示す．



1	無風
2	そよ風
3	軟風
4	大風
5	強風
6	烈風
7	疾風
8	突風

1-8 実線	写像先の感性語
①-⑧ 点線	写像された感性語

図 4「風」の位置関係(被験者 6)

7. おわりに

空間と写像理論をりようした感性情報処理システムを提案した. 今回は単語を感性空間として表現することを試みた. 今後は単語にとどまらず空間内に表現できる感性情報(色等)も取り扱っていきたい.

シミュレーションによってカテゴリの分類の重要性を再認識した. カテゴリの分類の自動化は困難であり, アンケートの手法とあわせてどのような分類が効果的なのか検討が必要である.

今回構築したシステムは線型写像で表現されている. しかし当然ながら実際の感性情報が全て線形であるとは考えにくい. 今回は線形写像でどこまでの感性を表現できるかということに重点をおいたが, どのように非線型写像を導入していくかも今後の課題の一つである.

この研究はまだ, はじめたばかりであり, 理論的に検証する部分が多く残されているが, 様々な分野に応用されることが予想される.

例えば, 本システムで各感性空間を基本感性空間に写像し統一的に取り扱うことで, 任意のカテゴリーをキーとする検索・類推ソフトの作成が可能となる. 詩歌を作成するときの感性語検索・類推支援ソフトといった, かな感じ変換プロセッサのような感性情報支援ソフトを実現できる可能性がある.

参考文献

[1] Yanaru T. "An emotion Processing System Based on Fuzzy Inference and Subjective Observations" The Second New Zealand International Two-Stream Conference on Artificial Neural Networks and Expert Systems, pp. 15-20, 1995.

[2] Yanaru T. "Basic concept and theory for subjective observation model, and the applicability to create a new machine equipped with emotional functions", Proceeding of Fifth IFSA World Congress (1993), pp. 50-53

[3] 河田敬義, "アフィン幾何・写像幾何"(岩波講座数学 線形代数 5), 岩波書房, 1976

[4] 奥野忠一, 久米均, 芳賀俊郎, 吉沢正 共著, "多変量解析法", 日科技連, 1971

[5] Plutchik, R. "The multifactor-analytic theory of emotion", Journal of psychology, pp. 153-171, 1960

[6] 国立国語研究所, "分類語彙表(国立国語研究所資料 6)", 秀英出版, 1964

問合わせ先

〒803 福岡県 北九州市 小倉南区 志井 5-20-1
北九州工業高等専門学校 白濱 成希
TEL (093)-964-7340 FAX (093)-964-7242
E-mail *naruki@kct.ac.jp*

THA4-4

程度表現語の程度表現以外の機能の実験的検討

Experimental evaluation of secondary functions of quantitative modifiers

吉川　歩，西村　武
YOSHIKAWA, Ayumi and NISHIMURA, Takeshi

京都工芸繊維大学　工芸学部　電子情報工学科
Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology

Abstract: It is important for some applications to treat adequately secondary functions of quantitative modifiers, such as making an impression and so forth. In this paper, we evaluate the conceptional model related to these functions, which has been proposed by Yoshikawa et al. (1996), using questionnaire method. The results reveal that modifiers which express almost similar degree are discriminated by the secondary functions. Therefore these results validate the model that contains the secondary functions.

1. まえがき

背景：程度表現語の第一義的機能(*Primary function*)は対象の程度を表す機能であることは言うまでもない．そしてファジィ理論を用いた程度表現語の研究の多くが対象としていたのも，この機能である．この第一義的機能とは別に，程度表現語はニュアンスを付加する機能や状況に即した使い分けなどの機能を有する．本稿では，これらの直接程度表現に関連しない機能を総称して副次的機能(*Secondary function*)と呼ぶ．例えば，程度表現語をシステムの入出力インタフェースや質問紙の選択肢に利用する場合には，その程度だけでなく，副次的な機能も適切に扱う必要がある．上記の観点から，すでに吉川らは副次的な機能も考慮した程度表現語の概念モデルを提案している[1].

目的：本稿の目的は副次的機能を考慮した程度表現語のモデルの妥当性を実験的に検証することにある．以下では，まず質問紙調査の結果をもとに，程度表現語に印象の好悪や予想との相違に関するニュアンスを付加する機能が存在すること，および伝達手段や状況による使い分けが行われていることを例示する．さらに，程度表現語の間でそれらの機能の相違を比較した結果についても詳述する．

2. 副次的機能を考慮した程度表現語のモデル

程度表現語のモデル：吉川らは①同程度を表す程度表現語が複数存在し，②それらが適切に使い分けられている点に着目し，新しいモデルを提案している[1](**図1**)．このモデルの特徴は，対象の程度をその境界の不明瞭さを考慮してメンバーシップ関数として表現するという，*Lakoff*[2]により提案されているような程度表現機能(図左)に加えて，対象とは独立に情報を付加する機能(図右)を有している点である．この付加情報には，程度表現語それ自体から受ける印象の好悪あるいは予想との相違といったニュアンス，その程度表現語と伝達手段や使用される状況との関係などが定義されている．送り手，つまり程度表現語の選択者は，選択の際に程度の表現に加えて，自身の主観や文脈あるいは周囲の環境などから，その語を選択することで付加される情報の適切さも考慮して，選択しているとみなす．

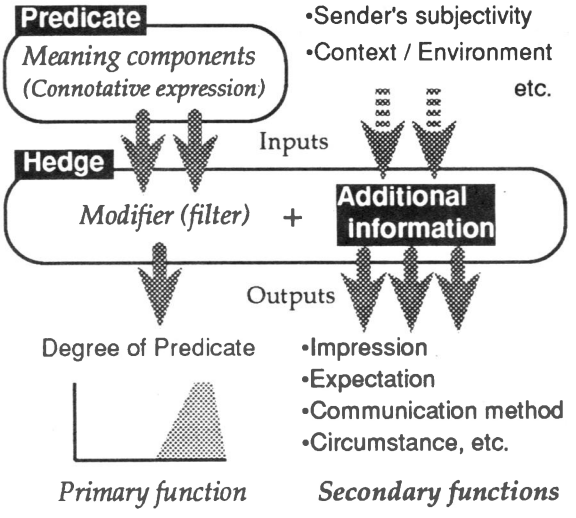


Fig. 1: A schema of functions of verbal hedge

検証すべき問題：上述のモデルに従えば，同程度を表す程度表現語の間には，それらが併存するに足る副次的機能の差異が存在するはずである．そこで本稿では，副次的機能に関する質問紙実験結果をもとに，程度表現語の間の副次的機能の差異を明らかにすることで，モデルの妥当性を検証する．

3. 実験方法および実験条件

実験目的：質問紙実験により，①程度表現語が2.で述べた情報を付加する副次的機能を有することを例示する．そして②それらの機能の程度表現語の間

での差について考察する．

質問項目：項目とそれらの選択肢を以下に示す．

①程度表現語から受ける**印象**：1:**好印象**，2:**悪印象**，3:両方あり，4:両方なし，5:わからない

②**予想**や期待との一致，相違：1:**意外な感じ**，2:**予想通り**，3:両方あり，4:両方なし，5:わからない

③**手段**：1:**会話**，2:**文章**，3:差なし，5:わからない

④**状況**：1:**日常**，2:**公式**，3:差なし，5:わからない

実際に使用した各選択肢には内容の理解を助けるための説明文を付けた．各項目に選択肢「わからない」を設け，回答に窮した設問の強制選択を回避した．

実施方法：実験は主にWWWのホームページ上で実施した．「かなり，けっこう，ずいぶん，すごく，少し，そうとう，たいへん，ちょっと，非常に，まあまあ，やや，わりと」の12種について上述の4項目ごとに回答を求めた．項目，程度表現語の呈示順序は被験者共通としたが，実際の回答順序は被験者に委ねた．回答時間には制限を設けていない．

被験者：17～51歳の男女71名であった．

4. 実験結果および考察

副次的機能の存在：まず各質問項目ごとに副次的機能の存在を積極的に肯定する選択肢(1,2)の相対度数を算出した．その結果，印象，予想，手段，状況の順に，51.7, 69.0, 70.7, 69.7%となった．印象の値が他に比べ低くなっているものの，この結果は程度表現語が程度表現以外の情報を付加するという副次的機能を有することを示唆している．また印象については，「両方あり」の回答が39.0%となったことも考慮すると，程度表現の対象，つまり述部の内容による影響を他の項目よりも強く受ける可能性があることを示唆している．

程度表現語の間の差：程度表現語の間の差異は，語の間の親近性行列をもとに数量化IV類で算出された1次元布置に基づいて解析した．親近度は，2つの語に対する選択肢(被験者の評価)が完全に一致していれば1，一方が選択肢1あるいは2で他方が3（例えば，好印象－両方あり）の場合0.5とした．これを全被験者について総和を求めたものを親近度とし，数量化IV類により各語の布置を算出した．

表1は得られた結果を項目ごとに示したものである．印象以外の項目については，第1固有値に対応する固有ベクトルを布置とした．また印象は第1～3固有値に差がなかったため，その中でもっとも好悪をよく反映しているとみなせる第2固有値に対応する固有ベクトルを布置とした．表より，例えば予想の項目の「まあまあ，わりと，けっこう」について見ると，「まあまあ」は予想通りと解釈されているのに対し，「けっこう」は予想外と解釈されていることが見て取れる．同様に，手段や状況の「やや，少し，ちょっと」でも，「やや」は文語的で公的であると解釈されているのに対し，「ちょっと」は逆に，口語的で日常的であると解釈されている．これらの結果は，ほぼ同程度を表す程度表現語がニュアンスの付与や手段・状況の差異により使い分けられていることを示唆している．したがって，この結果は提案モデルの妥当性を支持していると言える．

Table 1: The quantification results of 12 modifiers using the forth quantification method

Modifiers	Impress.	Expect.	Method	Circum.
かなり	0.183	0.245	0.120	0.083
けっこう	-0.177	0.148	0.258	0.224
ずいぶん	-0.183	0.341	-0.133	-0.183
すごく	0.361	0.130	0.237	0.261
少し	-0.060	-0.312	-0.065	-0.042
そうとう	-0.183	0.241	0.032	0.052
たいへん	0.699	0.190	-0.324	-0.304
ちょっと	-0.234	-0.138	0.300	0.329
非常に	0.189	0.196	-0.375	-0.411
まあまあ	-0.338	-0.686	0.310	0.329
やや	-0.195	-0.209	-0.595	-0.558
わりと	-0.063	-0.147	0.234	0.220

Legend
Impression: Bad (–) – (+) Good
Expectation: Expected (–) – (+) Unexpected
Communication method: Literal (–) – (+) Colloquial
Circumstance: Official (–) – (+) Private

5. まとめ

本稿では，吉川らにより提案された副次的機能を有する程度表現語のモデルの妥当性を心理実験結果に基づいて検証した．実験結果から同程度を表す程度表現語が副次的機能の違いにより使い分けられていることが明らかになった．

今後の課題としては，他の副次的機能を実験により抽出することや，副次的機能を定量的に把握するための実験の実施などが挙げられる．

参考文献

[1] 吉川，西村：言語ヘッジの程度表現以外の機能について，第1回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論文集，15-16 (1996)

[2] Lakoff, G.: Hedges: a study in meaning criteria and the logic of fuzzy concepts, *J. of Philosophical Logic*, 2, 458-508 (1973)

連絡先 606 京都市 左京区 松ヶ崎 御所海道町
京都工芸繊維大学 工芸学部 電子情報工学科
ayumi@dj.kit.ac.jp, http://www-sip1.dj.kit.ac.jp/
TEL: 075-724-7496, FAX: 075-724-7400

THB1-1

ファジィ推論規則と進化的計算についての一考察

Consideration on Fuzzy Reasoning Rule and Evolutionary Computation

仲田　明紀
Akinori NAKATA

水本　雅晴
Masaharu MIZUMOTO

大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract — In this paper, we focus our attention on a real neuron system from biological point of view, and consider a glial cell which helps some neurons. As a result, we propose a knowledge system expecting the emergence of autonomous individuals on the basis as follows:

· The autonomus individual acts for keeping itself.

· The helper individual makes some autonomous individuals.

· Autonomous and helper individuals have their own positions in an environment space.

· They interact each other according to the distance between them.

1　はじめに

これまでファジィ推論規則の自動チューニング、自動生成による知識獲得ついて、多くの研究者が様々な手法を提案してきた。中でも人間の脳・神経系をモデル化したニューラルネットワークとの融合によるファジィ推論システムの自動生成、自動チューニング手法の研究は数多くされてきた ([1-2] など)。また最近では遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ規則の自動生成手法も数多く提案されている ([3-5] など)。

上述の例は、生物の学習・進化システムから新しい知識処理システムを生みだそうとするものである。生物の中に秘める巧みな情報処理手法の発見から新たな知識システムの構築を試みる研究が現在活発に行われている。

脳について考えると、学習だけでなく脳の個体発生、発達、さらには進化について考えるとき、通常のニューラルネットワークなどで考慮されていないことは『脳・神経細胞が生物であり、また体積や質量を持っている』ことである。このような『生物である』、『体積をもつ』からこそ含まれる性質や制約条件こそ生物の学習、進化に影響を与えていると考えられる。

これらを踏まえ、本論文では脳・神経系をもう一度観察し、神経細胞を元来の生物的・物質的な観点を含めて考察し直す。そして、ここで述べた神経細胞とその周辺との相互作用による学習・進化過程を用いた、ファジィ規則を基にした自律個体の創発による学習・進化する知識システムについて提案する。

2　神経細胞

本節では、のちに提案する知識処理システムの理解のために、実際の脳・神経細胞について述べる。なお、ここでは文献 [6] を参考に、引用し要約した。

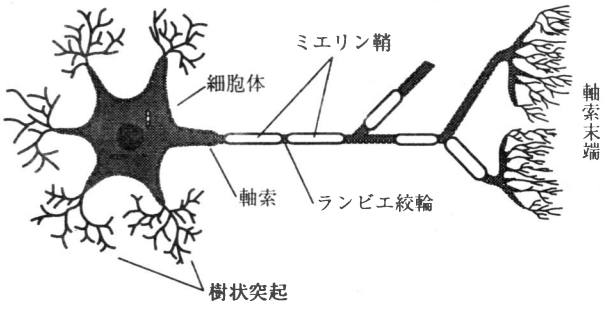


図 1: 自律個体

神経細胞には様々な形状があるが、基本的には樹状突起、細胞体、軸索からなる (図 1参照)。

樹状突起は細胞体から伸びた細胞質の突起で、1 本の神経細胞につき数十本あり、それはさらに樹のように枝分かれしている。その数や枝分かれの状態はさまざまである。

細胞体は球状や星状など 10 種以上に分類でき、それぞれ機能的に異なっていると考えられている。細胞体は通常の細胞のように DNA を含む細胞核とその周りの細胞質からなる。

軸索は細胞体から長く伸びた 1 本の繊維で神経繊維とも呼ばれる。長さは数十μm から $1m$ 以上のものまである。軸索の多くは電気的絶縁体のミエリン鞘に覆われている。また、軸索は途中で枝分かれしている場合もあり、末端近くで複雑に枝分かれしているものが多い。

神経細胞が他の神経細胞または筋肉や腺細胞などの末端効果器と接触して刺激を伝える部位をシナプスという。このシナプスを介して信号、つまり神経インパルスが神経細胞間を伝わっていく。

この神経インパルスのシナプスにおける伝達には神

経伝達物質による場合と電気信号による場合とがある。神経伝達物質には推定されたものも含め30種以上が知られている。その種類によりシナプスが興奮性であるか抑制性であるかが決まる。

また、この神経伝達物質による神経細胞間のインパルスの伝達の場合、シナプス前神経細胞の軸索末端とシナプス後神経細胞との間にはシナプス間隙といわれる約20から$30nm$の隙間がある。電気信号による場合にはわずか$2nm$程度で特殊な接着構造をしている。

脳を構成している細胞には上述の神経細胞の他に、神経細胞を支えるグリア細胞がある。グリア細胞には、神経細胞の軸索に細胞膜を巻きつけミエリン鞘を形成するオリゴデンドログリアや神経細胞と毛細血管とに突起を接触させ、神経細胞への栄養補給と老廃物の除去をしているアストログリア、さらに異物を取り除く小グリアなどがある。

以上が実際の脳を構成する神経細胞の構造とそれをとりまくグリア細胞の働きである。次節ではここで述べた脳・神経系を考察し、学習・進化する知識システムについて考察する。

3 実際の神経細胞に対する考察

前節で述べた神経細胞の構造とそれを取り巻くグリア細胞について考察する。

まず、神経細胞も通常の細胞と同じように細胞体内に細胞核、細胞質を持ち、アストログリア細胞を通して栄養の補給、老廃物の除去を行っていることからわかるように、神経細胞も生物である。

また、前節での神経細胞について考えられることは多種多様な個体の集合によって構成されていることである。2節で述べたように、細胞体の種類や軸索の長さ、樹状突起と軸索の枝分かれの様子、神経伝達物質の種類において、様々な形態、種類、組み合わせがあることから、それぞれが自律的な行動(ここでは自律的な発達過程や独自の反応などをいう)をするものと考えられる。このような自律個体が多数(1000億個以上[6])集まって人間の脳は構成され、動作していると言える。

また、これらは観念的なものではなく、実在するものとして認識するべきであるとわれわれは考える。つまり、空間中に実在し、神経細胞相互間の位置関係というものを考慮にいれる必要があると考えられる。神経細胞とグリア細胞との相互作用においても互いに近い位置に存在するからこそ相互作用が起こっているといえる。

さらに神経インパルスが多くの神経細胞を駆け巡ることで、脳・神経系全体としての知的活動が行われていることも重要である。樹状突起を多数伸ばし、多くの他の神経細胞からの神経インパルスを入力し、さらに軸索を枝分かれさせ神経インパルスを多くの他の神経細胞に送り出している。このネットワークの形成が知識獲得に貢献していることは明らかである。ただし、本研究においてはネットワークを形成していることを先行させるのではなく、自律個体の相互作用により、結果的にネットワークを形成している自己組織化によるものと認識している。

さらに本研究ではグリア細胞に注目する。グリア細胞は2節で述べたように神経細胞の代謝を手伝うアストログリアやミエリン鞘を形成するオリゴデンドログリアがある。代謝を手伝い、ミエリン鞘を形成することによって神経細胞の活動を活性化していると理解できる。グリア細胞は周辺の神経細胞の行動を活性化する細胞であると考えられる。このような神経細胞とグリア細胞の相互作用にも注目する。

以上の考察を以下の4つにまとめる。

- 神経細胞は通常の細胞の一種であり、生物である。(したがって自己の維持を図っている[7]。)
- 神経細胞は実在するものであり、絶対位置をもつ。
- 神経細胞はネットワークを形成し、神経インパルスというかたちでシナスプを介して相互作用を行っている。
- グリア細胞は周辺の神経細胞と相互作用し、神経細胞を活性化する。

ただし、本研究での目的は脳・神経細胞をつくるのではなく、生物の知識システムの学習、進化の様子からコンピュータにおける新たな知識処理手法を提案することにある。つまり、脳・神経系が行っていることに縛られることなく、脳のシステムの特性をうまく踏まえることで、新たな知識処理手法を開発することが重要である。

ここで、本研究では自律個体の相互作用による知識システムを提案する。このシステムには以下の点を考慮することが必要であると考えている。

- 各自律個体は自己維持を保つために活動する。
- 自律個体の維持、活性化を促す補助個体を設け、自律個体と相互作用を起こすことで補助個体自身も自己維持活動を行う。
- それぞれ絶対位置を持ち、その位置の環境に依存した相互作用をおこなう。
- 自律個体と自律個体または補助個体の相互作用により、自己組織的にネットワークが形成され、知識獲得が行われることを本研究では考慮している。

上述のような考え方から、次節ではこのシステムについての提案手法について述べる。

4 創発による知識システムの提案

本節では、前節までに述べた脳・神経系の特長を考慮した、自律個体の創発による知識システムについて提案する。

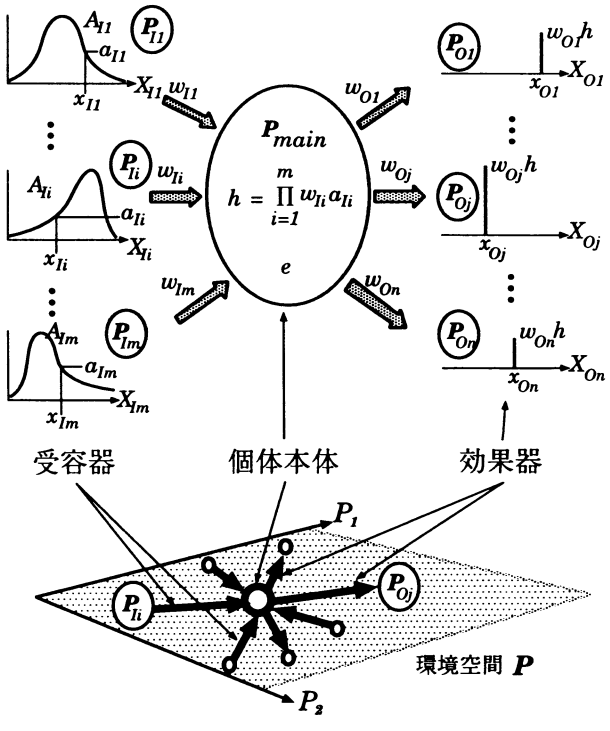


図 2: 自律個体

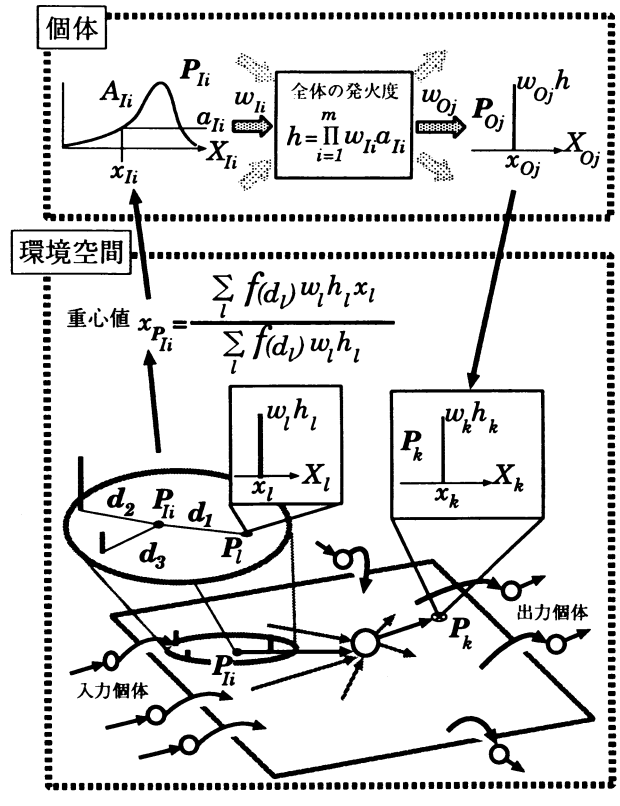


図 3: 自律個体と環境との相互作用

4.1 自律個体の構造と動作

本システムは自律個体と環境空間からなる。まず、提案する自律個体モデルについて説明する。図 2に提案する自律個体を示す。

この自律個体の基本構造はファジィ推論規則である。自律個体は受容器、個体本体、効果器の 3 つの部分からなる。

自律個体の受容器 i は自律個体 1 つに対していくつか設定し、それぞれ反応変数 x_{Ii}の集合 X_{Ii}とその変数に対する反応関数 $A_{Ii}(x_{Ii})$ をそれぞれ持つ。受容器は、環境空間から受容器の位置ベクトル$\boldsymbol{P}_{Ii}$における刺激信号 x_{Ii}を受け取り、それぞれが反応関数にしたがって反応度 a_{Ii} を個体本体に重み w_{Ii}で送る。

個体本体も位置ベクトル$\boldsymbol{P}_{main}$を持ち、さらに自律個体の活動エネルギー値 e を持つ。また、本体は各受容器からの反応度 a_{Ii} と重み w_{Ii}から個体全体における発火度 h を次式により計算し、効果器に送る。

$$h = \prod_{i=1}^{m} w_{Ii} \cdot a_{Ii} \qquad (1)$$

効果器 jも 1 個体に対していくつか存在し、それぞれ環境空間上の位置$\boldsymbol{P}_{Oj}$をもつ。さらに出力する効果変数の集合 X_{Oj}、その変数の出力値 x_{Oj}と重み w_{Oj}を効果器それぞれが持つ。効果器は環境空間上の位置ベクトル$\boldsymbol{P}_{Oj}$から、出力値 x_{Oj} とその重み $w_{Oj} \cdot h$(効果器の重みと本体の発火度との積) を刺激信号として出力する。

したがって、環境空間中には様々な刺激信号がそれぞれの位置に配置されることになる。環境空間は、これら多数の刺激信号を受け取り、それらを統合し、ふたたび自律個体に返す。ただし、これらの統合は刺激信号の変数の集合ごとに行う。

4.2 自律個体と環境との相互作用

各自律個体は環境からの入力を受容器を通して受け取り、また効果器から環境へ出力する。このような自律個体と環境との相互作用によって、システム全体の動作が決定される (図 3参照)。

自律個体から環境空間上の効果器の位置ベクトル $\boldsymbol{P}_{Oj}(=\boldsymbol{P}_k)$ に刺激信号として $w_k \cdot h_k(= w_{Oj}h)$ と集合 $X_k(= X_{Oj})$ 上の値 $x_k(= x_{Oj})$ が出力される。k は環境空間全体における刺激信号の番号である。

逆に自律個体への入力は、環境空間中に存在する刺激信号 lの位置ベクトル$\boldsymbol{P}_l$から自律個体の受容器の位置ベクトル$\boldsymbol{P}_{Ii}$への距離 d_lおよび刺激信号の値 x_lと重み $w_l \cdot h_l$による重心を求め決定する。lは環境空間全体における刺激信号の番号である。そのときの重心 $x_{\boldsymbol{P}_{Ii}}$を求める式を以下に示す。

$$x_{\boldsymbol{P}_{Ii}} = \frac{\sum_l f(d_l) \cdot w_l \cdot h_l \cdot x_l}{\sum_l f(d_l) \cdot w_l \cdot h_l} \qquad (2)$$

ここで関数 $f(d_l)$ は距離 d_lに対する刺激信号の影響度

減衰関数である。この重心値$x_{P_{li}}$が受容器への入力値とする。

以上を自律個体と環境との相互作用として繰り返すことで、刺激信号がシステム内を流れる。

なお、環境空間には自律個体以外にシステム外部からの入力信号を環境空間内に入力するための入力個体と、環境空間からシステム外部へ出力するための出力個体を配置する。これら入力個体、出力個体により外部との信号の受渡しを行う。ちなみに、これは実際の脳・神経系では、感覚器ニューロン、運動ニューロンに相当し、通常の自律個体が介在ニューロンに相当する。

5 自己組織化によるシステムの知識獲得について

この節では4節で述べた提案手法による知識獲得について考察する。

前にも述べたように、この手法のねらいは『自律個体と自律個体または補助個体の相互作用により、自己組織的にネットワークが形成され、知識獲得が行われること』にある。また特長として、補助個体を配置し、それによって自律個体の活性度を決定させることから、より柔軟にシステム自身がシステムを構築する自由度を与えている。

逆に、自律個体の自律的な行動をどのように定義するか、補助個体にどのように自律個体の活性度を決定し、組織化を促すかが大きな問題となる。これらがシステムの良し悪しを決定するといえる。

次に、極めて抽象的ではあるが、自律個体および補助個体の動作を以下のように提案する。

自律個体のもつ仕事とは、基本的に多くの刺激信号を得て多くの刺激信号を環境へ返すこととする。この目的が有効に達成できている場合、関係する補助個体から報酬が与えられることにする。そのために樹状突起を環境空間上で刺激信号の大きいところへ自律個体自身を移動させる。軸索も同様に個体の意志により移動可能とし、これは補助個体からの報酬にしたがって移動を決定する。

補助個体は、このシステム全体の評価から、今関係している周辺の自律個体の発火度に応じて評価を振り分ける。評価は正または負である。なお、この報酬によって個体の活動エネルギーなどを操作する。

自律個体本体と補助個体の位置は、システム全体をひとつの遺伝子にコードディングし、いくつかの遺伝子を生成して遺伝的アルゴリズムを行う。この遺伝子は文献[5]にあるようなDNAコードディング法や遺伝的プログラミングによるものがさらに有効であると思われる。遺伝的アルゴリズムの一世代は、上述の樹状突起と軸索が十分発達するまでとし、そのときの最終評価値を遺伝子の評価値とする。

6 まとめ

本論文では、脳・神経系の構造から神経細胞の生物・物質的側面を考察した。そしてファジィ規則を基本とした自律個体と、それを支える補助個体の相互作用による知識システムの構築について提案した。

今後は提案した知識システムのシミュレーションを行い、その有効性を検証していきたい。さらに、『自律個体・補助個体の行動について』、『自己組織化』、『環境空間の扱い方』などに注目していきたい。

参考文献

[1] 市橋 秀友: ニューロ的手法によるファジィルールの調整, **日本ファジィ学会誌**, Vol.5, No.2, pp.191-203, 1993

[2] 石, 水本, 湯場崎, 大谷: 最急降下法によるファジィ規則の自動チューニング一手法, **日本ファジィ学会誌**, Vol.8, No.4, pp.757-767, 1996

[3] M.A.Lee, H.Takagi: Integrating Design Stages of Fuzzy Systems using Genetic Algorithms, *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems(FUZZ-IEEE'93)*, pp612-617, 1993

[4] 古橋, 中岡, 前田, 内川: 局所改善型遺伝的アルゴリズムの提案とファジィルールの発見, **日本ファジィ学会誌**, Vol.7, No.5, pp.978-987, 1995

[5] 吉川, 古橋, 内川: DNAコーディング法を用いた遺伝的アルゴリズムによるファジィルール発見, **電気学会論文集 C 分冊**, Vol.116-C, No.1, pp125-132, 1996

[6] 竹村、大井: **生物の情報システム**, 講談社サイエンティフィック, 1990

[7] 中村 運: **生命科学**, 科学同人, 1996

問い合わせ先：

〒572 大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学　水本研究室
仲 田 明 紀
Tel: 0720-20-4569(直通)
Fax: 0720-24-0014(大学事務局)
E-mail: nakata@mzlab.osakac.ac.jp

THB1-2

じゃんけん戦略の知識表現

Representation of knowledge for janken game strategy

牧野泰裕 Yasuhiro Makino　西野順二 Junji Nishino　小高知宏 Tomohiro Odaka　小倉久和 Hisakazu Ogura

福井大学 工学部 情報工学科

Department of Information Science, Fukui University

Abstract : In this paper, we investigate of the repeated janken game to estimate characteristic of game agents. In the repeated janken game, players repeat single "janken" reiteratively. The repeated janken game has strategy, for examples, random strategy, fixed strategy, repeated strategy, history-based strategy that uses history of opponent hands. We analyze superiority of strategy by computer simulations. As a result, we show superiority of history-based strategy.

1 はじめに

本研究では、チェス、オセロ等といった、対戦型ゲームにおける戦略知識獲得を試みる [1][2]。その獲得について、戦略の分析や、ある局面において先を予測するための手法として、*GA* を用いた研究 [3] が行なわれている。本研究では対戦ゲームとして、繰り返しじゃんけんをとりあげ、*GA* の遺伝子コーディングするための準備として、その戦略の表現と、特性を調べることを目的としている。

さて、じゃんけんは、相手の手をみてから、自分の手を決めるゲームでない。このため、1回限りの対戦では、相手の手と自分の手を同時に出して勝負を決めるために、戦略は存在しない。そこで、今回はじゃんけんに戦略的要因を取り入れようとするために、じゃんけんを繰り返して行うような、繰り返し対戦型じゃんけんゲームを設定する [4]。

各々に戦略を持ったプレーヤーを集めて、そのプレーヤー同士が各自の戦略にしたがって、繰り返し対戦を行なっていき、総当たりの試合を行なって、その試合のたびに得られた得点の合計により、プレーヤー、つまり戦略の順位が決められる。実験では、戦略をコンピューターのプログラムで表し、プレーヤーはそのプログラムである。

今回は、繰り返し対戦型じゃんけんゲームにおいて、用意した戦略の中で、高得点を得るのは、どんな戦略であるかを調べた。それぞれの戦略について、他の戦略と比較してそのような結果を得られたのか、特徴を調べ、どのような戦略が有効であるかを考え、繰り返し対戦型のじゃんけんというものの戦略をどのように実現するかを検討する。

2 じゃんけんゲームの設定

2.1 対戦方法・ルールについて

対戦は全てコンピューター上で行なう。じゃんけんは、2人のプレーヤー同士で、一般に知られているじゃんけんのルールに従い行なう。じゃんけん1回の勝負ごとに、以下の表からその結果に応じた得点が、プレーヤーに与えられる。

例えば、プレーヤーAがｔ、プレーヤーBがｐの場合、Aが勝つので、得点表により、Aが1点、Bが−1点を得ることになる。

A \ B	g	t	p
g	0, 0	1,-1	-1, 1
t	-1, 1	0, 0	1,-1
p	1,-1	-1, 1	0, 0

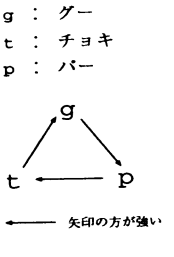


図 1: じゃんけんの利得表

対戦は、以下のような流れでコンピューター上でシミュレートする。

1. 1対1で試合する。
2. 1試合とは同じ相手と続けて n 回のじゃんけんを戦略に従い行うことである。(引き分けの場合も1回とする。) 各プレーヤーは各々の戦略を持っている。

3. コンピューター上で行ない、自分自身を含めたプレーヤー全員と試合を行う。
4. 1、2、を総あたりで行う。全試合を終了した時点での得点の合計を検討する。

2.2 各種戦略の定義

繰り返し対戦型のじゃんけんゲームを設定する。じゃんけんゲームをするプレーヤーを用意して、各々のプレーヤーは、それぞれに自分自身の戦略を持ち、その戦略に従ってじゃんけんをする。その戦略は、コンピューターのプログラムで用意する。対戦は全てコンピューター上で行ない、以下に、その戦略を示す。

自分の手を、h_tは、グー、チョキ、パーをそれぞれ、g、t、pとする。

1. でたらめ戦略：
   1回ごとに出す手を決定する場合に、ランダムに3種類の中から選択する。でたらめ戦略は、
   h_t＝（g，t，p）をランダムに選択する。
2. 一筋戦略：
   3種類の中で1つだけを選択し、試合中ずっとその手を出し続けて、他の2種類は出さない。自分の手、h_tは、

$$h_t = \begin{cases} \mathrm{g} & (\mathrm{g}\text{一筋戦略}) \\ \mathrm{t} & (\mathrm{t}\text{一筋戦略}) \\ \mathrm{p} & (\mathrm{p}\text{一筋戦略}) \end{cases}$$

   のいずれかになる。
3. 仕返し戦略：
   相手の数手前の手と同じ手を、自分の手として出す。1手前の手と同じ手を仕返しする場合は、自分の手の系列，(h_t,h_{t-1},h_{t-2},$\cdots$)　相手の手の系列，(o_t,o_{t-1},o_{t-2},$\cdots$) として、

$$h_t = o_{t-1}$$

   となる。この様子を図2に示す。

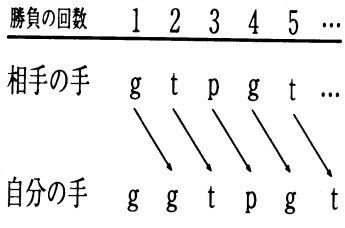


図 2: 仕返し戦略

2手、3手前の仕返し戦略の場合は、

$$h_t = o_{t-2}、h_t = o_{t-3}$$

となる。

4. 場合分け戦略：
   自分の一つ前の勝負の結果が、勝ち、引き分け、負けの場合に、その次の手を3種類のいずれかに決めておく戦略。

$$h_t = f(h_{t-1}, o_{t-1})$$

$$= \begin{cases} h^1, (h_{t-1}, o_{t-1}) \in \{(g,t),(t,p),(p,g)\} \\ h^2, (h_{t-1}, o_{t-1}) \in \{(g,g),(t,t),(p,p)\} \\ h^3, (h_{t-1}, o_{t-1}) \in \{(t,g),(g,p),(p,t)\} \end{cases}$$

   ただし、h^1,h^2,h^3 は、勝ち、引き分け、負けの時であり、それぞれ g、t、pのいずれかであり、その組合せにより図3に示した27種類の戦略がある。

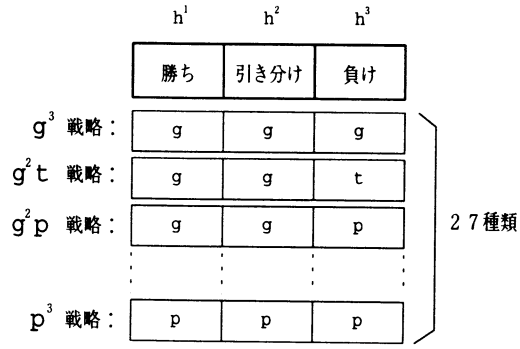


図 3: 場合分け戦略

5. 履歴学習型戦略：
   過去の相手の手を履歴として記憶しておき、それから相手の手を予測して出す手を決める。履歴2戦略の場合は、次のように書ける。

$$h_t = f(o_{t-2}, o_{t-1}, s_t)$$

   ベクトル s_tはプレーヤーの現在の状態を表す。状態の要素 w_{XYZ}は、過去に相手が手X、Yの次に手Zを出した回数を示す。

$$s_t = \begin{pmatrix} w_{ggg} \\ w_{ggt} \\ \vdots \\ w_{ppp} \end{pmatrix}, \quad s_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

   実際に出す手は、

$$w_{o_{t-2},o_{t-1},g}、w_{o_{t-2},o_{t-1},t}、w_{o_{t-2},o_{t-1},p}$$

   のうち数が最も大きいのをみつけ、それに勝つ手を出す。

s_tは、次式で更新する。

$$s_t = g(o_{t-3}, o_{t-2}, o_{t-1}, s_{t-1})$$

t = 1 、o_0 = ‘ g ’である場合、o_{-2}、o_{-1}、$\cdots$を、‘ g ’とすると、状態s_tは以下のようになる。

$$s_1 = g(o_{-2}, o_{-1}, o_0, s_0)$$

$$s_t = \begin{pmatrix} w_{ggg} \\ w_{ggt} \\ \vdots \\ w_{ppp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

履歴 4 、履歴 5 、履歴 6 戦略の場合も同様である。状態の更新と手の決定について図 4 に示す。

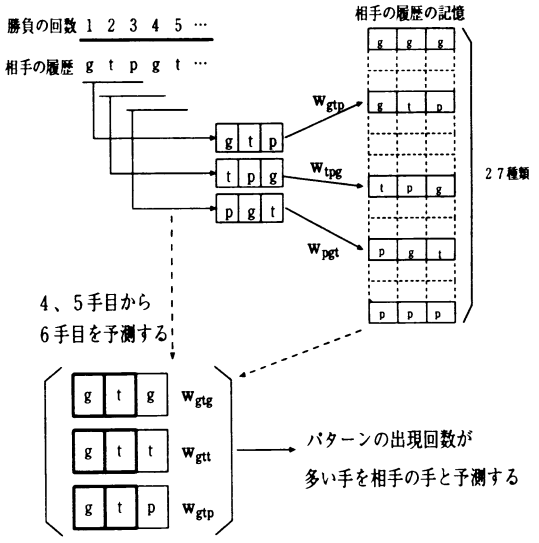


図 4: 履歴学習型戦略（履歴 2 戦略）

3 対戦結果

用意した戦略の中で、どの戦略が強いかを調べるために 1 試合につき n 回のじゃんけんを繰り返し行なった。3.1 に全ての試合を終えて、総合得点による順位表を示す。

その結果から履歴学習型の戦略が他の戦略よりも良い結果だったので、3.2 に履歴学習型戦略同士の対戦を行なった結果を示す。

3.1 総あたりの結果

1 試合について、n = 1000 回、5000 回、10000 回で行なった結果、どの場合においても履歴学習型戦略が上位を独占することになった。履歴学習型戦略のなかでも、履歴の長さによって順位に差があるものの、それ以外の戦略と比べて、高得点を得ている。これは、履歴学習型の戦略が、他の戦略に勝ち越していることを示していて、有効な戦略であると考えられる。

以下に、1 試合につき 10000 回のじゃんけんを繰り返した場合の、上位 10 個の戦略の対戦結果を示す。

順位	戦略	得点（勝ち－負け）
1	履歴 5 戦略	308331
2	履歴 4 戦略	300523
3	履歴 3 戦略	297204
4	履歴 2 戦略	284309
5	でたらめ戦略	-267
6	g g t 戦略	-12706
7	t t p 戦略	-12711
8	p p g 戦略	-14835
9	p t p 戦略	-24886
10	g p g 戦略	-24916

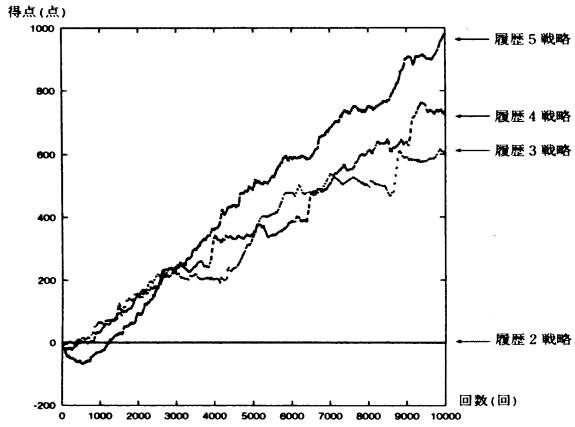
表 1: 1 試合に 10000 回のじゃんけんを行った結果

それぞれの戦略について、以下のようなことがわかる。

- でたらめ戦略:
  結果からもわかるように、勝ち、負け、引き分けの数に差がないという結果になった。これは、相手の手の履歴や 1 回ごとの勝負の結果に影響されないからである。
- 一筋戦略:
  ずっと同じ手なので、相手の戦略との相性によって、勝ち続けたり、負け続けたりして、あまり有効な戦略とは考えられない。
- 仕返し戦略:
  相手の手によって、出す手が決まってしまうために、相手の戦略に大きく依存してしまい、1 回ごとの勝負の結果を考慮していないため、良い結果が得られないと考えられる。
- 場合分け戦略:
  1 回ごとの勝負の結果、勝ち、負け、引き分けの 3 通りについて、あらかじめ出す手を決めている。そのため、相手の手を考慮していないために結果が良くなかった。
- 履歴学習型戦略:
  統計という形で相手の過去の全ての対戦結果を用いて、相手の次の手を予測をしていた。これに対して、他の戦略は、たかだか数手前の手についてだけしか用いていておらず、予測はしていなかった。そのために、履歴学習型戦略は、他の戦略に比べて良い結果が得られたと考えられる。

3.2 履歴戦略同士の結果

総当たりの対戦の結果から、履歴学習型戦略が、有効な戦略と考えられる。そこで、履歴学習型戦略同士の対戦について調べた。履歴戦略同士の対戦結果 1 試合につき 10000 回のじゃんけんを行なった。



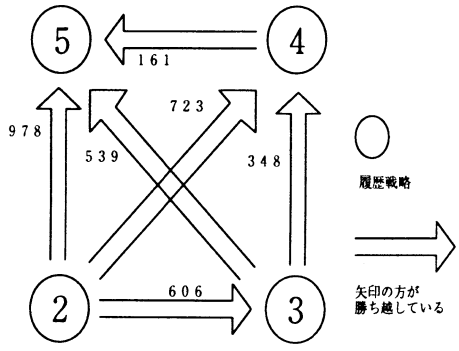


図 5: 履歴 2 に対する他の履歴戦略の結果

履歴学習型戦略同士の対戦をするとき、履歴を用いる長さと、履歴の初期値が同じもの同士の戦略は、結果はいつも引き分けになってしまう。これは、予測に用いる履歴が同じになってしまうために、図のように履歴 2 戦略同士は、引き分けという結果になった。履歴の長さで比べてみると、10000 回のじゃんけんを終えた時の、得点を得ると、履歴が長い戦略が短いものよりも良い結果がえられる。はじめのうちは短いものの方が有利なのは、履歴の用いる長さが長いと、学習に時間がかかるためと考えられる。正確に履歴のパターンを用いて予測するためにかかる、回数の違いによると考えられる。

このように、履歴学習型戦略は、履歴の初期値、長さ、対戦の回数といった違いにより差があるために、検討の必要がある。

4 まとめと今後の課題

今回は、繰り返し対戦型じゃんけんゲームというものを設定することで、じゃんけんに戦略を取り入れることを考え、有効な戦略の獲得と、その戦略の特徴についての検討をした。繰り返し対戦型ゲームを行なった結果、履歴学習型の戦略が有効であった。このことは履歴学習型戦略は、相手の全ての手の履歴を用いて相手の手を予測できているために、他の用意した戦略よりも良い結果が得られたと考えることができる。

実験では、決められた戦略、回数において、総当たりの総合得点で戦略の評価をしたが、他の戦略や、対戦方法により結果が違ってくると考えられる。そのため、いろいろな環境において、戦略の優位性がどのように変化するかを調べることが必要である。そして、有効と思われる履歴学習型戦略についても、履歴の初期値や、履歴の長さ、回数などのちがいにより、結果が違ってくる。そのような様々な履歴学習型戦略というものを考える必要がある。

今後は、有効な戦略を獲得するために、相手の手を学習し、次の手を予測することを試みたい。そこで、自己生成のモデルを用いて戦略を表現し、分類システムなどの枠組みで学習することを予定している。学習の方法としては、*GA* などを用いる。*GA* を用いることで、環境（対戦相手、条件など）の変化の影響を考慮した戦略の獲得が期待できる。そして、繰り返し対戦型じゃんけんゲームにおいて、戦略知識の獲得を試みたい。

参考文献

[1] モートン・D・デービス:「ゲームの理論」, 講談社 (1994)

[2] 西山 賢一:「勝つためのゲーム理論」, 講談社 (1995)

[3] 久保 長徳, 西野 順二, 小高 知宏, 小倉 久和:「遺伝的アルゴリズムによる知識獲得」,
平成 7 年度福井大学工学部情報工学科 修士論文, (1996)

[4] 牧野 泰裕, 西野順二, 小高 知宏, 小倉 久和:「対戦型ゲームにおける戦略知識獲得の試み」,
平成 8 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 p393, (1996)

問い合わせ先:

〒910 福井市文京3－9－1
福井大学工学部情報工学科
牧野泰裕
ymakino@rook.fuis.fukui-u.ac.jp
TEL: 0776-27-8968(ダイアルイン)
FAX: 0776-27-8751(事務室)

THB1-3

3次元CGにおけるライティングデザイン支援

Lighting Design Support on 3-D CG

青木 研 † 高木 英行 ‡

Ken AOKI† Hideyuki TAKAGI‡

九州芸術工科大学

†) 大学院 ‡) 音響設計学科

Kyushu Institute of Design

†) Graduate School ‡) Dept. of Acoustic Design

This paper applies an interactive GA technique to support lighting design of 3-D CG. Five amateur CG designers decide the best types, ON/OFF, color attributions, and positions of three lights in 3-D CG for a given object to match different two given motives. They make the lighting by hand and by using the lighting support system based on the interactive GA. 20 subjects compare their lighting arts, and a subjective test is conducted to evaluate how the interactive GA is useful. The subjective test has shown that the CG lighting support system especially helps lighting designers who are beginners.

1 はじめに

デザインの作業は、色や明るさ、形状、配置など多数のデザインパラメータの最適化問題として捉えることができる。したがって、GAのようなパラメータ最適化技術はデザイン支援技術として応用することが可能と考えられる。

GAはフィットネス値をベースに探索を行うので、デザイナの主観的評価を直接フィットネス値として扱う事で、デザイナの直観や、与えられたコンセプトやモチーフに対する解釈などを解の探索に反映させることができる。

このように人間とGAが協調的に探索する技術を対話型GAと呼ぶ。この技術を用いることで、デザイナはGAによるデザインパラメータの最適化の支援を受けつつデザインを進めることができる。

対話型GAのこのようなデザイン領域への応用は、画像や図を扱うシステム [1],[5],[7]、音楽を扱うシステム [3],[4]、工業設計を扱うシステム [8] などに用いられている。

本稿では3次元CGのライティングデザインを例にとり、対話型GAがいかにデザイナを支援できるかを主観評価実験を通じて評価する。

2 対話型GAによるCGライティング

今回評価を行う対話型GAによるCGライティングデザインには、ライティングパラメータの種類とGA演算の方式がそれぞれ異なる2つのタスクを用いた。

2.1 ライティングパラメータ

両タスクとも、同じ実験条件の女性上半身正面像の3灯ライティングである。両タスクの主な違いは、タスク2がライトの色のパラメータを持っており、GA探索の複雑度が増していることである。対話型GAは図1に示されたパラメータの最適な組合せ解を探索する。

タスク1では3つのライトはそれぞれ6個のパラメータを持ち、90bitの遺伝子にエンコードされる (図1(a))。typeはライトの種類を示し、点光源か平行光源かを1bitで区別する。ON/OFFはライトを点灯させるかどうかを示す。luminanceはライトの明るさを示す。latitude, longitude, distanceは、typeが点光源の場合はライトの位置を、平行光源の場合は光束の方向を球座標で表す。

タスク2での3つのライトはそれぞれタスク1のパラメータに加え、ライトの色の色相を示すhue、飽和度を示すsaturationを加えた8個のパラメータを持ち、114bitの遺伝子にコーディングされる (図1(b))。

2.2 GA演算

両タスクではGA演算の方式も多少異なっている。タスク1ではシンプレックス交叉 [2] と非対称突然変異率 [14] を用いている。この方式では個体数の半分を、良い親2個体と悪い親1個体を使ったシンプレックス交叉により生成し、残りの半分はこれをコピーする。そして各グループに対してそれぞれ20%と0.2%の突然変異率で演算を行う。これはGAの広域探索能力と収束の高速性のバランスを狙ったものであるが、文献 [14] の突然変異戦略とは多少異なっている。タスク1の個体数は9で、そのうち2個体はエリートとして前世代からコピーされる。タスク2ではより一般的なGA演算を用いる。2点交叉と、2%の突然変異率で演算を行い、個体数9のうち1つをエリートとして前世代からコピーする。

個体数が9というのは、通常のGAから考えると少なすぎるように思われるが、これは対話型GA特有の制限である。個体数が増加すると、多くの個体を一

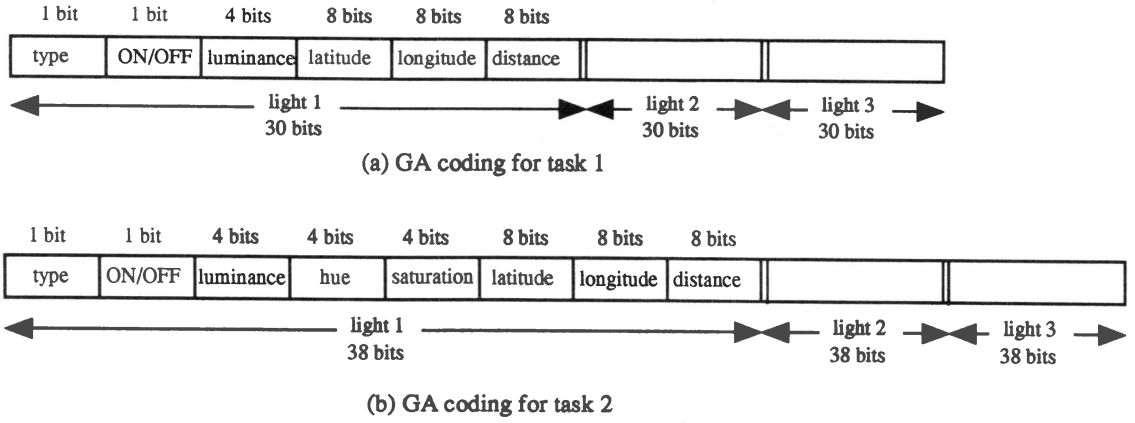


図 1: ライティングパラメータの遺伝子コーディング
'type' はライトの種類が点光源か平行光源かを示す。'ON/OFF' はライトのスイッチ、'luminance' は照度を表し、'latitude','longitude','distance' はライトの配置を球座標で表す。

度に画面に表示できない、何世代にもわたって全個体に対して評価を与えなければならないオペレータの疲労が増加するなど、実用上問題が生じてくる。このような対話型 GA システムのユーザインタフェイスに関する問題は重要な研究課題の 1 つである。この議論については第 6 節で再度取り上げる。

3 CG ライティングデザイン実験

ライティングデザイン支援における対話型 GA の能力を評価するため、5 人のアマチュアデザイナにライティングモチーフを与え、対話型 GA を使った場合と使わない場合とでライティングデザインを行わせた (図 2)。対話型 GA を用いない場合は、アマチュアデザイナ自身の知識と経験のみでライティングを行うことになる。この 5 人の CG 制作経験年数は、それぞれ 0 ～ 2 年程度である。対話型 GA を使ってライティングを行う場合は、GA が生成した 9 個のライティング結果が各世代ごとに同時に表示され、デザイナはそれぞれについて、どれだけ与えられたコンセプトに近いライティング結果であるかを 5 段階で評価する。評価値の 5 段階量子化は、オペレータの疲労軽減のためにおこなわれる [9]。

前節で述べた 2 つのタスクではそれぞれ表 1に示すようなモチーフをデザイナに与え、それに合ったライティングデザインを行わせた。

タスク 2 ではさらにモチーフの追加説明として、「映画のヒロイン...」には「やさしい、かれん、ほがらか、前向き、正義感」という描写を与えた。また、「映画の悪役...」に対しては「いじわる、しつこい、ずるい、こそく、邪悪、悪魔的」という描写を与えた。

実験に用いたユーザインタフェイスは、デザイナ

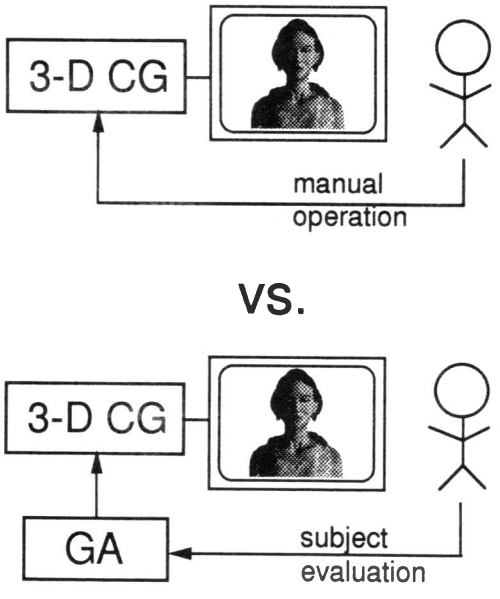


図 2: 対話型 GA を用いた場合と用いない場合での 3 次元 CG ライティングデザイン

の心理的負担を少なくするようにキーボードによる数値入力を避け、マウス操作だけで済むように設計した。対話型 GA を用いない実験では、3 次元 CG 空間上での直接操作が行えるように、3 次元 CG ツールキットである Open Inventor を使ってユーザインタフェイスを構築した。また、対話型 GA を用いる実験では、各ライティング結果の下に 5 つのボタンを配して、そのうちの 1 つをクリックして評価値を入力するようにした。

表 1: ライティングデザインのモチーフ

タスク 1	暗く陰鬱
	明るくさわやか
タスク 2	映画のヒロインのパンフレット写真
	映画の悪役のパンフレット写真

4 ライティング作品の主観評価実験

前節の実験で作成されたライティング作品は 20 名の評価者により、Sheffé の一対比較法 [6] の浦の変法 [13] を用いて評価を行った。

Sheffé の一対比較法は、評価者にライティング作品の対を見せ、その差を評価させる主観評価試験である。その評価者の評価結果から心理距離尺度が求められ、作品間の評価の有意差が分散分析によって検定される。

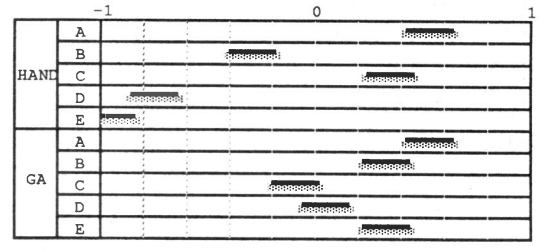
比較が行われる作品は、デザイナ 5 人がそれぞれ対話型 GA を用いた場合と用いない場合で作成しているので、1 つのモチーフにつき 10 枚である。したがって、主観評価実験に使われる作品の対は 1 つのモチーフにつき ${}_{10}C_2 = 45$ 対である。

主観評価実験は作品制作時と同一の CRT ディスプレイを用い、20 名の評価者を 4 人から 6 人の 4 グループに分けて行った。評価者には、(1) 作品がどの程度与えられたモチーフに合っているか、(2) 作品としての質がどの程度高いか、の 2 点について一対の作品間で比較を行い、その差を 5 段階で評価させた。

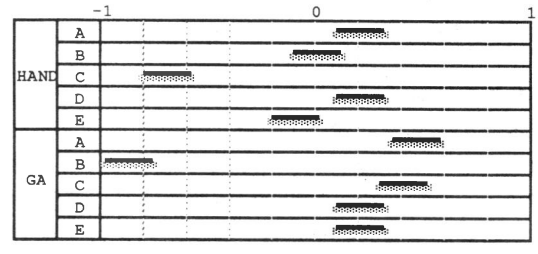
評価者による評価を統計処理した結果を図 3 に示す。横軸は構成された心理距離尺度で、図の中の黒とグレーの線はそれぞれ 95% 及び 99% の信頼区間を表している。心理距離尺度上で信頼区間が重なり合っていない作品間には評価に有意差があるといえる。

5 考察

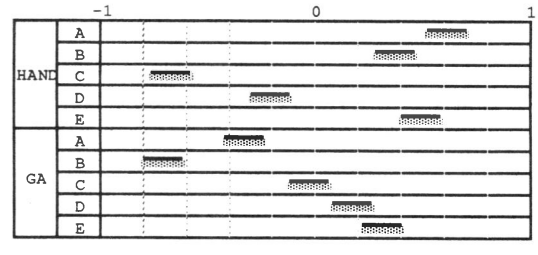
図 3 に主観評価実験の結果を示す。GA の方式によらず、HAND で評価が悪かった (< 0) デザイナ (図 3 (a) のデザイナ B,D,E, (b) のデザイナ C,E, (c) のデザイナ C,D, (d) のデザイナ D) は GA を用いた場合、全て有意に評価が高くなった。逆に HAND で評価が良かった (> 0) デザイナ (図 3 (a) のデザイナ A,C, (b) の A,B,D, (c) のデザイナ A,B,E, (d) のデザイナ A,B, C,E) は GA を用いた場合、有意差があるとは言えないか、あるいは有意に悪くなる傾向が見られる。HAND で評価の良かったデザイナは、デザインを行う以前にライトの配置に関する具体的なイメージを持っていたと仮定すると、GA を用いた場合、具体的なイメージどおりにライトの配置を収束させることが難しく、全体的に悪くなる傾向を示したのかもしれない。これは、



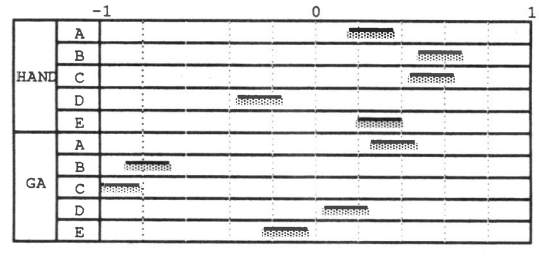
(a) 「暗く陰鬱」



(b) 「明るくさわやか」



(c) 「映画のヒロインのパンフレット写真」



(d) 「映画の悪役のパンフレット写真」

図 3: 主観評価実験の結果
(a) から (d) の 4 つのモチーフについて、評価結果の信頼区間が心理距離尺度上にプロットされている。HAND は対話型 GA を用いなかった場合、GA は用いた場合を示している。A から E はデザイナを示す。黒とグレーの線はそれぞれ 95% および 99% の信頼区間を表し、グラフの右側が高い評価を表す。

探索空間が広く、より収束が難しいタスク2の方が悪くなる傾向が強いことからも裏付けられる。一方、HANDで評価の悪かったデザイナは、最初に具体的イメージを持っていなかったと考えると、GAの持つ発見的探索能力と、人間の持つ評価能力の相乗効果によって良い結果が出たと考えられる。与えられたモチーフの、より具体性の強かったタスク2の方がHANDの評価が全体的に高いことからも、このことが裏付けられる。

以上より、GAの方式によらず、コンセプトに対する具体的なデザインのイメージをあまり持てないアマチュアの方が本システムによるサポートの効果が大きく表れるということができる。

6 まとめ

本稿では対話型GAを3次元CGのライティングデザインのタスクに適用し、アマチュアデザイナに対話型GAを用いた場合と、用いない場合でライティングデザインを行わせ、主観評価実験を通じて評価を行った。主観評価実験の結果から、対話型GAは本稿で扱ったタスクの種類やGAオペレータの違いに関係なく、特に知識や経験の少ないアマチュアデザイナの支援に効果があったということができる。

本稿では対話型GAによる支援が知識や経験の少ないアマチュアデザイナに有効であることを示したが、経験の豊富なデザイナへの支援の効果を評価するにはさらに実験が必要と思われる。これは今後の研究課題である。

対話型GAを用いた実用的なデザイン支援システムをつくるには、ヒューマンインタフェイスが1つの重要なポイントとなる。本研究では、対話型GAをCGデザイン支援に応用する研究とともに、その入力インターフェイス[9, 12]、及び表示インターフェイス[10, 11]についても研究をおこなっている。このような多角的なアプローチによって、対話型GA技術の実用化が可能になると考える。

参考文献

[1] Baluja, S., Pomerleau, D., Jochem, T., "Towards Automated Artificial Evolution for Computer-generated Images," Connection Science, vol.6, Nos.2 & 3, pp.325–354 (1994).

[2] Bersini, H. and Scront, G., "In search of a good evolution-optimization crossover," in *Parallel Problem Solving from Nature*, R. Manner and B. Mandrick (eds.), pp.479–488, Elsevier Science Publishers, (1992).

[3] Biles, J. A., "GenJam: a genetic algorithm for generating jazz solos," Int'l Computer Music Conf. (ICMC'94), pp.131–137, Aarhus, Denmark (1994).

[4] Damon. H., "Generating rhythms with genetic algorithms," Int'l Computer Music Conf. (ICMC'94), Aarhus, Denmark, (1994).

[5] McCormack, J., "Interactive Evolution of L-System Grammars for Computer Graphics Modelling" *Complex systems: from biology to computation*, (eds) D.G. Green and T. Bossomaier, Amsterdam, Netherlands: IOS Press, pp.118–130 (1993).

[6] Sheffé, H., "An analysis of variance for paired comparisons," J. of American Statistical Association, vol.47, pp.381–400 (1952).

[7] Sims, K., "Interactive evolution of equations for procedural models," The Visual Computer, vol.9, pp.466–476 (1993).

[8] Watanabe, T. and Takagi, H., "Recovering system of the distorted speech using interactive genetic algorithms," IEEE Int'l Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC'95), vol.1, pp.684–689, Vancouver, Canada (Oct., 1995).

[9] Takagi, H. and Ohya, K., "Discrete Fitness Values to Improve Human Interface of Interactive GA," IEEE 3rd Int'l Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'96), Nagoya, Aichi, Japan, pp.109–112 (May, 1996).

[10] Takagi, H., "System optimization without numerical target," NAFIPS'96, Berkeley, CA, USA (June, 1996).

[11] Takagi, H., "Interactive GA for System Optimization: Problems and Solution," 4th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT'96), Aachen, Germany (Sept., 1996).

[12] Takagi, H., Ohya, K., and Ohsaki, M., "Improvement of Input Interface for Interactive GA and its Evaluation," Int'l Conf. on Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing (IIZUKA'96), Iizuka, Fukuoka, Japan (Sept./Oct., 1996).

[13] Ura, S., "An analysis of experiments of paired comparisons," Quality Control, vol.16 pp.78–80 (1959) (*in Japanese*).

[14] Wada, KN, Doi, H., Tanaka, S., Wada, Y., and Furusawa, M., "A neo-Darwinian algorithm: asymmetrical mutations due to semiconservative DNA-type replication promote evolution," Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol.90, no.24, pp.11934–11938 (Dec., 1993).

【連絡先】
〒815
福岡市南区塩原4丁目9-1
九州芸術工科大学音響設計学科
高木英行
Tel : 092-553-4555
Fax : 092-553-4569
E-mail : takagi@kyushu-id.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THB1-4

DNAコーディング法によるホメオティック遺伝子の実現に関する一考察

A Study on Realization of Homeotic Gene using DNA Coding Method

吉川大弘 Tomohiro Yoshikawa　古橋武 Takeshi Furuhashi

名古屋大学工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

E-mail: yoshi@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp
Tel:052-789-2793 Fax:052-789-3166

Abstract Recently, hardware systems have been increasing in size and complexity, and it becomes extremely difficult to construct systems appropriately by designer's top-down approach. Studies on the hardware systems by bottom-up approach using genetic algorithm has been reported. However, the difficulties of vast search apace has been pointed out when the system becomes large. Indirect coding instead of direct coding is, therefore, needed to realize the automatic bottom up design. On the other hand, the mechanisms of the biological developmental process from only one egg cell have been investigated in biology. The existence of some of the controlling genes called the "Homeotic Genes" in DNA have been discovered in many animals including human beings. These genes are controlling activation/inactivation of other structural genes as transcription factor. This construction is similar to switching. The biological DNA acquires the indirect design system by these homeotic genes. This paper studies the indirect design system by realizing the performance of the homeotic genes. We have proposed a new coding method based on biological DNA and a mechanism of development from the artificial DNA. We call this coding method the "DNA coding method". This method can represent phenotypes flexibly and it has redundancy and overlaps of genes. This method uses four kind of bases on the chromosomes. Therefore, this method can be thought that it is able to realize the structure of chromosomes like homeotic genes and the mechanism of development process effectively. Furthermore, the information of amino acids arrangement has been used in one dimensional representation. However, the biological amino acids have three dimensions, so the proteins from the amino acids arrangement have diverse and complex abilities. In this paper, each amino acid has the information of two dimensions and the phenotype of each gene becomes the form of two dimensions. It is expected that the genes can represent information flexibly by this two dimensional development.

1. はじめに

近年、ハードウェア等におけるシステムの大規模化・複雑化が進み、設計者によるトップダウン的なシステムの設計は極めて困難になりつつある。樋口らは、遺伝的学習を用いた「進化するハードウェア」により、ハードウェア自身が適応的に自らのハードウェアを構成させていくことで、ボトムアップ的なシステムの構築を提案している[1]。しかしながら、文献[1]では、極めて規模の小さいシステムに対して回路の構築を行っており、規模の増大化に伴う計算時間等の問題により、大規模なシステムへの適用が困難であることを指摘している。これは、配線の接続パターンを極めて直接的に染色体にコーディングしていることにより、探索範囲が指数的に増大することで生じる問題点であると考えられる。

一方、近年の生物学上の研究により、生物個体の発生過程におけるメカニズムが解明されてきている[2]-[4]。それらの中でも、動物における受精卵から成体への発生過程において、他の一連の遺伝子の発現を調整する管理的な遺伝子（ホメオティック遺伝子：Homeotic Gene）の存在が、ヒトを含む多くの動物で確認され、発生の謎を解くカギとして注目を集めている[2]-[4]。動物の発生においては、DNA先頭部に存在するホメオティック遺伝子群が個々の遺伝子の活性・不活性を制御することで、間接的な個体構造の設計を実現している。

本稿では、生物におけるホメオティック遺伝子の働きを模倣することで、間接的な設計システムの構築を目指す。筆者らは、実際の生物におけるDNAとその翻訳機構に着目し、GAにおける染色体を4種類の塩基配列で表現するDNAコーディング法を提案

してきた[5]-[8]。この方法では表現型への翻訳において自由な表現方法をとることができるとともに、染色体が冗長性を持ち、柔軟なコーディングを行うことができる。また、本手法では、生物と同様にDNAにより染色体が表現されていることで、ホメオティック遺伝子などにおける染色体構造やその発生過程等のメカニズムを模倣するのに有効であると考えられる。

本稿では、間接的な設計システムの実現のための基礎的検討として、DNAコーディング法を用いたホメオティック遺伝子の模倣を行う。また、これまでに提案してきた手法では、DNA染色体の塩基配列およびそこから翻訳されるアミノ酸配列はすべて１次元情報として処理を行ってきた。生物においては、DNAに組み込まれた１次元情報は、タンパク質による３次元情報として翻訳され、極めて多様かつ複雑な個体形成がなされている。そこで本稿では、各アミノ酸に２次元情報を与え、そのアミノ酸配列により形成される２次元形態を表現型とすることで、各遺伝子により柔軟な表現能力を持たせる。

２．ホメオティック遺伝子

動物において受精卵から成体へと発生していく過程では、管理的な遺伝子が、特定の時期に特定の場所で命令を出し、それに従って一群の遺伝子が発現していることが、近年の生物学上の研究により解明されてきている。そのような管理的役割を果たす遺伝子として、ショウジョウバエの研究で見つかったホメオティック遺伝子は、脚や触角といった特定の構造の形成に関与していることが明らかにされている[2]-[4]。ホメオティック遺伝子におけるDNAの塩基配列を比較すると、約180塩基対の長さの非常によく似た特異的な塩基配列の部分があり、この塩基配列は”ホメオボックス”と呼ばれている[9][10]。さらにこれと同じもしくは類似した配列が環形動物からヒトを含む脊椎動物まで様々な動物にも共通して存在することが確かめられている[11]。

図１にホメオティック遺伝子による構造遺伝子(structural gene)の活性化の様子を示す。構造遺伝子は、個体生成のための細胞を作り出すタンパク質を合成する遺伝子で、この構造遺伝子の前後にはいくつかの制御領域が存在する[12]。これらの制御領域は、対応する構造遺伝子の活性・不活性の制御およびタンパク質の発現に対する時間的制御等を担う部分であり、この部分に転写因子(transcription factor)が結合することによって始めて、その構造遺伝子はタンパク質合成を開始する。すなわち、各構造遺伝子の付近にある制御領域がスイッチの役割を果たし、ホメオティック遺伝子から合成されるタンパク質が、そのオン・オフを決定する転写因子となることで、タンパク質合成の空間的・時間的制御を行っている。ただし、各構造遺伝子およびその制御領域は、それぞれの部品を作り出す部分とそのスイッチに過ぎず、全体を組み立てる設計図はホメオティック遺伝子群が持っている。図１において、ホメオティック遺伝子Aにより合成されるタンパク質が、転写因子として遺伝子1に対応する制御領域に結合し、遺伝子1を活性化している。なお、最近の生物学上では、構造遺伝子と制御領域あわせて、１つの役割を持つ部分全体を”遺伝子”と呼ぶことが多いが、本稿では、直接タンパク質を合成する部分、すなわちここでは構造遺伝子を遺伝子と呼ぶことにする。

図１では１つのホメオティック遺伝子が１つの構造遺伝子を活性化させている例を示したが、実際には、ホメオティック遺伝子と構造遺伝子とは１対１の対応ではなく、１つのホメオティック遺伝子はいくつもの構造遺伝子の活性化、さらには抑制のシグナルとして不活性化を制御している。図２(a)に３つのホメオティック遺伝子A,B,Cによる３つの構造遺伝子1,2,3の活性化・不活性化の制御の例を示す。図では、遺伝子1はホメオティック遺伝子Aにより活性化され、タンパク質を合成し、ホメオティック遺伝子Bからは抑制を受けている。同様に遺伝子2はホメオティック遺伝子A,Cにより活性化され、ホメオティック遺伝子Bからは抑制を受け、積極的にタンパク質の発現を抑えられている。これにより各遺伝子の発現における活性化・不活性化の状態推移を図２(b)に示す。特に高等な生物においては、ホメオテ

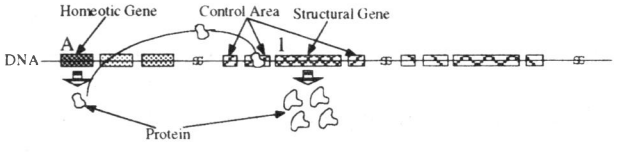
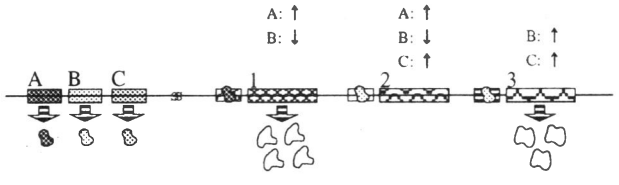
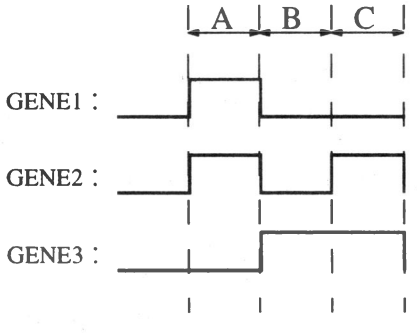


図１　構造遺伝子の活性化



(a)構造遺伝子の活性化・不活性化



(b)活性化・不活性化の状態推移

図２　ホメオティック遺伝子による制御

ィック遺伝子群はDNA中の前部に存在し、かたまりになっているDNAが先端部分からほどけていき、それにより先にあるホメオティック遺伝子から順に発現していくという説が有力であることが知られている。したがって図の例では、ホメオティック遺伝子Aが発現している間は遺伝子1,2がタンパク質を合成し、次のホメオティック遺伝子Bが発現している間は遺伝子3がタンパク質を合成し続ける。またこの時、遺伝子1,2は抑制され、積極的にタンパク質の発現を抑えられている。実際の生物においては、数十個のホメオティック遺伝子の組み合わせにより、複雑な制御システムを構築している。

3．DNAコーディング法

本章では、DNAコーディング法について説明する。生物においては、開始コドンATGから終了コドンTAG,TAA,TGAまでをDNAから読み取り、１つの遺伝子（構造遺伝子）としてタンパク質の合成を行っている[13]-[15]。その際には、３連続の塩基の並び（コドン）は、それぞれ対応するアミノ酸に翻訳される。終了コドン３つを除く計61種類の各コドンはすべて、それぞれ20種類のアミノ酸と対応している。本手法においても、開始コドンから終了コドンまでを１つの遺伝子とすること、および各コドンのアミノ酸との対応は生物と同様のものを用いる。

図３にDNA染色体と翻訳機構の例を示す。この例では、塩基配列の並びからATGコドンを読み取り、終了コドンTAGまでのコドンの並びを１つの遺伝子とし、各コドンをアミノ酸Tyr, Thr,・・・等に翻訳して、その遺伝子に１つの役割を持たせている。図１は、実際の生物の翻訳機構に則った例を示してある。

また、ϕX174ファージに見られるように、コドンの読み枠が１塩基ずれていて、遺伝子の上に遺伝子が重複していることがあり、しかもそれらの遺伝子がそれぞれ別の有効な働きをしている例が見られる[13]-[15]。これらの生物での例を模倣し、遺伝子の重複した読み取りを行う。図４ではこの遺伝子の重複によりGENE3, GENE4の他にさらにGENE5を読み取ることが可能である。本手法では、染色体が冗長性を有するとともに、遺伝子の重複が行われることで、情報の圧縮が可能となっている。また、本コーディング法は、染色体が塩基配列で表現されている

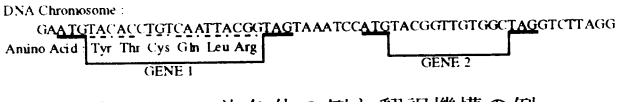


図３　DNA染色体の例と翻訳機構の例

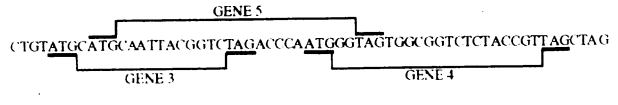


図４　遺伝子の重複

ことで、問題に応じて交叉や突然変異を工夫する必要がない。

DNAコーディング法の特徴を次に挙げる。

(a)柔軟な知識表現が可能である。

(b)染色体は冗長性を持ち、遺伝子の重複が可能である。

(c)染色体は可変長である。

(d)遺伝的演算が容易に行える。

4．ホメオティック遺伝子を用いたDNAコーディング法の適用

本章では、DNAコーディング法においてホメオティック遺伝子の働きを模倣し、空間充填問題に本手法を適用する。以下に、ホメオティック遺伝子の働き、DNA染色体中の遺伝子から２次元形状を持つタンパク質への翻訳方法および問題設定等について説明する。

4.1　ホメオティック遺伝子

実際の生物においては、進化の初期の段階においてホメオティック遺伝子の構造を自律的に獲得し、またその構造を獲得したことで、現在のような極めて高度な生物への進化が成し遂げられたものと考えられる。このことは、ヒトをはじめとする様々な生物において共通の塩基配列であるホメオボックスが存在することからも明白である。したがって、本来これらホメオティック遺伝子の働きは、遺伝子間の相互作用により自律的に獲得されることが望ましいが、本稿では、ホメオティック遺伝子の実現への基礎的検討として、その役割を設計者があらかじめ定めておくものとする。

本稿においては、DNA染色体中の位置により、前方部に位置する遺伝子群をホメオティック遺伝子群、それより後方の遺伝子群を構造遺伝子群とする。各ホメオティック遺伝子は先頭のものから順に発現し、構造遺伝子に対する制御を行う。第２章で示したように、各ホメオティック遺伝子は複数の構造遺伝子に対して転写因子として働く。本稿では、ホメオティック遺伝子から合成されるタンパク質の２次元形状と、各構造遺伝子が制御領域に持つアミノ酸配列の２次元形状が合致したとき、制御領域への結合とし、活性化・不活性化の制御を行う。また、時間的制御として、時間的制御領域への転写因子の結合により、構造遺伝子の発現の順序を制御する。ホメオティック遺伝子により活性化された構造遺伝子は、２次元形状を持つタンパク質を合成する。

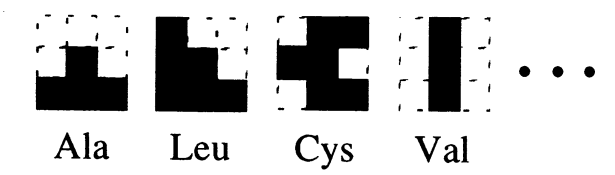
4.2　タンパク質の合成

本節では、ホメオティック遺伝子および活性化された構造遺伝子におけるタンパク質の合成方法について述べる。DNA染色体の塩基の並びから開始コドンATGを読み取り、終了コドンTAA,TAG,TGAまで

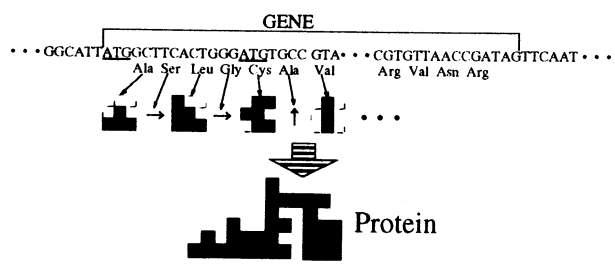
を１つの遺伝子として翻訳を行う。図５(a)(b)に本稿におけるアミノ酸の２次元形状の例と遺伝子からタンパク質への翻訳例を示す。図５(a)に示すように、アミノ酸は中心をコアとする３×３のブロック表現により表される。初期段階において、中心の１ブロックとランダムに選ばれたその周囲の８ブロックにより各アミノ酸の２次元形状を決定し、以後それらの形状は固定したままとする。すなわち、初期段階で決定されたアミノ酸のみが存在する環境の中で、染色体の進化により適切に環境に適応していくことが期待される。図５(b)に遺伝子からタンパク質への翻訳例を示す。アミノ酸の２次元配列を実現するため、アミノ酸２つを１セットとし、それぞれ２つめのアミノ酸は次のアミノ酸の接合方向を示すものとする。図で接合方向を示すアミノ酸セリン(Ser)・グリシン(Gly)・アラニン(Ala)はそれぞれ右・右・上を示しているので、ATGコドンの次のコドンGCTが対応するアラニン(Ala)から、ロイシン(Leu)・システイン(Cys)・バリン(Val)と図のようにアミノ酸が接続されていき、アミノ酸配列、すなわタンパク質が生成される。アミノ酸の配列は、終了コドンを読み取るもしくは接続されるアミノ酸が形成されているアミノ酸配列と重なったとき終了となり、そこまでの配列によりその遺伝子に対応するタンパク質となる。

４．３　問題設定

以上の方法で生成されたタンパク質は、ホメオティック遺伝子の制御する順序・方向に発現されていく。これにより、１つのDNA染色体から様々な形状のタンパク質の集合体が形成される。一定の大きさ・形状をもつ領域を設定し、この集合体をその中に生成させ、領域内での密度、すなわち領域内に存在するブロック数を各DNA染色体の評価値とし、遺伝的演算を行い、染色体を進化させる。なお、タンパク質が領域の外に発現されるときは、その時点で染色体のタンパク質の発現を終了する。構造遺伝子に対しては、より高密度なタンパク質の獲得、ホメオティック遺伝子に対しては、構造遺伝子が合成する様々な形状を持ったタンパク質の有効な組み合わせおよび有効な発現順序の獲得がそれぞれ要求される。



(a)アミノ酸の２次元形状



(b)タンパク質への翻訳

図５　アミノ酸の例とタンパク質への翻訳の例

５．まとめ

本稿では、生物における発生過程において重要な役割を果たしているホメオティック遺伝子について述べ、間接的な設計システムの実現のための基礎的検討として、DNAコーディング法を用いたホメオティック遺伝子の模倣を行い、具体的な導入方法について述べた。また、各遺伝子により柔軟な表現能力を持たせることを目的とし、これまで１次元情報として扱われてきたアミノ酸配列を２次元の形状で表現する手法について述べた。シミュレーションの結果については当日の発表により示す。

今後は、各遺伝子間の相互作用により、ホメオティック遺伝子の働きが自律的に形成されるシステムの構築を目指す。

参考文献

[1]樋口、伊庭、丹羽、田中、古谷："遺伝的学習によるハードウェア進化の基礎実験"、遺伝的アルゴリズム（北野宏明編：産業図書）、pp.263-285 (1993)

[2]土井："生物のかたちづくり"、サイエンス社 (1988)

[3]黒岩："ショウジョウバエの形態形成遺伝子"、科学、Vol.55、No.5、pp.277-289 (1985)

[4]W.J.ゲーリング："発生をつかさどる分子"、日経サイエンス1990年9月号、pp.131-143 (1990)

[5]吉川, 古橋, 内川："DNAコーディング法を用いた遺伝的アルゴリズムによるファジィルール発見"、電気学会論文誌C分冊、Vol.116-C、No.1、pp.125-132 (1995)

[6]吉川, 古橋, 内川："DNAコーディング法に基づくロボットの行動知識発見"、第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.891-894 (1996)

[7]T.Yoshikawa, T.Furuhashi, Y.Uchikawa, "*Acquisition of Fuzzy Rules from DNA Coding Method*", Lecture Notes in Artificial Intelligence 1152, pp.71-86 (1996)

[8]T.Yoshikawa, T.Furuhashi, Y.Uchikawa, "*DNA Coding Method and a Mechanism of Development for Acquisition of Fuzzy Control Rules*", Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'96), pp.2194-2200 (1996)

[9]W.Mc Ginnis et al., Nature, **308**, 428 (1984)

[10]W.Mc Ginnis et al., Cell, **37**, 403 (1984)

[11]M.Levine et al., Cell, **38**, 667 (1984)

[12]西田："すべては卵から始まる"、岩波書店 (1995)

[13]竹村、大井："生物の情報システム"、講談社サイエンティフィック (1990)

[14]中村、藤山、松原（監訳）："細胞の分子生物学第３版"、教育社 (1995)

[15]松原、中村、三浦（監訳）："遺伝子の分子生物学第４版（上）（下）"、トッパン (1995)

THB2-2

プログラムされた自己解体モデルによる進化システム

Evolutionary systems based on programmed self-decomposition model

大橋 力*、前川督雄**、佐山弘樹+、上野 修++

OOHASHI Tsutomu*, MAEKAWA Tadao**, SAYAMA Hiroki+, UENO Osamu++

*:ATR 人間情報通信研究所、**:ATR 知能映像通信研究所、+:東京大学大学院、++:岐阜大学医学部生化学教室

*: ATR Human Information Processing Research Laboratories, **: ATR Media Integration & Communications Research Laboratories, +: The University of Tokyo, ++: Department of Biochemistry, Gifu University School of Medicine

We previously proposed a biological hypothesis ``programmed self-decomposition (PSD) model [1]" which assumes that a self-decomposition mechanism is programmed in each cell of all living organisms on earth, and that the mechanism contributes to the restoration of the ecosystem to its original state. Results of simulations of virtual lives suggest the validity of our concept of the mechanism not only for the restoration of the ecosystem but also for evolutionary adaptation of virtual lives that exist in an environment that is heterogeneous and limited with respect to space and substance.

1. プログラムされた自己解体モデルの立脚点

1.1 地球生態系の原状回復メカニズム

わたくしたちの生きる地球生態系では、空間の容積も、存在する物質の種類や量もかぎられている。空間的にも物質的にも有限のこの環境のなかで、地球の生命は何十億年にもわたって連綿と生命活動をつづけてきた。生命が増殖し、生きていくためには、生態系のなかのいくばくかの物質を消費し、空間を占有しなければならない。地球生態系では、こうして消費された物質や占有された空間は、さまざまなみちすじをとおってもとの環境に還元され、あたらしい生命が生きることを可能にしている。こうした生態系の原状回復のしくみは、この地球が悠久の生命を栄えさせてきた重要な土台になっている。

この原状回復のメカニズムは、これまでは、生きものがたがいに他の生命の食物になりあう「食物連鎖」と、生命が破綻して無秩序に崩壊していく「自己消化(autolysis)」とによると説明されてきた[2]。これに対して、わたくしたちは、一方でこうした原状回復メカニズムがはたらくとともに、他方では、生命の個々の細胞それじたいが計画的・積極的に自己を解体して環境の復元に寄与する、もうひとつの原状回復のメカニズムがあり、すべての生命に遺伝的にくみこまれているという、あたらしい仮説をたてた[1]。

1.2 死に対するさまざまな態度

世の中には、死に対するさまざまな態度がある。とりわけ、個々の社会が文化としてもっている死生観は多様である。それらについて、どれが正しく、それ以外はあやまっている、あるいは劣っているときめつけるのは、現段階では適切とはいえないだろう。たとえば、死は欠陥やミスにもとづく生の敗北であり、できうるならば不死をのぞみたい、という態度が近代社会をつうじて強調されてきた。それに対して、死は生の重要な基盤であり、あらたな生への出発である、とかんがえることも可能である。後者のかんがえかたは、近代社会で多数派になった人間の生命を絶対視する立場とはなじみにくいだろう。しかし、ヒンドゥー系の輪廻思想が浸透しているアジア文化圏では、こうしたとらえかたこそ、古くから社会を通底した、自然で一般的な態度にほかならない。

生態系維持のためにみずからを解体するメカニズムが地球の生命の遺伝子にプログラムされている、とするわたくしたちの仮説は、死を積極的に評価する方向性のつよいこうしたアジアのコスモロジーを、重要な背景にしている。

2. 生命の数理モデル

J.フォン=ノイマンは、生命をあらわす数理モデルとして「自己増殖オートマトン」モデルを提唱した。わたくしたちは、この「自己増殖オートマトン」を基礎にして「プログラムされた自己解体モデル」を数理科学的に表現した[1]。

2.1 ノイマンの自己増殖オートマトンモデル

ノイマンの自己増殖オートマトン[3]は、(1)工作オートマトンA、(2)工作のための命令(プログラム)テープI、(3)命

令テープのコピーをつくるオートマトンB、(4)以上を連携して作動させるメカニズムC の四つの部分から構成されている 。ここで、命令テープIにこれらABCそれ自身の設計図がかかれている場合、オートマトンA+B+C(=オートマトンD)にその命令テープIDがセットされたシステムは、自分自身とおなじものを複製、すなわち自己増殖できる。

また、このオートマトンの命令テープIにDの設計図とともに他のオートマトンFの設計図がかきくわえられているオートマトンは、オートマトンDとともにFもつくることができる。これは生命の進化の可能性を表現しているといえるだろう。

生命の自己増殖メカニズムについて、上にのべたノイマンの提案と現実の生命とのあいだにたかい近似性があることが、後に分子生物学の発展にともなってあきらかになった。ただし、ノイマンのオートマトンは、空間・材料・エネルギーがあたえられつづけるかぎり増殖する一方であり、なんらかの外力によって打撃をこうむることがないかぎり、それ自体の構造は維持される。すなわち、ノイマンの自己増殖オートマトンは、不死の生命モデルといえる。これに対して、実際の地球上の生命は例外なく死にいたり、しかも死後には、特別な処置をほどこさないかぎり、その構成要素にむかって解体されてしまう。この点に注目すれば、ノイマンの自己増殖オートマトンと地球の生命とのあいだには、一部に本質的なちがいがあるとかんがえることができる。

2.2 自己増殖－自己解体するシステム

そこで、わたくしたちは、上記のオートマトンFのヴァリエーションとして「ふだんはねむっているが、スイッチがはいると、自分の属するオートマトンをその原料にまで解体してしまうサブモジュールFZ」を想定し、ノイマンの自己増殖オートマトンにそれをつけくわえた。このオートマトン(オートマトンGと名づける)は、FZ をふくめて自己増殖をくりかえし、あるきっかけで解体サブモジュールFZ が起動すると、みずから自分のからだを原料にまで解体する、すなわち自己解体する。

解体サブモジュールFZ が起動するきっかけは環境が不適合な状態になったとき、治癒不可能な損傷をこうむったとき、オートマトン自身の寿命がきたとき、などをかんがえることができる。

このシステムを、「自己増殖－自己解体システム(self-reproductio～self-decomposition system = SRSD system)」と名づけ、以上の理論モデルをプログラムされた自己解体モデル(programmed self-decomposition model = PSD model)とよぶことにした。

3.人工生命のシミュレーションによる検証

自己解体のメカニズムが地球の生命に実際にプログラムされているか、生態系の原状回復に寄与するかなどを検証するために、現在ふたつの手法で研究をすすめている[1,4,5]。

ひとつは原生動物テトラヒメナをもちいた実験で、それによって、自己解体メカニズムが存在し、遺伝子にプログラムされていることを示唆する結果がえられつつある。

また、コンピュータのなかに人工生命とそのすまう環境とをつくって増殖させるシミュレーションをすすめている。自己解体メカニズムの生態系の原状回復への貢献や、生命や生態系の進化の上での効果をしらべるためには、理想的には、自己解体する生命と、自己解体しない生命とそれぞれのすまう生態系を実際につくって、比較することがきめ手になる。しかし、この実験を厳密におこなうとすると、その規模や時間があらためて地球生態系の歴史をくりかえすほど巨大なものとなり、現実性にとぼしい。そこで、自己解体する人工生命と自己解体しない人工生命とを、わたくしたちの自己増殖－自己解体システム・モデルとノイマンの自己増殖オートマトン・モデルとにもとづいてコンピュータ上にくみあげ、両者を、すべての初期条件がひとしいふたつの有限環境でそれぞれ増殖させて比較するシミュレーションをおこなった。

3.1 人工生命シミュレータSIVA-3

この目的のために、これまでよりも現実の生命・生態系により近い条件でシミュレーションできるようなあたらしい人工生命シミュレータSIVA-3 を設計した。これは、これまでのおおくの人工生命シミュレータとことなるいくつかの特徴をもっている。たとえば、人工生命のすむ環境の温度が均質でなく、地球の各地で温度差があるように、温度に地域差がある。また、生命活動の材料となる物質A・B・C・Dを設定したが、それらも有限で、かつ分布に地域によるかたよりがあり、それぞれの物質の濃度が足りなければ、人工生命は増殖できない。

SIVA-3 上のこのような環境条件をともなう縦横各 128 ピクセルのひろがりをもつ2次元空間を初期の生態系とし、

まったくおなじものをふたつつくった。そして、そのふたつの生態系それぞれの中央に、その地点の環境条件にのみ適合しており、ともに1ピクセルの空間を占有する「自己解体する人工生命」と「自己解体しない(不死の)人工生命」とを一匹ずつおき、同時に増殖を開始させた。

3.2 シミュレーション結果

ふたつの生態系におけるそれぞれの人工生命の繁殖状況の推移を、シミュレーション過程のいくつかのタイムカウント(TC、ほぼ「世代」に相当する)について図1にしめす。自己解体する人工生命がTC=4000まで繁殖をつづけたのに対して、自己解体しない人工生命の増殖はTC=100をこえたところであたまうちになり、そのままの状態がつづいた。

シミュレーションの結果えられた自己増殖回数と突然変異回数との推移を図2にしめす。自己解体する人工生命は、自己増殖回数、突然変異回数ともに増加をつづけ、それぞれ5597回、363回をかぞえた。一方、自己解体しない人工生命は、TC=134であたまうちとなり、それぞれ279回、14回にとどまった。

3.3 考察

(1)自己解体メカニズムの生態系原状回復への貢献

ふたつのタイプの生命は、それぞれのおかれた環境のな

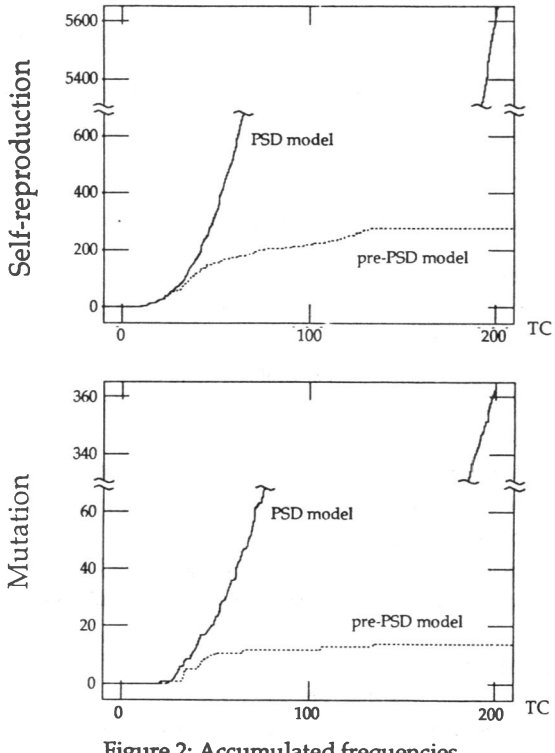


Figure 2: Accumulated frequencies of self-reproduction and mutation

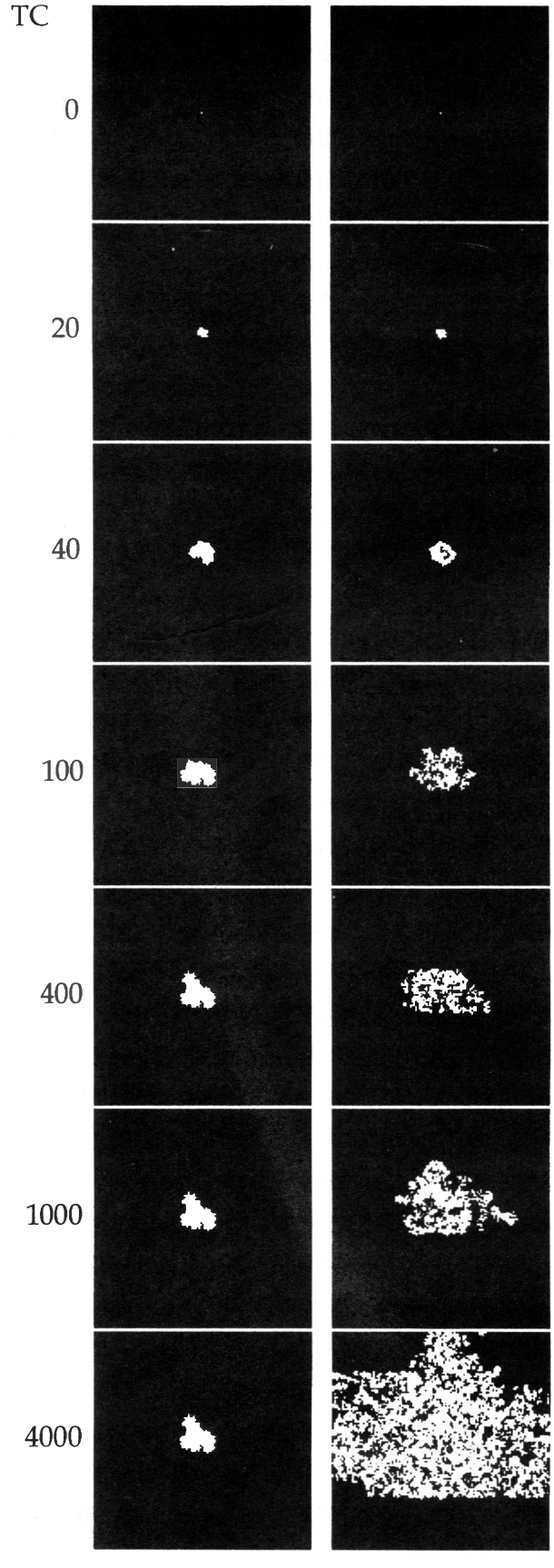


Figure 1: Transition of spatial distribution of individuals (left : pre-PSD model, right : PSD model)

かでまずは順調に増殖していった。しかし、自己解体しない人工生命は、ある領域まで勢力をひろげたところで、それ以上の増殖が不可能になった。これらの生命は中央部分の環境にのみ適合するようにつくられている。その範囲外ではより高温あるいはより低温にたえられないという環境不適合や、材料物質や空間の不足によって、これ以上の増殖が不可能になったとかんがえられる。

また、自己解体しない生命の系は、増殖が停止した以降シミュレーションを終了するまでそれ以上の変化は生じず、なんらかの外力がはたらかないかぎりその状態がつづくと判断できる。すなわち、空間・物質が有限の生態系では、自己解体しない生命のみが棲息する場合、環境はそれ以上の増殖を許容しないような状態を終着点として、非周期的・一過的に改変されていくことがわかる。

一方、自己解体する人工生命たちは、おなじ領域で何度も増殖・解体をくりかえしていることが観察できた。自己解体しない人工生命と同様に中央部分の環境にのみ適合するようにつくられているにもかかわらず、彼らの増殖が停止しないのは、自力で環境をもういちど棲息可能な状態に復元することができるためと解釈できる。このことと、自己解体しない生命の増殖停止とをくらべてみると、自己解体メカニズムによる空間・物質の環境への還元が有効にはたらき、生態系の原状回復に貢献していることが示唆される。増殖による空間・物質の消費速度と、解体によるそれらの再生産速度とは、やがて平衡状態に達することが期待できるだろう。この一種の動的平衡状態に達したあとでは、生命の増殖・解体にともなう環境変動は、無視できるほど小規模なものにちかづいていく。そうした平衡状態に達した生態系に適合した生命種があらわれた場合、その種は自己増殖にともなう環境変動の打撃から解放され、食物連鎖など他からの力による原状回復メカニズムが存在しなくても、子は代々の祖先と近似の環境条件のもとで生きることが期待できる。すなわち、この種は、この生態系において、安定して存続することが可能になるだろう。このように、空間・物質がかぎられた生態系では、自己解体による原状回復がおこなわれる場合のほうが、それがおこなわれない場合にくらべて、生命と環境との適合がよりおおきく保障される。

(2)自己解体モデルによる進化システム

また自己解体する人工生命は、くりかえされる増殖のなかで、自己解体しない人工生命よりも圧倒的におおく、突然変異による進化のチャンスにめぐまれることになる(図2)。そこにうまれてくる多様なミュータントたちのなかから、当初は不適合だった領域に進出できるあたらしい種が出現してきたことが観察できる。やがて、生態系全体がそれ自体ひとつの生命であるかのように、まとまってダイナミックなうごきをみせる高度に複雑で有機的なシステムをかたちづくるにいたった。このようなシミュレーション結果は、自己解体メカニズムが進化を促進し、多様な環境にすむ多様な生命をうみだす原動力となりうることを示唆している。

こうして多様に進化した生命たちは、それぞれのすまう環境条件に適合したライフスタイルをもち、たがいに時間空間をわけあって共存している。これは、今西錦司が自然界のあまたの生物の生態観察から発見した「棲みわけ」を、人工生命の生態系において実現した姿としてとらえることができる。自己解体する人工生命のシミュレーション結果がしめすこの状態は、これまで論理的・実証的な支持材料にかならずしもめぐまれていなかった今西の洞察に対する、あたらしいうらづけのひとつになるのではないだろうか。

また、ダーウィンのとなえた進化論をはじめとするこれまでのほとんどの進化モデルは、生存競争(struggle for existence)を不可欠の側面としている。弱肉強食と冷酷な淘汰とにかちのこるのがそのメカニズムで、他者とのせめぎあいが不可欠の属性になっている。それに対してわたくしたちのモデルは、他者とのせめぎあいなしに進化が実現するという性質において、おそらくこの分野で前例のない特徴をもっている。これは、ダーウィンの適者生存の概念に、根本的なみなおしをせまるものかもしれない。

<参考文献>

[1]大橋 他: プログラムされた自己解体モデル, 科学基礎論研究, 18, 2, 79-87 (1987)

[2]Odum E. P.: Fundamentals of Ecology, Third ed., 104-105 (1971)

[3]Von Neumann J.: The general and logical theory of automata -- The Hixon symposium, John Wiley & Sons, 1-41 (1951)

[4]Oohashi et al.: Programmed self-decomposition model and artificial life, Proc.1995 International Workshop on Biologically Inspired Evolutionary Systems, 85-92 (1995)

[5]Oohashi et al.: Artificial life based on programmed self-decomposition model, ATR Technical Report TR-H-198 (1996)

問合せ先：大橋 力

〒619-02 京都府相楽郡精華町光台 1-2

ATR 人間情報通信研究所 感性脳機能特別研究室室長

TEL: 0774-95-1002　E-mail: oohashi@hip.atr.co.jp

THB2-3

ハードウェアの行動の進化

Evolution of Hardware Behavior

邊見 均　　日景 智文　　下原 勝憲

Hitoshi Hemmi　Tomofumi Hikage　Katsunori Shimohara

NTT ヒューマンインターフェース研究所

映像処理研究部 進化システム研究グループ

Evolutionary Systems Group,

ATR Human Interface Laboratories

Abstract:

This paper overview a hardware evolutionary system "AdAM", investigate the architecture and the methodology of the system. Some research projects built on AdAM basis are also presented.

1 はじめに

進化的な方法論は最近広く認知されるようになり、進化手法を使ったシステムも多く見られるようになってきた。

しかし、進化的システムの一つの弱点はその手法が集団に対してしか働かないということである。これは計算機の上で実行する限り、スピードの点で進化手法は他の方法に比べて本質的なオーバーヘッドを持っている可能性があることを意味する。

この弱点を克服できる有力な候補はハードウェア (電子回路) 進化である。ハードウェアはエレクトロニクスのスピードで動作するし、並列化が容易である。進化手法は並列手法であり、この点でハードウェアの使用と非常に相性が良い。エレクトロニクス分野における FPGA (Field Programmable Gate Array) のようなプログラム可能なデバイスの開発もこの状況に貢献している。

この論文は AdAM (Adaptive Architecture Methodology) と呼んでいるハードウェア進化 システム / プロジェクト について紹介する。

このシステムが他のハードウェアシステムと比較してとりわけ特徴的な点は、これが大規模なシステムを指向していることと、このシステムではハードウェアの行動が進化しているということである。この性格はハードウェア記述言語 (Hardware Description Language: HDL) という強力な道具を使用していることに由来する。(HDL は本来は LSI CAD で使われる言語である。)

この論文は AdAM システムのアーキテクチャ、使われる技術を概観し、このプロジェクトの最近の成果を紹介する。

2 AdAM システムのメカニズム

2.1 AdAM システムの概要

図 1 に AdAM システムの概要を示す。この図に示されるように他のシステムと同様にこのシステムもループオペレーションを行なう。

ループに沿って説明すると、プロダクションルールのセットと構造を持った染色体からまず HDL プログラムの集団が生成される。次に、HDL プログラムはコンパイルされて、その出力が FPGA にロードされる。FPGA は電子回路として動作し、その動作が評価される。評価結果を受けて染色体に遺伝的操作が施され、新たなプログラムの生成が行なわれる。

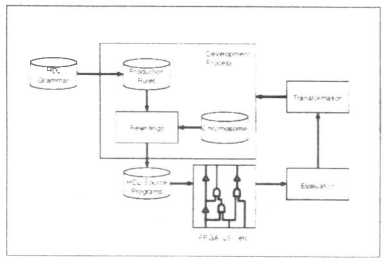


図 1: AdAM システムの概要

2.2 HDL プログラムの自動生成

AdAM システムは HDL プログラム生成メカニズムを備えている。このメカニズムはプログラム言語の仕様を厳密に定める方法をベースにしている。ほとんどすべてのプログラム言語はその仕様を BNF (Backus Naur Form) と呼ばれる方法で定めている。



図 2: プロダクションルール (BNF)

図 2 は本システムで使用している SFL という HDL の仕様を BNF で示したものである。[1]同じような記述は “C” や “C++” のレファレンスマニュアルでも見ることができる。

一つの言語の BNF 記述は一連の定義あるいはプロダクションからなる。図 2 の最初のルールは “SFL DEScription” を “SEQuece of MODule DEFinitions” と定義している。また “SEQuece of MODule DEFinitions” は’「空」(2 番目のルール)、 あるいは “SEQuece of MODule DEFinitions” と “MODule DEFinition” の列 (3 番目のルール) と定義されている。同様に “FORMULA” は “MONOMIAL”, “@”, “FORMULA” の列となることができる。このようにして言語の仕様は細部まで定められる。

ここで視点を変えると、言語仕様の BNF 記述はその言語のプログラムの自動生成に使うことができる。図 2の例を使うと、最初に記号 “sfl_desc” を用意する。(図 3参照) そしてこの記号を図 2の最初のルールに従い “seq0_mod_def” と書き換える。次にこの記号を 3 番目のルールに従い “seq0_mod_def” と “mod_def” に書き換える。この操作を続けると 1 つの SFL プログラムが次第に生成されてくる。

この操作はすべての記号が「終端記号」になった時に停止する。「終端記号」とはオペレータ記号、名前など、それ以上書き換えられない記号である。

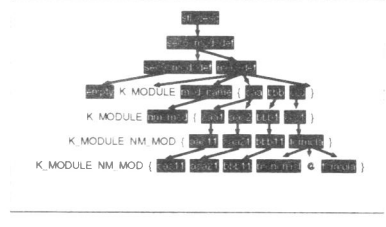


図 3: HDL プログラムの自動生成

2.3 染色体

前節で述べたプログラム生成には曖昧さがあった。例えば記号 “formula” には 5 通りのプロダクションルールが適用できる。

この曖昧さを取り除くのが染色体の役割である。図 4にこのシステムで使う染色体の例を示す。染色体は木構造をしている。各ノードはプログラム生成過程の 1 つの記号の書き換えに相当しており、ノードに書かれているのはその時に使用されるルールの index である。この染色体を用いるとプログラムは曖昧なく生成できる。

2.4 プロダクション遺伝的アルゴリズム

本システムにおける遺伝的操作は一見 Genetic Programming のものに類似しているが、原理を一般化して整理してあるため、LISP 以外に HDL を含む広範囲の

[1]SFL は LSI 設計システム PARTHENON の HDL である

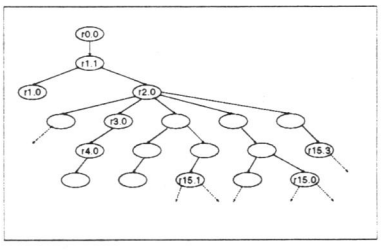


図 4: 染色体

プログラム言語に適用可能となっている。この手法をプロダクション遺伝的アルゴリズム (Production Genetic Algorithms :PGA) と呼んでいる。

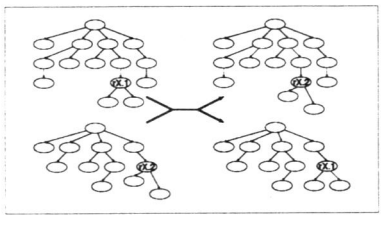


図 5: 交叉

図 5に PGA における交叉操作の例を示す。AdAM システムでは、Genetic Programming の場合と異なり、染色体の交換可能な副木は文法的に等価なものに限られる。すなわち副木のルートノードが同一の記号に対するプロダクションルールに相当しているもの同士のみが交換可能である。

図 2ではそのようなプロダクションルールは index の親番号が同一のものである。例えば r15.1 および r15.3 は同一の記号 "formula" に対するルールであり、それらをルートに持つ副木は、図 5のように交換可能である。

3 AdAM システムの発展

AdAM システムは進化ハードウェアのフレームワークとなるように作られた。この節では AdAM システム上での最近の 2 つの実験について述べる。

3.1 2 倍体モデル

ほとんどの多細胞生物は 2 倍体である。2 倍体の生物は優性・劣性の遺伝を行なうことができ 1 倍体の生物より優れていると考えられている。線形の染色体では優性・劣性の実現は比較的容易であるが、構造を持つ染色体では工夫が必要である。我々は次の方法を取った。([7])

まず木構造の染色体中のノードを拡張し、優性・劣性遺伝子に相当する 2 つの副木を持たせる。それらのうち優性に相当する副木だけが発現し、プログラムの一部となる。またそれらの副木は、時々役割を交替する。(6)

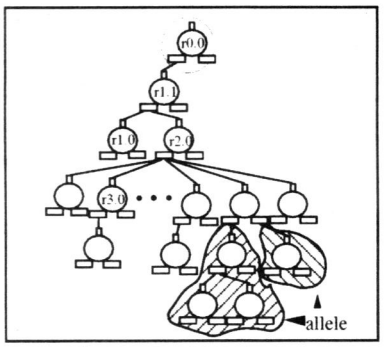


図 6: 優性・劣性を持った染色体

このモデルを変化する環境での人工蟻の問題に適用した。([7])

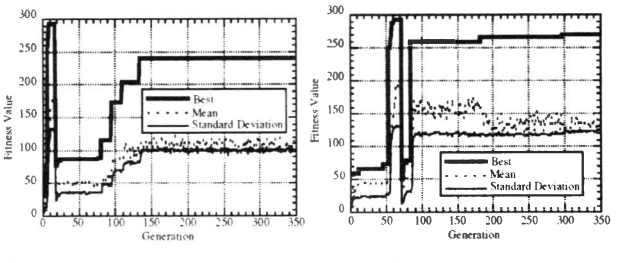


図 7: fitness の変遷 (1 倍体モデルと 2 倍体モデル)

結果を図 7 に示す。この図で左が 1 倍体モデルで右が 2 倍体モデルの場合である。最初は 1 倍体モデルの方が 2 倍体モデルより早く適応が進む。しかし環境が変わると 1 倍体モデルが回復に手間取るのに対し、2 倍体モデルはすばやい回復を示す。このように 2 倍体モデルの方が 1 倍体モデルよりもロバストであるといえる。

3.2 漸進進化モデル

ここでは目標を易しいものから難しいものへ次第に変化させる進化モデルについて述べる。([8]) このような方法は、非常に困難な問題に対し進化的方法を適用するさいに有効であると期待される。

ここでも実験には人工蟻の問題を使用した。John Muir trail の餌の配置を変え、段階的に難しくなる問題を数個設定した。各段階の問題ですべての餌を取るためには、蟻はそれぞれいくつかの新たな行動を獲得しなければならない。

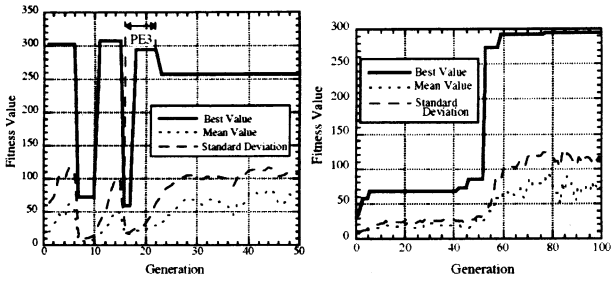


図 8: 漸進進化モデルと通常の進化モデルの比較

図 8 は漸進進化モデルと通常の進化モデルの比較を示す。この図で左が漸進進化モデルで右が通常の進化モデルである。漸進進化モデルでは蟻は目標の John Muir Trail に 20 世代以内で適応している。この実験ではすべての餌を取れる個体が現れてから問題を切替えるまで 5 世代の猶予を設けているので、実質的に必要な世代数はもっと少ない可能性もある。一方、最初から John Muir Trail だけで進化させたモデルではすべての餌を取る個体が現れるまで 60 世代程度を必要としている。この結果は漸進進化モデルの有効性を示している。

4 まとめ

この論文では AdAM システムのメカニズムを概観し、最近の結果を述べた。

参考文献

[1] H. Hemmi, J. Mizoguchi, and K. Shimohara. "Development and Evolution of Hardware Behaviors", In *Artificial Life IV*, pp. 371–376, Cambridge, MA, 1994. MIT Press.

[2] J. Mizoguchi, H. Hemmi, and K. Shimohara. "Production Genetic Algorithms for Automated Hardware Design Through an Evolutionary Process", In *Proc. of ICEC*, pp. 661–664, 1994.

[3] H. Hemmi, J. Mizoguchi, and K. Shimohara. "Hardware Evolution - An HDL Approach", In *Proc. of Japan-U.S.A Symposium on Flexible Automation*, pp. 1285–1288, 1994.

[4] H. Hemmi, J. Mizoguchi, and K. Shimohara. "Development and Evolution of Hardware Behaviors", In *Towards Evolvable Hardware (Lecture Note in Computer Science 1062)*, pp. 250–265, 1996. Springer.

[5] H. Hemmi and K. Shimohara, "Hardware Evolution - a real "life on the silicon"", In *Proc. of International symposium on Artificial Life and Robotics (AROB)*, pp. 191–194, Oita, Japan. 1996.

[6] H. Hemmi, J. Mizoguchi, and K. Shimohara. "Evolving Large Scale Digital Circuits", In *Artificial Life V*, MIT Press.

[7] T. Hikage, H. Hemmi, and K. Shimohara, "Hardware Evolution System Introducing Dominant and Recessive Heredity" In *Proc. of International Conference on Evolvable Systems: from Biology to Hardware (ICES96)*, Springer.

[8] T. Hikage, H. Hemmi, and K. Shimohara, "Progressive Evolution Model Using A Hardware Evolution System", In *Proc. of International symposium on Artificial Life and Robotics (AROB)*, Oita, Japan. 1997.

問合わせ先

〒 239 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

NTT ヒューマンインターフェース研究所

映像処理研究部 進化システム研究グループ

邊見 均

TEL: 0468-59-2941, FAX: 0468-59-2332

E-Mail : hemmi@nttcvg.hil.ntt.co.jp

進化アルゴリズムの理論について

An Overview of Theoretical Studies on Evolutionary Algorithms

喜多 一

Hajime Kita

京都大学 大学院 工学研究科

Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract Recently, evolutionary algorithms (EAs), population-based search algorithms have attracted attention as robust optimization techniques widely applicable to hard problems. EAs include several sorts of algorithms such as the genetic algorithms (GAs), the evolution strategies (ESs), the evolutionary programming(EP) and the genetic programming (GP). This paper gives a brief overview of theoretical studies on the EAs, mainly those on the GAs.

1. はじめに

生物の遺伝と進化を模倣し，個体群を用いて解を探索する計算手法である進化アルゴリズム (Evolutionary Algorithm, EA)[1]は幅広い問題に適用可能なロバスト性の高い最適化手法として注目されている．EA はいくつかの独立して展開されてきた類似の手法の総称であり，遺伝アルゴリズム (Genetic Algorithm; GA)[2, 3], 進化戦略 (Evolution Strategy; ES)[1], 進化プログラミング (Evolutionary Programming; EP)[4, 5], 遺伝プログラミング (Genetic Programming; GP)[6]などが含まれる．近年，EA について，種々の方法論的な提案が行われるとともに，多くの実問題への応用が試みられている．またその適用範囲も非線形最適化や組合せ最適化にとどまらず多目的最適化，ゲーム環境での進化，対話的進化などへの広がりを見せている．その一方で，EA については，その理論面での整備が不十分であるとの声もよく耳にする．しかしながら，この点でも EA の特性を種々の側面から捉える研究が進められている．本稿では，GA を中心に EA に関する理論的研究を概観する．

2. EA に関する理論的研究の方向

EA の最も重要でかつ広く適用されている応用分野は非線型最適化や組合せ最適化などの最適化計算である．しかしながら，これらの問題にはそれ自体，一般に厳密解を効率良く求めることが困難な問題が多く存在し，EA はこれらの問題に対する近似解法として位置付けられる．例えば組合せ最適化問題では，多くの実用的な問題が NP-困難と呼ばれる問題のクラスに属しており，問題の規模に対する多項式時間のアルゴリズムが存在しないものと予想されている．このような適用対象の困難さから EA に関する強力な理論の展開は難しいと考えられる．

また EA の理論的解析を難しくしているもう一つの要因として，交叉演算が挙げられる．交叉は両親の遺伝子型を組み合わせて子を作り，新しい探索点を生成する手法であり，EA，とりわけ GA を強く特徴付けている探索ルールである．しかしながら，生成される子が複数の親個体に依存すること，子の遺伝子型の取り得る範囲が両親の遺伝子型に依存して変化することなど，突然変異に比べてその動作が複雑であり理論的解析が難しい．

これらの問題点があるため，現在，展開されている理論は，EA を種々の側面から捉え，その性質を部分的にでも理解しようとする試みであると考える必要がある．

EA に関する理論は大きく 2 つに分けられる．一つは EA が用いている基本的なダイナミクス，すなわち，環境により適応した個体がより多くの子孫を残す，というダイナミクスの解析である．すなわち，このようなダイナミクスのもとでアルゴリズムがどのような挙動を示すかを知ろうとする理論である．もう一つは，突然変異や交叉によって探索される適応度関数の形状に関するものである．すなわち，適応度関数が探索しやすいなだらかなものであるのか，あるいは困難な凸凹したも

のであるのか，に関する議論である．以下，これらの理論を概観する．

3. 進化のダイナミクスに関する研究

3.1 集団遺伝学の基本定理とスキーマ理論

EAの基本構成は「より高い適応度を持つ個体がより多くの子孫を次世代に残す」というDarwinの自然選択説を計算機上で模倣することである．このようなシステムについて，個体数が十分に多いと仮定して，これを実数近似することにより差分方程式などにモデル化した解析が集団遺伝学の分野で数多く行われている．この分野での基礎的な知見として，「突然変異や交叉が行われなければ，より高い適応度を持つ遺伝子型がより多くの子孫を残し，個体群の平均適応度は単調増加する」，という定理があり，集団遺伝学の基本定理[7]と呼ばれている．

同様の考え方をGAにおける遺伝子型の部分パターン（スキーマと呼ぶ）に適応して考察したものがHollandのスキーマ理論[2]である．同理論では適応度による選択だけでなく，突然変異や交叉によるスキーマの破壊も考慮している．これにより「短くて平均適応度の高いスキーマが個体群中で増殖する」というGAの微視的な性質が導出される．しかしながら，同理論は突然変異や交叉について，注目しているスキーマの破壊のみを考慮し，その生成は無視している．このため，GAの特徴的な演算子である交叉については負の効果しか考えていないことになる．また交叉や突然変異の扱いが不完全なことから方程式が得られず，不等式での評価に留まる．このため，GAの長期間の挙動についての知見が得にくいなどの限界もある．

3.2 マルコフ連鎖による解析

先の分析が「同じ遺伝子型を取る個体数」を変数として非線形のモデルを導出しているのに対し，GAのプロセスを各個体の取り得るすべての状態の直積空間上での確率的状態遷移として捉えたマルコフ連鎖モデルによる解析も行われている．

この解析の代表的な知見として，大域的最適解への収束の議論がある．GAのプロセスにおいて，適当な突然変異を仮定して，各状態への可到達性を保証するとともに，探索で得られた最良の解を保存するエリート主義に似た拡張を加えたGAについて，これが確率1で最適解を発見することが示されている[8]．しかしながら，この定理はGAの主要な探索ルールである交叉に依存しない形で導出されており，十分に強力な定理とは言いがたい．

また，マルコフ連鎖モデルを用いて交叉の効果を分析した研究もある．GAが苦手とする問題として交叉による最適解の発見が困難な「騙し問題」[3]が研究されている．山村らはこの問題に対して，マルコフ連鎖モデルを用いて，GAが騙される条件を議論している[9]．

なお，マルコフ連鎖モデルはGAのプロセスをかなり精密にモデル化できるが，遺伝子長 M，対立遺伝子数 L，個体数 N に対して状態空間の大きさが ${}_{N+L^M-1}C_N$ と極めて大きくなり，実用的な規模のGAについての，有用な性質の議論は難しい．

3.3 その他の話題

EAを最適化問題に適用する場合は，各個体の適応度は問題の解としての良さから独立に決定される．このためEAのダイナミクスの挙動は比較的単純である．しかしながら，マルチエージェント環境やゲーム環境など，適応度が個体間の相互作用により決定される場合にはEAの挙動は複雑なものとなる[14]．このような状況を扱ったモデルとしては，例えばレプリケータ方程式[7, 10]などが挙げられる．

また，個体数の有限性と子孫を生成する不確定性を考慮した場合，たとえ個体間に適応度の差がなくても，個体群がしだいに多様性を失う遺伝的浮動という現象が知られている[11]．普通の最適化問題への応用ではこの現象はあまり顕在化しないが，Pareto最適集合を求める多目的GA[13, 15, 16]では注意を要する．遺伝的浮動は中立進化説[17]の重要なテーマとして解析されている[12]．

4. 適応度の景観に関する研究

EAでは良い解の近傍に子孫を生成してより良い解の探索を行う．探索に用いられる近傍系と探索空間における適応度関数の値が探索に伴う適応度関数値の変化を規定し，「適応度の景観」と呼ばれる．適応度の景観がなだらかなものであれば探索は効率良く進み，適応度の景観が凸凹したものであれば良い解の近傍を探索することの合理性が

失われる．

特定の問題に対して適応度の景観を議論する方法として，探索空間内をランダムウォークし，これに伴う適応度の自己相関関数を調べる方法がある．適応度の景観がなだらかであれば適応度の自己相関関数は遠くまで正の値を取り，景観が凸凹であれば急速に 0 に近づく．いくつかの典型的な組合せ最適化問題に対して自己相関関数が評価されている[18]．

Jones らは探索空間内をランダムウォークさせる代わりに最適解からの距離と適応度の相関を調べる方法を提案している[19]．この方法は最適解が既知の問題にしか使えないが，GA における騙し問題なども観測できる点が興味深い．

自己相関関数を調べる方法と類似した手法として，ランダムに生成した点とその近傍内から選んだ点での適応度の相関係数を見る方法がある．Manderick らはこの方法で突然変異や交叉演算の良否を判定することを提案している．すなわち，相関係数の高い演算子はなだらかな適応度の景観を与え，効率良く最適化できると予想するのである．ただし，交叉演算では複数の親個体から子が生成されること，交叉方法によっては交叉により生成される子の多様性（近傍の大きさ）が異なることなど，複雑な要因も存在しており，一概に相関係数が高い演算子が良いとは言えない．[21]

適応度の景観に関する議論の興味深い点は，純粋な理論ではなく，数値実験などを用いた経験的な議論が含まれることである．これにより，実際的な EA の持つ問題に接近しようという点で新鮮である．

5. おわりに

本稿では進化アルゴリズム (EA) に関する理論として主に GA に関する理論を取り上げて論じた．このほかにも進化アルゴリズムには ES や EP など遺伝子表現として実数（浮動小数点数）を用いる手法があり，非線型最適化の直接的手法として理論が展開されている[1]．また遺伝子表現として lisp のプログラムなど木構造を用いる GP については最適化の観点だけではなく，機械学習などの観点からの理論構築も重要であると考えられ，今後の展開に期待したい．

参考文献

1) T. Bäck and H.-P. Schwefel: "An overview of evolutionary algoIrithms for parameter optimization", *Evolutionary Computation*, Vol 1, No. 1, pp. 1-23 (1993).

2) J. H. Holland: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan (1975).

3) D. E. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley (1989).

4) D.B. Fogel: *Evolutionary Computation*, IEEE Press (1995).

5) L.J. Fogel et al.: *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, John Wiley & Sons (1966).

6) J.R. Koza:*Genetic Programming, On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press (1992).

7) J. Hofbauer and K. Sigmund: *The Theory of Evolution and Dynamical Systems*, Cambridge Univ. Press (1988).

8) G. Rudolph: "Convergence Analysis of Canonical Genetic Algorithms," *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 5, No. 1, pp. 96-101 (1994).

9) 山村，佐藤，小林：「遺伝的アルゴリズムにおける交叉の効果の解析」，SICE システム/情報合同シンポジウム'96, pp. 11-16 (1996).

10) 茶碗谷：「自己複製する要素からなる系の時間発展と準安定状態」，第 9 回自律分散システムシンポジウム, pp. 243-248 (1997).

11) J. Maynard Smith: Evolutionary Genetics, Oxford University Press (1989) (巌佐，原田訳：「進化遺伝学」，産業図書 (1995)).

12) 岩本：「講座: 遺伝アルゴリズム — IV」，システム/制御/情報, Vol.39, No.12, pp.502-514 (1996).

13) 玉置，岩本，喜多：「講座: 遺伝アルゴリズム — V」，システム/制御/情報, Vol.40, No.2, pp.69-76 (1996).

14) 玉置，岩本，喜多：「講座: 遺伝アルゴリズム — VI」，システム/制御/情報, Vol.40, No.4, pp.170-177 (1996).

15) H. Tamaki, H. Kita and S. Kobayashi: "Multi-Objective Optimization by Genetic Algorithms: A Review," *Proc. of the 3rd IEEE Conference on Evolutionary Computation (ICEC'96)*, pp. 517-522(1996).

16) C. M. Fonseca and P. J. Fleming: "An Overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization," *Evolutionary Computation*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-16 (1995).

17) M. Kimura: *The Neutral Theory of Molecular Evolution*, Cambridge University Press (1983) (木村監訳：分子進化の中立説，紀伊國屋書店 (1986)).

18) W. Fontana et al.: "RNA Folding and Combinatory Landscapes," Phys. Rev. E, Vol. 47, No. 3, pp. 2083-2099 (1993).

19) T. Jones and S. Forrest: "Fitness Distance Correlation as a Measure of Problem Difficulty for Genetic Algorithms," *Proc. 6th ICGA*, pp. 184-192 (1995).

20) B. Manderick and P. SpieOssens: "How to select Genetic Operators for Combinatorial Optimization Problems by Analyzing their Fitness Landscape ?," in J. M. Zurada et al. (eds.): *Computational Intelligence - Imitating Life*, IEEE Press, pp. 135-146 (1994).

21) 喜多，西村，玉置，西川:「遺伝アルゴリズムにおける適応度の景観と交叉演算子の評価」，SICE 第 8 回自律分散システムシンポジウム，pp. 195-200 (1996).

問合わせ先

〒 606-01 京都市左京区吉田本町
京都大学大学院工学研究科電気工学専攻
喜多　一
E-mail: kita@kuee.kyoto-u.ac.jp

THB2-5

社会システムと進化
Social Systems and Evolution

野村　竜也
Tatsuya Nomura
ＡＴＲ人間情報通信研究所
進化システム研究室
Evolutionary Systems Department,
ATR Human Information Processing Research Laboratories

Abstract:

In this paper, we introduce along our researches the recent situation on the relation between evolutionary systems and social science, in particular, social psychology.

1　はじめに

近年、進化システムを代表とする人工生命や複雑系の概念が社会科学の領域に浸透しつつある。本稿ではこの種の状況について、特に社会心理学に焦点を当てた著者らの研究を交えながら簡単な紹介を行い、今後の方向性に関する試論を展開する。

2　社会システムと進化システム

進化システムと社会科学との関わりの中で最も大きい位置を占めるのがゲーム理論である。元々ゲーム理論は社会学、経済学、社会心理学における社会場面を単純理想化したモデルであり、各々の領域において独自の発展を成し遂げてきた[1]。

社会科学における進化システムの位置付けは社会システムの１つのモデリング手法であり、その中で特に注目されているのが「社会的ジレンマ状況」における協調行動の進化のシミュレーションである[2]。つまり、「囚人のジレンマ」に代表される、個体の「協調」と「裏切り」の行動選択において、表1に示されるような個体の所属する集団の利益と個体自身の利益とが相互に矛盾する状況で、ゲームを繰り返す中でどのように個体間の「協調」行動が生み出されるかをモデリングすることである。この問題に対する研究結果は多数報告されているが、取り敢えず本稿では取り扱わない。

		プレーヤーB	
		協調	裏切り
プレーヤーA	協調	3, 3	0, 5
	裏切り	5, 0	1, 1

表 1: 囚人のジレンマにおける代表的な利得行列

進化システムや複雑系の概念は、社会科学の中でも特に理論経済学において多大な影響を与えている。実際に、米サンタフェ研究所などでは経済学者により進化システム・複雑系の概念に基づく経済現象のモデリング研究が進められており、日本においても、その影響を受けて昨年から「進化経済学会」が発足し、システムの多様性、組織の共存・競争の進化機構の本格的研究が進められようとしている。

それに対して、他の社会科学における状況はどのようなものであろうか。以降の章では社会心理学に焦点を当て、進化システムや人工生命などの概念と社会心理学との接点および交流研究の現状について議論する。

3 社会心理学におけるメタファーとしての進化システム

3.1 社会心理学における数理モデルの現状

社会心理学において数理モデルを用いて現象を表現・解析する分野は数理心理学として既に確立しているが、進化システムや複雑系の概念を用いたモデル及び実験は現状ではそれほど多くない。

2章で挙げたゲーム理論は社会心理学においても多用されているが、数学的研究よりはむしろ統制環境下における実験の1つの場面想定として利用される傾向が強い。つまり、実際に人間の決定がゲーム理論が明らかにしているゲーム場面での平衡点に至るかどうか、あるいはどのようにずれていくのかを実際の実験で検証するのが主流であり [1]、経済学のような進化システムによる社会的場面のモデリングは積極的には行われていない。(繰り返しのない囚人ジレンマ状況のシミュレーション実験は報告されているが [3]、進化システムを導入したものではない。)

既に数理心理学・数理社会学において提唱されている複雑系的概念としては、ハーケンのシナジェティクス [4] を基本とした、物理学・化学におけるマスター方程式、Fokker–Planck 方程式、ランジュバン方程式などを用いたモデリングによる半定量社会学 [5] が挙げられる。しかし、このアプローチが社会心理学の中で確個たる地位を獲得しているわけではなく、経済学などと比べてまだまだこの種の数理的アプローチはその存在を認知されていないのが現状である。

3.2 グループダイナミクスと進化システムの交流

しかし、近年グループ・ダイナミクスの観点からミクローマクロ・ダイナミクスを再認識する動きがある [6]。元々社会心理学は個人と社会の動的相互規定関係を問題とする学問であり、個人の認知研究に傾斜した現在の社会心理学の現状に危機感を唱える動きが着実に根付いているのである。著者は以前からこのミクローマクロ・ダイナミクスの観点が人工生命の「創発」の観点と同一であることに着目しており、この動きに沿う形で、人工生命的手法と社会心理学の相互交流による発展の可能性を論じている。

図1は人工生命における創発の模式図であると同時に、社会心理学におけるミクローマクロ・ダイナミクスの観点を表したものでもある。現在の人工生命における

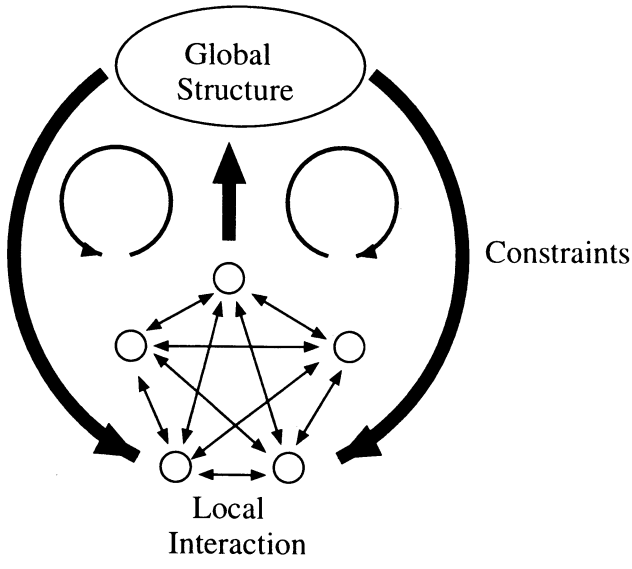


図 1: 人工生命と社会心理学の共通フレームワーク

集団行動研究においては、図1の局所ユニットは分子、細胞、あるいは単純な行動規則を持つ虫などであるが、社会心理学においては、特定の社会場面における比較的単純な行動規則を持つ人間として表現される。この図式に基づいて、人工生命と社会心理学の相互交流が可能となる。つまり、人工生命の合成的手法を社会心理学に持ち込むことにより、ミクローマクロ・ダイナミクスを表現する数理モデルを構築し、直接人間を用いた統制条件下実験の限界を超えたシミュレーションを可能とする。また、社会心理学が明らかにしている人間の特定場面での特徴を人工生命に持ち込むことにより、新たな集団行動モデルの可能性が広がる。社会心理学において既にこの種の研究は行われている [7][8][9]。いずれもマルチエージェントの概念を用いた人間の集団・組織行動のモデルであるが、進化システムの概念を積極的に導入したものは、筆者の研究 [10] も含めて、まだ現れていない。

しかし、その中に進化システムの概念を導入することは簡単であり、その有用性は高いと考えられる。ここでは、筆者の研究である確率オートマトンと態度変容理論による小集団構造変動モデルを例に取って、そのシナリオを記述することを試みる。

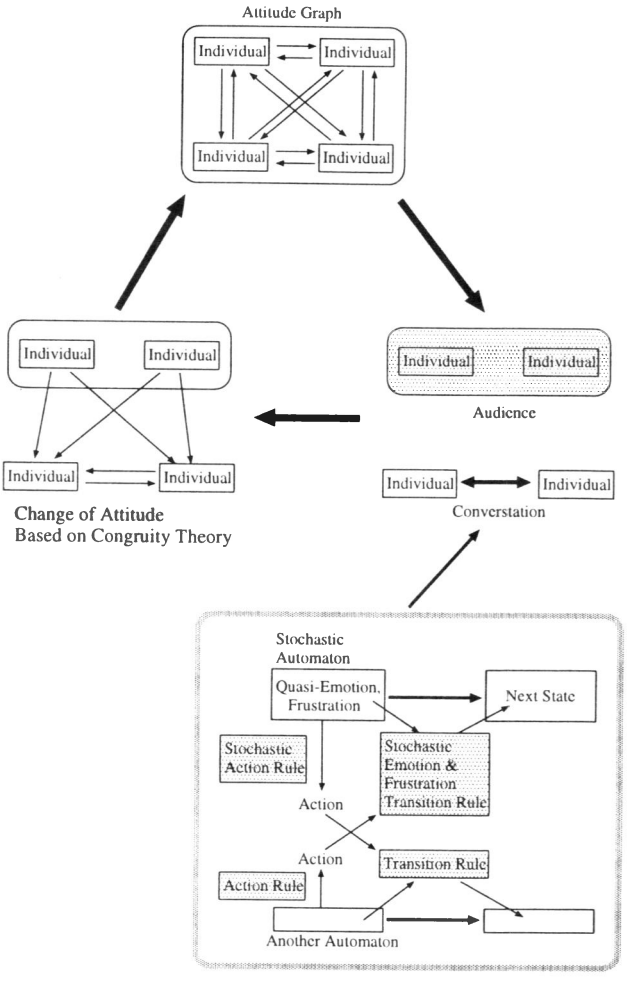


図 2: 確率オートマトンと態度変容理論による小集団構造変動モデル

3.3 小集団構造変動モデルと進化システム

図 2は本システムの概要を示すものである。本システムでは、１０人以下の小集団を想定し、各個体を確率的な状態遷移と出力を行うオートマトンで表現している。各確率オートマトンは疑似的な感情を内部状態として持ち、他個体に対して協調、反発などの行動を取る。行動選択と内部状態遷移に関してはある種の事前知識、つまりシミュレーション作成者の素朴心理学に基づいた傾向 (反発行動を受けた場合は怒りの感情に遷移しやすく、その時は相手に対して反発行動を選択しやすい など) を反映させてある。各個体は $[-1, 1]$ の範囲で態度、つまり行動に対する準備状態を保持している。各態度は相手に対するある種の好嫌の度合に対応し、それに応じて行動選択確率が決定される。つまり、態度パラメータの値の低い相手に対しては反発行動を取りやすく、高い相手に対しては協調行動を取りやすくなっている。また、内部にフラストレーションパラメータを持ち、その値が感情遷移確率や行動確率に影響を与える。このフラストレーションは、上記のオートマトンの傾向において、特定の感情状態において従来とるべき行動を確率的に選択出来なかった時 (例えば、怒りの内部状態でありながら協調行動を確率的に選択してしまった時) にその値を増し、結果として協調行動を選択しにくくなるように事前設定されている (ここでもシミュレーション作成者の素朴心理学が持ち込まれている)。

このモデルでは、個体オートマトンの出力と入力を直結することで対話を行い、対話結果に基づいて態度を変更させるが、さらに、対話に加わらなかった他個体の対話個体に対する態度も変更させる。この段階で、社会心理学の態度変容理論における 3 者関係モデルの態度変容予測式を導入し、あらゆる 3 者関係においてある種の均衡状態が成立するように態度変容と対話を繰り返す。この繰り返しの中で、どのような態度グラフ、つまり個体間関係が生成されるかを観察するのである。結果として、個体オートマトンに事前に導入する傾向の種類により、集団構造の安定性、集団分割の形式に様々なバリエーションが現れることがわかっている [10]。

問題は、個体オートマトンの動作が事前に与えられていることである。このモデルでは、素朴心理学的な事前知識に基づく個体モデル表現と態度変容予測式から人間の集団に似た構造が引き出されることまではわかるが、そのような個体の行動パターンの源が何であるかまでは明らかには出来ない。

一方、進化システムはどのような個体の行動パターンが現状の環境の中で生き残るかを、自然選択や染色体の組合せの概念に基づいて明らかにしてくれる。本モデルにおいても、進化システムとの組合せにより、染色体表現された個体の行動出力・状態遷移確率、態度変容パターンの中でどのようなものが生き残るかを示すシミュレーションに拡張することが可能である。つまり、人間の行動パターンと社会構造が進化の中でどのように形成されてきたのかを示す１つのメタファーとして、社会心理学におけるこの種のモデルの有効性を示唆するものであると考えられる。

4 おわりに

以上、簡単ながら社会科学、特に社会心理学における進化システムによるモデリングの現状について論じてきた。多くの方々が指摘するように、著者も社会科学における自然科学・計算機科学の成果の盲目的輸入に関しては疑問を持たざるを得ない。しかし、オートポイエーシスやロトカーヴォルテラ方程式など、自然科学から導入され社会システム理論において有益な成果をもたらしたモデルの存在は無視出来ないであろう。進化システムの社会システム理論への貢献を期待することは、決して的外れではないと考えられる。

謝辞

本稿の作成に当たり御協力戴きましたＡＴＲ人間情報通信研究所進化システム研究室の下原勝憲室長，及びその内容の中での議論において多大なる示唆を戴きました京都大学総合人間学部教授の杉万俊夫先生、奈良大学社会学部助教授の矢守克也先生、同じく社会学部助手の八ッ塚一郎先生に、この場を借りて御礼を申し上げます．

参考文献

[1] 寺岡隆, 他. ゲーム論特集号. 心理学評論, Vol. 32, No. 3, pp. 199–350, 1989.

[2] M. Mitchell and S. Forrest. Genetic Algorithms and Artificial Life. *Artificial Life*, Vol. 1, pp. 267–289, 1994.

[3] 林直保子. 繰り返しのない囚人のジレンマの解決と信頼感の役割. 心理学研究, Vol. 66, No. 3, pp. 184–190, 1995.

[4] H. Haken. Synergetics – An Introduction. Springer–Verlag, 1978 (邦訳：牧島邦夫, 小森尚志「協同現象の数理」, 東海大学出版会, 1980).

[5] W. Weidlich and G. Haag. Concepts and Models of a Quantitative Sociology: The Dynamics of Interacing Populations. Springer–Verlag, 1983 (邦訳：寺本英, 中島久男, 重定南奈子「社会学の数学モデル」, 東海大学出版会, 1986).

[6] 杉万俊夫. ミクロ－マクロ・ダイナミクス －「かや」のイメージに基づく構想－. 実験社会心理学研究, Vol. 32, No. 2, pp. 101–105, 1992.

[7] 岡田勇, 山本匡, 太田敏澄. パーソナリティから創発される組織の硬直化現象について. Technical Report 96–MPS–10–3, 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会, Nov. 1996.

[8] 大浦宏邦. セルオートマトンによる社会変動のシミュレーション. 実験社会心理学研究, Vol. 32, No. 2, pp. 115–128, 1992.

[9] 矢守克也, 杉万俊夫. 横断歩道における群集流の巨視的行動パターンのシミュレー ション. 実験社会心理学研究, Vol. 32, No. 2, pp. 129–144, 1992.

[10] T. Nomura. Generation of Relations between Individuals based on a Stochastic Automaton and an Analogy from Social Psychology. In *Proc. ALIFE V Poster Presentations*, pp. 125–132, May 1996.

問合わせ先

〒 619-02 京都府相楽郡精華町光台 2-2
ＡＴＲ人間情報通信研究所 進化システム研究室
野村　竜也
TEL: 0774-95-1010, FAX: 0774-95-1008
E-Mail : nomura@hip.atr.co.jp

THB3-1

ファジィ遺伝的機械学習の改良アルゴリズム
Modified Algorithms of a Fuzzy Genetics-Based Machine Learning

○中島 智晴　石渕 久生　村田 忠彦
Tomoharu Nakashima, Hisao Ishibuchi, and Tadahiko Murata

大阪府立大学工学部
College of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract— A fuzzy classifier system has been already proposed for pattern classification problems. In this paper, we examine the performance of modified versions of a fuzzy classifier system. We introduce three heuristics: an initial population heuristics, a population update heuristics, and a variable population size heuristics. By computer simulations on a real-world pattern classification problem, we show that the search ability of the fuzzy classifier system is drastically improved by introducing these heuristics. We also examine the generalization ability of the modified fuzzy classifier system.

1. はじめに

多数の連続値を伴うようなパターン識別問題において，ファジィクラシファイアシステムによるルール選択手法が提案されている[1]．ファジィクラシファイアシステムでは，ランダムに生成されたファジィ If-Then ルールの集合が，遺伝的操作により進化して行く．

本研究では，ファジィクラシファイアシステムの性能を向上させるために，様々な手法を導入し，数値実験によりその性能を調べる．

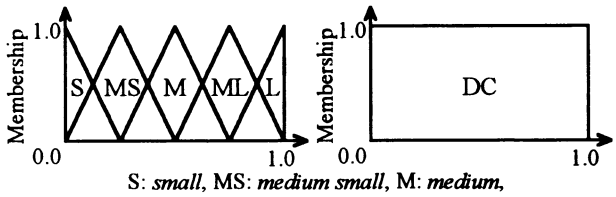
2. ファジィクラシファイアシステム

2.1 アルゴリズム

ファジィクラシファイアシステム[1]のアルゴリズムは，次のように書くことができる．

(1) 初期世代の生成

ランダムに N_{pop} 個のファジィ If-Then ルールを生成する．各ルールの条件部ファジィ集合は，図1に示す6つの言語値からランダムに選ばれる．なお，N_{pop} は，各世代のルール数（個体群サイズ）である．



S: *small*, MS: *medium small*, M: *medium*,
ML: *medium large*, L: *large*, DC: *don't care*

図1 言語値

(2) 適応度の割当

次式により，各々のファジィ If-Then ルールの適応度を計算する．

$$fitness(R_j) = \omega_{NCP} \cdot NCP(R_j) - \omega_{NMP} \cdot NMP(R_j) \tag{7}$$

ここで，$NCP(R_j)$ はルール R_j が正しく識別した学習用パターン数，$NMP(R_j)$ はルール R_j により誤識別された学習用パターン数，ω_{NCP} と ω_{NMP} は，それぞれ $NCP(R_j)$ と $NMP(R_j)$ に対する重みである．

(3) 遺伝的操作

以下の確率に応じて2個の個体（ルール）を親個体として選択する．

$$R(R_j) = \frac{fitness(R_j) - fitness_{\min}(S)}{\sum_{R_j \in S}\{fitness(R_j) - fitness_{\min}(S)\}} \tag{8}$$

ここで，$fitness_{\min}(S)$ は，ルール集合 S に含まれるルールの持つ最も小さい適応度の値である．

選択された2つのファジィ If-Then ルールから2つのファジィ If-Then ルールを交叉と突然変異により生成する．交叉は，ファジィ If-Then ルールの条件部ファジィ集合を2つの親の間で入れ替える操作により行なう．また，突然変異は，ファジィ If-Then ルールの条件部ファジィ集合をランダムに変更することにより行なう．交叉と突然変異により条件部が決定されたファジィ If-Then ルールの結論部クラスと確信度は，条件部に適合する学習用データから決定される．

(4) 置換操作

遺伝的操作により生成されたファジィ If-Then ルールを，適応度の低いファジィ If-Then ルールと置換する．

(5) 終了判定

本研究では，終了判定に総世代数（数値実験では 100 世代）を用いる．

2.2 数値実験

ファジィクラシファイアシステムをワインデータ[2]に適用した．ワインデータは，13 次元 3 クラスパターン識別問題であり，178 個の学習用パターンから構成されている．10 回の数値実験を行なった結果，平均識別率が 75.8%であった．図2に，世代ごとの識別性能を示す．

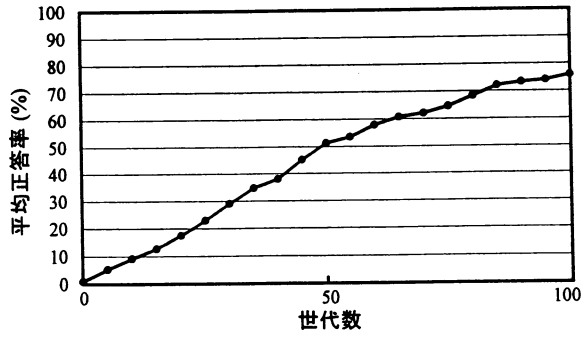


図2 数値実験結果

3. アルゴリズムの改良

図2からわかるように，2章で示したファジィクラシファイアシステムは，初期世代の性能が悪いという問題点がある．この問題に対して，本研究では，ファジィクラシファイアシステムの性能を向上させるために，以下に述べるヒューリスティックを導入する．

3.1 初期個体群生成のヒューリスティック

初期世代の性能が低い理由として，大規模なパターン空間（例えば，13 次元空間$[0,1]^{13}$）のなかで，ファジィ If-Then ルールが覆うことができる領域がわずかであり，多くの学習用パターンが識別拒否されることが考えられる．そこで，初期世代生成において，学習用パターンから直接ファジィ If-Then ルールを生成することにより，識別拒否されるパターンを減少させることにする．まず，ランダムに学習用パターンを選択し，各軸ごとに，最も学習用パターンに適合する条件部ファジィ集合を決定する．ファジィ If-Then ルールの結論部クラスと確信度は，条件部に適合する学習用データから決定される．図3に，数値実験結果を示す．

3.2 個体群更新のヒューリスティック

4.1 節のヒューリスティックは，新しいルールの生成にも用いることができる．すなわち，個体群の更新において，新しく生成される個体の数をN_{rep}とすると，$\min\{N_{rep}/2, m_{error}+m_{reject}\}$個を誤識別または識別拒否された学習用パターンから生成する．図4に，数値実験結果を示す．

3.3 個体群の大きさを可変とするヒューリスティック

従来のファジィクラシファイアシステムのアルゴリズムでは，個体群の大きさ（すなわち，ファジィ If-Then ルールの数）は固定であったが，パターン識別問題の難しさに応じて個体群の大きさを適切に設定されるべきである．そこで，個体群の大きさを可変にアルゴリズムを改良した．図5に，数値実験結果を示す．

3.4 評価用データに対する性能

評価用データに対する性能を調べるために，クレジットデータ[2]にファジィクラシファイアシステムを適用した．クレジットデータは，14 次元 2 クラスパターン識別問題であり，690 個の学習用パターンから構成されている．10-fold cross-validation を 50 回繰り返すことにより，以下の結果が得られた．表 1 は，平均の誤識別率である．また，比較のために，Quinlan[3]の C4.5 アルゴリズムの性能も示す．

表 1 評価用データに対する性能

	C4.5	提案手法
誤識別率	14.2%	14.1%

4. おわりに

本研究では，様々なヒューリスティックを導入して，ファジィクラシファイアシステムの性能の向上を行なった．数値実験により，ヒューリスティックの有効性が示された．また，改良アルゴリズムの評価用データに対する汎化性能も調べられた．

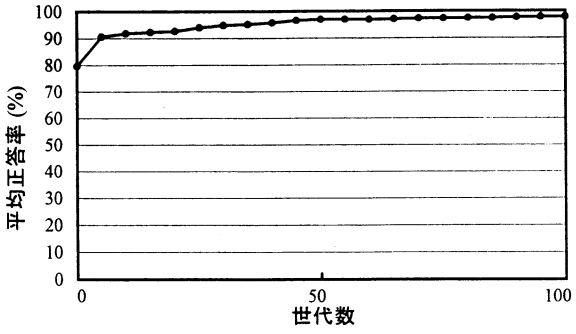


図3 初期個体群生成のヒューリスティックを導入した結果

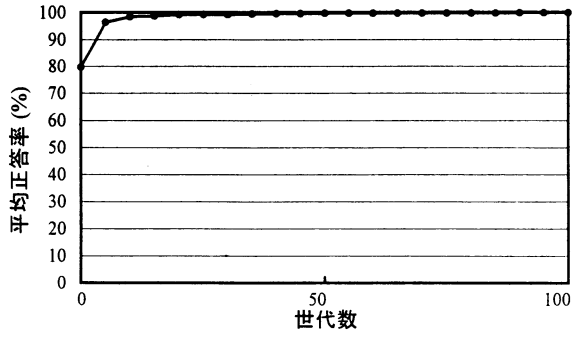


図4 個体群更新のヒューリスティックを導入した結果

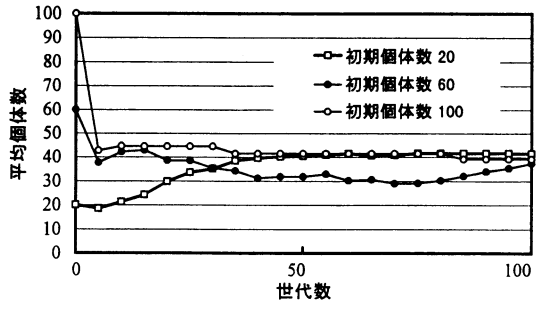


図5 個体数を可変とした結果

参考文献

[1] H.Ishibuchi, T.Nakashima, and T.Murata, "A fuzzy classifier system that generates fuzzy if-then rules for pattern classification problems," *Proc. of 2nd ICEC*, pp.759-764, 1995.

[2] Irvine Data Sets, available via anonymous FTP from *ics.uci.edu* in directory */pub/machine-learning-databases*.

[3] J.R. Quinlan, *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1993.

問い合わせ先:
〒593大阪府堺市学園町1－1
大阪府立大学 工学部 経営工学科
石渕 久生
TEL: 0722-52-1160 (Ext. 2377)
FAX: 0722-59-3340
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THB3-2

遺伝的アルゴリズムを用いた見習い学習によるユーザ概念の構築

○櫨木 哲夫*, 谷 直樹**, 片井 修* (*京都大学大学院工学研究科, **西日本旅客鉄道(株))

Reconstructing User's Internal Concepts by GA-Based Apprentice Learning

Tetsuo Sawaragi*, Naoki Tani** and Osamu Katai*
Graduate School of Engineering, Kyoto University
*West Japan Railway Company

Abstract: This paper presents a method for concept formation for an interface agent that attempt to capture user's internal conceptual structure by observing interactions between an user and a system. Our proposing algorithm for concept formation consists of two phases: the one for selecting the essential attributes out of a provided set of attributes that may initially contain both relevant and irrelevant ones, and the other for constructing new attributes using genetic algorithms applied to a set of elementary features logically represented in a disjunctive normal form. Our method is applied to an artificial data set as well as to a practical one obtained through operating a plant simulator.

1 はじめに

情報、電子技術の進歩に伴う自動化の進展やその水準の高度化により、人間とシステムの距離はますます広がりをみせ、これに伴う弊害をいかに解決するかが新たな課題となっている[?]。このような状況で求められる支援システムの機能としては、システム操作におけるユーザの認知的負荷を軽減し、認知的タスクの遂行を容易にするような知的インタフェースである[1]。

システムオペレータを支援するインタフェースのなすべき概念構築は、ユーザ挙動とシステムの状態の観察から上述のタスクモデルを推し量り学習することである。ただし、このような観察の対象となる状態記述には様々な特徴が混在しているため、この中から真に本質的な特徴のみを取捨選択したり再構成することで、ユーザの挙動をうまく説明づけられるような概念を能動的に構築していかねばならない。

本研究では自律エージェントの学習形態の一つである「見習い学習」の考え方を用いる[2]。自律エージェントはユーザとシステムのインタラクションをユーザの「肩越しから」モニタリングして観察しながら、ユーザ挙動の中に見出される同期的パターンや規則性を自律的に発見する。これにより、最初は何ら知識を持ち合わせていないものの、段階的にタスクに適合したユーザのノウハウを学び取り、やがては自律的に判断ができるエージェントの構築が可能となる。観察学習の手法としては, 機械学習分野における概念形成手法がある. ここで前提とされていたのは、概念形成に必要な情報は、事例記述のためのアプリオリに決められた属性集合によるものが全てであり、それは変化することはない点であった。しかし現実には、行動によって、また状況が変化する中で、必要な情報と不必要な情報を見分けることが求められ、必要な情報の中でも目的を限定すれば、全てを考え合わせるのではなく、その一部もしくは複合的なものを考えて概念を構築する方が判断の質が改善される場合もある[4]。

本研究で提案する動的概念形成手法の全体図を図1に示す。ここで観察から得られる事例は属性と値の対として表現され、事例を記述する属性群は、実環境を想定して、少なくとも観察の段階では関連する重要な情報とそうでない情報が混在している場合を考える。本提案手法は大きく分けて以下の二つのアルゴリズムから構成される。

1. 属性空間の縮約:属性選別機能を付加した概念形成手法(Salience-Based COBWEB)
   概念形成に関与する属性の重要度の動的更新を行ない当該目標に非関連の属性を選別し削除する。
2. 属性空間の再構成:GAを用いた新規属性の創出(GA-Based Feature Discovery)
   遺伝的アルゴリズムによる新属性創出を行なう。

上記1.2.の処理を経て最終的に残った属性群は、観察される挙動の背後にあるユーザ概念を構成するものであることから、これを用いることによりユーザの対象認識や運転をサポートするための知的支援が可能となる。

2 属性選別機能を付加した概念形成手法

2.1 概念形成手法による未知属性値の推論

概念形成(concept formation)は観察からの学習(learning from observation)と呼ばれるもので、事例の集合を入力され、それら事例全体にわたる意味のある分類スキームをつくり出すことを目的とする手法である。観察学習により生成される"良好な"概念とは新規事例の未知属性に対する予測精度をできるだけ高くできるものである。Fisherらの提案した概念形成アルゴリズムであるCOBWEBは、この基準に基づき階層的なクラス分類を作り出すもので多くの手法の原型となっている[3]。

COBWEBは事例記述の集合を逐次的に階層的な概念木へと変換する。事例は属性とその値の対の集合で表現され、値は通常離散値をとる。概念のそれぞれの階層レベルにおいて、クラス分岐をどのように行うかはクラス分類の質を定量化した尺度である分類有用値(category utility)を算出することによって決められる[5]。

形成された概念に基づく推論は、基本的に例の分類は概念を生成するアルゴリズムと同様に行われる。すなわ

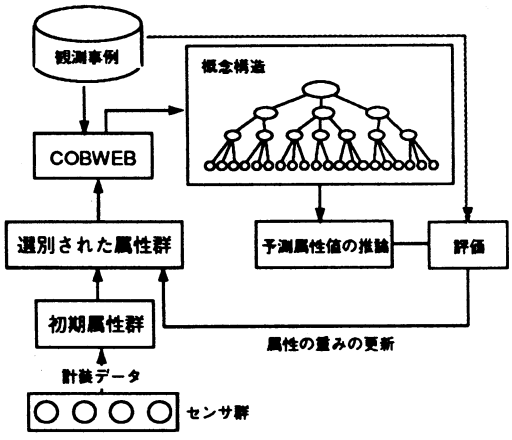


Fig. 1: Salience-Based COBWEB

ちルートクラスから順に下方向にそれぞれのレベルで最も適合する子ノード(クラス)を同定し、葉(リーフ)のクラスに達すると、これを構成するクラス内情報(既知の事例)を参照することによって未知属性に対応する属性の値を予測値として推論する。

2.2 属性選別機能を付加した概念形成手法

本節では前節で述べた概念形成手法のアルゴリズムを部分的に内包する新たなアルゴリズムを提案する(図2)。まず、入力事例を構成する属性集合(初期属性集合)の中から値を予想すべき属性を予測属性としてあらかじめ決めておく。逐次的に入力される観測事例に対してその時点で生成されている概念構造を用いて前節末尾で述べた方法で予測属性の値の推論を行ない、その結果をフィードバックすることによって概念構造を変化をさせる。この概念構造の修正は、例を表現しているそれぞれの特徴量の考慮の度合を示す重みを変化させることにより実現する。概念形成および値の予測に関してはCOBWEBのアルゴリズムをそのまま利用する。以下、アルゴリズムのそれぞれのプロセスについて簡単に説明を行う。

Step.1　誤認識の原因となったノードの同定

それまでに構築されている既存概念に対し新しく観測された事例を加え、決められた予測属性の値を推論し、観測事例中の当該属性値と比較した上で、属性の重みの更新を行なう。このためには、予測属性値の推論を既得概念木中のいずれのノードに対して行なうかを決める必要があるが、本研究では以下の手順に従って決定する。

COBWEBの推論過程と同様、新事例を既存ノードにルートノードから順次トップダウンに最も適合するクラスを探索する過程でそのパス上のノードにおける予測属性値の分布状態をみながら、単一の属性値か複数の値に分布しているか、またその予測値が新事例の観測値と一致しているか否かをモニターしながら探索を下位に継続するか否かを決定する。

Step.2　各属性の重みの更新

上記のパスを探索する過程では、概念木のそれぞれのレベルにおいてその下位のレベルにおける適合クラスを同定する際にCU値の算出が行なわれるが、Gluck and Corterの定義したCU値に対し以下のような変形を行うとCU値の構成要素は例を記述するそれぞれの属性iごとに分離することができる。

$$\frac{\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{n}P(C_k)[\sum_j P(A_i=V_{ij}|C_k)^2-\sum_j P(A_i=V_{ij})^2]}{n}$$

$$\equiv\sum_{i=1}^{I}CU_i \tag{2.1}$$

ここで、Iは属性の総数を表す。上式に従って各属性毎のCU値CU_iを算出することにより下位レベルでの適合クラスを同定する際の各属性の寄与度が算出できる。いま、属性全体を考慮して算出したCU値に基づく下位レベルの適合クラスとCU_iに基づく適合クラスが同一になるような予測属性以外の属性iを、パスの選択に対してsalientな(顕著である)属性という意味で優越属性(salient attribute)と定義する。

ルートから適合クラスを順次探索するStep.1のプロセスにおいて予測値の変化をもたらしている優越属性を同定し、その変化の様子から正・負の教師信号を得ることで属性間の重みを動的に更新する。そしてStep.2で求めた属性間で重み付けられたCU値を算出して、COBWEBの学習のアルゴリズムにより新事例を加え概念を更新する。以上のループを学習事例がなくなるまで繰り返す。

3 遺伝的アルゴリズムによる新属性の創出

3.1 導入の目的

人間は概念を形成していく過程において、必要な情報と必要でない情報の切り分けを行っている。しかし、タスク解決のために効率のよい概念を作り上げていくには、情報の取捨選択だけでは不十分で、積極的に、より有効な情報を再構成していくことが不可欠である[7]。本研究では、このような既有属性の再構成による新属性の創出を行なうために組合せ最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズムを用いる[6]。

3.2 GAに基づく新属性創出アルゴリズム

3.2.1 個体の表現(コード化)

本アルゴリズムにおける新属性の問題空間上での表現は、DNF (Disjunctive Normal Form)表現により行なう[7]。新属性は、「属性＝値」およびその論理積(and結合)(これを複合体(complex)と呼ぶ)を要素として、それらの論理和(or結合)形式で表現される。「値」については、属性の値域中の複数の値の選言として記述される。新属性の値域については(01)の二値に限定して考え、新属性がいずれの値をとるかは、事例における新属性の定義する論理関係の真偽値から決定する。すなわち、真の場合を1、偽の場合を0とする。

新属性(個体)はor結合された複合体それぞれに対応する染色体を複数個有する。染色体は例を表現している属性の全ての値域を足し合わせた長さを持ち、「属性＝値」に対応する遺伝子座の遺伝子が1、該当しない遺伝子座は0となる。DNF表現による新属性(個体)全体は、このようにコード化された染色体をor結合の分だけ併せ持つ。図3にコード化の例を示す。

3.2.2 遺伝的オペレータ

各々の個体はor結合のレベルとand結合のレベルの二つのレベルの構造を有することから遺伝的オペレータはそれぞれのレベルで別々に考える。外側のループでor結合のレベルでの組合せが探索され、各個体を構成するand結合のレベルでは内部操作が順に実行される。後者の内部操作は、一定回数のor結合レベルのループの実行に対して一定頻度で間欠的に行なわれる。

1. or結合レベル

   交叉については、or結合レベルでの染色体の境界からランダムに選ばれた交叉箇所で前半部と後半部分

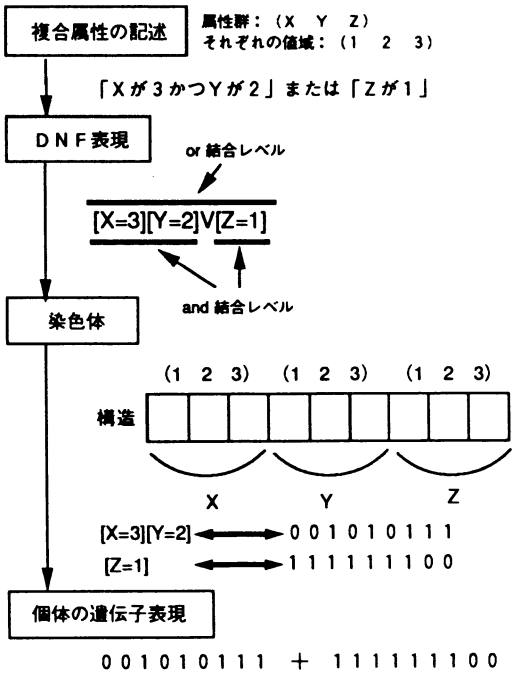


Fig. 2: コード化の例

を交換する一点交叉を行なう。生成された子は親と共に後の選択の対象となる。新世代の選択は、適応度の高い順に M 個の個体を選ぶ。

2. and結合レベル(内部操作)
or結合レベルでのそれぞれの個体内には、and結合を形作る個々の複合体に対応する幾つかの染色体がある。これを一つの世代と考え、1.と同様の一点交叉を行なう。突然変異については、設定された突然変異確率に従って、各染色体ごとに選ばれた遺伝子座の値をビット反転させる。また、交叉、突然変異を行なうと、多くの染色体群が生成されるがその中のどの染色体を選んでor結合の個体とするか(新しい染色体群の選択)について以下の方法を用いる。
まず、生成された染色体それぞれに対し、それらの染色体が単独で新属性(個体)を構成すると考えた際の適応度を計算する。そして、最も適応度の高い染色体を最初に選択する。次にその染色体と非類似でかつ適応度の高い個体を選びそれとの間で交叉を行ない子個体を生成する。

3.2.3 評価関数

個体の適応度は、それが表す新属性 A_N の予測属性 A_M に対する依存度 (dependence) の大きさ $R(A_N)$ として定義する。具体的には以下の式で定義する。

$$R(A_N) \equiv \sum_{j_N} P(A_N = V_{Nj_N}) \sum_{j_M} [P(A_M = V_{Mj_M} | A_N = V_{Nj_N})^2 - P(A_M = V_{Mj_M})^2] \quad (3.1)$$

4 実験

4.1 実験内容

提案した動的概念形成システムの有効性を示すため、機械学習の検証によく使われるUC Irvine校の機械学習

ループ回数	除かれる属性名	除く属性／平均の重み／重み	正答率	カウンタ値差	追加の新属性
1	domestic	0.168/0.516	85	23.5	
2	#1006	0.144/0.492	87.2	23.3	
3	やり直し	- /0.487	83.6	22.9	
4	#1008	0.147/0.499	87.6	23.6	
5	#1012	0.180/0.446	87	23.1	
6	#1005	0.148/0.473	87.6	24.3	#61
7	#1006	0.174/0.518	88.4	24	
8	#1003	0.179/0.485	88.6	21.9	
9	#1009	0.232/0.501	86.8	22.2	
10	#1007	0.154/0.521	88.4	21.7	
11	#1000	0.211/0.526	90	22.1	#111
12	#1011	0.112/ 0.492	89.2	20.1	
13	#1001	0.207/0.536	88	18.9	
14	predator	0.227/0.509	89.6	19.4	
15	catsize	0.209/0.520	90	18.4	
16	#1010	0.228/0.509	88.8	18	#161
17	#1004	0.098/0.508	89	19.2	
18	#1002	0.274/0.481	90.6	18.4	
19	milk	0.240/0.455	88.6	16.6	
20	tail	0.306/0.504	89.2	15.9	
21	#111	0.260/0.465	90.8	16.5	#211
22	#161	0.201/0.478	88.8	13.1	
23	#211	0.206/0.506	88.4	12.8	
24	venomous	0.371/0.557	88.6	14.9	
25	fins	0.285/0.506	87.4	17.7	
26	eggs	0.269/0.471	88.6	14.2	#261
27	toothed	0.298/0.547	90.4	12.4	
28	breathes	0.336/0.527	90.2	13.5	
29	feathers	0.379/0.531	89.2	9.6	終了

Table 1: 実験結果（予測属性: "type" #1001 以上は混入された非関連属性, #61-#261 は新属性）

データベースの動物の分類に関するデータセット (ZOO) を用いる。これは元来関連する属性として選ばれた17属性を持つ101の動物例からなるデータセットであり、全ての属性は離散的な分類値で定義されている。

このデータセットを基に初期属性群としてZOOからの17属性に加え、意図的に非関連属性を混入させた事例集合を作成するため(01)のランダムな値をとる13属性を付加し、合わせて30属性を持つ事例数100の例集合を作成する。

予想属性としては、動物の"種"を表す"type"属性を指定する¶。属性を除くループでは属性選別機能を付加した概念形成手法は10回実行され、その平均重みが最低となる属性が除外の対象となる。GAによる新属性の発見は属性を除くループに対して5回に1回の頻度で実行され適応度最大の新属性一つが加えられる。また、GAによる新属性創出アルゴリズムが対象とする属性群は、各々のループ処理の終了時点で残される属性群とする。ループの終了条件としては、属性間の重みが均一になった時点で終了する。また、遺伝的アルゴリズムにおける交叉確率は0.6、突然変異確率は0.1に設定した。さらに、概念形成過程が例が与えられる順序に依存することを抑える目的で、とり除く属性の決定のやり直しを認める。

実際に動的概念形成システムを適用した結果を表1に、新属性創出アルゴリズムで加えられた新属性を表2に示す。ここでの予測属性値の正答率は、100例の内半数を検証用データとして用いて算出した結果である。結果は29ループ目で属性の集約は終了している。ここで最初の30の属性群と最後の集約された属性群において、元来のCOBWEBを使って形成した概念木を図5に示す。なお、

¶例えば事例"bear"や"gorilla"は1の値を、"chicken"や"crow"は2の値を持っており、値域は(1 2 3 4 5 6 7)である。

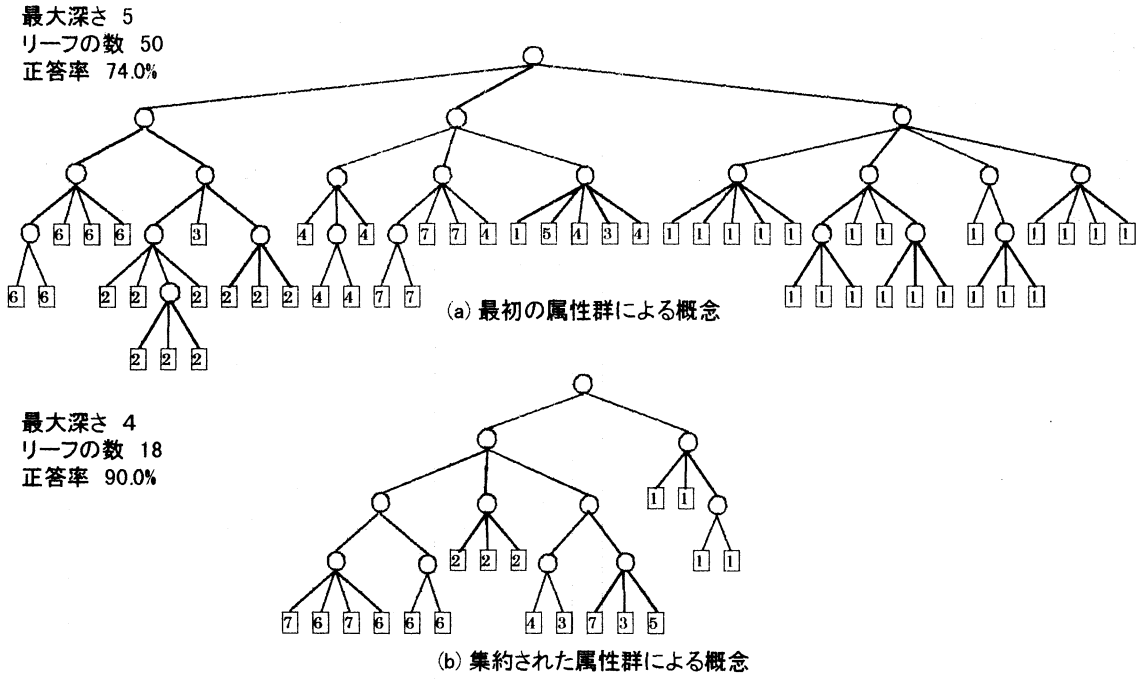


Fig. 3: 概念木の比較

初期属性群	type hair legs aquatic airborne backbone domestic feathers breathes toothed eggs fins venomous tail milk catsize predator #1001-#1013 (計30属性)
最終属性群	type hair legs aquatic airborne backbone #61 #261 (計8属性)
追加された新属性	属性定義
#61	[milk=0][eggs=1] ∨ [milk=0][backbone=0]
#111	[milk=1][backbone=1]
#161	[milk=1][venomous=0]
#211	[eggs=1][61=1] ∨ [hair=0][toothed=1][breathes=0] ∨ [legs=0,2,5,6,8][backbone=0]
#261	[#61=0][breathes=1]

Table 2: 実験で用いた属性と新属性の詳細

同一の例表現をもつ事例は1つのノードにまとめて示している。各リーフ内の数字は該当事例における予測属性の値である。集約がなされた場合の方が、30属性を用いた概念に比べて、冗長で不必要な例の細分化が減り、明らかにコンパクトで効率的に予測を行なえる概念構造となっており、正答率も上昇していることがわかる。

最終的に残った属性群の中にはGAによって生み出された属性が2つ含まれているが、その新属性を構成している要素属性は必ずしも最終的な属性群に単独で含まれているわけではない。例えば、"milk"や"eggs"属性は新属性の中でのみ考慮されている。つまり、これらの属性は単独では良好な概念形成への貢献度が小さいものの、構造化し組み合わせることで、有効に働く属性として構成されたものであるといえる。

5 結言

本研究では、オペレータの挙動を観察する中から必要とされている情報を取捨選択し、再構成された情報を新たに生成しながら概念を構築することのできる動的概念形成システムの提案を行なった。

本手法をユーザの挙動およびシステムとのインタラクションを学習データとしてその観察からユーザ概念を再構成する問題として簡単なプロセスコントロールシミュレータを用意し、システムの状態履歴とユーザの操作をデータとして用いた実験を行ない良好な結果を得ている。

参考文献

1) 椹木、高田、片井: 時系列データからの概念形成によるプラント異常の動的診断とリアルタイム支援, 計測自動制御学会第22回知能システムシンポジウム講演論文集, pp.339-346, 1995

2) Maes, P.: Agents that Reduce Work and Information Overload, *Communications of the ACM*, 37-7, pp.30-40, 1994

3) Fisher, D. H.: Knowledge Acquisition via Incremental Conceptual Clustering, *Machine Learning*, 2, pp.139-172, 1987

4) Wrobel, S.: Towards a Model of Grounded Concept Formation, *Proc. of 12th International Conference on Artificial Intelligence*(IJCAI-91), pp.712-717, 1991

5) M. Gluck and J. Corter: Information, Uncertainty and the Utility of Categories, *Proc. of the Seventh Annual Conf. on Cognitive Science Society*, pp.283-287, 1985

6) 北野編著: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993

7) Janusz Wnek, Ryszard S. Michalski: Hypothesis-Driven Constructive Induction in AQ17-HCI:A Method and Experiments, *Machine Learning*, 14, pp.139-168, 1994

[連絡先] 〒606-01 京都市左京区吉田本町
京都大学大学院工学研究科精密工学専攻
椹木哲夫
Tel. (075) 753-5266 Fax. (075) 771-7286
Email. sawaragi@prec.kyoto-u.ac.jp

THB3-3

遺伝的アルゴリズムによる超楕円錐形メンバーシップ関数を用いたファジィルールの自動生成

Automatic Generation of Fuzzy Rules Using Hyper Elliptic Cone Membership Functions by Genetic Algorithms

井上博行　亀井且有　井上和夫
Hiroyuki INOUE　Katsuari KAMEI　Kazuo INOUE

立命館大学理工学部
Fuculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

Abstract We had presented an automatic generation technique for fuzzy rules using hyper cone membership functions by genetic algorithm (GA). In this method, however, there is a problem that the shape of fuzzy subsets is limited to a hyper sphere. In this paper, we expand the shape of fuzzy subsets to be elliptic and present an automatic generation technique for fuzzy rules. In order to reduce the number of rules efficiently, we also present a technique of sort of rules. We applied this method to a line pursuit control problem and a trailer truck back up control problem.

1. はじめに

ファジィ推論は，ファジィ制御[1]をはじめ様々な分野に応用されてきた．このファジィ推論には，推論ルールやメンバーシップ関数のチューニング問題が存在し，それらを様々な手法を用いて自動チューニングや自動生成する研究が盛んに行われてきた．例えば，ニューラルネットワーク[2]-[4]やクラスタリング[5]などである．遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) もその主要な手法として多くの研究がされてきた．その中でもルール数を考慮した手法も提案されている．例えば，必要なルールをたくさんのルール群から GA により選ぶ手法[6],[7]，GA を用いて前件部のメンバーシップ関数の数とその位置を決定する手法[8]-[10]，前件部と後件部を GA で決定する手法[11]-[12]などが提案されている．これらは，ルール数が少ないコンパクトなファジィシステムが得られている．

筆者らは超円錐形メンバーシップ関数を用いたファジィルールを GA を用いて自動生成する手法を提案した[12]．提案法では，超円錐形メンバーシップ関数で表現したファジィルールの位置と形を GA により決定するものである．また，それぞれのルールが発火を許すか許さないかの情報を GA と忘却により決定し，不必要なルールの削除を行っていた．しかし，いくつかの問題点が存在する．第1にファジィルールの形状が超球形に限定されている．2番目に，ピッツアプローチ的手法を用いているが，交叉は各ルールごとに行っているため，ほとんどの場合，前件部の構造が全く違うルール同士が交叉する．したがって，交叉により良好なルールが壊されたり，忘却によるルール削減が効率よくない．そこで本稿では，ファジィルールを回転を伴う楕円形に拡張し，超楕円錐形メンバーシップ関数で表されたファジィルールを GA を用いて自動生成することを試みる．また，ルール数の効果的な探索，削減を行うため，各個体のルールを並び替える手法を提案する．また，提案手法を自動車の追従運転とトレーラ・トラックの後退運転に適用する．

2. 超楕円錐形メンバーシップ関数によるファジィルール

本研究で用いるファジィルール R^i は，(1)式で表す．

$$R^i:\ \text{if } \boldsymbol{x} \text{ is } A_i \text{ then } \boldsymbol{y} \text{ is } B_i, \quad i=1,2,\cdots,n, \tag{1}$$

ここで i はルール番号，n はルール数，$\boldsymbol{x}$ と $\boldsymbol{y}$ はそれぞれ入出力ベクトル，A_i と B_i はファジィ集合である．入出力ベクトルは，

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_l \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},\quad \boldsymbol{y}=\begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_m \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

である．ファジィ集合 A_i および B_i は，超楕円推形メンバーシップ関数であらわされる．

2.1 入出力メンバーシップ関数

ファジィ集合 A_i はグレードが 1.0 である中心 $\boldsymbol{a}_i \in \boldsymbol{R}^l$ として回転している．例として図1に2入力の場合のファジィ集合 A_i を示す．(3) 式により，入力ベクトル $\boldsymbol{x}$ は $\boldsymbol{a}_i$ を原点として $\boldsymbol{\theta}_{Xi}$ 回転する $\boldsymbol{X}_i$ 座標系のベクトル $\boldsymbol{x}'$ に変換する．

$$\boldsymbol{x}'=T_{Xi}\left(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{a}_i\right) \tag{3}$$

ここで，$\boldsymbol{a}_i$ は中心座標ベクトルで (4) 式のように与えられる．$\boldsymbol{\theta}_{Xi}$ は回転角度ベクトルで (5) 式のように与えられる．

$$\boldsymbol{a}_i=\begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{il} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{Xi}=\begin{bmatrix} \theta_{Xi}^{12} & \theta_{Xi}^{13} & \cdots & \theta_{Xi}^{pq} & \cdots & \theta_{Xi}^{l-1\,l} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad p=1,\cdots,l-1,\ q=p,\cdots,l \tag{5}$$

T_{Xi} は座標変換行列である．

超楕円錐形メンバーシップ関数 $\mu_{A_i}(\boldsymbol{x})$ は (6)，(7) 式で定義される．

$$\mu_{A_i}:\ A_i \rightarrow [0,1] \tag{6}$$

$$\mu_{A_i}(\boldsymbol{x})=\left(1-\left\|\left\{\mathrm{diag}\ \boldsymbol{\alpha}_i\right\}^{-1}\boldsymbol{x}'\right\|\right)\vee 0 \tag{7}$$

(7)式の $\boldsymbol{\alpha}_i$ は，楕円形ファジィ集合の各軸の広がりで有り，(8) 式で与えられる．

$$\boldsymbol{\alpha}_i=\begin{bmatrix} \alpha_{i1} & \alpha_{i2} & \cdots & \alpha_{il} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

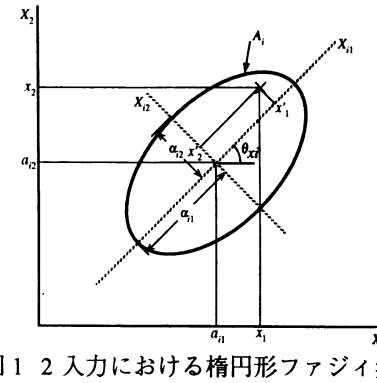


図1 2入力における楕円形ファジィ集合

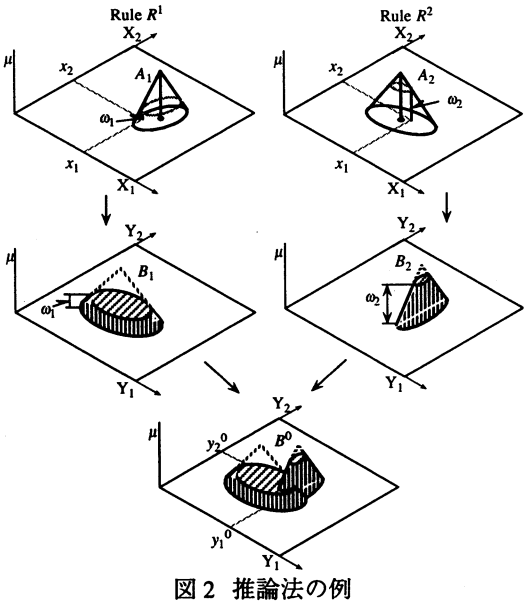


図2 推論法の例

出力のメンバーシップ関数も同様に定義する．

2.2 推論法

入出力メンバーシップ関数より推論結果 μ_{B^0} を求め，非ファジィ化を行い出力 y^0 を算出する．

まず，ルール R^i の前件部における適合度 ω_i を (7) 式で求める．すなわち，メンバーシップ値がそのまま適合度になる．次にこの適合度 ω_i を使い (9) 式のようなメンバーシップ関数 $\mu_{B_i^*}(y)$ を定義する．

$$\mu_{B_i^*}(y) = \omega_i \wedge \mu_{B_i}(y) \tag{9}$$

次に，各ルールの推論結果の合成である $\mu_{B^0}(y)$ を (10) 式で求める．

$$\mu_{B^0}(y) = \bigvee_{i=1}^{n} \mu_{B_i^*}(y). \tag{10}$$

最後に (11) 式を用いて非ファジィ化を行い，出力値 y^0 を求める．

$$y^0 = \frac{\int_{D_y} \mu_{B^0}(y)\, y\, dy}{\int_{D_y} \mu_{B^0}(y)\, dy} \tag{11}$$

y^0 は $\mu_{B^0}(y)$ の重心座標である．これらの一連の流れを $l=2$，$m=2$，$n=2$ の場合を例にとり，図2に示す．

また，入力のメンバーシップ関数の配置に規則性を持たせていないため，どのルールに対しても適合度が 0.0 である領域が出現する可能性がある．本手法ではこのような領域に入力 x を得た場合，最も近いルールのみが発火するものとする．

3. 遺伝的アルゴリズムによるファジィルールの生成

GA を用いて超楕円錐形メンバーシップ関数を持つファジィルールを生成する．本手法では，一つのファジィシステムを一つの個体とするピッツアプローチ的手法を用いる．

3.1 遺伝子のコーディング

本手法における遺伝情報は，ファジィルール R^i を構成する次の7つの事項となる．

・ファジィ集合 A_i の中心座標 a_i
・ファジィ集合 A_i の楕円形の各軸の広がり α_i
・ファジィ集合 A_i の回転角度 θ_{Xi}
・ファジィ集合 B_p の中心座標 b_i
・ファジィ集合 B_p の楕円形の各軸の広がり β_i
・ファジィ集合 B_p の回転角度 θ_{Yi}
・ルール R^i の発火の許否

ここでの「ルール R^i の発火の許否」は，ルールが発火するかその許否を決定する情報である．すなわち，この遺伝子が「発火を許す」という情報を持っているならルール R^i は普通に発火するが，「発火を許さない」という状態であれば，発火しない．

各ルールは一つの染色体で表す．すなわち，ファジィルール R^i は遺伝子が一列に並んだ形となる．ルールは，一つのファジィシステムに n 個あるため，染色体を n 個用意する．従って，個体 I_p ($p=1,2,\cdots,P$) は n 個の染色体により構成される．なお，P は個体数である．

また，ルール発火許否の遺伝子を用いてルール数の削減を行うため，各ルールにそのルールが過去何世代発火していないかという情報を記憶するカウンター g を持っている．

3.2 遺伝演算

STEP1　初期集団を作成する．このときルール発火許否は，「発火を許す」とし，その他は，ランダムに決める．

STEP2　以下のような操作を行い，次世代の集団を作成する（図4参照）．

STEP2-1　適応度比例戦略を用いて交配を行う個体（2個体）を選択する．

STEP2-2　STEP2-1 で選ばれた個体間で交叉を行う．本手法では，同じルール番号同士の染色体がそれぞれ一点交叉する（図4参照）．

STEP2-3　各遺伝子において一定の確率で突然変異を行う．

STEP2-4　以上のような操作により得られた2個体を次世代の集団に加える．もし，次世代の個体数が P 個になれば STEP3 に進み，そうでなければ STEP2-1 に戻る．

STEP3　各個体の適応度の算出を行う．この際，3.3 で述べる手法によりルールの削減を行う．

STEP4　終了条件を満たすなら操作を終了し，そうでなければ STEP2 に戻る．

なお，カウンター g は各ルールを表すビットの先頭に付随している．したがって，カウンター g は交叉によって分かれた染色体の前半部分と一体化して次世代に引き渡される．例えば，図4において個体 I_a の g は個体 $I_{a'}$ に受け継がれる．

3.3 忘却によるルール数の削減

ルール発火許否の情報とカウンター g を使い，遺伝演算の最中に不必要なルールの削減する．まず，初期集団生成時に各ルールにおいて，ルール発火許否を「発火を許す」とし，カウンター g を0にセットする．また，発火の許否に関する判定を行うための定数 G の値を設定する．

STEP1　ルール発火許否が「発火を許す」であるルールのみを用いて，ファジィ推論を行う．このとき，各ルールについてルールが発火したか記録しておく．

STEP2　発火許否が「発火を許す」であるルールについて次の操作を行う．STEP1 において，一度も発火しなかったルールに対し，$g<G$ であれば g に1を加え，$g=G$ であればそのままにする．また，一度でも発火したルールは g を0とする．

STEP3　ルール発火許否が「発火を許さない」であるルールで $g<G$ であれば，g に1を加える．

STEP4　$g=G$ でありルール発火許否が「発火を許す」であるルールのルール発火許否を，「発火を許さない」と書き換える．

この操作が繰り返され $g = G$ になれば，不必要なルールとみなされ，次の世代から発火を許されるルールの対象から外される．また，削除されたルールの遺伝子は残されているので，交叉や突然変異によって再び発火が許されることもある．

3.4 ルールの並び替え

文献 [12] では，各個体のルール番号には規則性を持たせていない．したがって，ほとんどのルールは交叉を行うときに，前件部の構造が違うルールと交叉することになる．そのため，良いルールの染色体が破壊され，次の世代に受け継がれにくくなる．また，親と子の前件部のが大きく異なるため，忘却によるルール削減の効率が悪くなる．そこで以下のようなルールを並び替える手法を提案し，ある程度交叉するルール対が決まるようにする．

各次元を正規化した入力空間の原点 $\mathbf{o}$ と各ルールの中心座標 $\boldsymbol{a}_i$ との距離を式 (12) で求める．

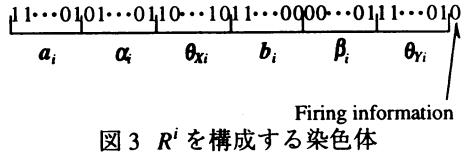


図 3 R^i を構成する染色体

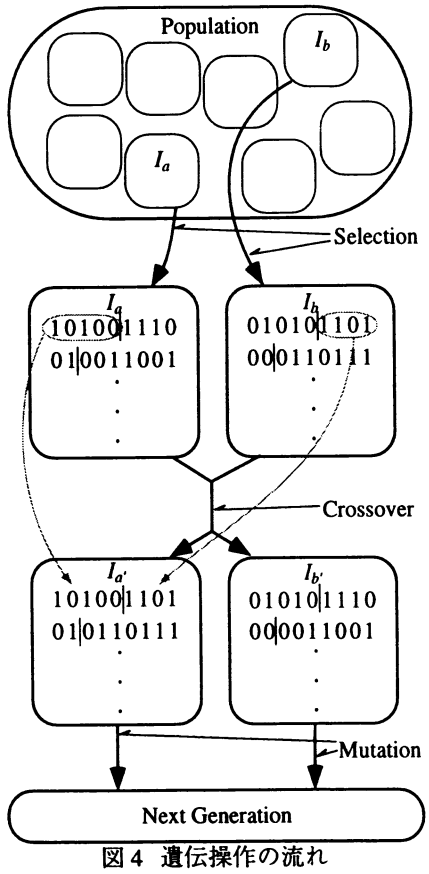


図 4 遺伝操作の流れ

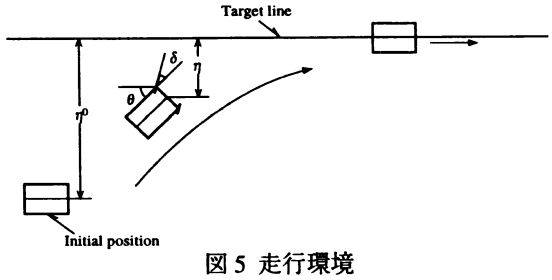
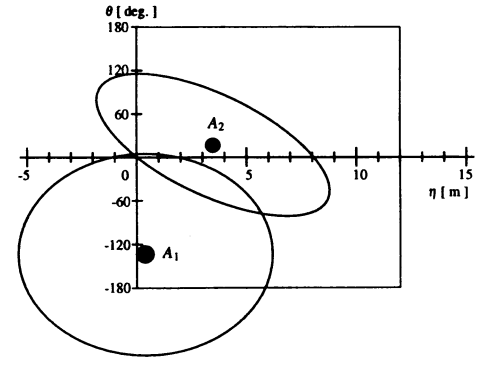


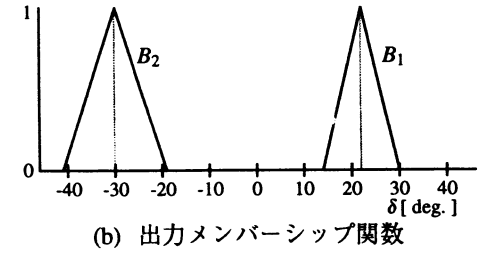
図 5 走行環境

表 1 平均ルール数と平均適応度

	Membership Function	The Average Number of Rules	The Average of Fitness
Non-sorting	Hyper Elliptic Cone	4.72	0.00306
	Hyper Non-Elliptic Cone	5.70	0.00282
Sorting	Hyper Elliptic Cone	2.64	0.00317
	Hyper Non-Elliptic Cone	2.92	0.00310



(a) 入力メンバーシップ関数



(b) 出力メンバーシップ関数

図 6 生成されたルール

$$D_i = |\mathbf{o} - \boldsymbol{a}_i| \tag{12}$$

そして，D_i の値により順番にルールを並び替え，ルール番号を付け替える．すなわち，D_i が最も小さいルールのルール番号が 1 になり，D_i が最も大きいルールのルール番号が n となる．これにより，各個体のルール R^i の D_i は似たような値になり，半径 D_i の超球面付近にあるルール同士で交叉することになる．したがって，前件部の構造が比較似たルール同士の交叉が増えるので，有効なルールが受け継がれやすくなる．また，忘却によるルール削減が効率的に行えるようになる．

4 車両の走行への応用

4.1 自動車の追従運転

4.1.1 シミュレーションモデルと遺伝操作の設定

走行環境を図 5 に示す．初期位置から目標直線に向かって走行し直線上を追従させる．図中の変数は

η ：目標直線と走行車両との水平距離 [m] ($0.0 \leqq \eta \leqq 12.0$)

θ ：走行車両の傾き [deg] ($-180.0 \leqq \theta \leqq 180.0$)

δ ：走行車両の舵角 [deg] ($-30.0 \leqq \delta \leqq 30.0$)

である．η と θ を入力とし，出力である δ を推論する．

各ルールの染色体は，32 bit の遺伝子で構成する．ルール数を $n = 30$，個体数を $P = 30$ とする．突然変異率は，1.0×10^{-3} である．ルール発火パラメータを $G = 10$，打ち切り世代を500世代とし，全世代中最も適応度が高かった個体を採用する．

4.1.2 シミュレーション結果

並び替えを行った場合と，並び替えをしなかった場合とでルールの生成を行った．それぞれ初期集団を変え，50

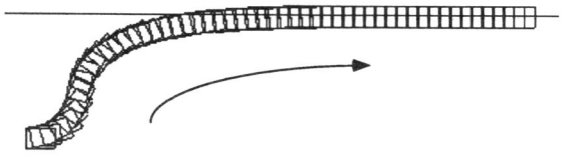


図7 シミュレーション結果 ($\eta^0 = 12.0$ [m])

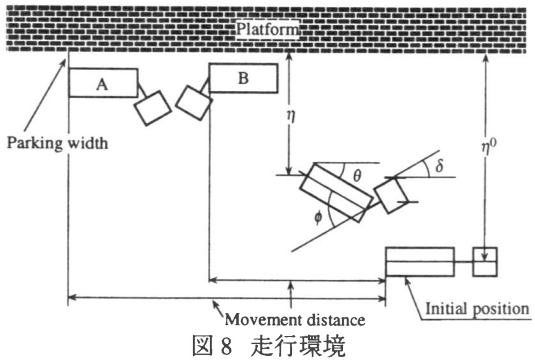


図8 走行環境

試行行った．表1に50試行の平均ルール数と平均適応度を示す．表1には比較のため超円錐形メンバーシップ関数を用いた結果も示している．表よりルールを並べ替える手法を用いた場合，並べ替えないときに比べルール数も適応度も良好な結果が得られている．また，超楕円錐形メンバーシップ関数の方が若干結果が良くなっている．

このとき得られたルールの入出力メンバーシップ関数の一例を図6に示す．これらのルールを使用した走行シミュレーションを図 7に示す．ルール数が少ないにもかかわらず，良好に直線に追従していることがわかる．

4.2 トレーラ・トラックの後退運転

4.2.1 シミュレーションモデルと遺伝操作の設定

走行環境を図8に示す．初期位置から後退のみを許容しホームにトレーラを横付けする．横付け位置の状態は，AとBのどちらでもよい．図中の変数は以下の通りである．

η ：ホームとトレーラとの水平距離 [m] ($1.0 \leqq \eta \leqq 12.0$)

θ ：トレーラの傾き [deg] ($-180.0 \leqq \theta \leqq 180.0$)

ϕ ：連結角度 [deg] ($-90.0 \leqq \phi \leqq 90.0$)

δ ：トラックの舵角 [deg] ($-30.0 \leqq \delta \leqq 30.0$)

η，θ，ϕを入力とし，出力である舵角δを推論する．

各ルールの染色体は， 53 bit の遺伝子で構成する．ルール数を $n = 30$，個体数を $P = 30$ とする．突然変異率は，1.0×10^{-3} である．また，ルール発火パラメータを $G = 10$ ，打ち切り世代を500世代とし，全世代中最も適応度が高かった個体を採用する．

4.2.2 シミュレーション結果

4.1.2と同様にそれぞれ50試行行った．表2に50試行の平均ルール数と平均適応度を示す．並べ替える手法は，ルール数も適応度も良好な結果が得られている．また，超楕円錐形メンバーシップ関数と超円錐形メンバーシップ関数とはほぼ同様な結果を示していると言える．

このとき得られたルール（ルール数 5）を使用した走行シミュレーションを図 9に示す．ルール数が少ないにもかかわらず，良好に直線に追従していることがわかる．

表2 平均ルール数と平均適応度

	Membership Function	The Average Number of Rules	The Average of Fitness
Non-sorting	Hyper Elliptic Cone	9.28	0.0848
	Hyper Non-Elliptic Cone	8.36	0.0656
Sorting	Hyper Elliptic Cone	6.82	0.1512
	Hyper Non-Elliptic Cone	6.48	0.1613

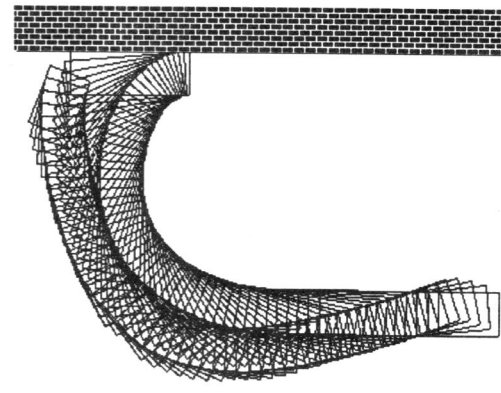


図9 シミュレーション結果 ($\eta^0 = 12.0$ [m])

5. おわりに

本稿では，超円錐形メンバーシップ関数を超楕円錐形メンバーシップ関数に拡張した．また，ルールの探索と削減の効率化のため，ルールを並び替える手法を提案した．提案法を自動車の直線追従走行とトレーラ・トラックの後退運転に応用し，良好な結果が得られた．

参考文献

[1] 菅野：ファジィ制御，日刊工業新聞社 (1989)

[2] 林，野村，若見：ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルールの獲得，日本ファジィ学会誌，Vol.2， No.4，pp.585-597 (1990)

[3] S. Horikawa, T. Furuhashi, Y. Uchikawa: On fuzzy modeling using fuzzy neural networks with the back-propagation algorithm, *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol.3, No.5, pp.801-806 (1992)

[4] J. A. Dickerson, B. Kosko: Fuzzy Function Approximation with Ellipsoid Rules, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol.26, No.4, pp.542-560 (1996)

[5] 亀井：クラスタリングの制御への応用，日本ファジィ学会誌，Vol.8, No.3, pp.448-455 (1996)

[6] 古橋，中岡，森川，内川：多段ファジィクラシファイアシステムによる制御知識獲得，日本ファジィ学会誌，Vol.6, No.3, pp.603-609 (1994)

[7] 石渕，村田，田中：遺伝的アルゴリズムによるファジィ識別システムの構築，日本ファジィ学会誌，Vol.7, No.5, pp.1022-1040 (1995)

[8] 野村，若見：遺伝アルゴリズムによるファジー推論ルールの決定法，電子情報通信学会論文誌A，Vol.J77-A， No.9，pp.1241-1249 (1994)

[9] 福田，石上，新井，柴田：遺伝的アルゴリズムとデルタルールによるファジィモデルの自動生成，電気学会論文誌C，Vol.113, No.7, pp.495-500 (1993)

[10] K. Shimojima, T. Fukuda, Y. Hasegawa: RBF-Fuzzy System with GA Based Unsupervised/Supervised Learning Method, *Proc. of the In'l Joint Conf. of the 4th IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systens and the 2nd Int'l Fuzzy Engineering Symposium*, pp.253-258 (1995)

[11] M. A. Lee, H. Takagi: Integrating Design Stage of Fuzzy Systems using Genetic Algorithms, *Proc. of the 2nd IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems*, Vol.1, pp.612-617 (1993)

[12] 井上，亀井，井上：遺伝的アルゴリズムと超円錐形メンバーシップ関数によるファジィルール自動生成手法の提案，日本ファジィ学会誌，Vol.8, No.6, pp.1104-1115 (1996)

連絡先 〒525 滋賀県草津市野路東 1-1-1
立命館大学理工学部情報学科
亀井研究室 井上博行
TEL: 0775-66-2807 FAX: 0775-61-2669
E-mail: hiro@spice.cs.ritsumei.ac.jp

An Evolutionary Computation-Based Approach to Fuzzy Clustering with Relational Data

Linhu **ZHAO**, Yasuhiro **TSUJIMURA** and Mitsuo **GEN**

Department of Industrial and Systems Engineering
Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga 326, Japan
Tel: +81(284)62-0605 Fax: +81(284)64-1071
E-mail : zhao@genlab.ashitech.ac.jp

Abstract

In this paper, an Evolutionary Computation(EC)-based algorithm is developed to solve the fuzzy clustering problem with relational data. Relational data consists of n^2 measurements of pairwise dissimilarities between n objects, and is sometimes all of the data which is available for the clustering. There are several objective functions developed for fuzzy clustering with relational data, and typically local optima of these objective functions are defined as optimal clusterings. The Evolutionary Algorithm(EA) proposed in this paper can alter objective functions, can process any type of relational data, and has more chance to attain global optima than conventional iterative search algorithms for the same objective function. A substantial example from design of cellular manufacturing system is used to demonstrate the effectiveness of the proposed EA in finally.

Key Words: Fuzzy clustering, Evolutionary computation, Pattern recognition, Cellular manufacturing system

1 Introduction

Cluster analysis is an approach to divide a given data set into some categorically homogenous subsets called "clusters". The conventional crisp clustering approaches restrict that each objective of the data set can belong to one cluster exactly , however, objects whose lineage are much less evident cannot be adequately assigned to one cluster. Here, Fuzzy Set Theory provides a means for a more accurate presentation of uncertain or inexact information. Now fuzzy clustering has been widely studied and applied in various areas such as taxonomy, character recognition, image processing, medical diagnosis, optimization of manufacturing systems, and so on[1].

In general, numerical data used for fuzzy clustering can be either object data or relational data. Object data is often available in the generic form of n objects data set $\boldsymbol{X}=\{\mathbf{X}_1,\mathbf{X}_2,...\mathbf{X}_n\}\subset\boldsymbol{R}^p$, where $\boldsymbol{R}^p$ is called feature space and $x_{jl}(j=1,2...,n,\ l=1,2,...,p)$ is the l-th feature of the j-th object $\mathbf{X}_j$. The other type of numerical data, relational data can be described by a $(n\times n)$ relation matrix on n objects $D=[d_{jk}]$, where d_{jk} indicates the dissimilarity(or similarity) between pair of objects $\mathbf{X}_j$ and $\mathbf{X}_k$. Sometimes, relational data is all of the data which is available for the clustering. And if numerical data is given as object data, relational data can be derived from object data with some measure of distance between pairs of objects. Therefore, one can say that an effective fuzzy clustering algorithm processing relational data are more useful than those algorithms processing object data.

On the other hand, Evolutionary Computations (ECs) which model natural genetic inheritance and Darwinian strife for survival have been widely used for various optimization problems[6][7]. Because ECs use population wide search instead of a point-search, and the transition rules of ECs are stochastic instead of deterministic, the probability of reaching global optima in ECs is more than one in other conventional search algorithms. And ECs require the values of objective functions, rather than gradient information about objective functions, so ECs are appropriate for finding near-optimum solutions to hard constrained nonlinear problems.

The purpose of this paper is to develop an Evolutionary Algorithm(EA) based on the EC for fuzzy clustering with relational data. In Section 2, the fuzzy clustering problem is described. Section 3 presents an implementation of the EA, and Section 4 illustrates the application of the EA to manufacturing cell formation problem following conclusion in Section 5.

2 Fuzzy Clustering with Relational Data

In the data set $\boldsymbol{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, ..., \mathbf{X}_n\} \subset \boldsymbol{R}^p$, each $\mathbf{X}_j = \{x_{j1}, x_{j2}, ..., x_{jp}\} \in \boldsymbol{R}^p (j = 1, 2, ..., n)$ is called a feature vector, and x_{jl} is the l-th feature of $\mathbf{X}_j$. Let $2 \leq c < n$, where c is the number of clusters, and $\boldsymbol{R}^{cn}$ denotes the set of all real $c \times n$ matrices. The matrix $\tilde{U} = [\mu_{ik}] \in \boldsymbol{R}^{cn}$ is called a *fuzzy c-partition* if it satisfies the following conditions:

$$\mu_{ik} \in [0, 1], \quad i = 1, 2, ..., c; k = 1, 2, ..., n \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{c} \mu_{ik} = 1, \quad k = 1, 2, ..., n \tag{2}$$

$$0 < \sum_{k=1}^{n} \mu_{ik} < n, \quad i = 1, 2, ..., c \tag{3}$$

By contrast to the hard c-partition, μ_{ik} are not restricted to integer value of 0 or 1, *i.e.*, they can be fractional. Conditions (2) and (3) ensure that the "total membership" of a object is normalized to 1 and that it cannot belong to more clusters than there exist. The set of all matrices in $\boldsymbol{R}^{cn}$ that satisfy these conditions is called $\boldsymbol{M}_{fcn}$.

Since the number of possible matrices $\tilde{U} \in \boldsymbol{M}_{fcn}$ is infinite, it is necessary to define an objective criterion for improving an initial partition at first. In the relational version of Fuzzy c-Means(FCM) approach, clusters are formed using the matrix $D = [d_{jk}]$ of relational data corresponding to pairwise distances between objects and the following objective function[3]:

$$K_m(\tilde{U}) = \sum_{i=1}^{c} \left\{ \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} (\mu_{ij}{}^m \mu_{ik}{}^m d_{jk}) / (2 \sum_{t=1}^{n} \mu_{it}{}^m) \right\} \tag{4}$$

where

$$d_{jk} = (\|\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_k\|_A)^2 \quad \text{for} \quad 1 \leq j, k \leq n, \tag{5}$$

$\| \bullet \|_A$ is an inner product induced norm,

$$m > 1 \text{ is a weighting exponent.} \tag{6}$$

Hathaway *et al.*[3] proposed the Relational Fuzzy c-Means(RFCM) clustering algorithm which is an iterative algorithm to search local optima of K_m for $\tilde{U} \in \boldsymbol{M}_{fcn}$. It is necessary to note that the relational data used in RFCM clustering algorithm is derived using an inner product induced norm in Equation (10). By contrast to it, Windham's Assignment-Prototype(AP) algorithm requires much weaker assumptions about relational data[5]:

$$d_{jk} \geq 0, d_{jj} = 0 \text{ and } d_{jk} = d_{kj}, \quad \text{for all } 1 \leq j, k \leq n \tag{7}$$

Windham proposed the following objective function J_{AP} with relational data satisfying above conditions :

$$J_{AP}(\tilde{U}, B) = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} (\mu_{ij}{}^2 b_{ik}{}^2) d_{jk} \tag{8}$$

where

$$\tilde{U} \in \boldsymbol{M}_{fcn}, \quad B = [b_{ik}] \in \boldsymbol{R}^{cn}, \text{ with } b_{ik} \in [0, 1] \text{ and } b_{1k} + b_{2k} + ... + b_{in} = 1, \quad \text{for } 1 \leq i \leq c, \ 1 \leq k \leq n. \tag{9}$$

Such $B = [b_{ik}]$ is called prototype weight matrix. Windham obtained the necessary conditions for minimizers $\tilde{U}^*$ and B^* of $J_{AP}(\tilde{U}, B)$ and proposed an iterative algorithm called AP algorithm.

The more intuitive and simple objective function with relational data defined by Equation (6) is the Rouben's objective function J_{RO}[4]:

$$J_{RO}(\tilde{U}) = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} (\mu_{ij}{}^2 \mu_{ik}{}^2) d_{jk} \tag{10}$$

In this paper, three different objective functions, K_m, J_{AP}, J_{RO} are used to cluster data set using the same EA presented in the next section.

3 Evolutionary Algorithm

3.1 Representation

A matrix representation is the most natural representation of a solution for fuzzy clustering. In this representation, a $c \times n$ matrix $\tilde{U} = [\mu_{ik}]$ representing a fuzzy c-partition should satisfy conditions (1) to (3). For example, a fuzzy 3-partition of 4 objects is as follows:

$$\tilde{U}_{3\times4} = \begin{array}{c} \\ \text{cluster}_1 \\ \text{cluster}_2 \\ \text{cluster}_3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \mathbf{x}_3 & \mathbf{x}_4 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.4 \\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.4 \\ 0.3 & 0.4 & 0.7 & 0.2 \end{pmatrix} \end{array}$$

3.2 Initialization Procedure

Define an integer *pop_size* as the size of population. *pop_size* initial chromosomes will be randomly generated through the following steps:

Step 1: Generate c random numbers $r_{1k}, r_{2k}, ..., r_{ck}$ in the interval of $[0, 1]$ for the k-th object of a chromosome.

Step 2: Calculate $\mu_{ik} = r_{ik}/(r_{1k} + r_{2k} + ... + r_{ck})$, for $i = 1, 2, ..., c$. Obviously the obtained μ_{ik} will satisfy conditions (1) and (2).

Step 3: Repeat Steps 1 and 2 for $k = 1, 2, ..., n$, and produce a chromosome.

Step 4: If the produced chromosome satisfies condition (3) then go to Step 5, else return to Step 1. (however the latter case has never been occurred in our experiments.)

Step 5: Repeat above Steps 1 to 4 *pop_size* times and produce *pop_size* initial chromosomes.

3.3 Evaluation Function and Selection

In this paper, the well-known *rank – based* evaluation function [7] is employed, and the selection process is based on spinning the *roulette wheel* [7] *pop_size* times and each time one selects an individual for the next generartion.

3.4 Genetic Operators

The arithmetic crossover operation is used in the proposed EA. Define a parameter P_c as the probability of crossover, then $P_c \cdot pop\_size$ chromosomes will undergo the crossover operation in the following way:

Step 1: Generate a random real number r_c in the interval of [0,1] for the given i-th chromosome.

Step 2: Select the given i-th chromosome for crossover if $r_c < P_c$.

Step 3: Repeat Steps 1 and 2 for $i = 1, 2, ...,$ *pop_size*, and produce $P_c \cdot pop\_size$ parents, averagely.

Step 4: For each pair of parents(matrices $\tilde{U}_1$ and $\tilde{U}_2$), the crossover operator on $\tilde{U}_1$ and $\tilde{U}_2$ will produce two children $\tilde{U}_3$ and $\tilde{U}_4$ as follows:

$$\tilde{U}_3 = \lambda_1 \cdot \tilde{U}_1 + \lambda_2 \cdot \tilde{U}_2, \quad \tilde{U}_4 = \lambda_2 \cdot \tilde{U}_1 + \lambda_1 \cdot \tilde{U}_2. \qquad (11)$$

where $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, and λ_1 is a random real number generated in the interval of $[0, 1]$.

The mutation operation can be proceed in column-wise. Define P_m as the probability of mutation, then $P_m \cdot pop\_size \cdot n$ columns would be selected for mutation. For these selected columns, we produce new elements by using the Steps 1 and 2 of initialization procedure(see 3.2).

4 Application to Manufacturing Cell Formation

Let us consider a substantial example from design of Cellular Manufacturing System(CMS).

The EA is used to below to cluster a set of 9 parts, whose corresponding data are given in the form of part-machine matrix (12). An entry of 1 for x_{jl} indicates that part j visits machine l. After clustering the 9 parts using a proper "cell formation" approach, rows and columns in the part-machine matrix can be rearranged as matrix(13) according to the clustering results, *i.e.*, the first cluster consists of parts 3,7 and 8, the second cluster consists of parts 1,4 and 5, and final cluster consists of parts 2,6 and 9 respectively[2]

	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9
p_1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
p_2	1	1	0	1	0	1	0	0	1
p_3	0	0	1	1	0	0	1	1	0
p_4	0	0	0	1	1	0	0	1	0
p_5	1	0	0	0	1	0	0	1	0
p_6	0	1	0	0	0	1	0	0	1
p_7	0	0	1	0	0	0	1	1	0
p_8	0	0	1	1	1	0	1	1	0
p_9	0	1	0	0	0	1	0	0	1

(12)

	m_3	m_4	m_7	m_8	m_1	m_5	m_2	m_6	m_9
p_3	1	1	1	1	0	0	0	0	0
p_7	1	0	1	1	0	0	0	0	0
p_8	1	1	1	1	0	1	0	0	0
p_1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
p_4	0	1	0	1	0	1	0	0	0
p_5	0	0	0	1	1	1	0	0	0
p_2	0	1	0	0	1	0	1	1	1
p_6	0	0	0	0	0	0	1	1	1
p_9	0	0	0	0	0	0	1	1	1

(13)

The following 2 norms are used to calculate dissimilarity between parts:

Euclidean(2-norm) distance

$$\|x_j - x_k\|_2 = \left[\sum_{l=1}^{9} (x_{jl} - x_{kl})^2\right]^{1/2},$$

1-norm distance

$$\|x_j - x_k\|_1 = \sum_{l=1}^{9} |x_{jl} - x_{kl}|,$$

The EA for fuzzy clustering is coded in Turbo C and the parameters selected for this example are as follows: The degree of fuzziness m=2, the maximum generation *max_gen*=2000; population size *pop_size*= 50; the probability of crossover P_c=0.7; the probability of mutation P_m=0.1.

To compare clustering results obtained using the EA with different types of objective functions and

data sets, the following partition coefficient $F_c(\tilde{U})$ is employed[1]:

$$F_c(\tilde{U}) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}(\mu_{ik})^2/n \qquad (14)$$

Tables 1, 2 list the final partitions and the corresponding partition coefficients values obtained by using the EA with the three objective functions and two relational data sets. For the two data sets, the EA with the objective function K_m obtained better partitions than the EA with the other two objective functions. And the EA with all of the three objective functions can obtain more ideal partitions for the relational data set derived with 1-norm distance than for the data set derived with Euclidean distance.

5 Conclusion

In this paper, an EA has been developed to solve the fuzzy clustering problem with relational data. The EA has more chance to attain global optima, can conveniently alter objective functions for searching more ideal fuzzy c-partitions, and can processing any types of relational data. Our EA may be a very effective tool for a number of real-world clustering problems, such as the manufacturing cell formation problem.

References

[1] J. C. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press, New York(1981)

[2] C. H. Chu, and J.C. Hayya, A Fuzzy Clustering Approach to Manufacturing Cell Formation, *Int. J. of Production Research*, Vol.29, pp.1475-1487(1991)

[3] R. J. Hathaway, J. W. Davenport, and J. C. Bezdek, Relational Duals of the c-Means Clustering Algorithms, *Pattern Recognition*, Vol.22, No.2, pp.205-212(1989)

[4] M. Roubens, Pattern Classification Problems with Fuzzy Sets, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.1, pp.239-253(1978)

[5] M. P. Windham, Numerical Classification of Proximity Data with Assignment Measures, *J. of Classification*, Vol.2, pp.157-172(1985)

[6] Z. Michalewicz, Engineering Design and Evolutionary Computation, *Proc. of mini-symposium on Genetic Algorithm and Engineering Design*, pp.1-24, Published in Ashikaga, Japan(1996)

[7] M. Gen, and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York(1996)

Table 1: Optimal partitions using Euclidean distance

part(j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$F_3(\tilde{U})$
K_m										
μ_{1j}	0.68	0.19	0.05	0.51	0.88	0.04	0.14	0.12	0.03	
μ_{2j}	0.20	0.69	0.03	0.14	0.05	0.94	0.09	0.06	0.95	0.69
μ_{3j}	0.12	0.12	0.92	0.35	0.07	0.03	0.77	0.82	0.02	
J_{AP}										
μ_{1j}	0.41	0.32	0.47	0.46	0.45	0.05	0.47	0.48	0.04	
μ_{2j}	0.42	0.33	0.46	0.47	0.46	0.04	0.45	0.46	0.04	0.51
μ_{3j}	0.17	0.35	0.07	0.07	0.09	0.91	0.08	0.06	0.92	
J_{RO}										
μ_{1j}	0.36	0.47	0.21	0.23	0.26	0.52	0.21	0.19	0.51	
μ_{2j}	0.36	0.29	0.35	0.38	0.39	0.26	0.36	0.36	0.26	0.36
μ_{3j}	0.28	0.24	0.44	0.39	0.35	0.22	0.43	0.45	0.22	

Table 2: Optimal partitions using 1-norm distance

part(j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$F_3(\tilde{U})$
K_m										
μ_{1j}	0.06	0.03	0.98	0.38	0.01	0.01	0.90	0.95	0.02	
μ_{2j}	0.14	0.90	0.01	0.09	0.01	0.97	0.03	0.01	0.97	0.83
μ_{3j}	0.80	0.07	0.01	0.53	0.98	0.02	0.07	0.04	0.01	
J_{AP}										
μ_{1j}	0.08	0.06	0.92	0.36	0.08	0.01	0.85	0.90	0.01	
μ_{2j}	0.20	0.82	0.03	0.08	0.04	0.97	0.04	0.02	0.97	0.75
μ_{3j}	0.72	0.12	0.05	0.56	0.88	0.02	0.10	0.08	0.02	
J_{RO}										
μ_{1j}	0.20	0.82	0.03	0.09	0.06	0.89	0.05	0.03	0.89	
μ_{2j}	0.08	0.05	0.90	0.35	0.10	0.03	0.81	0.85	0.04	0.69
μ_{3j}	0.72	0.13	0.07	0.56	0.84	0.08	0.14	0.12	0.08	

GAによるファジィシステムの同定と性格診断
Character Diagnosis of Fuzzy Systems by Genetic Algorithm and Fuzzy Inference

岡村 正和 Masakazu Okamura
大谷 忍 Shinobu Otani
菊池 浩明 Hiroaki Kikuchi
ロナルド R イェガー Ronald R.Yager
中西 祥八郎 Shohachiro Nakanishi

東海大学工学部電気工学科
Faculty of Engineering, Tokai University
Machine Intelligence Institute,Iona College

Abstract: Fuzzy systems represented by a fuzzy composite relational equation depend on the composite operation. That is, it can be considered that the operationin the equation means a character of the system. This paper proposes a method to identify the both of the composite operation and fuzzy relation in the quation representing the system from the only input-output data by a genetic algorithm.

1 はじめに

1976年にSanchezによってファジィ合成関係方程式に対する解法が与えられ、その後多くの研究者によってファジィ合成関係方程式による同定問題や診断問題に関する多くの研究が発表されてきた。これまでこの合成関係方程式に用いられて来た合成演算はMax, Min等の演算が用いられていた。このようなファジィシステムを同定する場合には合成演算を仮定して、ファジィ関係のみを同定するのが従来の方法であった。しかしながら、システムをより正確に同定するには合成演算とファジィ関係を同時に同定する必要がある。これに関しては筆者等が行った結果を既に報告している[1]。

ファジィ演算 Max, Min 等の演算を拡張した t-norm, s-norm(t-conorm) の演算として Schweizer, Hamacher, Yager 等はそれぞれに異なる演算を提案している。これらの演算はいずれもその定義式の中にパラメータを有しており、このパラメータを連続的に変化させる事でその内容を変化させている。そこで、合成演算にこのような t-norm, s-norm(t-conorm) を用いれば一つの表現で広範囲な領域を網羅する表現形式が得られる。このような表現におけるシステムの同定では、合成演算に含まれるパラメータの決定とその演算のもとでのファジィ関係の同定が必要となる。このように、連続的に変化する演算を用いる事で、通常用いられているMax, Min等の演算の場合よりも細かい表現が得られる。従って、同定を行う場合にも適切にシステムの同定が行えるものと思われる。その反面パラメータの決定は困難になることが予想される。

本稿では t-norm, s-norm の演算として、R. R. Yager の提案した演算を用いて合成演算を構成するものとする。更に、この演算に含まれるパラメータとそれに伴うファジィ関係を遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて決定する。このようにして決定された合成演算 (パラメータ) とそれに伴うファジィ関係は複数存在するので、これらから、ファジィシステムの正確をファジィ推論を用いて決定する方法を提案する。

2 演算の性質

ファジィ集合の演算には max 演算、min 演算等多く演算が提案されている。これらの演算

は大小関係がはっきりしており、性質に応じてt-normとs-normの二つに大別できる。従来は、これらを組み合わせた合成関係で表されるファジイ合成関係方程式が多く用いられていた。本稿では次に示すR. R. Yagerの提案したt-norm, s-normを合成演算に用いる

t-norm：

$$1 - min(1, ((1-a)^p + (1-b)^p)^{1/p}) \quad (1)$$

s-norm：

$$min(1, (a^p + b^p)^{1/p}) \quad (2)$$

ただし、計算上はパラメータは正規化した0から1の間の数値を使用する。また、図1に従来の演算の大小関係とそれらの演算に対応するおおよそのパラメータ値を示す。

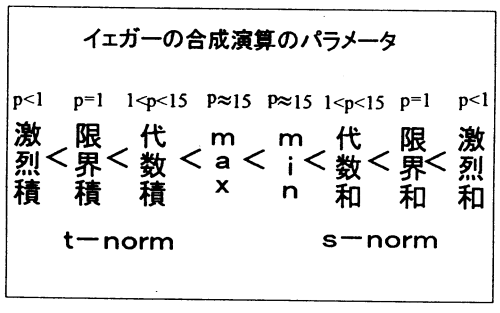


図 1: パラメータと各種演算の関係

3 GAによるファジイ同定

3.1 コーディング方法

(3)式で表されるファジィ合成関係方程式において、合成演算の中に含まれるパラメータとそれに伴うファジイ関係Rを GA を用いて同時に求める方法を以下に示す。

$$A \circ R = B \quad (3)$$

染色体は図2に示されているように演算部とファジィ関係部から構成されており、染色体の最初から2つの遺伝子座が演算を表す部分であり演算部とパラメータの部分に分かれている。3番目以降の遺伝子座がファジィ関係を表す部分である。ファジィ関係は図2に示すように、1列目から順に最後の列に至るまで遺伝子座に配列した。

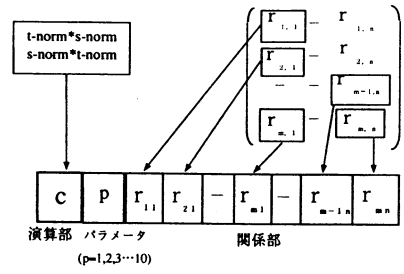


図 2: コーディング概念図

3.2 適応度

入出力データはランダムに決められた入力Aとそれを今回性格診断に用いるシステムに入力したとき出力されるBを入出力データとする。適応度は入力を与え、求められた出力と最初に与えた入出力データとの誤差を計算して、0となるときつまりシステムから得られた出力が与えられた出力データと一致したときに1となるようにした次の関数を適応度関数とする。

$$fitness = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{1 + |b_i - b'_i|} \quad (4)$$

3.3 同定結果

以上のようなGA操作により同定された結果を表1に示す。表1では、1入力1出力の4つ

表 1: 同定結果

No.	入出力	同定結果			
1	A=(0.6 0.1 1.0) B=(0.1 0.1 0.5)	p=8 p=7 p=5	2 1 1	p=3 p=2 p=1	3 1 2
2	A=(0.5 0.3 0.3) B=(1.0 0.5 0.4)	p=10 p=8 p=7	1 1 3	p=6 p=2 p=1	2 2 1
3	A=(0.1 0.4 0.8) B=(0.6 0.9 0.8)	p=9 p=8 p=5	2 2 2	p=4 p=3 p=1	2 1 1
4	A=(0.8 0.9 1.0) B=(0.9 0.8 0.9)	p=10 p=9 p=8	2 2 3	p=4 p=3	1 2

のシステムを取扱、それぞれのシステムに対して入出力の値、同定されたパラメータ値、およびそれに伴うファジィ関係の個数が示されている。一般に、データ数が多い程システムを正確に同定できると考えられる。反対に、データ数が少ないとそのデータを満たすパラメータ値と

ファジィ関係は多く存在するので同定が困難になると考えられる。ここでは多くのパラメータ値とそれに伴うファジィ関係からシステムの性格を診断するためのものであるから、1入力1出力のシステムを例にとった。

4 システムの性格診断

今回性格診断に用いるサンプルデータには先程のGAにより同定された合成演算のパラメータとファジィ関係を使用し、それを簡略型ファジィ推論を用いてシステムの性格診断を行う。さらに、システムの実行結果が妥当であるかどうかを検証する。

4.1 簡略型ファジィ推論

入力データと出力データからGAにより同定された複数の組合せのパラメータの大きさとファジィ関係の大きさをもとにして(5)式を用いて推論を行い、その結果の平均をシステムの性格とする。

$$X \ and \ Y \Rightarrow Z \qquad (5)$$

ここで、X、Yはそれぞれパラメータの大きさおよびファジィ関係の大きさを表している。また、Zは推論結果を表している。このZはファジィ合成関係方程式で表されるシステムの出力の値を図3に示すように5段階表示し、大きな値を「楽観的」、小さな値を「悲観的」、中間の値を「中庸」と名付ける。さらに、それらの中間の値を「やや楽観的」、「やや悲観的」と呼ぶことにする。これらを基にファジィ推論規則を図3のように構成する。ただし、5段階表示は1から5までに規格化した値を採用することにする。

例えば、パラメータの値が大きく、ファジィ

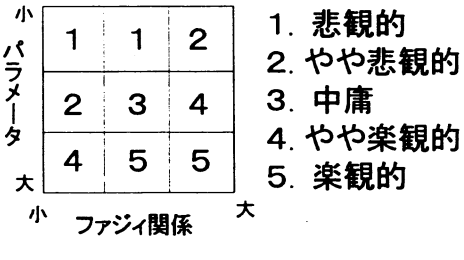


図3: ファジィ推論のルール (t-norm*s-norm)

関係が小さい場合には推論はやや楽観的となる事を示している。

上に述べたファジィ推論を、GAによって得られた1つのパラメータとそれに対応するファジィ関係の対に対して適応する。このような対は複数存在するので、これらにそれぞれ上に述べたファジィ推論を適応して、それぞれの性格を求める。

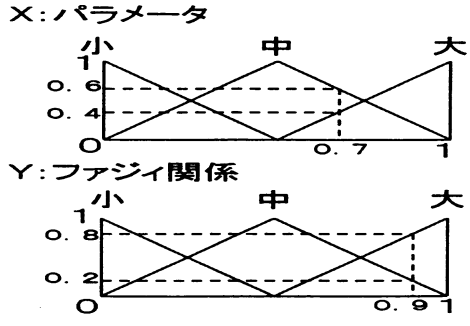


図4: メンバーシップ関数

4.2 診断結果

今までは、GAによって得られた個々のパラメータとそれに対応するファジィ関係で表されるシステムの性格を診断して来た。しかしながら、与えられた入出力を満たすファジィシステムは多数存在するので、これらを合成して全体的な性格を求める。この方法を表1のシステムNo.4を例にとり説明する。

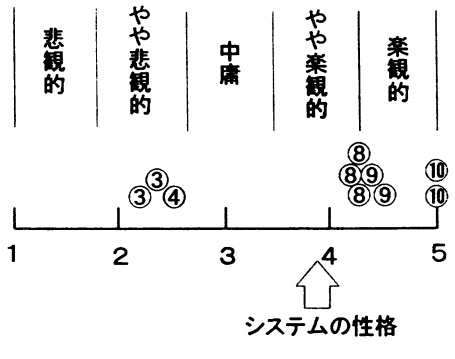


図5: 推論結果の分布 (システムNo.4)

図6は表1のシステムNo.4より得られた結果を図示したものである。横軸はシステム出力を1から5までの5段階表示したものである。さらに、これらに対応したシステムの性格を悲観的から楽観的まで言語表示したものを一番上に示す。表1のシステムNo.4ではp=10のとき2個のファジィ関係が得られ、p=9のとき2個、p=8のとき3個、p=4のとき1個、p=3のとき2個、合計10個のファジィ関係が得ら

れている。図5において、○の中の数字はパラメータpの値を示している。例えば、右端の⑩はパラメータp=10の場合の2個のファジィ関係に対応するシステムの性格を表したものである。また、左端③はp=3に対応する2つのファジィシステムの性格を表している。また、それぞれの○の位置は、前に述べたシステムの性格を診断するためのファジィ推論によって得られた数値に対応する。例えば、p=3の場合の2つのシステムのファジィ推論結果はそれぞれ2.1および2.4であり、それに対応する表現はいづれもやや悲観的である。従って、これらの数値に対応する場所に配置してある。これら10個のファジィシステムの平均をとり全体的な性格とする。今の場合、平均は3.9(図中矢印)となり、システムの性格診断結果はやや悲観的となる。同様にして行ったシステムNo.1からNo.4までの診断結果を表2に示す。

表2: 診断結果

No	システムの性格	診断結果
1	悲観的	悲観的
2	中庸	中庸
3	やや楽観的	やや楽観的
4	楽観的	やや楽観的

表2において、" システムの性格" のカラムは本実験で仮定したシステムの性格を表している。また、" 診断結果" のカラムは本研究で同定されたパラメータすなわち合成演算とファジィ関係から性格診断した結果である。これらを比較してみる限り、一部異なる結果があるとはいえ、全体的にはほぼ同じような結果を示していることがわかる。

5 おわりに

今回の研究で入出力データからシステムの性格診断法を提案した。本手法は大きく2段階に分けられる。最初はGAを用いて入出力データを満たす合成演算とファジィ関係を探索する。本研究ではその合成演算にパラメータのついたイェガー演算を用い、演算の特徴を連続的に求めることを可能にした。次に得られたパラメータとファジィ関係からファジィ推論を用いて性格診断した。ここで問題点および改善案を挙げる。

- 本研究では入出力が1つの場合の条件でシステム同定したが、性格診断という意味や正確性より、複数の入出力の場合を考えていく必要がある。
- 複数個の同定解から性格診断したものの平均をとり性格診断したが、性格はシステムの独自性であるから平均から判断すべきではないと考えられる。
- システムの性格診断の判断材料として出力の大きさのみから判断しているがこれは演算の性格を正しく規定しているわけではなく、今後は多方面でアプローチしてゆき総合的に性格診断していく。
- 今回、合成演算にパラメータを用いた為、今までのファジィ演算より細かく演算を限定することが出来たが、これからはパラメータ数を増やしていき、より広い範囲でかつ演算をさらに細分化し性格診断することが必要になってくる。

以上から、今後はシステムの性格診断をする際、性格診断の基となり、数多く提案されている人間の場合の性格診断を参考にし、考察した上でそれをシステムに適応することがより正確で柔軟な性格診断になると考え、課題とする。

参考文献

[1] 大谷忍："システムの性格診断",
第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp499-502(1996)

[2] 北野浩明(編)："遺伝的アルゴリズム",
産業図書(1993).

[3] 本多中二："ファジィ情報学",
日刊工業新聞社.

[4] 寺野 寿郎:"ファジィシステム入門",
オーム社.

連絡先

岡村 正和
Email:masakazu@cake.ep.u-tokai.ac.jp
259-12 平塚市北金目 1117
東海大学工学部電気工学科
Tel: 0463-58-1211 ext. 4025
Fax: 0463-59-4014

Degree of Truth Value as a Criterion for Division of Chromosomes for Pseudo-Bacterial Genetic Algorithm

Norberto Eiji Nawa, Tomonori Hashiyama, Takeshi Furuhashi, Yoshiki Uchikawa
Laboratory of Bio-Electronics, Department of Information Electronics
School of Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, JAPAN
Tel.+81-52-789-2793, Fax.+81-52-789-3166
e-mail: {eiji,tom,furu}@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

Abstract

This paper presents a new operator called adaptive operator for the Pseudo-Bacterial Genetic Algorithm (PBGA). The PBGA was proposed by the authors as a new approach combining a genetic algorithm (GA) with a local improvement mechanism inspired by a process in bacterial genetics. The PBGA with adaptive operator was applied for the discovery of fuzzy rules. The aim of the newly introduced adaptive operator is to improve the quality of the generated fuzzy rules, producing blocks of effective rules and more compact rule bases. The new operator adaptively decides the division points of each chromosome for the bacterial mutation and the cutting points for the crossover according to the distribution of degrees of truth values of the rules. In this paper results obtained when using the PBGA with the adaptive operator for a simple fuzzy modeling problem are presented. The results show the benefits obtained with this operator.

1 Introduction

Fuzzy systems can represent non-linear systems using linguistic variables in a straightforward form when enough knowledge about the object system is available. However, when the necessary knowledge is incomplete or can not be easily described, alternative methods for building a fuzzy system have to be used. Hybrid systems that utilize the methodologies of Soft Computing (fuzzy logic, neural computing, genetic computing, etc.) provide the perspective to overcome these difficulties.

A local improvement mechanism based on the genetic recombination of bacterial genetics is implemented in the Pseudo-Bacterial Genetic Algorithm (PBGA) [1]. It is efficient in improving local portions of chromosomes. The chromosomes are divided into several parts and each one of them is improved by the bacterial mutation of the PBGA. In previous works [1, 2] the PBGA was applied for the discovery of fuzzy rules. However, there was no criterion for determining the division points that define the parts of the chromosomes.

This paper introduces an adaptive operator in the PBGA to determine the parts for the bacterial mutation and also the cutting points for the crossover operator. The adaptive operator decides the parts/cutting points according to the degrees of truth values of the fuzzy rules. This special operator works effectively to discover sets of fuzzy rules with less numbers of irrelevant rules, i.e. unused parts of chromosomes. The importance of discovering relevant fuzzy rules relies in the following premise: Genetic Algorithms (GAs) and their variants, such as the PBGA, are fitness function driven optimization methods. As long as the fitness function is being improved, GA-type algorithms are not concerned with the structure of the fuzzy system. Special operators like the *adaptive operator* are necessary in order to facilitate the task of the GA-type algorithms of finding relevant fuzzy rules. Also, with fewer rules the possibility of acquiring knowledge by analyzing the obtained rules is open. The results show the benefits obtained with this new operator.

2 PBGA

2.1 Bacterial Genetics

The process of bacterial recombination that inspired the PBGA is the following: Bacteria can transfer DNA to recipient cells through mating. Male cells transfer strands of genes to female cells.

After that, those female cells acquire characteristics of male cells and transform themselves into male cells. By these means, the characteristics of one bacteria can be spread among the entire bacteria population.

Another analogy is possible. Bacteriophages can carry a copy of a gene from a host cell and insert it into the chromosome of an infected cell. This process is called *transduction*. By *transduction*, it is also possible to spread the characteristics of a single bacterium to the rest of the population. These genetic recombination mechanisms have configured a process of microbial evolution. Mutated genes can be transferred from a single bacterium to others and lead to a rapid evolution of the entire population.

2.2 Algorithm Description

A similar process to the bacterial genetics is implemented in the PBGA. Its algorithm is briefly described as follows:

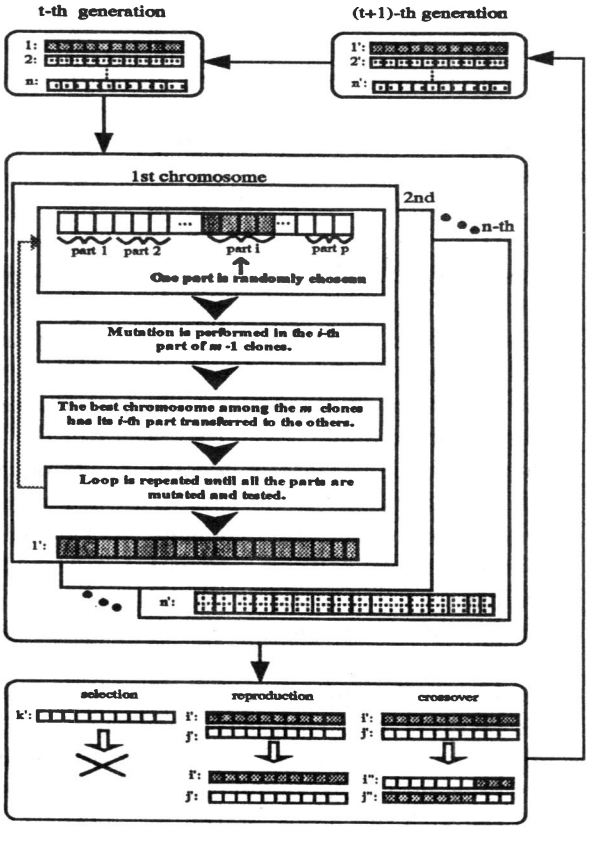


Figure 1. Scheme of the PBGA

1. *Generation of the initial population*: n chromosomes are created and evaluated;
2. *Genetic Operations*:
   (a) *Bacterial operation*: This genetic operation is applied to each chromosome one by one. Suppose there are p parts in a chromosome. The first chromosome is chosen and it is reproduced in m clones. The i-th part (randomly chosen) of m-1 clones is mutated. The elite among the m chromosomes is selected and the i-th part of the selected chromosome is transferred to the m-1 chromosomes. On this stage, the i-th part of all the clones is replaced by the i-th part of the selected chromosome. This process, mutation-evaluation-selection-replacement, is repeated. The mutation is applied to another randomly chosen part, different from the already chosen ones. When all the p parts have been tested, one chromosome from the m clones is selected to remain in the population and the other m-1 clones are deleted.

   This genetic operation is applied to all the n chromosomes in the population.

   (b) *Conventional genetic operations*: The chromosomes with lower fitness values are deleted and some randomly chosen chromosomes from the remaining group are reproduced. Chromosomes are mated and offsprings are generated by crossover.
3. *Stop condition*: If the stop condition is satisfied, stop, otherwise, go back to 2.

2.3 Adaptive Operator

In the previously described process of mutation and selection of genes, the division points that determine the parts of the chromosomes were arbitrarily fixed during the whole search process. Also, the crossover points in the chromosome were randomly chosen. In order to improve the performance of identification of fuzzy models by the PBGA, a new operator was introduced.

Fuzzy inference systems have rule bases that represent the core of the object system. In the case of a fuzzy controller, for example, the rules will describe the control algorithm of a given process. For fuzzy models, the rules are the models themselves.

When real values of input variables are applied to the antecedents of a fuzzy rule, a truth value is calculated. The truth value describes the degree of truth of the premise of a rule, therefore, the intensity that the consequent of the rule will apply.

The new operator, called adaptive operator, is used to determine the division points when the local improvement operation of the PBGA is to be

applied. The probability of a certain *locus* to be selected is inversely proportional to the degree of truth value of the fuzzy rule it encodes. For each chromosome, the *moving average* of each fuzzy rule is calculated. The moving average is defined as the average of the accumulated truth values of the rules. The accumulated truth value of a rule is the sum of the truth values for each one of the entries in the training data. The moving average of the rule j, M_j can be defined as:

$$M_j = \frac{T_{j-2} + T_{j-1} + T_j + T_{j+1} + T_{j+2}}{5} \quad (1)$$

where T_j is the accumulated truth value of the fuzzy rule j.

The accumulated truth value of a fuzzy rule is a measure of its quality. If a rule possesses a high value of accumulated truth value, it means that that rule was intensively and frequently triggered during the PBGA process. Consequently, this is an evidence of the effectiveness and utility of that rule. On the other hand, if a rule possesses a low value of accumulated truth value, this is an indication that the rule does not play an important role in the system.

The motivation for using the moving average of the accumulated truth value is to identify portions of good quality rules in the chromosome. Those strings having high moving averages are considered to have a high concentration of good quality rules. These strings are desirable to be preserved. On the other hand, blocks with low moving averages have higher probabilities of being mutated. The crossover points are also adaptively determined according to the moving averages of the accumulated truth values of the fuzzy rules. The lower the moving average, the higher the probability of being selected as the crossover point. This selection of crossover points works well to build blocks with effective fuzzy rules. Effective fuzzy rules are highly desired in order to build more compact models. Figure 2 shows a schematic of the adaptive operator.

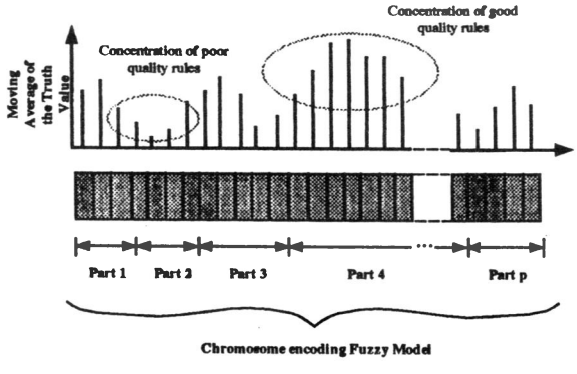


Figure 2. Scheme of the adaptive operator

3 Experiments and simulation results

In order to test the efficiency of the adaptive operator, experiments were performed to build a fuzzy model of the following function:

$$y = x_1 + x_2^{0.5} + x_3 * x_4 + 2 * e^{2*(x_5 - x_6)} \quad (2)$$

with $x_1 \epsilon [1 \ldots 5]$, $x_2 \epsilon [1 \ldots 5]$, $x_3 \epsilon [0 \ldots 4]$, $x_4 \epsilon [0.0 \ldots 0.6]$, $x_5 \epsilon [0.0 \ldots 1.0]$ and $x_6 \epsilon [0.0 \ldots 1.2]$.

The function $y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ was modeled on 7 fuzzy variables, 6 variables on the function plus one dummy variable. 80 randomly chosen 6-tuples were used as training data entries. The training data plus another 80 randomly chosen entries were used as test data. The population of chromosomes was fixed in 30 chromosomes during the whole search process.

The performance index (PI) used in the simulation session is defined as follows:.

$$PI = \frac{1}{n_{entries}} \sum_{i=1}^{n_{entries}} \frac{|y_i - y_i^*|}{y_i} + \frac{NumRules}{Num_{MAX}} * \omega_r \quad (3)$$

where $NumRules$ is the number of fuzzy rules of the model, Num_{MAX} is the maximum number of rules allowed to one chromosome and ω_r is an assigned weight. Num_{MAX} was arbitrarily set to 50 and ω_r was set to 0.1 after some parameter adjusting experiments. The second term in PI increases the pay-off of the PBGA to models with fewer rules.

Table 1. Error of the built models(average of 100 runs)

	80 entries	160 entries
PBGA	29.95%	29.88%
PBGA+Adap.Op	9.88%	12.52%

Table 1 shows that there is a considerable difference in the performance between the models built by the PBGA and the models built by the PBGA with the adaptive operator.

Table 2. Fuzzy rules of the built models (average of 100 runs)

	(I)	(II)
PBGA	13	33.16%
PBGA+Adap.Op	13	14.02%

Column (I) in Table 2 shows the average of the number of rules of the built models. Column

(II) shows the percentage of non-used rules of the fuzzy models. It can be seen that the percentage of non-used rules when using the adaptive operator considerably diminishes when using the PBGA with adaptive operator.

Table 3. Standard Deviation for the error of the models (average of 100 runs)

	80 entries	160 entries
PBGA	0.110	0.095
PBGA+Adap.Op	0.027	0.037

Table 4. Standard Deviation for the number of rules (average of 100 runs)

	No. of rules
PBGA	14.40
PBGA+Adap.Op	4.47

Table 3 shows the standard deviation of the obtained results for the error of the built models when using 80 entries and 160 entries, respectively. Table 4 shows the standard deviation for the number of rules of the built models. It can be seen that the variance of the results is less when using the adaptive operator combined with the PBGA in both tables.

The simulations results show that benefits can be obtained when using the adaptive operator for building effective fuzzy rules. The combination of PBGA with adaptive operator brings the best percentage of non-used rules in the obtained models, which is a confirmation of the action of the adaptive operator.

4 Conclusions

This paper presented a new adaptive operator for determining the division points of chromosomes for bacterial mutation and the cutting points for crossover. The effects of the new operator introduced into a Pseudo-Bacterial Genetic Algorithm were shown in experiments building a fuzzy model of non-linear equation.

The adaptive operator had an effective action for increasing the percentage of active rules in the built models. This led to more compact fuzzy models with better quality rules. Operators like the one presented here should be used to combine forces with the dynamics of GA type algorithms in order to build better quality models. GAs are basically fitness function-oriented search methods, therefore, blind for any other aspect that is not explicitly considered on the fitness function. Consequently additional mechanisms are necessary in order to construct not only good fuzzy models in terms of performance but also compact models and with optimized rules.

References

[1] T.Furuhashi, Y.Miyata, K.Nakaoka, Y.Uchikawa, "A New Approach to Genetic Based Machine Learning for Efficient Finding of Fuzzy Rules", *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 1011, pp.173-189, 1995.

[2] T.Hashiyama, T.Furuhashi, Y.Uchikawa, *"A Study on Finding Fuzzy Rules for Semi-Active Suspension Controllers with Genetic Algorithm"*, Proc. of the IEEE Intl. Conference on Evolutionary Computation 95, Perth, Australia.

THB4-3

免疫機構を用いたオンライン手書き文字認識システム

On-Line Handwritten Alphabet Character Recognition System by Immune Mechanism

友田大輔　　柿ヶ尾仁司　　菊池浩明　　中西祥八郎

Daisuke TOMODA, Hitoshi KAKIGAO, Hiroaki KIKUCHI and Shouhachiro NAKANISHI

東海大学工学部電気工学科

Department of Electrical Engineering, Tokai University

Abstract: The authors propose a method to recognize the on-line handwritten alphabet characters by a biological immune mechanism in this paper. The biological immune mechanism is protection system of the living thing like a human body from various kinds of antigens. The lymphocyte flowing in human body act on only a specific antigen. The authors use this feature of immune mechanism to pattern recognition, and construct a system to specify the handwritten alphabet characters.

1．はじめに

生体は病原菌のような外的から自己を守る機能として免疫機構を有している。

人は多くの情景や文字等のパターンを認識することが出来るので、機械にもそれと同じ様な機能を持たせようとして、パターン認識等の多くの研究がなされている。その中で文字認識についても多くの研究報告がある。文字認識の中でも、手書き文字は書き手の個性が反映されて認識しにくいパターンである。手書き文字認識についても数多くの研究があるが、ここでは生体の免疫機構を用いたオンライン手書き文字認識に関する一手法を提案する。

2．免疫モデル

免疫機構は、病原菌等の外的から生体を防御するシステムである。免疫機構には病原菌等の抗原を認識する機能、すなわち自己と非自己を区別する能力を有している。更に、抗原を駆逐する機能や抗体を制御する機能等も有している。また、過去に遭遇した抗原の種類を記憶する機能や新たな抗原を認識し記憶する事もできる。この様に免疫システムは様々な機能を有しているが、本稿ではその一部である抗原を撃退する機能を用いることにする。この中で重要な役割をなすのがリンパ球である。リンパ球はT細胞とB細胞に分けられる。B細胞はY字型をした蛋白質のミサイルで抗原を撃退する。このY字型のミサイルを抗体と呼ぶ。抗原と抗体が結びつく反応は、よく鍵と鍵穴（錠）にたとえられる。抗原と抗体が完全に符合したとき最も効果的な免疫反応が起きる。

図1に抗原とリンパ球（抗体）との反応をモデル化した概念図を示す。リンパ球は抗原と遭遇するこ

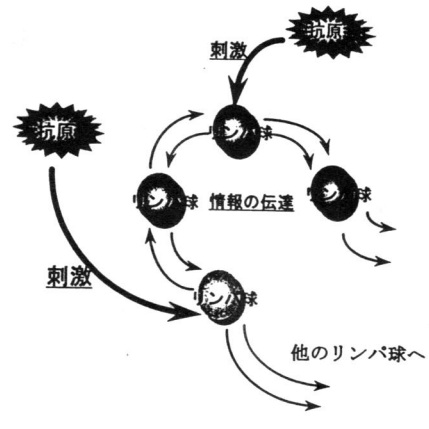


図1　免疫モデル

とにより刺激を受け、抗原情報を他のリンパ球へ伝達するものとする。抗原と抗体（リンパ球）の反応を示す刺激値は、両者が完全に符合したときに最も高い値を示すものとする。その他の場合には、一致する度合いに応じた刺激値を示すものとする。

3．オンライン手書き文字認識システム

入力された手書き文字のストローク数と各ストロークの長さを求める。また、入力された文字は8

×８ますのビットマップを用いて表現される。さらに、ビットマップで表された文字は図３に示すよう



図２　直線近似　　図３　近似方向

な８方向の直線で近似される。図２に文字「D」の直線近似例を示す。この例では、Dは６本の直線で近似される。以上の処理結果を整理すると次のようになる。

(1)　ストローク数
(2)　ストロークの長さ
(3)　直線近似の各要素

本システムでは上に求めた処理結果の一つ一つを抗原と見なす。例えば、上のDの文字の場合には(1) ストロークの本数は２であり、(2) ストロークの長さは各ストロークの長さの合計であり、(3) 直線近似は６本の直線である。従って、抗原としては (1) から１個、(2) から１個、(3) から６個、合計８個の抗原が生成されることになる。

本システムではアルファベット２６文字の文字認識を行うので、抗体（リンパ球）としては２６種類の抗体（リンパ球）を用意する。各リンパ球は、そのリンパ球に対応する文字の特徴(1),(2),(3)に対して強く反応する。従って、各リンパ球は固有の文字にのみ強い刺激を受け、他の文字からはさほどの刺激を受けない。

４．文字認識

図４に、本システムで用いた手書き文字の例とそのビットマップに変換した例を示す。図４では、手書き文字として「Q」と「S」が示されており、ビットマップの例としてはBの例が示されている。

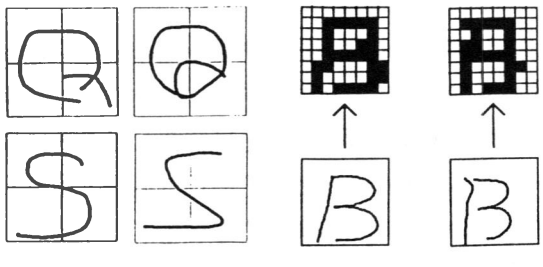


図４　手書き文字とビットマップ変換例

シミュレーション例として、図２に示した文字「D」を入力したときの各リンパ球の刺激値を図５に示す。この図からわかるように、文字Dに対応するリンパ球が最も強く反応していることがわかる。

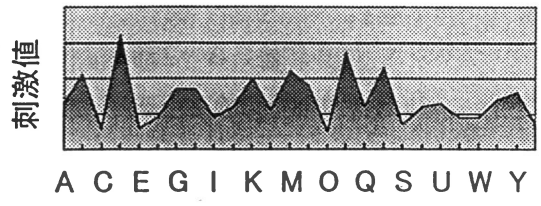


図５　各リンパ球の刺激値

更に、図２とは異なるDを入力した場合の結果を図６に示す。この場合もDに対応するリンパ球が最も強く反応していることがわかる。図２のDと図６のDを比較し、更にそれぞれのリンパ球の刺激値を比べてみると、文字形状による違いを柔軟に吸収していることがわかる。



図６　異なる文字によるリンパ球の刺激値

表１に筆記者を変えて認識させたときの認識率を示す。今回は３人の筆記者による結果のみを示した。この結果から、認識率はかなり良い結果を示していることがわかる。

表１　認識結果

筆記者	1	2	3
認識率	99．1%	92．3%	96．2%

５．まとめ

生体が持つ免疫機構の工学的応用は今のところあまり例がないが、本稿ではこの可能性を探る一例として文字認識への応用を試みた。

参考文献

[1] 矢田純一：「免疫学」,朝倉書店,１９９４

[2] 橋本新一郎：「文字認識概論」,電気通信協会,１９８２

[問い合わせ先]

〒259-12　平塚市北金目１１１７

東海大学工学部電気工学科

TEL: 0463-58-1211 Ext. 4025,

FAX:0463-59-4014

中西祥八郎

THB4-4

逆問題としてのファジィモデリングに関する一考察

A Study on Fuzzy Modeling within a Framework of Inverse Problem Solving

古橋武* 松下聖一** 筒井宏明*** 内川嘉樹*

Takeshi Furuhashi, Seiichi Matsushita, Hiroaki Tsutsui, Yoshiki Uchikawa

*:名古屋大学工学部 Dept. of Information Electronics, Nagoya University
**:名古屋市工業研究所 Nagoya Municipal Industrial Research Institute
***:山武ハネウエル Yamatake-Honeywell Co.

Abstract: This paper studies a framework of fuzzy modeling using genetic algorithm(GA). The framework is made as a process of inverse problem solving. In the real world, sufficient data for identification of object system are hard to obtain. Thus, modeling of the object is an inverse problem. The framework introduced in this paper consists of a hypothesis generation block and a hypothesis evaluation block. The generation block generates candidates for the object model and the evaluation block tests the candidates. This separation of modeling process makes the important points of inverse problem solving clear. The generation block should have the ability to generate an appropriate model with sufficient data. Without sufficient data, this block should generate various candidates for the model. The evaluation block has thus the burden to evaluate the candidates from a certain point of view.

This paper clarifies the performance of the hypothesis generation block which is able to generate a proper model constantly in the case where sufficient data are available. The landscapes of achieved fitness with various GA parameters are examined to show the constant generation of good model.

1. はじめに

ファジィモデリングは非線形な入出力関係の記述能力に優れ[1]，また，同定結果がファジィルールにより表現されるためモデル内部の解析が容易であり，非線形対象のモデリングの有力な手法の一つとして注目されている。

実世界の対象をモデリングする際の重要な問題点の一つに，対象を記述するに十分なデータを対象から収集することが困難なことが挙げられる。このとき，モデリングシステムは得られたデータの範囲内で精度と汎化性のトレードオフを迫られる[2]。そして，モデルの構造決定，入力変数選択など，困難な探索課題に対して遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm:GA)などが適用される。ここで問題となるのは良いモデルが得られないときに，その原因が探索手法にあるのか，モデルの構造にあるのか不明確になってしまうことである。

本稿では，GA によるファジィモデリングを逆問題解法の枠組みで捉える。本枠組みは，仮説生成部と仮説検証部からなる。仮説生成部は対象のモデルの候補を生成し，仮説検証部ではこれらのモデルを評価関数により評価する。選ばれたモデルを基に，さらに，仮説生成・検証のプロセスを繰り返すことで妥当なモデルを導出する。逆問題解法をこのように二つの部分に分割することにより，この解法プロセスにおける課題を明確にすることができる。すなわち，仮説生成部は，十分なデータに対しては常に適切なモデルを生成できることが要求される。不十分なデータに対しては唯一の解が定まらないので，仮説生成部は種々の解を生成する。このとき，仮説検証部に対してモデルの妥当性を検証し，候補を絞り込む機能が要求される。

本稿では，仮説生成部に GA によるファジィモデリングを用い，データが十分にある場合について，この生成部が常に安定して妥当な解を出力できることを検証する。GA のパラメータを

変え，達成される適応度のランドスケープを求めることで，解が安定に求められることを示す。

2. ファジィモデリングの枠組み

一般に逆問題解法の枠組みは図1のように表される。不十分なデータを基に仮説の検証結果を踏まえ、仮説生成部は探索範囲を絞りながら、新たな仮説を生成する。これを繰り返すことで、適切な解を最終的に得ることができる。これをファジィモデリングに当てはめてみれば図2のように仮説生成部＝GAによるファジィモデリング、仮説検証部＝モデルの評価という対応づけがなされる。不充分なデータが与えられたとしても、GAによるファジィモデリングによりモデルの候補を生成し、それらを評価し、さらにその評価を基に再度ファジィモデリングを繰り返すことで、より適当なモデルを得ることができる。ここで、GAによるファジィファジィモデリングで用いる評価規範はモデルの精度や簡潔性を用い、評価部で用いる規範は、例えばデータの連続性や領域内分散、出力の滑らかさなど別の指標を用いる。このように生成部と検証部で評価の基準を分けて、要求される目的にあったモデルを得ることができる。

2.1 仮説生成部（GAによるファジィモデリング部）

理想状態として充分かつ偏りのないデータを与えた時、GAによるファジィモデリングは常に最適なモデルを生成できることが要求される。モデル生成部で用いるGAのパラメータ（交叉率や突然変異率など）に左右されないことが必要条件である。ファジィモデリング部に要求される、この優れた機能は3章で数値シミュレーションにより実証する。現実の問題では充分なデータが偏りなく得ることは困難である。データの数が少なく、かつ偏りがひどくなるにつれ、GAによるファジィモデリングでは様々な局所解が生成される。この時の評価規範はモデルの精度と簡潔性を用いることが有効となる。モデルの分かりやすさを重視しないのであれば精度の項の重みを増やし、階層化ファジィモデリングのサブモデルのようにより簡潔なモデルが必要であればパラメータ抑制の項の重みを増せば良い。

2. 2 仮説検証部（モデル評価部）

生成部で得られたファジィモデルの候補を評価・選択し、必要であれば評価の情報を加えて再度生成部に戻す役割を持つ。評価部では精度・簡潔性を主とした生成部の評価とは異なり、モデル利用の目的に合わせて評価基準を設定することができる。すなわち、ルールが存在するファジィ領域内における出力の分散や入出力関係の連続性[4]、出力の滑らかさ、経験則などが挙げられる。

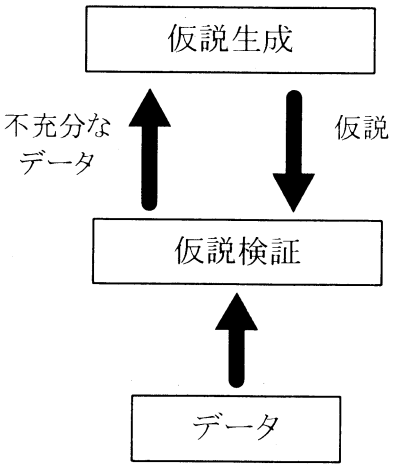


図1 逆問題解法の枠組み

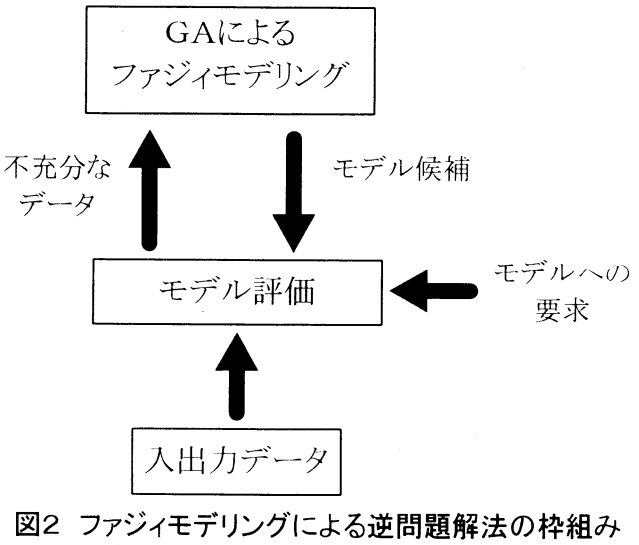


図2 ファジィモデリングによる逆問題解法の枠組み

3. GAのパラメータとフィットネスのランドスケープ

ファジィモデリングによって獲得されるモデルがGAのパラメータによってどのように変化するかを調査した。対象として(1)式のような非線形性の強い関数を用いた。

$$y = x_1 + 2x_2^2 + \exp\left(\frac{1+\sin x_3}{2}\right) + \exp\left(\frac{1+\cos x_4}{2}\right) + \exp(x_5 + x_6) \quad (1)$$

入出力データは(1)式の x_i を[0, 1]でランダムに与えて作成し、x_7 をダミー変数として加えた。ファジィ推論には簡略推論法[5]を用いた。簡略推論法はルールの同定に学習を要しないので、高速にファジィモデルを同定することが可能である。簡略推論法では入力空間を等分にクリスプに分割し、領域内の出力値の平均をルールの値 f_{ij} として用いる。出力推定値 y^* は式(3)により求められる。

$$f_{ij} = \sum_{k=1}^{N_k} \frac{y_{ij}^k}{N_k} \quad \left\{i, j \,|\, x_{1i}, x_{2j}\right\} \quad (2)$$

$$y^* = \sum_{i=1}^{N_l} \frac{f_{ij}}{r_{ij}^n} \Big/ \sum_{i=1}^{N_l} \frac{1}{r_{ij}^n} \quad \left\{i, j \,|\, R_{ij} \le L\right\} \quad (3)$$

ここで、x_{1i}、x_{2j} はそれぞれ、入力変数 x_1、x_2 の i 番目、j 番目のクリスプ分割した領域、f_{ij} は x_{1i}、x_{2j} におけるルールの後件部定数、N_k はクリスプ分割した空間内のデータ点数、y^k_{ij} はクリスプ分割した領域 i、j 内における k 番目の出力データ、y^* は推論値、N_l は、推論に適用するルール数、r_{ij} は、入力データとルールの中心点との距離、R_{ij} は入力データとルールとの間の部分空間の数、L は定数である。

前件部構造をGAにより同定した。用いた染色体は図3のように表される。各遺伝子座の値はその入力変数の分割数を表す。遺伝的操作は淘汰、交叉、突然変異の順で行う。淘汰は総数 n_g の染色体うち、評価規範の良いものから異なる n_l 個を保存する。交叉は1点交叉で、両親および分割位置はランダムとし、交叉率 p_c で行う。突然変異は各遺伝子座に $p_m/2$ の確率でランダムな値を与え、$p_m/2$ の確率で値を±1する。最も優秀な染色体の評価規範が m_{end} 世代変化しなかった場合、収束したと見なし、計算を終了する。

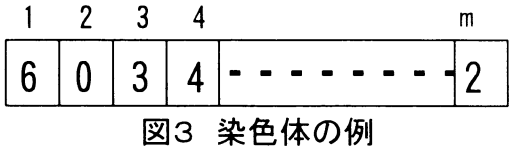


図3 染色体の例

評価規範は全データを均等にグループ A・B の2つに分け、次式(4)を用いた[6]。

$$AIC3 = n_B \log\left(\frac{\sum_{i=1}^{n_B}(y_i^{BA} - y_i^B)^2}{n_B}\right) + n_{rule} \quad (4)$$

ここで、n_B はグループ B のデータ数、$y^{BA}{}_i$ はモデル B にグループ A のデータ i を与えたときの出力、$y^B{}_i$ はグループ B のデータ i の出力、n_{rule} は同定されたファジィモデルのルール数である。$AIC3$ は第1項の精度・汎化性に加え、第2項のルール数抑制が効いたモデルを良いモデルと見なす。

遺伝的操作におけるパラメータ n_g, n_l, p_c, p_m を変化させ、獲得されたファジィモデルを調べた。n_B=500、L=1、m_{end}=200とし、$n_l < n_g \le 100$、$0 \le p_c, p_m \le 1$ で与えた。

p_c, p_m を変化させて獲得されたファジィモデルの収束に要した世代数、最優秀の個体の評価規範の値、ファジィモデルのルール数を図4に示す。(p_c, p_m)のほとんどの組について同一のモデルに収束した。p_m=0 の時は最良のモデルにはほとんど収束できなかった。また、p_m が大きくなると収束に時間がかかる。この図から、(1)式のような非線形性の強い対象であっても最良のモデルに収束する(p_c, p_m)の組の範囲は広く、ランドスケープはほとんどフラットであり、GAによるファジィモデリング部はGAのパラメータを大き

な自由度で設定することができる。

4. まとめ

本稿ではGAによるファジィモデリングを逆問題解法の枠組みで捉えた。モデル生成部とモデル評価部を分離し、データが不充分な場合でも多くのモデル候補を生成しそれを評価することで最適のファジィモデルを得ることのできる手法を提案した。また、データ数が充分な場合にGAのパラメータの獲得されるモデルへの影響を調べることにより、本稿で用いたファジィモデリング手法は与えられたデータから最善のファジィモデルを導き出すことを確認した。

5. 参考文献

[1] T. Takagi, M. Sugeno: Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Transactions on Systems and Cybernetics Vol.SMC-15, pp.116-132 (1985).

[2]中山、古橋、内川:ファジィモデリング手法の一提案，日本ファジィ学会誌 Vol.5, No.5, pp.1155-1168 (1993).

[3]松下、黒宮、山岡、古橋、内川:複数のサブモデルを用いた階層化ファジィモデリング:日本ファジィ学会誌 vol.8, No.3, pp.488- 498 (1996).

[4]筒井:データマイニングにおける非線形システムのモデリングとその応用、システム制御情報学会誌、vol.40, No.12, pp.522-530 (1996).

[5]福島、古橋、筒井、内川:多入力変数選択に遺伝的アルゴリズムを用いた階層化ファジィモデリング，第12回ファジィシステムシンポジウム pp. 525-528 (1996).

[6]松下、古橋、筒井、内川:GAとファジィニューロによる非線形モデリング、第6回FANシンポジウム pp.51- 54 (1996).

問合わせ先
〒456 名古屋市熱田区六番三丁目4－41
名古屋市工業研究所
松下聖一
TEL 052-654-9885
E-mail:matsushita@nmiri.city.nagoya.jp

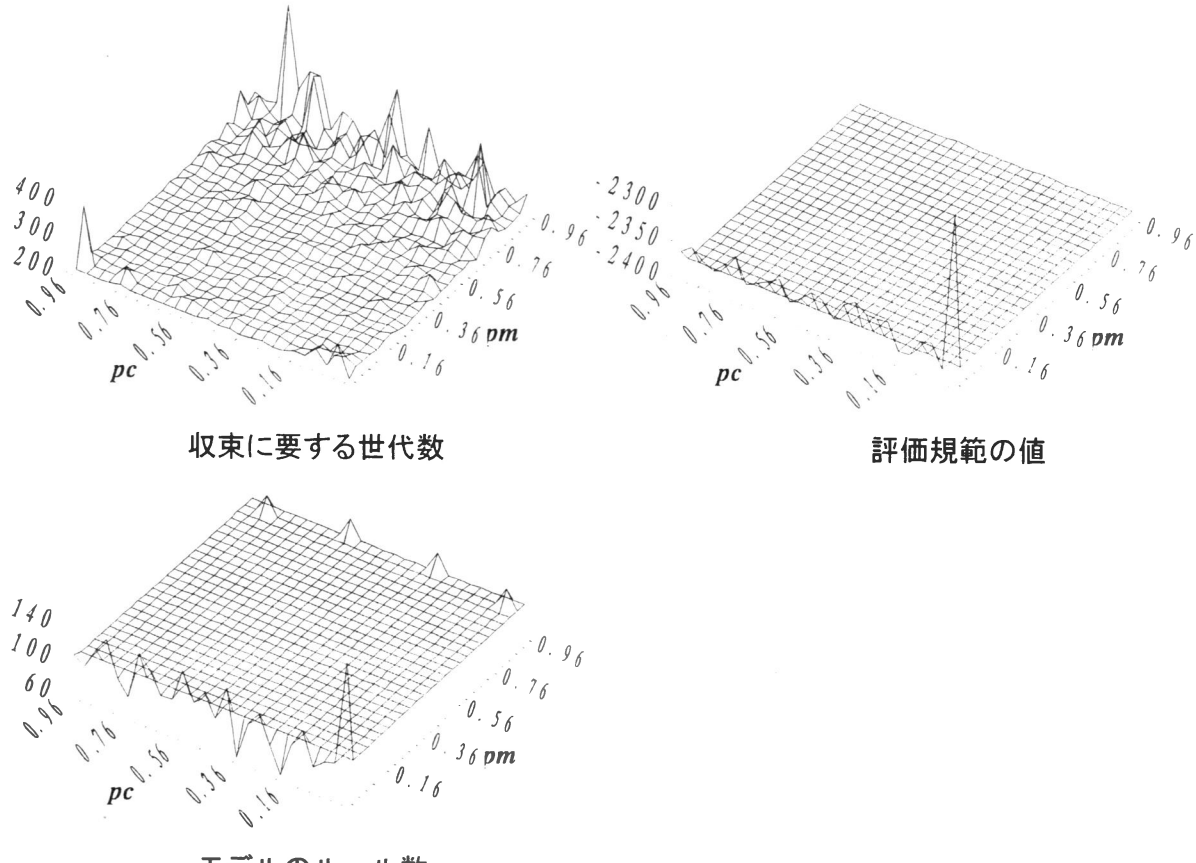


図4 p_c, p_mの変化に対して決定されたフィットネスのランドスケープ

THC1-1

分位法によるファジイ回帰分析
Identification Of Fuzzy Regression Model Based On Regression Quantile

田中英夫　小山研一　○李海寛
Hideo Tanaka　Kenichi Koyama　Heakwan Lee
大阪府立大学大学工学部
College of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract: *In this paper, we propose a new identification method of interval regression model. Without using all data, we first identify the main trend from the designated proportion of the given data. After that, the interval regression model can be identified based on the acquired main trend. We introduce the regression quantile method to s elect t he p roportion o f data. This method can reflect the expert's opinion and enables one to establish robust regression model with less influence of outliers.*

1．はじめに

与えられたデータの不一致性をファジィ係数に帰着させるファジイ回帰モデルが田中らにより提案されている．これらは全てのデータ点を包含し，回帰式の幅の総和を最小にすることを目的とした線形計画問題（LP）として定式化されている．したがって回帰モデルは端点データから決定されるため，外れ値に非常に敏感であった．また回帰モデルに包含されているデータは回帰モデルの同定の際に無関係であった．本論文では全てのデータから区間回帰モデルを同定するのではなく，考慮したい一部のデータからデータの傾向を求め（区間回帰分位モデル），これを基に区間回帰モデルを同定する手法を提案する．提案する手法は意思決定者の意向を反映でき，端点データのみに依存していないためにはずれ値の影響が少ないといえる．また2つのモデルを組み合わせることにより台形型のメンバシップ関数によってファジィ出力を表現できる．最後に提案した方法を説明するために数値例を示す．

2．分位法によるデータ点の抽出

m 個のデータ点のうち考慮したい一部のデータ点を抽出するために回帰分位法を用いる．回帰分位モデルを次式で表す．

$$y_j = \boldsymbol{\beta}' \boldsymbol{x}_j + e_j, \quad j = 1, 2, ..., m. \tag{1}$$

$\boldsymbol{\beta} = (\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_n)'$ は回帰分位係数ベクトルであり，$\boldsymbol{x}_j = (x_{j1}, x_{j2}, \cdots, x_{jn})'$ は入力ベクトルである．この直線（超平面）により y の分布を $(100p)\%$ に分ける．すなわち直線上より上に約 $m(1-p)$ 個のデータ点が存在する直線である．（1）式は以下のＧＰ問題により同定することができる．

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\beta}, \delta_j^+, \delta_j^-} \quad & \sum_{j=1}^{m} [\, p\delta_j^+ + (1-p)\delta_j^-] \\ \text{sub.to} \quad & \boldsymbol{\beta}' \boldsymbol{x}_j + \delta_j^+ - \delta_j^- = y_j \quad , j = 1, 2, ..., m \\ & \delta_j^+ \geq 0 \quad \delta_j^- \geq 0 \quad , j = 1, 2, ..., m \end{aligned} \tag{2}$$

n 次元データにおいて直線を決めるには n 点必要であるため，正確にデータ点を $m(1-p)$ 個を mp 個に分けることができない．正確にデータ点を分けるために（2）式の双対問題を考える．

$$\begin{aligned} \max_{w_j} \quad & \sum_{j=1}^{m} w_j y_j \\ s.t. \quad & \sum_{j=1}^{m} w_j x_{ij} = 0, \; i = 1, 2, ..., n. \\ & -(1-p) \leq w_j \leq p \;\; i = 1, 2, ..., n. \end{aligned} \tag{3}$$

ただし，w_j は双対変数である．（3）式により得られた双対変数 w_j は次の性質を持つ．

$w_j = p$ ：直線より上にデータ点が存在する．
$w_j = -(1-p)$ ：直線より下にデータ点が存在する．
$-(1-p) \leq w_j \leq p$ ：直線上にデータ点が存在する．

この性質により，双対変数 w_j の大きさ順に並べ替え上位 $\lceil m(1-p) \rceil$ 個と下位 $\lceil mp \rceil$ 個の2つにデータ点を分けることができる．ただし，$\lceil \; \rceil$ は切り上げを意味する．次に全データ点の $[100p_1\%, 100p_2\%]$ を抽出することを考える．このとき $p = p_1, p_2$ として（3）式を解くことで得られる双対変数 w_{j1}, w_{j2} を用いて，次のようにデータ点を3クラスに分けることができる．

Class 1 (C_1)： w_{j1} の上位 $\lceil m(1-p_1) \rceil$ 個のデータ点
Class 2 (C_2)： w_{j1} の下位 $\lceil m\, p_1 \rceil$ 個のデータ点かつ
w_{j2} の上位 $\lceil m(1-p_2) \rceil$ 個のデータ点
Class 3 (C_3)： w_{j2} の下位 $\lceil m\, p_2 \rceil$ 個のデータ点
ここで，数の境界であるデータ点は2つのクラスに属する．

3．区間回帰分位モデルの同定

ここで，考慮したいデータ点を全データの $[100p_1\%, 100p_2\%]$ とする．このデータ　$(j \in C_2)$ を包含する区間回帰分位モデルを次式で表す．

$$Y_P = B_0 + B_1 x_1 + \cdots + B_n x_n \tag{5}$$

ここで，$B_i = \langle b_i, d_i \rangle, i = 0, 1, ..., n.$ は区間係数である．（5）式は次のＬＰ問題により同定することができる．

$$\begin{aligned} \min_{a, c, e} \quad & \sum_{j \in C_2} (d^t |x_j| + k e^t |x_j|) \\ s.t. \quad & y_j \geq b^t x_j + (d^t |x_j| - e^t |x_j|), \quad j \in C_1 \\ & b^t x_j + d^t |x_j| \geq y_j \geq b^t x_j - d^t |x_j|, \quad j \in C_2 \\ & y_j \leq b^t x_j - (d^t |x_j| + e^t |x_j|), \quad j \in C_3 \end{aligned} \tag{6}$$

ここで k は大きな正の整数であり，$e_i, i = 0, 1, ..., n.$ は許容幅係数である．許容幅係数は C_2 のデータを包含する際に区間回帰分位モデルが C_1, C_3 のデータ点を包含せざるを得ない場合があるため，C_1, C_3 のデータ点が C_2 のクラスに入ることを許す幅である．このとき e_j に関して次のようにいえる．

$e_i = 0, i = 0, 1, ..., n$ ：明確なクラス分けができる．
$\forall e_i \neq 0, i = 0, 1, ..., n$ ：明確なクラス分けができない．

（6）式を解くことにより容易に区間回帰分位モデル

$$Y_P = \langle b_0^*, d_0^* \rangle + \langle b_1^*, d_1^* \rangle x_1 + \cdots + \langle b_n^*, d_n^* \rangle x_n$$

を得ることができる．

4．分位法による区間回帰分析

次に3．で得られた区間回帰分位モデルを基に全データを包含する区間回帰モデルを同定する．区間回帰モデルを次式で表す．

$$Y_F = A_0 + A_1 x_1 + \cdots + A_n x_n \qquad (7)$$

ただし，$A_i = \langle a_i, c_i \rangle, i = 0, 1, ..., n.$ は区間係数である．（7）式を定数項を除いて区間回帰分位モデルの傾きと等しくする．すなわち（7）式は次式で表わされる．

$$Y_F = \langle a_0, c_0 \rangle + \langle b_1^*, c_1 \rangle x_1 + \cdots + \langle b_n^*, c_n \rangle x_n \qquad (8)$$

ここで（7）式は（5）式を包含するので（9）式を，満足しなくてはならない．

$$B_i \subseteq A_i 0, \quad i = 0, 1, ..., n. \qquad (9)$$

（8）式は次のＬＰ問題により同定することができる．

$$\begin{aligned} \min_{a_0, c} \ & J = \sum_{j=0}^{m} c^t |x_j| \\ \text{s.t.} \ & a_0 + b^{*t} x_j - c^t |x_j| \le y_j \\ & a_0 + b^{*t} x_j + c^t |x_j| \ge y_j, \ j = 1, 2, ..., m \\ & c_i \ge 0, \ i = 0, 1, ..., n. \\ & B_i \subseteq A_i 0, \ i = 0, 1, ..., n. \end{aligned} \qquad (10)$$

（10）式を解くことにより容易に区間回帰モデル

$$Y_F = \langle a_0^*, c_0^* \rangle + \langle a_1^* (= b_1^*), c_1^* \rangle x_1 + \cdots + \langle a_n^* (= b_n^*), , c_n^* \rangle x_n$$

を得ることができる．

5．台形型メンバシップ関数の生成

3．，4．で提案した2つの回帰モデルより，区間回帰分位モデルのメンバシップ値を1とし，区間回帰モデルを台とした台形型のメンバシップ関数を生成することができる．メンバシップ値は次式で計算される．

$$h_j = \mathrm{Min}[h_j^+, h_j^-] \qquad (11)$$

$$h_j^+ = \mathrm{Min}[\frac{(a^t x_j + c^t |x_j|) - y_j}{(a^t x_j + c^t |x_j|) - (b^t x_j + d^t |x_j|)}, 1]$$

$$h_j^- = \mathrm{Min}[\frac{y_j - (a^t x_j - c^t |x_j|)}{(b^t x_j - d^t |x_j|) - (a^t x_j - c^t |x_j|)}, 1]$$

このメンバシップ値 h_j により，データ点のクラスの変更，はずれ値の抽出を行うことができる．すなわち，C_1, C_3 のデータ点のメンバシップ値が1のときは C_2 のクラスに変更され，h_j の値がほかのデータ点の h_j よりかなり小さいときははずれ値の可能性が考えられる．

6．数値例

表1の簡単な数値例により提案した手法を示す．この数値例でははずれ値をデータ番号4，16に含めている．このデータに対して $p_1 = 0.8, p_2 = 0.2$ として解析を行う．まずデータのクラス分けを行った結果，以下のようにクラス分けすることができた．

$$\begin{aligned} & C_1 = \{3, 6, 16, 18\}, C_3 = \{4, 7, 12, 17\}, \\ & C_2 = \{1, 2, 5, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 19, 20\} \end{aligned} \qquad (12)$$

（12）式に対して同定した区間回帰分位モデルを（13）式に区間回帰モデルを（14）式に示す．

表1　　入出力データ

番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y_j	10.3	12.3	14.5	11.8	19.5	5	17.5	24	25.9	24.8
番号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
x_j	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
y_j	29.2	25.2	29.2	35.5	31.5	50	35	44.5	41.9	44.2

$$Y_F = \langle 10.68, 10.23 \rangle + \langle 1.478, 0.340 \rangle x \qquad (13)$$

$$Y_P = \langle 12.53, 0.013 \rangle + \langle 1.478, 0.340 \rangle x \qquad (14)$$

また，そのときの推定区間出力を図1に示す．

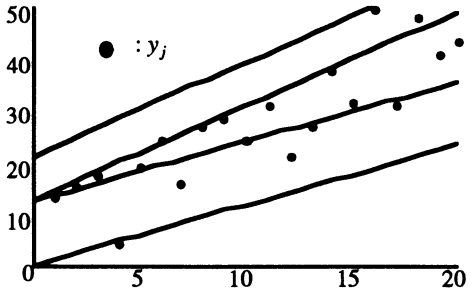


図1　区間回帰モデルと区間回帰分位モデルの推定区間出力

表2に（12）式より計算された C_1, C_3 のクラスのメンバシップ値を示す．ここで，C_2 のクラスのメンバシップは1である．　図1，表2により明らかにデータ番号4，16がはずれ値であることがわかる．

表2　　メンバシップ値

	データ番号	h_j		データ番号	h_j
C_1	3	1	C_3	4	0
	6	0.872		7	0.628
	16	0		12	0.598
	18	0.663		17	0.931

7．おわりに

本研究では分位法による区間回帰分析を提案した．このモデルは意思決定者の意向を反映でき，全体の傾向が端点データに影響されず，台形型のメンバシップ関数の生成ができることなどの利点がある．

8．参考文献

[1] 田中；可能性回帰分析，日本ファジィ学会誌 5-5,1260-1272,1993.

[2] T. Sueyoshi, Empirical Regression Quantile, *Journal of the Operations Research Society of Japan* **34**-3, 250-262, 1991.

問い合わせ先

田中英夫

〒593　大阪府堺市学園町1-1　大阪府立大学工学部

TEL　：　0722-52-1161（内）2376

E-mail：tanaka@ie.osakafu-u.ac.jp

THC1-2

Dealing with Outliers by Fuzzy Regression Reflecting Central Tendency

○Haekwan Lee, Hideo Tanaka
Department of Industrial Engineering, Osaka Prefecture University, Gakuencho 1-1, Sakai, Osaka 593

Abstract: This paper proposes new fuzzy regression analysis by quadratic programming. In this formulation, the following two objects are considered: minimizing the distances between the estimated output centers and the observed outputs, and minimizing the spreads of the estimated outputs. Moreover, fuzzy regression based on duality property in linear programming problems is introduced. Both statistical least squares and fuzzy regression are sensitive to outliers. The proposed approaches afford an analyst to discard outliers easily, regardless one has sufficient knowledge or not on the observed data. In order to illustrate our methods, numerical data are used throughout this paper.

1. Introduction

The approach proposed in this paper consists of two objects, i.e., to obtain central tendency by minimizing the distances between the estimated output centers and the given observed outputs, and also to minimize the spreads of the estimated outputs. To do this, both concepts of least squares and fuzzy regression are considered by means of the objective function. This proposed approach resorts to QP method because the distances are defined by quadratic functions. When analyzing a data set, one would encounter one of following situations: a case when expert knowledge on the observed data is available, and a case without expert knowledge. The proposed methods effectively cope with both cases. Furthermore, we introduce fuzzy regression using duality property in LP, which is useful to detect outliers.

2. Least squares and fuzzy regression

Given the input-output data $(x_j, y_j) = (1, x_{j1}, \ldots, x_{jn};\ y_j)$, the regression model can be assumed as

$$y_j = \beta_0 + \beta_1 x_{j1} + \cdots + \beta_n x_{jn} + \varepsilon_j, \quad j = 1, \ldots, p, \tag{1}$$

where β_i is a regression coefficient and ε_j is an observation error for the j-th data. Simply (1) can be written as

$$y = X\beta + \varepsilon, \tag{2}$$

where $y = (y_1, \ldots, y_p)'$, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_p)'$, $\beta = (\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_n)'$, and X is an $p \times (n+1)$ matrix .

Least squares regression is to determine the optimal coefficient vector β^* that minimizes the sum of squared errors as

$$\beta^* = (X'X)^{-1}X'y. \tag{3}$$

A fuzzy regression model can be written as

$$Y = A_0 + A_1 x_1 + \cdots + A_n x_n = A\,x \tag{4}$$

where $x = (1, x_1, \ldots, x_n)'$ is an input vector, $A = (A_0, \ldots, A_n)$ is a fuzzy coefficient vector, and Y is the corresponding estimated fuzzy output. Since regression coefficients A_i in (4) are fuzzy numbers, the estimated output Y also becomes a fuzzy number. Therefore, using the extension principle, (4) can be expressed as

$$Y(x_j) = (a'x_j,\ c'|x_j|)_L . \tag{5}$$

Fuzzy regression analysis is to determine the optimal fuzzy coefficients $A_i = (a_i, c_i)_L$ $i = 0, \ldots, n$ by solving the following LP problem:

$$\begin{aligned} \min_{a,c}\ & J = \sum_{j=1}^{p} c'|x_j| \\ \text{subject to}\ & a'x_j - (1-h_j)\,c'|x_j| \le y_j, \\ & y_j \le a'x_j + (1-h_j)\,c'|x_j|, \quad j = 1, \ldots, p \\ & c_i \ge 0, \quad i = 0, \ldots, n. \end{aligned} \tag{6}$$

3. Fuzzy regression using expert knowledge

Here, we introduce an objective function which combines both concepts of sec. 2:

$$J = k_1 \sum_{j=1}^{p} h_j (y_j - a'x_j)^2 + k_2 \sum_{j=1}^{p} h_j c'|x_j|\,|x_j|'c. \tag{7}$$

where the data are given as (x_j, y_j, h_j) with expert knowledge about h_j. Thus we determine the fuzzy coefficients $A_i = (a_i, c_i)_L$, $i = 0, \ldots, n$, by the following QP problem:

$$\begin{aligned} \min_{a,c}\ & J = k_1 \sum_{j=1}^{p} h_j (y_j - a'x_j)^2 + k_2 \sum_{j=1}^{p} h_j c'|x_j|\,|x_j|'c \\ \text{subject to}\ & a'x_j - (1-h_j)\,c'|x_j| \le y_j \\ & y_j \le a'x_j + (1-h_j)\,c'|x_j|, \ j = 1, \ldots, p, \\ & c_i \ge 0, \quad i = 0, \ldots, n. \end{aligned} \tag{8}$$

Suppose enough expert knowledge on the observed data is available, then an analyst can give different h-value to each data and determine the acceptable h-level set of the estimated fuzzy output Y.

Using numerical data in Table 1, let us assume that an analyst assign small h-value for sample numbers 4 and 7, i.e., $h_4 = h_7 = 0.1$, and $h_j = 0.8$ for the remaining data by his or her expert knowledge on the observed data. We assign same weights, $k_1 = k_2 = 1$, because 2 outliers are already influenced by a small h-value. By solving (8), fuzzy regression model is obtained as

$$Y = (7.13008,\ 3.49594)_L + (0.43089,\ 0)_L\,x. \tag{9}$$

From (9), 0.8-level fuzzy regression model (inner 2 solid lines) and 0.1-level fuzzy regression model (outer 2 dotted lines) are shown in Figure 1 (a). Here, 0.8-level lines effectively include most data except 2 outliers. In some cases, if more optimistic analysis is permitted, one can consider 0.1-level lines which contain all observed data.

Table 1 Numerical data

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
y	7	8	8	12	9	10	7	10	11	12	12	13

4. Fuzzy regression without expert knowledge

4.1 Obtainment of the h-values for data

Such cases when sufficient information to assign h-values for the observed data is not available, one encounters difficulty to decide the acceptable h-level of the estimated fuzzy output Y. In this case, we suggest the following procedure to decide the acceptable h-level of the estimated fuzzy output Y.

(i) Given the input- output data $(\boldsymbol{x}_j, y_j)$, $j = 1, \ldots, p$, determine $A_i = (a_i, c_i)_L$, $i = 0, \ldots, n$ by solving (8) with $h_j = 0$ for all data.

(ii) Using $A_i = (a_i, c_i)_L$, $i = 0, \ldots, n$ obtained in (i) as known values, solve the following LP problem:

$$\max_{\boldsymbol{h}} J = \sum_{j=1}^{p} h_j$$
$$\text{subject to} \quad \boldsymbol{a}^t\boldsymbol{x}_j - (1-h_j)\,\boldsymbol{c}^t|\boldsymbol{x}_j| \le y_j, \qquad (10)$$
$$y_j \le \boldsymbol{a}^t\boldsymbol{x}_j + (1-h_j)\,\boldsymbol{c}^t|\boldsymbol{x}_j|, \quad j = 1, \ldots, p$$

where decision variables are h_j, $j = 1, \ldots, p$.

(iii) Determine acceptable h-level of the estimated fuzzy output Y according to the result of (ii).

Using the numerical data, let us apply this procedure. By solving QP problem (8) with $k_1 = 1$, $k_2 = 0.1$, we obtained optimal coefficient values. Then, considering $A_i = (a_i, c_i)_L$ as known values, solve (10) and obtain h_j values. It is noticed that 10 out of 12 samples are above 0.7 level. Thus, one can easily decide to accept 0.7-level of the estimated fuzzy output Y which is depicted in Figure 1 (b).

4.2 Fuzzy regression using duality property

The duality property is one of the most important concepts in LP. The dual problem of (6) is

$$\max_{t} \quad J_d = \sum_{j=1}^{p} t_j y_j$$
$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^{p} t_j x_{ji} + (1-h_j)\sum_{j=1}^{p} t_j|x_{ji}| \le \sum_{j=1}^{p}|x_{ji}|, \qquad (11)$$
$$-\sum_{j=1}^{p} t_j x_{ji} + (1-h_j)\sum_{j=1}^{p} t_j|x_{ji}| \le -\sum_{j=1}^{p}|x_{ji}|, \quad i = 0, \ldots, n$$
$$t_j \ge 0, \quad j = 1, \ldots, p.$$

where decision variables t_j represent multipliers to the corresponding primal constraints in (6).

Now, we can solve fuzzy regression with selected p' out of p samples by the following simple procedure:

(i) Solve the dual problem (11).

(ii) Remove a data which has the highest value in (i).

(iii) If p-p' data are removed, go to (iv). Otherwise go to (i).

(iv) Solve the primal problem (6).

If obtained objective function value J from one simulation result is dropped drastically compared to former simulation, then the removed data can be regarded as a outlier. Using this procedure, fuzzy regression model after discarding 2 outliers (sample numbers 7 and 4) is obtained as

$$Y = (6.78571, 0.21429)_L + (0.46429, 0.03571)_L\, x \qquad (12)$$

which is depicted in Figure 1 (c).

5. Conclusion

In this paper, fuzzy regression analysis which reflects both properties of least squares and possibilistic regression is introduced. In other words, this approach considers tracking the central tendency for better prediction, and minimizing the spreads of the estimated fuzzy outputs. QP problem is applied to combine two properties. Both cases with / without expert knowledge on the observed data, are effectively analyzed by this approach. Also fuzzy regression using the duality property is introduced. The decision variable of the dual problem, when it is combined with the corresponding optimal objective function value, is quite effective to detect outliers. Our proposed approaches can also be applied effectively to interval regression analysis.

References

[1] H. Tanaka, Fuzzy data analysis by possibilistic linear models, *Fuzzy Sets and Systems* **2 4** (1987) 363-375.

[2] H. Tanaka, H. Ishibuchi, Possibilistic regression analysis based on linear programming, in J. Kacprzyk and M. Fedrizzi, Eds. *Fuzzy Regression Analysis,* Omnitech press, Warsaw and Physica-Verlag, Heidelberg (1992) 47-60.

[3] V. Chvatal, Linear programming (W. H. Freeman and Company, New York/San Francisco, 1983).

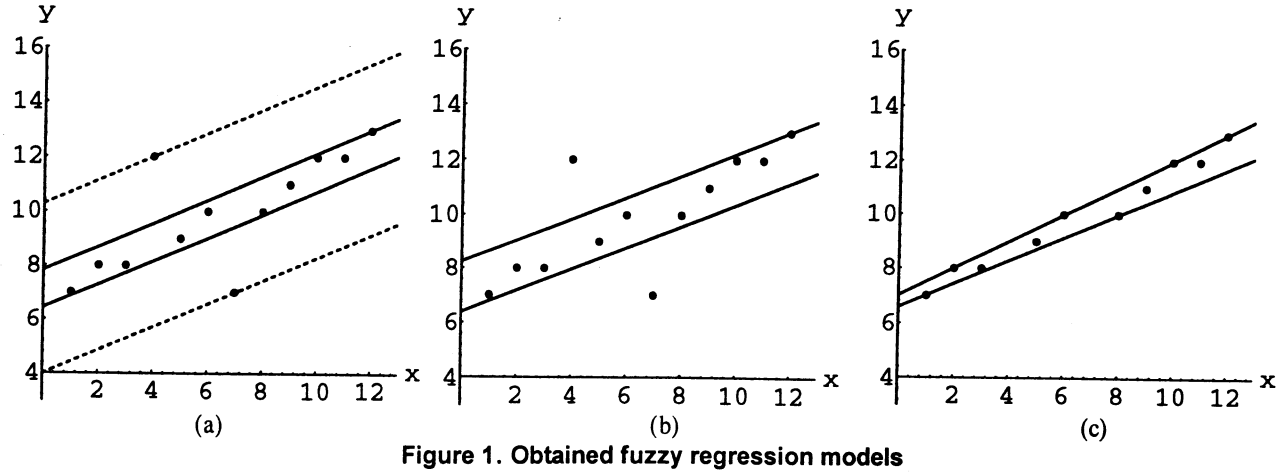


Figure 1. Obtained fuzzy regression models

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THC1-3

メディアン型ファジィ線形回帰
Median Fuzzy Linear Regression

乾口 雅弘† 坂和 正敏 後閑 智
Masahiro INUIGUCHI Masatoshi SAKAWA and Satoshi USHIRO

広島大学工学部第二類（電気系） 新菱冷熱工業(株)
Faculty of Engineering, Hiroshima University *Shinryo Corporation*

Abstract: In this paper, we propose a fuzzy linear regression technique based on the mean-absolute-deviation. The error between the fuzzy linear regression function and the given data is defined as a fuzzy number based on the extension principle. The fuzzy linear regression function is estimated by the minimization of the sum of the absolute deviations of a level set. Since the minimization problem has an interval objective function, we introduce an interpretation which can deduce the level set from the data without specifying the levels. Through the repetitive use of this level set estimation, the entire fuzzy linear function is obtained in the form of a family of level sets. Since this technique is based on the mean-absolute-deviation, the obtained fuzzy linear regression function is related to a median.

1. はじめに

本研究では，絶対誤差和最小化 [1] に基づいたファジィ線形回帰分析手法を提案する．データとファジィ線形回帰式との誤差がファジィ集合として定義され，ファジィ誤差のレベル集合の絶対和の最小化により，ファジィ線形回帰式が推定される．ファジィ誤差のレベル集合の絶対和の最小化は，区間関数の最小化問題になるので，データからファジィ線形回帰式のレベル集合を自動的に生成する解釈を導入し，多段階線形計画問題として定式化する．このレベル集合の推定を繰り返すことにより，ファジィ線形回帰式が推定できる．

本提案手法は，(a) 誤差の最小化に基づいていること，(b) ファジィパラメータの型を規定していないノンパラメトリック手法であること，(c) 得られたファジィ線形回帰式の中心がメディアンに関係していること，の 3 点において，従来法 [2] と大きく異なり，より直感に応じたファジィ線形回帰式が推定できる．

2. ファジィ線形システム

本研究では，対象とするシステムは，

$$\tilde{F}(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{m} \tilde{A}_j x_j + \tilde{A}_0 \tag{1}$$

と，記述できると仮定する．ここで，$\boldsymbol{x} = (x_0, \ldots, x_m)$ は入力である．係数 $\tilde{A}_j$ はファジィ数であり，出力 $\tilde{F}(\boldsymbol{x})$ もファジィ数となる．

$\tilde{A}_j$ はファジィ数であるので，任意の $h \in (0,1]$ について，h-レベル集合 $[\tilde{A}_j]_h = \left\{ a_j \middle| \mu_{\tilde{A}_j}(a_j) \geq h \right\}$ は閉区間となる．したがって，任意の $h \in (0,1]$ について，

$$[\tilde{F}(\boldsymbol{x})]_h = \sum_{j=1}^{m} [\tilde{A}_j]_h x_j + [\tilde{A}_0]_h \tag{2}$$

が成立し，出力の h-レベル集合 $[\tilde{A}_j]_h$ は区間演算により計算できる．

以下では，n 個のデータ $(\boldsymbol{x}_i, y_i)$ が与えられたとき，式 (1) の $\tilde{A}_j$ を推定する問題を考える．なお，簡便のため，$x_{i0} = 1$ と定義する．

3. 提案するファジィ線形回帰分析手法

データ $(\boldsymbol{x}_i, y_i)$ は次式を満たすと仮定する．

$$y_i - \tilde{F}(\boldsymbol{x}_i) = \tilde{E}_i \tag{3}$$

ただし，$\tilde{E}_i$ はファジィ誤差である．

式 (3) が成立するとき，

$$y_i - [\tilde{F}(\boldsymbol{x}_i)]_h = [\tilde{E}_i]_h, \ \forall h \in (0,1] \tag{4}$$

が成立し，任意の $h \in (0,1]$ について，式 (4) が成立すれば，分解原理より，式 (3) が成立する．このことより，式 (4) の $[\tilde{F}(\boldsymbol{x}_i)]_h$ を逐次推定することを考える．

絶対誤差和最小化に基づくと，問題は，

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} \left| [\tilde{E}_i]_h \right| \tag{5}$$

となる．この問題は，区間 $\left| [\tilde{E}_i]_h \right| = [|e|_i^{\mathrm{L}}(h), |e|_i^{\mathrm{R}}(h)]$ の総和を最小化する問題であり，区間の大小関係が全順序でないため，一義に定義されていない．

本研究では，問題 (5) を次の辞書式最小化問題とし

†平成 9 年 4 月 1 日より，大阪大学大学院工学研究科

て取り扱う．

$$\text{lex-min} \left(\sum_{i \in I_{\tilde{F}}(h)} \left(|e|_i^{\mathrm{L}}(h) + |e|_i^{\mathrm{R}}(h) \right), \sum_{i \in I_{\tilde{F}}(h)} |e|_i^{\mathrm{L}}(h), \sum_{i=1}^{n} |e|_i^{\mathrm{R}}(h) \right) \quad (6)$$
$$\text{subject to} \quad [\tilde{A}_j]_p \subseteq [\tilde{A}_j]_h, \ \forall p > h$$

ただし，$I_{\tilde{F}}(h) = \left\{ i \mid \mu_{\tilde{F}(\boldsymbol{x}_i)}(y_i) \leq h \right\}$ である．また，集合 $\left\{ [\tilde{A}_j]_p \mid p \in (0,1] \right\}$ がファジィ数のレベル集合の族となるように，一貫性の条件 $[\tilde{A}_j]_p \subseteq [\tilde{A}_j]_h$, $\forall p > h$ が加えられている．

$I_{\tilde{F}}(h)$ が使われているため，各データに対して，メンバシップ値が h 以下か否か，予め与えられなければ適用できないように見えるが，$h = 1$ から初め，問題 (6) を繰り返し適用すれば，$[\tilde{A}_j]_p$, $\forall p > h$ を逐次求めることができる．

$$[\tilde{F}(\boldsymbol{x}_i)]_h = \langle f_i^{\mathrm{C}}(h), \ f_i^{\mathrm{W}}(h) \rangle = \left\langle \sum_{j=0}^{m} a_j^{\mathrm{C}}(h) x_{ij}, \ \sum_{j=0}^{m} a_j^{\mathrm{W}}(h) |x_{ij}| \right\rangle \quad (7)$$

とすると，k 回目の問題 (6) は，次の多段階線形計画問題になる．

$$\text{lex-min} \left(\sum_{i \in I_{\tilde{F}}(h_k)} \left(d_i^{\mathrm{L}}(h_k) + d_i^{\mathrm{R}}(h_k) \right), \sum_{i \in I_{\tilde{F}}(h_k)} d_i^{\mathrm{L}}(h_k), \sum_{i=1}^{n} d_i^{\mathrm{R}}(h_k) \right)$$
$$\text{subject to}$$
$$f_i^{\mathrm{C}}(h_k) - \tfrac{1}{2} f_i^{\mathrm{W}}(h_k) - d_i^{\mathrm{L}}(h_k) \leq y_i,$$
$$f_i^{\mathrm{C}}(h_k) + \tfrac{1}{2} f_i^{\mathrm{W}}(h_k) + d_i^{\mathrm{L}}(h_k) \geq y_i,$$
$$f_i^{\mathrm{C}}(h_k) - \tfrac{1}{2} f_i^{\mathrm{W}}(h_k) + d_i^{\mathrm{R}}(h_k) \geq y_i,$$
$$f_i^{\mathrm{C}}(h_k) + \tfrac{1}{2} f_i^{\mathrm{W}}(h_k) - d_i^{\mathrm{R}}(h_k) \leq y_i,$$
$$a_j^{\mathrm{C}}(h_k) - \tfrac{1}{2} a_j^{\mathrm{W}}(h_k) \leq \hat{a}_j^{\mathrm{C}}(h_{k-1}) - \tfrac{1}{2} \hat{a}_j^{\mathrm{W}}(h_{k-1}),$$
$$a_j^{\mathrm{C}}(h_k) + \tfrac{1}{2} a_j^{\mathrm{W}}(h_k) \geq \hat{a}_j^{\mathrm{C}}(h_{k-1}) + \tfrac{1}{2} \hat{a}_j^{\mathrm{W}}(h_{k-1}),$$
$$a_j^{\mathrm{W}}(h_k), \ d_i^{\mathrm{L}}(h_k), \ d_i^{\mathrm{R}}(h_k) \geq 0; \quad i = 1, \ldots, n, \ j = 0, \ldots, m \quad (8)$$

ただし，$\hat{a}_j^{\mathrm{C}}(h_{k-1}), \hat{a}_j^{\mathrm{W}}(h_{k-1})$ は，$(k-1)$ 回目に問題 (8) を解いて得られた最適解である．便宜上，$\hat{a}_j^{\mathrm{C}}(h_0) = 0$, $\hat{a}_j^{\mathrm{W}}(h_0) = -M$ (M は十分大きい正数) と設定される．

問題 (8) を解くことにより，集合 $[\tilde{A}_j]_{h_k}$ は定められるが，レベル h_k は定められない．そこで，集合 $[\tilde{A}_j]_{h_k}$ に含まれるデータ数 $q(h_k)$ に基づき，レベル h_k を次のように定める．

$$h_k = \frac{n - q(h_{k-1})}{n}, \ k = 2, \ldots, p \quad (9)$$

ただし，$h_0 = 1$, $q(h_0) = 0$ とする．

$q(h_k) = n$ となるまで，問題 (8) が解かれる．

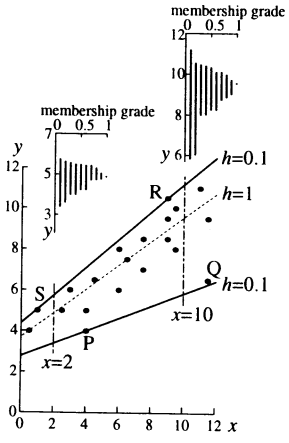


図 1: 例 1

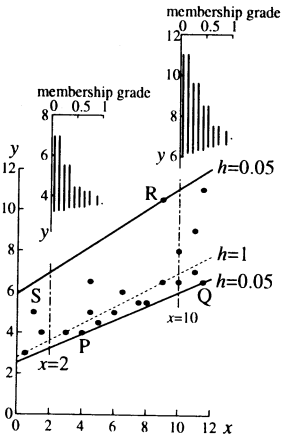


図 2: 例 2

4. 数値例

図 1, 2 に示されるデータに対して，提案したファジィ線形回帰分析手法を適用した．従来法 [2] では，これらのデータに対して，全く同じファジィ線形回帰式が得られる．提案法では，図 1, 2 のように，データの分布に応じて異なったファジィ線形回帰式が得られる．

5. おわりに

ファジィ線形回帰式のレベル集合の推定を繰り返すことにより，全体のファジィ線形回帰式を求める方法を提案した．この方法は，ノンパラメトリック手法であり，より直感に応じたファジィ線形回帰式が得られる．その反面，データ数に応じて解くべき問題数および規模が大きくなる．

参考文献

[1] W. F. Sharpe: Mean-Absolute-Deviation Characteristic Lines for Securities and Portfolios, *Management Science*, Vol.18, No.2, pp.B1–B13 (1971)

[2] H. Tanaka, S. Uejima and K. Asai: Linear Regression Analysis with Fuzzy Model, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.12, No.6, pp.903–907 (1982)

［連絡先］（平成 9 年 3 月 31 日まで,）
〒 739 東広島市鏡山 1 丁目 4-1
広島大学工学部第二類（電気系）
乾 口 雅 弘
Tel. 0824-24-7695 Fax.0824-22-7195
E-mail: inuiguti@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

（平成 9 年 4 月 1 日から,）
〒 565 吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
電子情報エネルギー工学専攻
乾 口 雅 弘
Tel. 06-879-7787 Fax.06-879-7939

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THC1-4

可能性回帰分析における決定係数の定義

Definition of Determination Coefficient for Possibility Regression Analysis

渡邊 匠, 小沢 和浩

Takumi Watanabe, Kazuhiro Ozawa

法政大学経済学部

Faculty of Economics, Hosei university

abstract

In this paper, the determination coefficient for the possibility regression analysis is defined. The determination coefficient shows the ability to explain of the possibility regression model in quantity, and it can be an important index for selection of models. Before we define the determination coefficient, we consider the concept of the ability to explain of the possibility regression model. Besides, we define the determination coefficient for the interval regression analysis and the possibility regression analysis. Finally we show an example of interval regression model in the practical case and calculate its determination coefficient.

1.はじめに

本論では、可能性回帰分析における決定係数を定義する。決定係数はモデルの説明力を定量的に示すものであり、モデルに対する客観的な評価をする上で不可欠である。たとえば、同一の対象について何通りかの異なるモデル化を試みたというような場合に、決定係数のような客観的な評価尺度があれば、最適なモデルの選択をすることができるであろう。このようなことは、可能性回帰分析を実問題へ適用しようとしたときには重大な関心事であるから、決定係数のようなモデルについての評価尺度はその存在に大きな意義を持つ。

可能性回帰分析とは、ファジィ係数をもつ可能性回帰モデルによってあいまいなシステムを記述するためのものである[1,2]。このモデルによる推定値はファジィ数となり、被説明変数の可能性領域として解釈される。また、その推定値に包含される個々の実数データ点は、あらゆる可能性の中での一つの実現値である。

ここで定義する決定係数とは、可能性回帰分析によって変量の可能性領域が推定されることに着目し、可能性回帰モデルの説明力を示そうとするものである。

可能性回帰分析ではいくつかの定式化がなされている。ここでとりあげるのはそのうち区間回帰分析および対称三角型ファジィ数を用いた可能性回帰分析である。また、いずれも変数が実数データであることを前提としている。しかしながら、本論では可能性回帰モデルの説明力という概念について述べるため、同様の方法によりあらゆる可能性回帰モデルについても決定係数が定義可能と思われる。

最後に、数値例によって可能性回帰モデルを導出し、決定係数を計算する。

2.決定係数を定義する対象

ここでは本論で対象とする区間回帰分析や可能性回帰分析について述べておく。

用いるのは実数データであり、被説明変数と説明変数の組を、

$$(y_t; \boldsymbol{x}_t), t = 1,2,\cdots,n \qquad (2\text{-}1)$$

とする。これらに対する区間回帰モデルは次式により表される。

$$Y(\boldsymbol{x}_t) = A_0 + A_1 x_{1t} + \cdots + A_k x_{kt} \qquad (2\text{-}2)$$

ここでそれぞれの区間係数は中心と幅により表される。

$$A_i = \langle a_{iC}, a_{iW} \rangle, i = 0,1,\cdots,k \qquad (2\text{-}3)$$

したがって、区間回帰モデルによる推定値もまた区間値となる。

$$Y(\boldsymbol{x}_t) = \langle y_C(\boldsymbol{x}_t), y_W(\boldsymbol{x}_t) \rangle \qquad (2\text{-}4)$$

区間回帰分析とは、

$$y_t \in Y(\boldsymbol{x}_t) \qquad (2\text{-}5)$$

という制約条件の下であいまいさ最小のモデルを求める問題であり、これはLP問題に帰着する。

また可能性回帰モデルは、対称三角型ファジィ数を用いて以下のように表される。

$$\tilde{Y}(x_t) = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x_{1t} + \cdots + \tilde{A}_k x_{kt} \quad (2\text{-}6)$$

対称三角型ファジィ係数も中心と幅により表される。

$$\tilde{A}_i = (a_i, e_i)_L, i = 0,1,\cdots,k \quad (2\text{-}7)$$

この推定値はやはり対称三角型のファジィ数となる。

$$\tilde{Y}(x_t) = (a(x_t), e(x_t))_L \quad (2\text{-}8)$$

可能性回帰分析とは、

$$y_t \in [\tilde{Y}(x_t)]_h \quad (2\text{-}9)$$

という制約条件の下であいまいさ最小のモデルを求める問題であり、やはりLP問題に帰着する。

3.可能性回帰モデルの説明力の概念

この章では、決定係数の定義にあたり区間回帰分析および可能性回帰分析の説明力とはどう表されるかということについて考察する。

区間回帰分析や可能性回帰分析では、被説明変数 y をすべて包含し、かつあいまいさ最小のモデルが求められる。この結果、あらゆる水準の説明変数 x に対する y の可能性領域が、モデルによって示されることになる。このようにして求められた区間回帰モデルおよび可能性回帰モデルの説明力を評価するには、x によるモデルを用いないときにどのように y の可能性領域が推定されるかを考慮し、それと比較すればよいと考えられる。

いま、y のデータのみが与えられ、x などこの変動を説明する要因を考慮しない状況を考える。この場合に、y をすべて包含する幅最小の区間を求めることは、区間回帰分析と同様に y の可能性領域を推定する作業でもある。そのような区間は、

$$[\min y, \max y] = \left\langle \frac{\max y + \min y}{2}, \frac{\max y - \min y}{2} \right\rangle \quad (3\text{-}1)$$

と、容易に求めることができる。回帰が不可能であれば、このような推定で y の変動をとらえ、可能性領域として示すのが唯一の方法である。

次に、y の変動に大きく寄与する変量 x を用い、

$$Y(x_t) = A_0 + A_1 x_t \quad (3\text{-}2)$$

$$y \in Y(x_t) \quad (3\text{-}3)$$

という区間回帰モデルを同定し、パラメータが決定された場合を考える。これにより、x の値をモデルに入力すれば、それに対する y の可能性領域が、

$$Y(x_t) = \langle y_C(x_t), y_W(x_t) \rangle \quad (3\text{-}4)$$

のように推定できる。

このモデルによる推定区間((3-4)式)のそれぞれは、モデルを用いないときの推定区間((3-1)式)と比較すると幅の小さい、精密なものとなっていることが期待される。これは、x という追加的な情報を用いているために当然のことでもある。ということは、(3-1)式によって推定された可能性領域は、モデルにより、再び可能性領域として示される部分((3-4)式)と、可能性領域として考慮する必要のなくなった部分((3-5)(3-6)式)とに分けて考えられるようになるということである。

$$\max y - Y^*(x_t) \quad (3\text{-}5)$$

$$Y_*(x_t) - \min y \quad (3\text{-}6)$$

ただし、

$$Y^*(x_t) = y_C(x_t) + y_W(x_t) \quad (3\text{-}7)$$

$$Y_*(x_t) = y_C(x_t) - y_W(x_t) \quad (3\text{-}8)$$

とする。

x が y の変動要因としては取るに足らないものであり、したがって回帰モデルそのものが無意味である場合には、(3-4)式の幅が大きく、(3-5)(3-6)両式が小さくなるだろう。逆に、モデルに x を含めることが非常に有効であれば、(3-4)式の幅は小さくなり、(3-5)(3-6)両式は大きくなるだろうと考えられる。したがって、モデルの説明力はこれらの比率により示すことができると考えられる。

たとえば、(3-2)式の区間回帰モデルにおいて y_t に対する推定区間が $Y(x_t)$ として与えられている場合に、x_t の説明力は次式のように評価することができる。

$$(x_t\text{の説明力}) = \frac{(\max y - Y^*(x_t)) + (Y_*(x_t) - \min y)}{\max y - \min y} = 1 - \frac{Y^*(x_t) - Y_*(x_t)}{\max y - \min y} \quad (3\text{-}9)$$

モデル全体の説明力は、(3-9)式によって示される説明力が、n 個のデータすべてについて反映されていればよいということになる。

これまで区間回帰分析の場合について述べたが、可能性回帰分析についても α-カットにより区間の問題に直すことができるため、同様に説明力を捉えることができる。

4.可能性回帰分析における決定係数の定義

ここでは、これまでに示した区間回帰分析や可能性回帰分析における説明力の概念を基に、それぞれについて決定係数を定義する。

4.1.区間回帰分析

前述のような考察から、区間回帰モデルの決定係数は次式のように定義される。

$$R^2=\sum_{t=1}^{n}\frac{\left(\max y-Y^*(x_t)\right)+\left(Y_*(x_t)-\min y\right)}{\max y-\min y}=1-\frac{\sum_{t=1}^{n}\left(Y^*(x_t)-Y_*(x_t)\right)}{n(\max y-\min y)}=1-\frac{2\sum_{t=1}^{n}y_W(x_t)}{n(\max y-\min y)} \tag{4-1}$$

上式の$2\sum_{t=1}^{n}y_W(x_t)$とは、区間回帰モデルのあいまいさの総和であり、モデルを導出するLP問題の目的関数である。これに関しては、以下が成り立つ。

$$2\sum_{t=1}^{n}y_W(x_t)\le n(\max y-\min y) \tag{4-2}$$

なぜなら、(2-2)式のような区間回帰モデルのパラメータをそれぞれ、

$$A_0=\left\langle\frac{\max y+\min y}{2},\frac{\max y-\min y}{2}\right\rangle \tag{4-3}$$

$$A_i=\langle 0,0\rangle, i=1,2,\cdots,k \tag{4-4}$$

としたとき、モデルのあいまいさは$n(\max y-\min y)$となり最大となる。これ以上大きなあいまいさを持つモデルは、LP 問題を解く事によって得られることがないためである。したがって、

$$0\le R^2 \tag{4-5}$$

となる。ただし、モデルが定数項を持たず、原点を通るような場合はこの限りではない。

また、推定されたモデルのあいまいさが0である、すなわちyがモデルの上に一直線に並ぶような場合は、

$$2\sum_{t=1}^{n}y_W(x_t)=0 \tag{4-6}$$

となるため、

$$R^2\le 1 \tag{4-7}$$

が常に成り立つ。よって、(4-1)式により定義される区間回帰分析の決定係数について、(4-5)(4-7)式より、

$$0\le R^2\le 1 \tag{4-8}$$

が言える。

4.2.可能性回帰分析

実数データに対する可能性回帰分析では、モデルが与えられたhレベル集合内にyを包含する。したがって、そのhレベル集合のみに着目すれば前節の区間回帰分析と同様に決定係数が定義できる。

まず、すべてのyをhレベル集合内に包含する対称三角型ファジィ数が、

$$\left(\frac{\max y+\min y}{2},\frac{\max y-\min y}{2(1-h)}\right)_L \tag{4-9}$$

のように与えられるが、この対称三角型ファジィ数のhレベル集合は結局、

$$\left\langle\frac{\max y+\min y}{2},\frac{\max y-\min y}{2}\right\rangle \tag{4-10}$$

となる。

つぎに、モデルによるn個の推定値のhレベル集合の幅の総和は、

$$\sum_{t=1}^{n}2(1-h)e(x_t)=2(1-h)\sum_{t=1}^{n}e(x_t) \tag{4-11}$$

となる。したがって、可能性回帰分析における決定係数は以下のように定義できる。

$$R^2=1-\frac{2(1-h)\sum_{t=1}^{n}e(x_t)}{n(\max y-\min y)} \tag{4-12}$$

区間回帰モデルからは、可能性回帰モデルが導出されることが分かっており、それぞれのパラメータには以下の関係が成り立つ。

$$a_i=a_{iC}, i=0,1,\cdots,k \tag{4-13}$$

$$e_i=a_{iW}/(1-h), i=0,1,\cdots,k \tag{4-14}$$

したがって、双方のモデルによる推定値の幅にも次の関係が成り立つ。

$$y_W(x_t)/(1-h)=e(x_t) \tag{4-15}$$

双方のモデルの決定係数がそれぞれ、

$$R^2=1-\frac{2\sum_{t=1}^{n}y_W(x_t)}{n(\max y-\min y)} \tag{4-16}$$

$$R^2=1-\frac{2(1-h)\sum_{t=1}^{n}e(x_t)}{n(\max y-\min y)} \tag{4-17}$$

であったから、区間回帰モデルから可能性回帰モデルを導出する場合には、レベル h の与えかたに関わらず決定係数は不変である。また、これは可能性回帰分析においてレベル h の与えかたと決定係数には関係がないことをも意味する。すなわち、同一のデータ、被説明変数、説明変数を用いたときには、決定係数は一致する。モデルの説明力を向上するには説明変数の選択を変更しなければ意味がないということである。

5.計算例

この章では実際のデータに区間回帰分析を行い、その区間回帰モデルについて決定係数を求める。ここでは、(C_t,Y_t)の2変数について、次式により表されるあいまいな入出力関係をモデル化する。

$$C(Y_t) = c_0 + c_1 Y_t \qquad (5\text{-}1)$$

$$C_t \in C(Y_t) \qquad (5\text{-}2)$$

ただし、C_t、Y_t はそれぞれ民間最終消費支出、国民総生産である。c_0、c_1 はそれぞれ、

$$c_i = \langle c_{iC}, c_{iW} \rangle, i = 0,1 \qquad (5\text{-}3)$$

という区間パラメータである。経済学における一般的な表記法に従い、データを大文字により、パラメータを小文字により表した。

推定の結果、区間回帰モデルが以下のように推定された。

$$C(Y_t) = \langle 26742.083, 0.0 \rangle + \langle 0.513, 0.00458 \rangle Y_t \qquad (5\text{-}4)$$

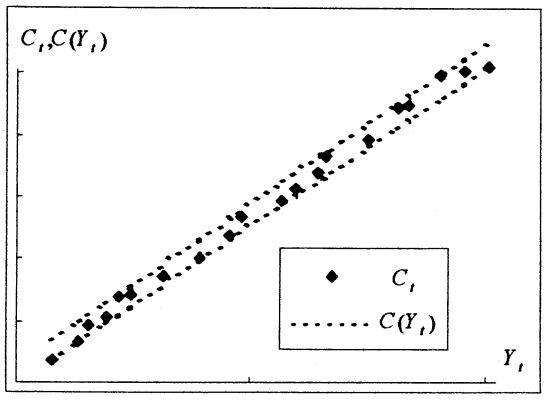


図 5-1 Y_t と C_t およびその推定値の散布図

(4-1)の計算式により、このモデルの決定係数は以下のように求められた。

$$R^2 = 0.924 \qquad (5\text{-}5)$$

つまり、(5-4)式のモデルにより C_t の変動を92.4%説明できるということができる。

参考までに、同様の構造を統計的回帰分析によって推定した結果を示す。

$$C_t = \underset{(3428.96)}{22815.9} + \underset{(6.654)}{0.523} Y_t + e_t \qquad (5\text{-}6)$$
$$\qquad\qquad (0.00872)$$
$$\qquad\qquad (59.963)$$
$$R^2 = 0.995 \qquad s = 1130.047$$

もちろん、統計的回帰分析と区間回帰分析や可能性回帰分析との結果を比較することは、まったく無意味である。それらは、モデル化する対象によって使い分けるべきものであるからだ。しかし、複数の可能性回帰モデル同士を比較するような場合、決定係数のような指標は有効であろう。

6.まとめ

本論では、実数データに対する区間回帰分析および可能性回帰分析における決定係数を定義した。可能性回帰分析はここでとりあげたもの以外にも様々な定式化がなされているが、本論で述べた説明力の概念に従えば、それぞれについても決定係数は定義が可能であると思われる。

また、ここでとりあげた決定係数は説明力を増やすほど値が良くなる(上昇する)という問題があるため、説明変数の個数により調整した決定係数も定義される必要がある。

最後に、可能性回帰分析の適用例を基に決定係数を計算した。実際の問題では、いくつかの可能性回帰モデルの中から最適なものを選択する場合などにおいて決定係数が有効な指標となると考えられる。

参考文献

[1] 浅居喜代治, 田中英夫:「ファジィOR」日刊工業新聞社, pp141-185(1985)

[2] 田中英夫:「可能性回帰分析」日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.6, pp.1260-1272(1993)

[3] 蓑谷千鳳彦:「計量経済学」東洋経済新報社(1983)

連絡先

〒194-02 東京都町田市相原町 4342
法政大学経済学部　　小沢 和浩
TEL:0427-83-2534, FAX:0427-83-2611
E-mail: kozawa@mt.tama.hosei.ac.jp

THC2-1

ファジィ自己回帰モデルとその適用

Fuzzy Auto-Regressive Model and Its Applications

小沢 和浩*, 渡邊 匠*, 菅家 正康**

Kazuhiro Ozawa*, Takumi Watanabe*, Masayasu Kanke*

*法政大学経済学部, **(株)明電舎 太田工場 動力計測部

*Faculty of Economics, Hosei University

**Ohta Factory, Meidensha Corporation

abstract

We propose a fuzzy auto-regressive(AR) model and show its applications. The identification and the estimation of the fuzzy AR model is discussed in this paper. We can know the parameters of the fuzzy AR model by means of the linear programming problem which minimizes the fuzziness of the model. By using the fuzzy AR model, we become able to describe the behavior of fuzzy time series which can not be described with the stochastic model. Furthermore this method is applied to the estimation and forecasting of Living Expend of Worker's Household in Japan.

1.はじめに

本論では、ファジィ時系列のモデルであるファジィ自己回帰モデルについて、定義から同定、推定、予測の方法にいたるまでを述べる。また、その応用例も示す。

ファジィ自己回帰モデルは、過去のデータに依存するようなファジィ時系列を簡単な数式により表現するためのモデルである。これにより、ファジィ時系列データが過去にどのように依存しているか、あるいは、過去のデータにはまったく依存していないことなどを知ることができる。

2.ファジィ時系列

ファジィ時系列とは、時系列的に得られるファジィデータのことである。ファジィデータは、一般的な観測値とはことなるものである。しかし、経済など人間の意思決定が介在している複雑なシステムに対しては、ファジィな量を積極的に分析することもまた意味のあることと思われる。たとえば経済などでは企業や消費者によって、生産量や消費額などのさまざな意思決定がなされている。それらは、一つの実数値として仮定するよりも、ある程度の幅を持った計画量として考えた方が自然である。したがって、社会における意思決定システムそのものを分析の対象とする場合には、均衡の結果などによる統計の実数データを用いるよりは、意思決定主体の計画量をファジィ数として分析した方が適当であると考えられる。

本論で用いるファジィ時系列データ X_t, $t=1,2,\cdots,n$ は、すべて台形型ファジィ数により表すことが出来るとする。台形型ファジィ数は四つのパラメータにより以下のように表記される。

$$X_t=(\alpha_t,\beta_t,\gamma_t,\delta_t),\alpha_t\le\beta_t\le\gamma_t\le\delta_t \qquad (2\text{-}1)$$

また、台形型ファジィ数の包含関係を次のように定義する。

$$X_t\subseteq X_s \Leftrightarrow \alpha_t\ge\alpha_s,\beta_t\ge\beta_s,\gamma_t\le\gamma_s,\delta_t\le\delta_s \qquad (2\text{-}2)$$

同じく、和と実数倍が次のように計算されるものとする。

$$X_t+X_s=(\alpha_t+\alpha_s,\beta_t+\beta_s,\gamma_t+\gamma_s,\delta_t+\delta_s) \qquad (2\text{-}3)$$

$$p\cdot X_t=\begin{cases}(p\cdot\alpha_t,p\cdot\beta_t,p\cdot\gamma_t,p\cdot\delta_t), & p\ge 0\\ (p\cdot\delta_t,p\cdot\gamma_t,p\cdot\beta_t,p\cdot\alpha_t), & p<0\end{cases} \qquad (2\text{-}4)$$

ここで p は実数値である。

3.ファジィ自己回帰モデル

ここでは、ファジィ自己回帰モデルの定義、同定と推定、予測の方法に至るまでを述べる。

3.1.定義

ファジィ自己回帰モデルは次式により定義される。

$$\tilde{X}_t\equiv\phi_1X_{t-1}+\phi_2X_{t-2}+\cdots+\phi_kX_{t-k}+U \qquad (3\text{-}1)$$

$$X_t \subseteq \tilde{X}_t \tag{3-2}$$

$$\tilde{X}_t = \left(\tilde{\alpha}_t, \tilde{\beta}_t, \tilde{\gamma}_t, \tilde{\delta}_t\right) \tag{3-3}$$

なお、(2-1)(2-2)式および(3-2)(3-3)式より以下が明らかである。

$$\alpha_t \geq \tilde{\alpha}_t \tag{3-4}$$

$$\beta_t \geq \tilde{\beta}_t \tag{3-5}$$

$$\gamma_t \leq \tilde{\gamma}_t \tag{3-6}$$

$$\delta_t \leq \tilde{\delta}_t \tag{3-7}$$

つまり、モデルによるファジィ時系列の推定値は、ファジィデータをすべて包含する。パラメータの $\phi_1, \phi_2, \cdots, \phi_k$ は実数値であり、過去のファジィデータが問題とする時点にどれだけ影響を与えているかを示す。U はモデルに固有の定数項であり、ファジィデータが過去のデータに依存しない部分を表す。これもやはり4つのパラメータにより表される台形型ファジィ数として定義されている。

$$U = \left(u_\alpha, u_\beta, u_\gamma, u_\delta\right), u_\alpha \leq u_\beta \leq u_\gamma \leq u_\delta \tag{3-8}$$

ファジィ時系列データにおける過去に依存する部分は、パラメータ $\phi_1, \phi_2, \cdots, \phi_k$ により表現される。しかしながら、ファジィデータが過去のデータの実数倍には依存していなければ、その部分が U に吸収されて表現される。したがって、ファジィ自己回帰モデルによって、ファジィ時系列が過去に依存している部分と依存していない部分に明確に分離される。

過去のデータにはまったく依存していないファジィ時系列に対してファジィ自己回帰モデルを適用したような場合、極端な例ではすべてのパラメータ $\phi_1, \phi_2, \cdots, \phi_k$ がまったく0と等しいということにもなる。このとき、このファジィ時系列に対してファジィ自己回帰モデルはまったく適していないし、モデル化することも無意味である。

3.2.同定と推定

ファジィ自己回帰モデルのパラメータ決定は(3-2)式の包含条件を満たした上でのモデルのあいまいさ最小化となり、これは以下のような線形計画問題に帰着する。

$$\text{minimize:} \quad \sum_{t=k+1}^{n} \left(\left(\tilde{\delta}_t - \tilde{\beta}_t\right) + \left(\tilde{\gamma}_t - \tilde{\alpha}_t\right)\right) \tag{3-9}$$

$$\text{subject to:} \quad \alpha_t \geq \tilde{\alpha}_t, t = k+1, k+2, \cdots, n \tag{3-10}$$

$$\beta_t \geq \tilde{\beta}_t, t = k+1, k+2, \cdots, n \tag{3-11}$$

$$\gamma_t \leq \tilde{\gamma}_t, t = k+1, k+2, \cdots, n \tag{3-12}$$

$$\delta_t \leq \tilde{\delta}_t, t = k+1, k+2, \cdots, n \tag{3-13}$$

$$u_\alpha \leq u_\beta \tag{3-14}$$

$$u_\beta \leq u_\gamma \tag{3-15}$$

$$u_\gamma \leq u_\delta \tag{3-16}$$

目的関数の(3-9)式は、この線形計画問題によりモデルのあいまいさの総和が最小化されることを示している。(3-10)～(3-13)式は、ファジィデータの包含条件を示す。また(3-14)～(3-16)式は U が台形型ファジィ数であるために必要である。

ここで、次のような1次のファジィ自己回帰モデルを考えてみる。

$$\tilde{X}_t = \phi X_{t-1} + U \tag{3-17}$$

$$X_t \subseteq \tilde{X}_t \tag{3-18}$$

このモデルでは、推定値の計算が係数の符号によって以下のように場合分けされる。

$$\tilde{\alpha}_t = \begin{cases} \phi\alpha_{t-1} + u_\alpha, \phi \geq 0 \\ \phi\delta_{t-1} + u_\alpha, \phi < 0 \end{cases} \tag{3-19}$$

$$\tilde{\beta}_t = \begin{cases} \phi\beta_{t-1} + u_\beta, \phi \geq 0 \\ \phi\gamma_{t-1} + u_\beta, \phi < 0 \end{cases} \tag{3-20}$$

$$\tilde{\gamma}_t = \begin{cases} \phi\gamma_{t-1} + u_\gamma, \phi \geq 0 \\ \phi\beta_{t-1} + u_\gamma, \phi < 0 \end{cases} \tag{3-21}$$

$$\tilde{\delta}_t = \begin{cases} \phi\delta_{t-1} + u_\delta, \phi \geq 0 \\ \phi\alpha_{t-1} + u_\delta, \phi < 0 \end{cases} \tag{3-22}$$

すなわち、係数の符号が負である場合には、乗算によってファジィ数が反転する。これは、モデル導出の線形計画問題にも関わっている。すなわち、1次のファジィ自己回帰モデルでは二通りの線形計画問題を解き、よりよい解が得られた方を選択しなくてはならない。

ファジィ自己回帰モデルの推定の方法について述べてきたが、次数やパラメータの符号などの決定に関して、事前に同定する手段はいまのところ存在しない。統計的な時系列のモデル化手法のように、自己相関や偏自己相関などの判断材料はファジィ時系列については得られないし、ファジィな時系列は実数データによる時系列よりも数段多くの情報を含むからである。したがって、分析者はモデルを決定するにあたり試行錯誤に頼らざるを得ない。しかしながら、4次や5次或いはそれ以上の自己回帰に従うようなファジィ時系列を考えなければ、その試行錯誤にそれほど多くの労力は必要ではない。

3.3.予測

ファジィ自己回帰モデルによって次の期を予測する場合には、モデルにファジィデータを代入すればよい。ここでは、例として1次のファジィ自己回帰モデルを用いる。

$$\tilde{X}_{n+1} = \phi X_n + U \tag{3-23}$$

このように、n 個のサンプルが得られていれば、その次の期の値を予測する事が可能である。また、予測値の代入を繰り返せば、さらに先の予測値も計算することが可能である。

$$\begin{aligned}\tilde{X}_{n+2} &= \phi\tilde{X}_{n+1} + U \\ &= \phi(\phi X_n + U) + U \\ &= \phi^2 X_n + (1+\phi)U\end{aligned} \tag{3-24}$$

$$\begin{aligned}\tilde{X}_{n+3} &= \phi\tilde{X}_{n+2} + U \\ &= \phi(\phi^2 X_n + (1+\phi)U) + U \\ &= \phi^3 X_n + (1+\phi+\phi^2)U \\ &\cdots\end{aligned} \tag{3-25}$$

$$\tilde{X}_{n+h} = \phi^h X_n + (1+\phi+\phi^2+\cdots+\phi^{h-1})U \tag{3-26}$$

これからわかるように、係数 ϕ の絶対値が1より小さければ予測値は U の実数倍に収束してゆく。しかし U はファジィ時系列の過去に依存していない部分を反映しているから、予測値の代入を繰り返すことにより予測の精度は低くなる。また、ϕ の絶対値が 1 より大きければ、遠い将来の予測値は発散してゆき、予測できないということになる。

4.ファジィ自己回帰モデルの適用

ここでは消費支出の時系列に対するファジィ自己回帰モデルの適用を試みる。消費行動とはもちろん人の意思決定によるものである。その場合、消費支出額として一つの実数値が計画量として意思決定されているとは考えにくい。あらかじめ幅を持った消費支出額が計画され、実際の消費支出額はその範疇で実現されると考えられる。したがって、人の意思決定に基づく計画量は、ファジィ数による分析が適当であると考えられる。

データは統計から得るものであるため実数値であるが、前述の通りこれをファジィ時系列化して分析に用いることとする。この目的は、消費支出をする行動主体の意思決定が、時間的な連続の中でどのような特徴を持つのかを明らかにすることである。

実数データをファジィデータ化するということは、非常に主観的な過程である。ここでは、以下のような方針に従ってこの過程を行った。

まず、実績値 x_t は統計から得られる実数データである。これに対する計画量 X_t はファジィデータとして表され、以下のような関係が仮定できる。

$$x_t \in X_t \tag{4-1}$$

つまり、計画量の範囲内で一つの数値が実現される。X_tは三角型のファジィ数で表すこととする。

$$X_t = (\alpha_t, \beta_t, \delta_t) \tag{4-2}$$

さらに、x_t は X_t においてメンバーシップ値が 1 となる β_t と等しいとする。以上の様な方針のもとで、X_t は x_t より次式により得ることとした。

$$\begin{aligned}X_t &= (\alpha_t, \beta_t, \delta_t) \\ \alpha_t &= x_t \cdot \frac{\min\{x_{t-1}, x_t, x_{t+1}\}}{\max\{x_{t-1}, x_t, x_{t+1}\}} \\ \beta_t &= x_t \\ \delta_t &= x_t \cdot \frac{\max\{x_{t-1}, x_t, x_{t+1}\}}{\min\{x_{t-1}, x_t, x_{t+1}\}}\end{aligned} \tag{4-3}$$

この方法では、変動の大きな期ではファジィデータの幅が大きく同定される。

こうして得られたファジィ時系列は、右上がりの直線的な傾向変動と季節変動を持つことが分かった。通常の時系列分析では傾向変動や季節変動を取り除くことにより定常な系列に変換することができるが、ファジィ時系列では中心の値と幅の値がそれぞれ傾向変動や季節変動を持つということがあり得る。このばあい、データをどのように変換してファジィ時系列の分析を進めるかということについては様々な方法をとることが考えられ、今後の研究の中で確立してゆかなければならない課題となっている。

ここでは連続する傾向変動のみを除去してモデル化に用いることとした。傾向変動を除去せずにファジィ自己回帰モデルを導出すると、自己回帰のパラメータが 1 よりも大きくなるということが十分考えられる。前述の通り、これは予測に関して非常に不都合な性質であるから、傾向変動の除去は最低限必要である。傾向変動の除去では、X_t のパラメータ β_t により一階差分をとり、これを∇X_tとする。

$$\nabla X_t = (\alpha_t - \beta_{t-1}, \beta_t - \beta_{t-1}, \delta_t - \beta_{t-1}) \tag{4-4}$$

図 4-1 に示すとおり、ファジィ時系列はほぼ水平な推移を示すようになったが、季節変動は依然として残っている。

このファジィ時系列に対し、次式のモデルを考え、パラメータを推定することにする。

$$\nabla \tilde{X}_t = \phi_1 \nabla X_{t-1} + \phi_{12} \nabla X_{t-12} + U \qquad (4\text{-}5)$$

$$\nabla X_t \subseteq \nabla \tilde{X}_t \qquad (4\text{-}6)$$

季節変動を持つため、モデルには12ヶ月前の要因を含めた。

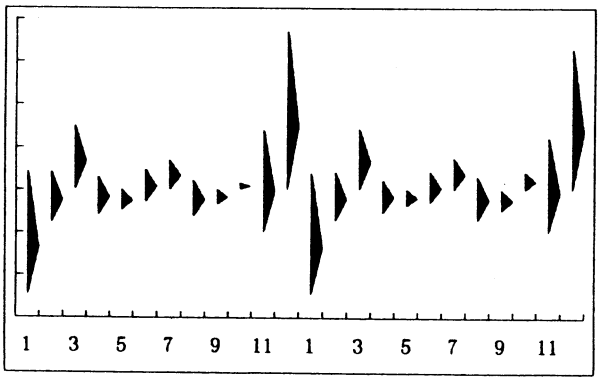


図 4-1 ファジィ時系列∇X_t

推定の結果、次のようにパラメータが決定された。

$$\nabla \tilde{X}_t = 0.037 \nabla X_{t-1} + 1.056 \nabla X_{t-12} + (-27.702, -20.944, 19.120, 43.919) \qquad (4\text{-}7)$$

モデルの当てはまりの様子を図 4-2 に示す。合計4本の太い点線と細い点線によって、推定台形型ファジィ数の各パラメータを示している。

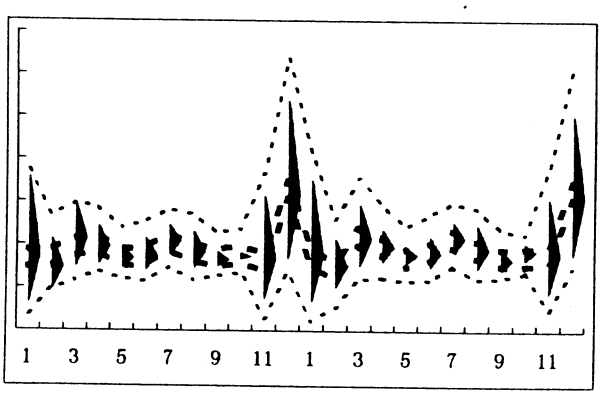


図 4-2 モデルによる当てはまり

このモデルにより1年間にわたる予測も行った。パラメータを更新しない逐次予測である。この様子を図4-3に示す。

5.まとめ

本論では、ファジィ自己回帰モデルについて概要を示した。本手法が、ファジィ時系列の簡潔な記述を目的とすることや、パラメータの導出、予測の方法の他、実データに対する適用に至るまでを述べた。

人間の意思決定に直接影響を受けるであろう何らかの計画量をファジィデータとして分析するということは、意思決定の過程そのものをモデル化できるという点で興味深いものであると考えられる。このような分析が意味を持つためには、観測されることのないファジィデータをどのように評価するかということと、そのファジィデータをどのように分析するかということの2点での考察が深められる必要がある。

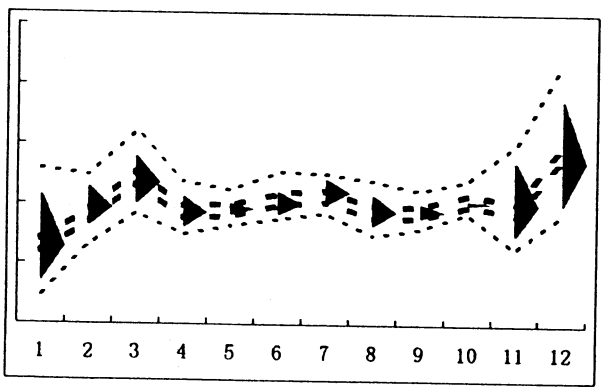


図 4-3 モデルによる予測(1992 年)

参考文献

[1] K.Ozawa, T.Watanabe, M.Kanke: Forecasting Fuzzy Time Series with Fuzzy AR Model: Proceeding of ICC&IE'96, Vol.1, pp.105-108(1996)

[2] 和多田淳三, 田中英夫, 横山宏, 浅居喜代治:「ファジィ時系列モデルとその予測問題への応用」日本経営工学会誌 Vol.34, No.3(1983)

連絡先

〒194-02 東京都町田市相原町 4342
法政大学経済学部　　小沢 和浩
TEL:0427-83-2534, FAX:0427-83-2611
E-mail: kozawa@mt.tama.hosei.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THC2-2

データの持つ特性を活かしたファジィ回帰モデルの同定法

Identification of Fuzzy regression model by using qualities of data sets

田島博之
Hiroyuki Tajima

創価大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering,Soka University

Abstract: The studies of fuzzy regression model was researched by Prof.H.Tanaka and others for the first time. Fuzzy regression models of usual type were proposed from a point of view as an application of regression analysis with interval model. Fuzzy regression models are considered to be suitable for analyzing data containing various vagueness in contrast with the regression model of the least square method.The present paper gives several fuzzy regression models introduced by new approaches.If section estimated from fuzzy regression model show fuzzy number, a mean of its center value is so important .Accordingly the author proposes new objective functions derived from the fundamental concept of least square method .Consequently new fuzzy regression model was possible to estimated realistic fuzzy number.

1. はじめに

「ファジィ回帰モデル」は80年代から大阪大学の田中英夫教授を中心とするグループによって発案されてきた。現在までに区間回帰分析法を応用した幾つかのタイプのファジィ回帰モデル同定問題が定義され、様々な事例研究もされている。[1]~[6] ファジィ回帰モデルによる分析は、従属変数に視覚、味覚、聴覚等の感覚また、意思決定のような人間の思考が絡むような状況を表したデータが実数値あるいはファジィ数値として与えられた場合に有効である。独立変数がファジィ数であるような場合のファジィ回帰モデルの研究[7]~[10]もされているが、本研究は現在、最も良く研究されている独立変数が実数値として与えられる場合について考えてゆく。これらの曖昧さを多分に含んだ独立変数データを分析するうえで、ファジィ回帰モデルはそのデータをよく表現することができる。従来の最小二乗推定法において、データとモデルの予測値の差は測定誤差として考えられ、その値は正規分布に従うと仮定されていたが、このファジィ回帰モデルにおいてはモデルの表現する幅自体に重要な意味を持たせている。曖昧さとは本来その要因が未知という意味と、その要因があまりにも複雑な関係からなるために特定するのが難しいという意味がある。どちらの場合においても、ファジィ回帰モデルはデータに内在的に含まれる、未知の要因を明らかにすることなくモデルに表現することができる。

区間回帰モデルの応用であるファジィ回帰モデルは全てのデータを包括したモデルを同定する所に特徴があり、その点は最小二乗推定法の概念とは異なる。そこで本稿では、従来の区間回帰モデルと最小二乗推定法の両方の概念を導入した新しいタイプのファジィ回帰モデル同定法を提案する。これは、従来の実数データに対する同定問題よりも推定するファジィモデルの中心値の持つ意味を強くするという点においてデータの特性を活かしたモデル同定といえる。

2. 従来型モデル同定法の問題点

ここでは最も基本的な従来型のファジィ回帰モデル同定問題を紹介する。詳細の定義は文献[4]参照
なお、本論で使用するデータを以下に与える。

$$(\mathbf{x}_i, y_i) = \left((x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in}), y_i\right) \tag{1}$$

$$i = 1, 2, \cdots, m$$

従来型の同定問題（Problem1）

目的関数：

$$\min \sum_{i=1}^{m} e(\mathbf{x}_i) \tag{2}$$

制約条件：

$$a(\mathbf{x}_i)-(1-\alpha)e(\mathbf{x}_i)\le y_i \quad (3)$$

$$a(\mathbf{x}_i)+(1-\alpha)e(\mathbf{x}_i)\ge y_i \quad (4)$$

$$i=1,2,\cdots,m$$

$$e_j\ge 0\ ,\ j=1,2,\cdots,n \quad (5)$$

決定係数：

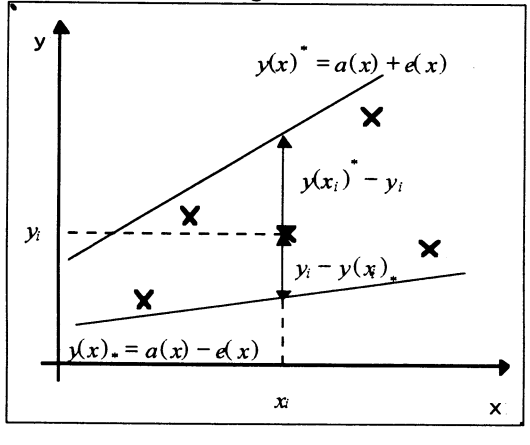
$$a_j,e_j\ ,\ j=1,2,\cdots,n \quad (6)$$

上に示す従来型のモデル同定法は同定されたモデルが、その同定される際に使用したデータをそのモデルの端に追いやってしまう場合がある。
この問題は、y_iあるいは $\tilde{Y}_i$ がモデル同定問題の目的関数に関与していないことからも明らかであるように、従来のモデルが区間回帰モデルの概念をそのまま応用させていることに原因がある。

従来型のモデルがファジィ数を予測するのであるならば、やはりそのモデルの中心を表す関数は重要な意味を持たなければならないと考える。そこで、与えられたデータセットの従属変数値をモデル同定の際にもっと活用することを考えたい。

3　実数データに対する新たな同定問題

Figure1



実数データに対するファジィ回帰モデルの同定問題を新たな最小化基準の導入により定義する。
以下に新たな最小化基準を定義するが、その基本概念を単回帰モデルを例に説明する。同定するモデルの上辺、下辺をそれぞれ次のように定義する。

$$y(x)^* = a(x)+e(x) \quad (7)$$

$$y(x)_* = a(x)-e(x) \quad (8)$$

Figure1 のように同定するファジィ回帰モデルは与えられた全てのデータがそのモデルに包括されるような制約条件のもと、各データ点からモデルの上辺までの距離の二乗と下辺までの距離の二乗を加えた値の総和を最小にするような最小化基準を定義する。すなわち、

$$\sum_{i=1}^{m}\left\{y(x_i)^*-y_i\right\}^2+\sum_{i=1}^{m}\left\{y_i-y(x_i)_*\right\}^2$$

$$=\sum_{i=1}^{m}\left\{a(x_i)+e(x_i)-y_i\right\}^2+\sum_{i=1}^{m}\left\{a(x_i)-e(x_i)-y_i\right\}^2$$

$$=2\sum_{i=1}^{m}\left[\left\{y_i-a(x_i)\right\}^2+e(x_i)^2\right] \quad (9)$$

と計算される。以上の考察から、独立変数xが複数存在するような重回帰モデルにおいても式（9）を拡張させた形で最小化基準を定義し、これを目的関数とした新たなモデル同定問題を次に定義する。

ファジィ回帰モデル同定問題（Problem2）

目的関数：

$$\min\sum_{i=1}^{m}\left[\left\{y_i-a(\mathbf{x}_i)\right\}^2+e(\mathbf{x}_i)^2\right] \quad (10)$$

制約条件：

$$a(\mathbf{x}_i)-e(\mathbf{x}_i)\le y_i \quad (11)$$

$$a(\mathbf{x}_i)+e(\mathbf{x}_i)\ge y_i \quad (12)$$

$$i=1,2,\cdots,m$$

$$e_j\ge 0\ ,\ j=1,2,\cdots,n \quad (13)$$

決定係数：

$$a_j,e_j\ ,\ j=1,2,\cdots,n \quad (14)$$

次のProblem3では、まず始めに同定するファジィ回帰モデルの中心を表す関数$a(\mathbf{x})$を従来の最小二乗推定法によって定め、その後に全てのデータを包括するような制約条件のもとその曖昧さの幅の二乗和を最小にする$e(\mathbf{x})$を決定する。

ファジィ回帰モデル同定問題（Problem3）

First phase
目的関数：

$$\min \sum_{i=1}^{m} \{y_i - a(x_i)\}^2 \qquad (15)$$

決定係数：

$$a_j\ ,\ j = 1,2,\cdots,n \qquad (16)$$

ここで決定された関数$a(\mathbf{x})$を$\hat{a}(\mathbf{x})$とする。

Second phase
目的関数：

$$\min \sum_{i=1}^{m} e(\mathbf{x}_i)^2 \qquad (17)$$

制約条件：

$$\hat{a}(\mathbf{x}_i) - e(\mathbf{x}_i) \le y_i \qquad (18)$$
$$\hat{a}(\mathbf{x}_i) + e(\mathbf{x}_i) \ge y_i \qquad (19)$$
$$i = 1,2,\cdots,m$$

$$e_j \ge 0\ ,\ j = 1,2,\cdots,n \qquad (20)$$

決定係数：

$$e_j\ ,\ j = 1,2,\cdots,n \qquad (21)$$

本稿における新たに定義したモデル同定問題は同定されたモデルから予想されるファジィ数の中心の持つ意味が強いという特徴がある。特にProblem3では、最小二乗推定法を利用するためファジィ回帰モデルの中心を表す関数がデータに敏感に左右される。本節で提案したProblem2，Problem3はいずれもデータの変化がモデル同定に与える影響を従来型のProblem1よりも大きく含んでいる点でデータの特性を活かしているといえる。

4. 数値実験による比較

ここでは、独立変数、従属変数がともに実数データとして与えられた場合について、従来型のProblem1により同定されたファジィ回帰モデルと新たに提案したProblem2およびProblem3により同定したファジィ回帰モデルを数値実験の結果から比較する。

データセットA

x	0.00	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	90.0	110	130
y	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	2.00	7.43	7.71	8.00

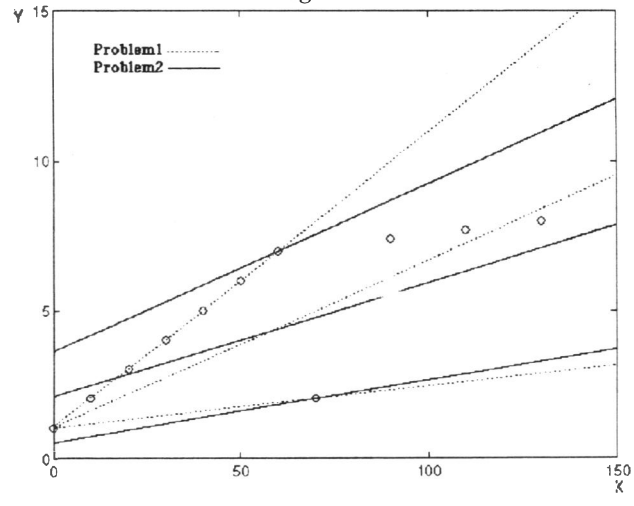
データセットAに対して得られた計算結果を以下の表にまとめる

データセットAの計算結果（表4.2）

	a0	a1	e0	e1
prob.1	1.00	5.71E-02	0.00	4.28E-02
prob.2	2.08	3.86E-02	1.57	1.73E-02
prob.3	2.04	5.04E-02	1.53	2.90E-02

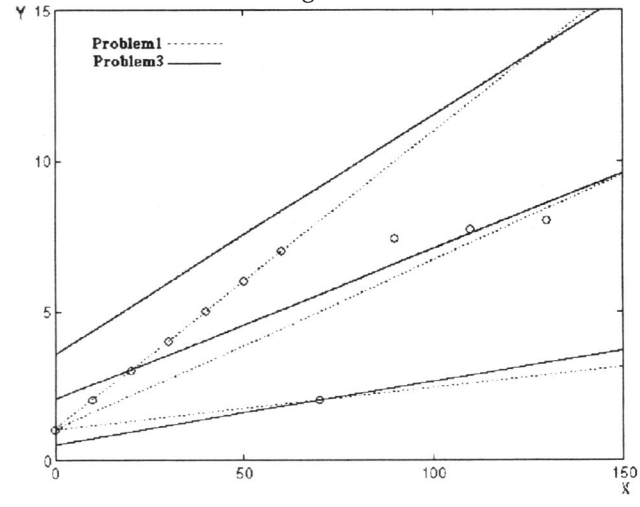
ここで、計算結果をFigure2に表す。

Figure2



Problem1を解くことによって同定されるファジィ回帰モデルはFigure2で表されるように実際に与えられたデータの多くを、そのモデルの端に追いやった形になってしまうことがある。

Figure3



Problem2, Problem3では、それぞれの最小化基準にデータ点の従属変数の値を取り入れているため、

中心を表す直線がデータのある方向へ近づいていることがわかる。これは、同定されたファジィ回帰モデルの中心値の持つ意味が従来型よりも強いということを顕著に表していると言える。
次にデータセットAと同じ凸多角形に包括されるデータセットBを与えその計算結果を比較する。

データセットB

x	0.00	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	90.0	110	130
y	1.00	1.14	1.29	1.43	1.57	1.71	7.00	2.00	4.00	6.00	8.00

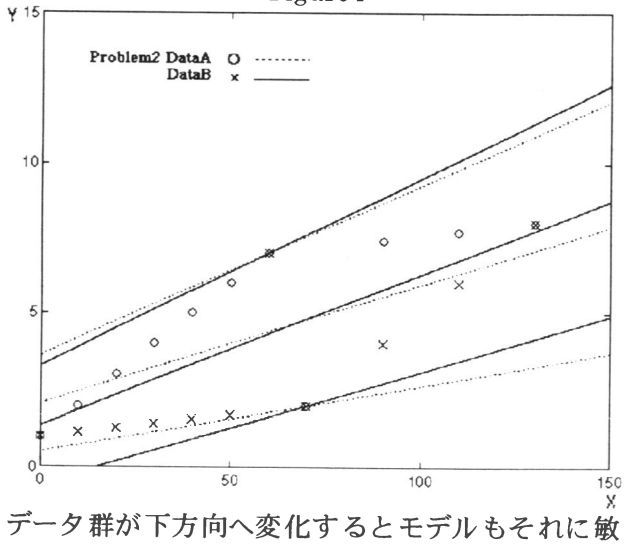
データセットBに対して得られた計算結果を以下の表にまとめる

データBの計算結果

	a0	a1	e0	e1
Prob.1	1.00	5.71E-02	0.00	4.28E-02
Prob.2	1.36	4.92E-02	1.90	1.30E-02
Prob.3	0.31	5.21E-02	2.96	1.02E-02

データA,Bいずれの場合もProblem1の解は同一である。データA,Bに対するProbrem2の結果をグラフにしたものを次に表す。

Figure4



データ群が下方向へ変化するとモデルもそれに敏感に反応して同定されていることが良くわかる。これは、Problem3でも同様のことが言える。

5. まとめ

本稿において新たに提案したファジィ回帰モデル同定問題は、目的関数に最小二乗推定法の基本概念を導入することにより同定されるモデルの中心の関数に強い意味を持たせた。これによって、従来型のモデルによって予想されるファジィ数よりも、中心の意味が強いという点で現実的なファジィ数を予測することが可能になったといえる。
本稿では実数データが与えられた場合についてのファジィ回帰モデル同定法を提案したが、同様に従属変数のデータとしてファジィ数が与えられた場合にも同様に考えて、定式化することも考えられる。今後は本研究で提案したモデルを具体的な事例研究を行うことにより汎用性を確認したい。

参考文献

[1] 田中,和多田,林:ファジィ線形回帰分析の三つの定式化, 計測自動制御学会論文集,Vol.22,No.10, pp.1051-1057 (1986)
[2]石淵,田中,黄:作業時間解析におけるファジィ回帰手法の比較,システム制御情報学会論文誌,Vol.3,No.3,pp.90-92 (1990)
[3]田中,石淵,黄:類似度を導入したファジィ回帰分析による職員数モデル,日本経営工学会誌,Vol.41,No.2,pp.99-104 (1990)
[4]石淵:ファジィ回帰分析,日本ファジィ学会誌 Vol.4 , No.1 ,pp.52-60(1992)
[5]田中,小山,李:二次計画法による可能性回帰分析,第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.845-846 (1996)
[6]藪内,和多田:超楕円関数に基づくファジィロバスト回帰分析,Journal of the Operations Research Society of Japan,Vol.39,No4,pp.512-524(1996)
[7]Aivars Celmins : LEAST SQUARES MODEL FITTING TO FUZZY VECTOR DATA ,Fuzzy Sets and Systems,Vol.22,pp.245-269 (1987)
[8]A.Celmins :MULTIDIMENSIONAL LEAST-SQUARES FITTING OF FUZZY MODELS , Math Modelling, Vol.9,No9,pp.669-690 (1987)
[9]Phil Diamond: Fuzzy Least SquaresInformation Sciences Vol.46 pp.141-157 (1988)
[10]坂和,矢野:ファジィ入出力データに対する多目的ファジィ回帰分析,日本ファジィ学会誌,Vol.1,No.1,pp.107-116 (1989)

連絡先

〒192　東京都八王子市丹木町1-236
創価大学大学院工学研究科情報システム学専攻
博士課程一年　古川長太研究室所属
田島 博之
E-mail　htajima@t.soka.ac.jp

THC2-3

干渉するファジィ時系列の予測
Forecasting for Fuzzy Time Series with interference

菅家 正康*, 小沢 和浩**, 渡邊 匠**
Masayasu Kanke*, Kazuhiro Ozawa** and Takumi Watanabe**

*(株)明電舎 太田工場 動力計測部, ** 法政大学経済学部
*Ohta Factory, Meidensha Corporation
**Faculty of Economics, Hosei University

Abstract - We propose a interference model includes uncertainly or fuzziness. We called it fuzzy interference model. We express the fuzzy data by membership function of the triangular symmetric type, from a practical viewpoint. By using a fuzzy auto-regressive (AR) model that was defined as a fuzzy time series model, we carried out the fuzzy interference model. Finally, we show the result of the estimation and the prediction of the multivariate fuzzy time series model which is given by the power demand peak and the maximum temperature of the everyday.

1.はじめに

本稿では複数の時系列に、曖昧さを含みかつ互いに干渉する複数のファジィ時系列データに関するモデルの提案を行う。ここでは、実用的観点からファジィ時系列として観測された対称三角型ファジィ時系列データの干渉系を例に取り、そのモデル化を行う。モデル化の手法としてはファジィ時系列モデルとして定義されたファジィ自己回帰(AR)モデル[1]を用いることにする。

最後に本手法を毎日の最大電力量と最高気温を例に取り、その多変量ファジィ時系列モデルを推定し、予測を行った結果について述べる。

2.多変量ファジィ AR モデルの定義

1変量ファジィ時系列モデルの定義を以下に示す。

$$\tilde{X}_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \ldots + \phi_n X_{t-n} + U \qquad (1)$$

ここで ϕ は実数である。X_t は時刻 t におけるファジィ数を表し、U はモデルに固有のファジィ値で、$X_{t-1}, X_{t-2}, \ldots, X_{t-n}$ では説明しきれない部分を吸収する項である。

(1)式を m 次多変量ファジィ時系列モデルに拡張したものを以下に示す。

$$\tilde{\mathbf{X}}_t = \Phi_1 \mathbf{X}_{t-1} + \Phi_2 \mathbf{X}_{t-2} + \ldots + \Phi_n \mathbf{X}_{t-n} + \mathbf{U} \qquad (2)$$

$$\mathbf{X}_t = \begin{bmatrix} X_{1t} \\ X_{2t} \\ \cdots \\ X_{mt} \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \cdots \\ U_m \end{bmatrix}, \Phi_n = \begin{bmatrix} \phi_{11n} & \phi_{12n} & \cdots & \phi_{1mn} \\ \phi_{21n} & \phi_{22n} & \cdots & \phi_{2mn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \phi_{m1n} & \phi_{2mn} & \cdots & \phi_{mmn} \end{bmatrix}$$

ここで与えた多変量時系列モデルは観測された時系列を包含するようにモデル化を行う。

$$\mathbf{X}_t \subseteq \tilde{\mathbf{X}}_t \qquad (3)$$

ファジィ時系列やその推定値は、簡単のためすべて対称三角型ファジィ数により記述する。

$$X_t = (a_t, c_t), c_t \geq 0 \qquad (4)$$

$$U = (u_a, u_c), u_c \geq 0 \qquad (5)$$

a_t はファジィ数 X_t の中心を表し、c_t はあいまいさを示す数値である。U も X_t と同様に中心 u_a とあいまいさ u_c で表す。

対称三角型ファジィ時系列データの包含条件は、(3)式から導かれる $\tilde{a}_t = a_t$ を満たさなければならないが、現実的には不可能であるので、適合度 h における包含条件を適用する。

$$[X_t]_h \subseteq [\tilde{X}_t]_h \qquad (6)$$

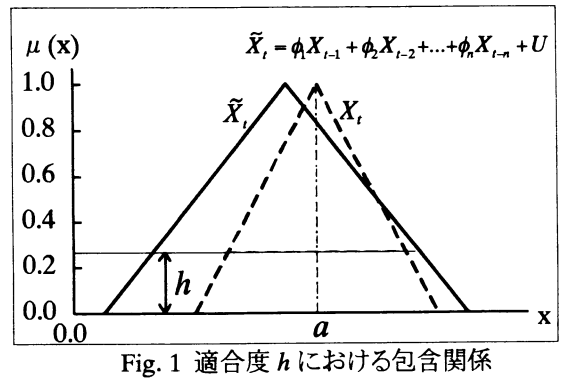


Fig. 1 適合度 h における包含関係

3.多変量ファジィ AR モデルの同定とパラメータ推定

従来の統計的手法を用いた自己回帰モデルの同定では、モデルの設計者が経験や自己相関等から、季節変動、トレンドを取り除く処理を行った後、AR モデルの次数を決定していた。一方、ファジィ AR モデルではモデル推定時の制約条件に明示することにより設計者の持っている多くの経験等を直接モデルに反映させられる特徴を持つ。

ここでは、簡単のため 1 次 2 変量のモデルの推定方法を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} \tilde{X}_{1t} \\ \tilde{X}_{2t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1,t-1} \\ X_{2,t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \qquad (7)$$

となり、展開すると、

$$(\tilde{a}_{1t},\tilde{c}_{1t}) = \phi_{11}(a_{1,t-1},c_{1,t-1}) + \phi_{12}(a_{2,t-1},c_{2,t-1}) + U_1 \quad (8)$$

$$(\tilde{a}_{2t},\tilde{c}_{2t}) = \phi_{21}(a_{1,t-1},c_{1,t-1}) + \phi_{22}(a_{2,t-1},c_{2,t-1}) + U_2 \quad (9)$$

となる。ここでファジィ時系列データの h レベル集合に関して記述すると、

$$\left[X_{1t}\right]_{h_1} = \left[(a_{1t},c_{1t})\right]_{h_1} = \left\langle a_{1t},(1-h_1)c_{1t}\right\rangle, h_1 \in [0,1] \quad (10)$$

$$\left[X_{2t}\right]_{h_2} = \left[(a_{2t},c_{2t})\right]_{h_2} = \left\langle a_{2t},(1-h_2)c_{2t}\right\rangle, h_2 \in [0,1] \quad (11)$$

となる。

ここで、(6)式の包含条件を満たしながらあいまいさの総和を最小にするため(12)式を目的関数に、各パラメータを求めることがモデルの推定手法である。

$$\min.\left(\sum_{i=k+1}^{n}(\tilde{c}_{1i}+\tilde{c}_{2i})\right) \quad (12)$$

4.ファジィ AR モデルへの適用

ここでは、既知のパラメータを持つシステムに±0.05 のランダム数を付加した時系列を発生させ、その実数値データから作られたファジィ時系列に対し3の手法を適用し、パラメータの推定を行う。最後に求めたモデルの有効性を示す。既知のパラメータを持つシステムを以下に与える。

$$\mathbf{X}_t = \Phi_1 \mathbf{X}_{t-1}$$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} -0.8 & 0.2 \\ 0.3 & -0.6 \end{bmatrix}, \mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} 0.9 \\ 0.8 \end{bmatrix} \quad (13)$$

実数値データからのファジィ化には和多田らの方法 [2]があるが、本稿ではファジィ時系列データ X_{kt} は原データ x_{kt} から次のように得た。

$$X_{kt} = \left(x_{kt}, \frac{\left|x_{k,t-1}-x_{kt}\right| + \left|x_{k,t+1}-x_{kt}\right|}{2}\right), k = 1,2 \quad (14)$$

この方法によるファジィ化では、時系列データが激しく変動する時点では可能性分布を広く推測し、変動幅の小さな時点のファジィ時系列データの可能性分布を狭く推測する。また、x_{kt} は X_{kt} の可能性の尤度最大の実現値と考える。

また、ここでは適合度を $h_1 = 0.5, h_2 = 0.5$ とし、(12)式を目的関数とし、(6)式の制約条件のもとでファジィ AR のパラメータを求めた結果を以下に示す。

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} -0.66 & 0.50 \\ 0.31 & -0.69 \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} (0.01, 0.13) \\ (0.00, 0.14) \end{bmatrix}$$

この結果からパラメータ推定の効果が確認できる。

5.ファジィ時系列の予測への適用

最後に、ここまで述べてきた方法を干渉系と考えられる気温と最大電力量のモデリングに適用し、得られたパラメータで予測を行う。

実データである気温と電力量の元データを先で述べた方法でファジィ時系列データにする。その時系列はトレンドと季節(週)変動はあらかじめ除去する。そして、ここでも、モデルの構造を 1 次 2 変量とした(7)式に適用し、最高気温を X_1、最大電力量は X_2 としてモデリングを行う。また、ここでも適合度を $h_1 = 0.5, h_2 = 0.5$ とし、(12)式を目的関数とし、(6)式を制約条件とし、パラメータ推定を行った。

ここで利用したデータは 1992 年 7 月 1 日～8 月 31 の東京の最高気温と東京電力の最大電力量で、7 月 1 日～8 月 23 日までのデータでパラメータ推定を行い、予測の前日までのデータを逐次用い 8 月 24 日～8 月 30 日の予測を行った。

パラメータを求めた結果を以下に示す。

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 1.47 & 0.00 \\ 460 & 0.77 \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} (-0.44, 12.6) \\ (-1390, 1960) \end{bmatrix}$$

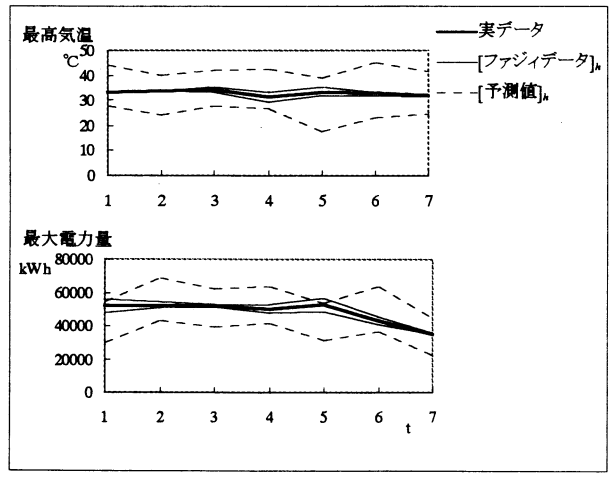


Fig. 2 最高気温と最大電力量の予測

求められたパラメータから最高気温から最大電力量への干渉が認められる。逆に最大電力量から最高気温に影響を与えることは考えられず、ϕ_{12} の項がほぼ 0 となっていることがそれを示している。

6.まとめ

複数の時系列の中にファジィ時系列が含まれる時系列データを多変量ファジィ AR モデルで示し、最大電力量と気温のモデリングと予測に適用した。

参考文献

[1] Kazuhiro Ozawa, Takumi Watanabe and Masayasu Kanke: Forecasting Fuzzy Time Series with Fuzzy AR Model, Proceeding of ICC&IE'96 (1996)

[2] 和多田, 田中, 横山, 浅居, ファジィ時系列モデルとその予測問題への応用, 日本経営工学会誌 Vol.34, No.3, pp180-186 (1983)

連絡先

〒373 群馬県太田市西新町 127 番地

㈱明電舎 太田工場 菅家 正康

TEL : 0276-32-7781 FAX : 0276-32-7711

E-mail : PFF02061@niftyserve.or.jp

THC2-4

重複観測データ概念を用いるデータ解析

Data Analysis by Using the Concept of Overlapping Observation Data

○古殿　幸雄，西本　由紀恵，浅居　喜代治
Yukio KODONO, Yukie Nishimoto and Kiyoji ASAI

福山平成大学　経営学部　経営情報学科
Department of Management Infomation, Faculty of Management, Fukuyama Heisei University

Abstract: It was proposed several methods of a statistical treatment of fuzzy observation data. To using Zadeh's probability of fuzzy events, their methods are defined by fuzzy observation data that are obtained by fuzzy observations involving human vagueness. Recently, it has been proposed a new method by using overlapping-interval functions instead of membership functions. In this paper, an application to a data analysis problem is attempted by using the concept of overlapping observation data .

1．まえがき

これまでに、人間の主観的なあいまいさを伴うデータをファジィ観測データとして、ザデーが定義したファジィ事象の確率概念 [1] を用いることで、ファジィ観測データの統計的処理を行う方法が提案されている [2]。そして、これらの方法をさらに発展させる方向で、重複観測データの概念が提案された [3]。この方法は、従来から提案されているファジィ観測データの統計処理法において用いられるメンバシップ関数の代わりに、(0,1] 区間上の実数値で定義される重複区間関数 [4] を用いることで、より簡便なファジィ観測データの統計的処理を行うことができる。

本研究では、この重複観測データ概念を用いることで、実際のデータ解析問題への応用を試みる。特に、実際に得られたデータの持つ意味から、重複観測データとして解釈することでの適用を検討している。

2．重複観測データからのファジィ統計処理

重複の目安 $\alpha \in (0,1]$ によって定まる、区間 $H_{\alpha i}=[x_i-h/2\ \alpha\ ,\ x_i+h/2\ \alpha\ ]$ 上の重複区間関数 $T(x_i)$ を次のように定義する。

$$T(x_i)=\begin{cases}\alpha\ , & x_i \in \left[x_i-\dfrac{h}{2\alpha},x_i+\dfrac{h}{2\alpha}\right] \\ 0\ , & otherwise\end{cases} \qquad (1)$$

この重複区間関数における重複の目安 α を定めることで、ファジィ観測におけるメンバシップ関数を決めることと同等の効果が得られる [4]。

この重複区間関数を用いて、ファジィ統計処理を行うために、重複区間モーメントを導出しておく。

まず、ファジィ観測におけるファジィ観測データのファジィモーメント d_r は、次式で定義される [2]。

$$d_r=\int_{x_i-h}^{x_i+h} \chi_i(x)(x-x_i)^r dx \qquad (2)$$

そこで、このメンバシップ関数の代わりに、重複区間関数を用いて、重複区間モーメント g_r を次式で定義する [4]。

$$g_r=\int_{x_i-h/2\alpha}^{x_i+h/2\alpha} T_i(x)(x-x_i)^r dx \qquad (3)$$

この式を展開して、次式を得る。

（r が奇数次の時）　$g_r=0$

（r が偶数次の時）　$g_r=\dfrac{h^{r+1}}{(r+1)(2\alpha)^r}$ 　(4)

この重複区間モーメントを用いることにより、ファジィ統計処理が、メンバシップ関数の代わりに、重複の目安 α を用いることで可能となる。すなわち、(0,1]上の実数値を任意に定めることにより、どのような形状のメンバシップ関数にも対応するファジィ統計処理が可能となる。

例えば、ファジィモーメントの補正公式 [2] に代わる補正公式は、次式のように表すことができる。

$$\bar{m}_r=\sum_{i=0}^{[r/2]}\binom{r}{2i}\frac{g_{2i}}{g_0}m_{r-2i} \qquad (5)$$

3．２種類のタッチタイプ練習ソフトの比較

ここでは、２種類のタイピング練習ソフトを用いて、各ソフトの学習効果を比較するデータ解析を行う。タイピング練習ソフトＭＴ（以下ＭＴ）は、ホームポジション（以下ＨＰ）から、ＨＰの上１段、ＨＰの下１段、ＨＰ＋上１段、ＨＰ＋下１段などを順に練習することで、タッチタイプのマスターを目指すソフトウェアである。一方タイピング練習ソフトＰＴ（以下ＰＴ）は、人差し指の担当するキーの入力、中指の担当するキーの入力といったように、最初の練習から８つの指を動かさなければならないＭＴに比べて、最初の練習は２つの指（右手と左手の人差し指）の移動からはじめることで、タッチタイプのマスターを目指すソフトウェアである。また、ＰＴには、リズミカルなキー入力が行えるように、キー入力と同時に音が鳴るようになっている。

これら２つのソフトウェアをタイピングの初心者に対して適用し、タイプ入力速度のデータを収集した。このとき、ＭＴを用いてタイピングの練習をす

るグループをAクラスとし、PTを用いてタイピングの練習をするグループをBクラスとする。これら両クラスで、1分間のキー入力の速度を、同じ条件の下で収集する。

A，Bクラスともに、練習時間30分を3回（週に1回）行った後、キーの打鍵数を測定するテストを行った。このテストは、画面上にランダムに表示される300字程度の英単語を、1分間の間に順番にどれだけ入力できるかを測定する。1回（1分間）のテスト中、画面には、入力数、打鍵数、誤打数が表示される。ここで、入力数＝打鍵数－誤打数であり、何回か行われるテスト中に最高入力数のみが最終的に記録される。このテストを、15分間の時間を与えて行い、テスト中の最高入力数を報告させる。

4．重複観測データ概念を用いるデータ解析

このテストによって得られた最高入力数のデータの一部を表1のMAX値(1)に示す。また、表1のMAX値(2)は、翌週に行った15分間テストの最高入力数のデータの一部である（以下(1)、(2)は各々1回目、2回目のデータを表すものとする）。

表1　最高入力数

Aクラス

No.	073	075	076	077	079	080	081
MAX値(1)	28	69	69	86	58	54	72
MAX値(2)	32	93	80	92	69	62	97

Bクラス

No.	109	112	113	114	115	116	117
MAX値(1)	87	94	86	65	82	79	55
MAX値(2)	121	114	99	63	79	79	60

さて、この表のデータから統計的手法を用いてMTとPTの両ソフトについて考察すればよいのだが、テスト実施中に、次のような疑問点が生じた。まず、タイピングテストということで、誰もが最高入力数を少しでも上げたいと考えており、入力しづらい英単語が出ると入力途中でも、画面上のテストをパスして、次のテストへ移る（英単語はランダムであるので、テスト中に同じ英単語の画面はでない）。次に、どこかでつまづいてしまうと、そのテストをパスして、すぐに次のテストへ移る。このようにして最高入力数を記録するのは、本来コンスタントに入力されるであろう速度とは少し異なる感じがする。そして、記録として残される入力数は、誤打数を引いているため（テストとして誤打数を引かないと、デタラメにタイプする者がでてくる）、今回の最高入力数よりも、高い値の出る可能性も考えられる。

したがって、最高入力数で統計的に処理するよりも、最高入力数よりも小さい値が、本来の被験者の平均的な入力数であると解釈して、その値を中心に、最高入力数が記録された事実も踏まえて、最高入力数を覆うような幅を持たせてデータ処理を行うことを考えた。

以上のような考えにより、表1のデータを表2のように変更することで処理を行うことにした。そして、この表2のデータを重複観測データとして処理することにする。

表2　重複観測データ

Aクラス

No.	073	075	076	077	079	080	081
MAX値(1)	20	60	60	80	50	50	70
MAX値(2)	30	90	80	90	60	60	90

Bクラス

No.	109	112	113	114	115	116	117
MAX値(1)	80	90	80	60	80	70	50
MAX値(2)	120	110	90	60	70	70	60

以上のデータから分散比を比較した結果を表3に、平均値の差を比較した結果を表4に示す。なお、表中のADは、表1の実際のデータを用いた場合を、ODは、表2の重複観測データを用いた場合を表している。また、FはF分布を、tはt分布を意味し、()内の%値を示している。

表3　分散比

	AD	OD	F(2.5%)	F(5%)
分散比(1)	1.6184	1.5621	2.14	1.889
分散比(2)	1.7157	1.8499		

表4　平均値の差

	AD	OD	t(5%)	t(1%)
平均値の差(1)	5.4554	5.2392	2.004	2.670
平均値の差(2)	4.6296	4.3847		

今回の結果からは、MTとPT（AクラスとBクラス）の分散や平均値には差がないと考えられるが、表3の2回目のテストの重複観測データの分散比では、F分布の5%点に近い値になっており、今後も検討する価値があるように考えられる。

最後に、本研究を進めるに当たり、有益なご助言をいただいた本学経営情報学科の牧野純先生に深甚な謝意を表する。

参考文献

[1] L.A.Zadeh : Probability Measures of Fuzzy Events, J.Math Anal. Appl., Vol.28, 421/427(1968)

[2] 奥田、古殿、浅居：ファジィ観測データに基づく統計的推定、計測自動制御学会論文集、Vol.26, No.5, 564/571(1990)

[3] 古殿、浅居、小西、奥田：ファジィ統計処理における重複観測データの概念、第12回ファジィシステムシンポジウム、601/604(1996)

[4] 古殿：重複区間関数を用いるファジィ観測データの統計的推定、福山平成大学経営学部紀要－経営情報研究－、Vol.1, 55/71(1996)

［問い合わせ先］

〒720　広島県福山市御幸町上岩成

福山平成大学　経営学部　経営情報学科　古殿 幸雄

TEL:0849-72-5001 ex.2603, FAX:0849-72-7771

E-mail:GEG06004@niftyserve.or.jp

THC2-5

AICによるファジィ区間データに基づく独立性の分析

Analysis of Independency based on Fuzzy Interval Data using AIC

小西 幹彦* 奥田 徹示* 浅居 喜代治**
Mikihiko Konishi Tetsuji Okuda Kiyoji Asai
* 大阪工業大学 ** 福山平成大学
Osaka Institute of Technology Fukuyama Heisei Univarsity

Abstract - In some systems which involve human beings, there is a case that it is difficult to observe the exact data. Then, seeing these data which including human vagueness as fuzzy interval data, some methods to process fuzzy interval data using usual statistical method easily have been proposed. In this paper, using the method to select a statistical model using AIC from fuzzy interval data, we apply the method to the selection problem of 2-dimensional statistical model. And we try our method to analysis of independency of observed fuzzy interval data.

1 はじめに

経営システムや社会システムなど人間のかかわるシステムにおいて，正確にデータを観測することが難しく，観測者の主観的なあいまいさを含むデータとして得られる場合が考えられる．そこで，このようなデータをファジィ区間データとして取り扱い，一般に利用されている統計的手法を用いて簡便に処理する方法が提案されている ([1] など)．また，この処理方法を応用して，AIC を用いてファジィ区間データから統計的モデルを選択するための処理方法が提案されている [2]．本研究では，この処理方法を利用して 2 次元モデルの選択をファジィ区間データにより行う．しかし，これらの処理方法では，簡便な計算処理を実現するために近似的な処理を用いているため，推定値などの精度が問題となる．そこで，本研究において必要となる最尤推定値，ファジィ区間データの出現確率及び AIC の推定精度について検討する．そして，本手法を 2 次元ファジィ区間データの独立性の分析に応用する．

2 ファジィ区間データ

正確なデータを観測することが難しく，ある 1 点 x_i を中心として，となり合う区間との境界が明確に示されない区間 $H_i = [x_i - h/2, x_i + h/2](x_{i+1} = x_i + h/2)$ 上で定義されるファジィ事象 χ_i として，データが観測される場合を考える．本研究では，χ_i をファジィ区間データとして取り扱い，区間 H_i をファジィ区間と呼ぶことにする．また，χ_i に対するメンバシップ関数として台形型メンバシップ関数

$$\chi(x) = \max\left\{0, 1 \wedge \left(-\frac{1}{2e}|x| + \frac{h}{8e} + \frac{1}{2}\right)\right\} \quad (1)$$

を想定する．ただし，このメンバシップ関数は $x = 0$ を中心とするファジィ区間データであり，一般のファジィ区間データに対するメンバシップ関数は $\chi_i(x) = \chi(x - x_i)$ で表される．また，e は台形の形状を表すパラメータで，$0 < e \leq h/4$ である．

このようなファジィ区間データを処理するためには，メンバシップ関数による演算が必要となり，非常に複雑な処理となる．そこで，ファジィ区間の中心値 x_i をファジィ区間データ χ_i の代表値として抽出し，この値を用いて簡便に処理する方法が提案され，[2] ではこの方法を用いて最尤推定が行われている．この代表値はただ 1 点のみを示す non-fuzzy なデータであり，通常の統計的手法を適用することが可能である．そこで，本研究では [2] と同様にして 2 次元モデルのパラメータの最尤推定を行い，AIC によりモデル選択を行う．

3 ファジィ区間データの独立性の分析

ファジィ区間データを集計する場合には，通常の区間データと同様に分割表を用いることができる．そして，分割表の分析の一つとして，2 つの変数間の相関を問題とする独立性の分析が行われる．このような場合，通常は χ^2 検定が用いられるが，ここでは情報量規準 AIC [4] を用いて，ファジィ区間データの分布モデルの選択問題として，独立性の分析を試みる．

まず，本研究ではファジィ区間データの背後にある確率分布として，2 次元正規分布モデル

$$f(x_1, x_2|\theta_1) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_1^2\sigma_2^2(1-\rho^2)}} \times \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left\{\frac{(x_1-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho\frac{(x_1-\mu_1)(x_2-\mu_2)}{\sqrt{\sigma_1^2\sigma_2^2}}\right.\right.$$

$$+\frac{(x_2-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\Big\}\Big],$$

$$\theta_1=\{\mu_1,\mu_2,\sigma_1^2,\sigma_2^2,\rho\} \tag{2}$$

を考え，このモデルを変数間に相関のある従属モデルとする．そして，相関のない独立モデルは$\rho=0$に固定した$f(x_1,x_2|\theta_0),\theta_0=\{\mu_1,\mu_2,\sigma_1^2,\sigma_2^2,0\}$となる．また，$(x_{1i},x_{2j})$を中心とするファジィ区間データ$(\chi_{1i},\chi_{2j})$の出現確率はZadehの定義[3]より

$$P_{ij}(\theta)=\int_{x_{1i}-h_1/2}^{x_{1i}+h_1/2}\int_{x_{2j}-h_2/2}^{x_{2j}+h_2/2}\chi_{1i}(x_1)\chi_{2j}(x_2)\times f(x_1,x_2|\theta)\,dx_1dx_2 \tag{3}$$

と表される．したがって，ファジィ区間データの分布が多項分布を用いて表されることから，対数尤度は

$$l(\theta)=C+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}n_{ij}\log P_{ij}(\theta) \tag{4}$$

となる．ただし，n_{ij}はファジィ区間データ(χ_{i1},χ_{2j})の観測度数を示し，

$$C=\log n!-\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\log n_{ij}! \tag{5}$$

としている．したがって，最尤推定値$\hat{\theta}$は式(4)を最大にするθとなる．しかし，解析的に最尤推定値を求めることは難しい．そこで，代表値を用いて近似的に求めることができる補正法[2]を用いれば，$\hat{\theta}=\theta^0+\Delta\theta$として求めることができる．ただし，$\theta^0$は代表値を通常のデータとして処理して得られる最尤推定値で，$\Delta\theta$は$\hat{\theta}$とθ^0の間の偏りを取り除く補正量となる．2次元正規分布モデルの場合，この補正量は

$$\begin{bmatrix}\Delta\mu_1\\ \Delta\mu_2\\ \Delta\sigma_1^2\\ \Delta\sigma_2^2\\ \Delta\rho\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ -\dfrac{d(2,0)}{d(0,0)}\\ -\dfrac{d(0,2)}{d(0,0)}\\ \dfrac{d(2,0)}{2d(0,0)}\dfrac{\rho^0}{(\sigma_1^0)^2}+\dfrac{d(0,2)}{2d(0,0)}\dfrac{\rho^0}{(\sigma_2^0)^2}\end{bmatrix} \tag{6}$$

となる．ただし，$d(r_1,r_2)$は

$$d(r_1,r_2)=\int_{x_{1i}-h_1/2}^{x_{1i}+h_1/2}\int_{x_{2j}-h_2/2}^{x_{2j}+h_2/2}\chi_{1i}(x_1)(x_1-x_{1i})^{r_1}\times\chi_{2j}(x_2)(x_2-x_{2j})^{r_2}\,dx_1dx_2 \tag{7}$$

で，x_1,x_2に対してそれぞれr_1,r_2次のF-モーメントを表している．

表 1: 処理方法

処理方法	N-R 法	補正法	代表値
最尤推定	Newton 法	補正法	通常の最尤推定
確率計算	数値積分	展開式	数値積分

次に，モデル選択の基準となる情報量規準AIC[4]

$$\mathrm{AIC}(\theta)=-2\times l(\hat{\theta})+2\times K(\theta) \tag{8}$$

を求める．ただし，$l(\hat{\theta})$は最大対数尤度で，式(4)において$\theta=\hat{\theta}$としたものである．また，$K(\theta)$はモデルに含まれるパラメータの数である．しかし，最大対数尤度を求めようとすれば，式(3)のファジィ区間データの出現確率が必要となり，複雑な積分計算により求めることになる．そこで，補正量を導出するときに導かれる，テイラー展開された確率分布を用いた近似的な確率

$$P_{ij}(\theta)=d(0,0)\cdot f(x_{1i},x_{2j}|\theta)+\frac{d(2,0)}{2}\cdot\frac{\partial^2 f(x_{1i},x_{2j}|\theta)}{\partial x_{1i}^2}+\frac{d(0,2)}{2}\cdot\frac{\partial^2 f(x_{1i},x_{2j}|\theta)}{\partial x_{2j}^2} \tag{9}$$

を用いれば，計算処理が容易になる．そして，独立モデルと従属モデルに対するAIC:$\mathrm{AIC}(\theta_0),\mathrm{AIC}(\theta_1)$を求め，この2つの値を比較して，$\mathrm{AIC}(\theta_0)<\mathrm{AIC}(\theta_1)$ならば独立モデルが選択されることから，変数間に相関はないと判断される．

4 推定値の精度

本研究では，複雑な計算処理を避けるために，近似的な最尤推定値及びファジィ区間データの出現確率を用いてAICを求めている．そこで，コンピュータシミュレーションにより，これらの推定値の精度を数値的に検討する．

4.1 シミュレーション方法

まず，2次元正規分布にしたがう正規乱数を発生させ，[2]で用いられている方法によりファジィ区間データを作成する．そして，得られたファジィ区間データを表1に示す方法で処理し，その推定値の精度を検討する．つまり，'N-R法'はファジィ区間データに対して正確な処理を行っており，'N-R法'で得られる結果が正しい結果であると考えられる．しかし，'N-R法'ではNewton-Raphson法の繰り返し計算や数値積分を用いるなど，複雑な処理が必要となる．そこで，このような複雑な処理をできるだけ避

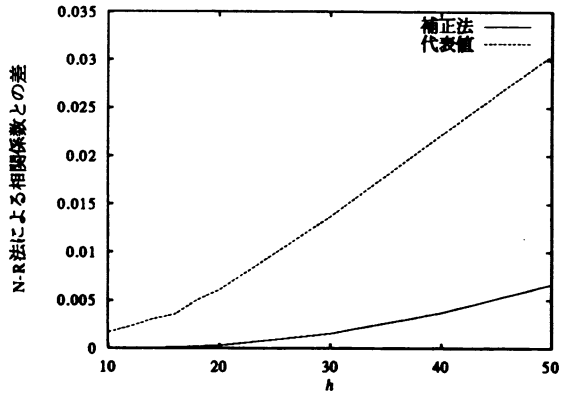


図 1: 相関係数の最尤推定値の平均

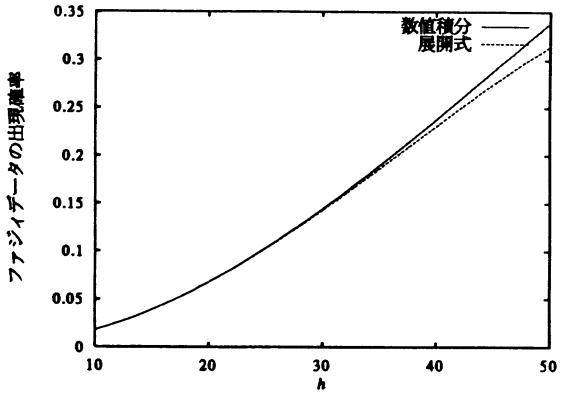


図 2: ファジィデータの出現確率

け，簡便にかつ精度よく推定できると考えられる方法が'補正法'である．また，'代表値'も簡便に処理できるが，ファジィ区間データに含まれるあいまいさを無視して処理しており，誤った処理方法であると考えられる．そこで，ここでは'N-R 法'による推定値を基準にして，'補正法'と'代表値'の推定値の精度を検討する．なお，本研究では推定値の精度を平均的な視点から検討するために，100 回のシミュレーションを行い，その推定値の平均を用いて検討することにする．

4.2 シミュレーション結果

まず，AIC を推定する過程において最初に推定される最尤推定値の精度であるが，[5] で述べられているように，'補正法'による最尤推定値は'N-R 法'による推定値にかなり近似することが明かとなっている．[5] では 1 次元正規分布モデルのパラメータの中で，補正量が必要な分散について検討されていることから，ここでは分散と同様に補正量が必要な相関係数の最尤推定値のみを図 1に示す．なお，ここでは推定精度に視点をおいていることから，'N-R 法'の最尤推定値との差で示している．この結果からも明らかなように，'補正法'により推定される最尤推定値はかなり精度の高い推定値となっている．

次に，式(9) の展開式を用いたファジィ区間データの出現確率について検討する．ここでは，2 次元正規分布 $N(50, 50, 15^2, 15^2, 0)$ を背後に持つファジィ区間データについて，x_1, x_2 ともに式(1) のメンバシップ関数において $e = h/8$ とし，$H = [50-h/2, 50+h/2]$ のファジィ区間上のファジィ区間データの出現確率を展開式と数値積分を用いて計算する．その結果，図 2のような値が得られた．h の増加とともに精度は若干落ちるが，展開式を用いてもだいたい 1/100 レベルまで計算できている．したがって，式(9) の展開式は，ファジィ区間データの出現確率としてある程度実用的であると考えられる．

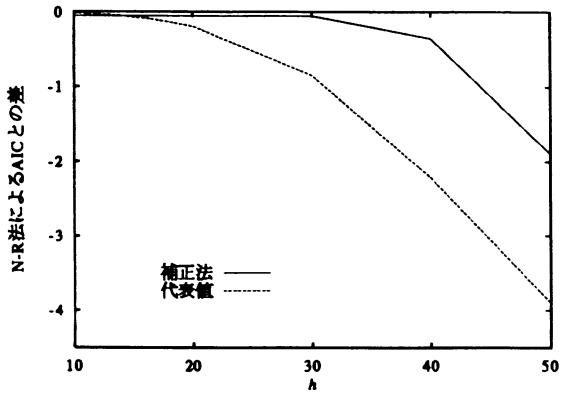


図 3: AIC の平均

最後に，モデル選択の基準となる AIC についての結果を図 3に示す．なお，h の大きさにより区間数が異なることから，AIC の値も大きく変化するため，'N-R 法'により得られる AIC の値を基準として，'補正法'及び'代表値'による AIC との差を示している．また，この AIC は $\rho = 0$ とする独立モデルに対する AIC である．この結果から明らかなように，h の増加とともに精度は落ちるが，'代表値'による AIC に比べ'補正法'による AIC は'N-R 法'により計算された AIC に近い値となっている．特に，h が 30 以下の時は'補正法'による AIC は'N-R 法'による AIC にほぼ一致している．

5 モデル選択による独立性の判定

2 次元正規分布にしたがう乱数を発生させ，これをファジィ区間データとして観測したとき，データの独立性を AIC により分布モデルの選択として行う．つまり，得られたファジィ区間データに対して，背後の分布に $N(\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2, 0)$ という独立モデルと，

表 2: モデル選択の結果

	N-R 法	補正法	代表値
Maxmum Likelihood Estimates			
$\hat{\mu}_1$	50.39972	50.40000	50.40000
$\hat{\mu}_2$	53.29943	53.30000	53.30000
$\hat{\sigma}_1$	17.07146	17.07113	17.37354
$\hat{\sigma}_2$	16.48191	16.48312	16.79613
$\hat{\rho}$	0.13034	0.13019	0.12570
AIC			
AIC(θ_0)	192.19765	192.23373	192.31999
AIC(θ_1)	192.60556	192.64368	192.73349

表 3: すべてのパラメータを固定した場合の結果

	N-R 法	補正法	代表値
Maxmum Likelihood Estimates			
$\hat{\mu}_1$	47.40044	47.40000	47.40000
$\hat{\mu}_2$	49.40022	49.40000	49.40000
$\hat{\sigma}_1$	14.02499	14.02937	14.39583
$\hat{\sigma}_2$	14.66686	14.67049	15.02132
$\hat{\rho}$	0.25981	0.25904	0.24713
AIC			
AIC(θ_0)	147.73624	147.78804	147.73624
AIC(θ_1)	147.52893	147.59599	147.79488

$N(\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2, \hat{\rho})$ という従属モデルのどちらの分布を想定した場合の方が，ファジィ区間データの分布とよりよく当てはまるかを AIC により判断する．このとき，式(8)の $K(\theta)$ は，$K(\theta_0) = 4, K(\theta_1) = 5$ となる．そこで，$N(50, 50, 15^2, 15^2, 0.13)$ にしたがう正規乱数を 100 個発生させ，x_1, x_2 ともに $h = 20$ のファジィ区間データとして観測されたときについての結果を，表 2に示す．この結果より，いずれの処理方法を用いても AIC(θ_0) < AIC(θ_1) となっていることから，選択されるモデルは独立モデルとなる．つまり，データの処理方法を誤った '代表値' を用いても，モデル選択に対してはその影響を及ぼしていない．しかし，AIC の値を見れば '補正法' を用いた方がより正確な値に近くなっている．

また，独立モデルを $N(50, 50, 15^2, 15^2, 0)$ のようにすべて固定し，$N(50, 50, 15^2, 15^2, 0.32)$ にしたがう正規乱数を用いて同様のシミュレーションを行った結果，表 3のような結果が得られた．なお，このケースでは $K(\theta_0) = 0$ となる．この結果では，'N-R 法' 及び '補正法' では AIC(θ_0) > AIC(θ_1) となっているが，'代表値' では AIC(θ_0) < AIC(θ_1) であり，'代表値' では正しくモデルが選択されない．

したがって，得られたデータ及び想定するモデルによっては '代表値' では誤ったモデルを選択することもあり，そのような場合でも正しいモデルを選択する '補正法' は有効な手法であると考えられる．

6 おわりに

本研究では，2 次元ファジィ区間データの独立性の分析を AIC により行う方法を示した．ファジィ区間データは通常のデータとは異なり，正確に取り扱うためには Newton-Raphson 法などを用いた複雑な計算処理が必要となる．そこで，これまでに提案されている補正法を応用した本手法では，より簡単な処理で行うことができることを示した．しかし，ファジィ区間データの取り扱い方法を誤った代表値による処理でも，最尤推定値にはあいまいさを無視することによる偏りが存在し，正しいモデルが同定されているとはいえないが，モデル選択のみであれば特に問題なく行える．しかし，場合によっては代表値による処理では誤ったモデルを選択することがある．したがって，簡単な計算処理で正しいモデルが同定でき，かつモデル選択もできる補正法は，ファジィ区間データの処理方法として有効であると考えられる．

参考文献

[1] 奥田，古殿，浅居: ファジィ観測データに基づく統計的推定, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.5, pp.564–571 (1990)

[2] 小西，奥田，古殿，浅居: AIC によるファジィ区間データからの統計的モデル選択, 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.4, pp.706–719 (1996)

[3] Zadeh: Probability Mesure of Fuzzy Events, J. Math. Anal. Appl., 28, pp.421–427 (1968)

[4] Akaike: Information Theory and An Extension of the Maximum Likelihood Principle, 2nd Inter. Symp. on Information Theory (Petrov,B.N. and Csaki,F eds.), Akademiai Kidao, Budapest, pp.267–281 (1973)

[5] 小西，田中，奥田: ファジィ区間データに基づく最尤推定とその応用, 第 1 回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論文集, pp.49–50 (1996)

問い合わせ先

535 大阪市旭区大宮 5-16-1
大阪工業大学 経営工学科 奥田研究室
小西 幹彦
TEL: 06-954-4315, FAX: 06-952-6197
E-mail: mickey@dim.oit.ac.jp

剣道における打突速度の向上支援への可能性線形回帰分析の適用

The Application of Possibility Linear Regression Analysis for The improvement of Striking Velocity on Kendo

杉本光公
Mitsukimi Sugimoto

筑波大学大学体育センター
Sport and Physical Education Center
University of Tsukuba

安信誠二
Seiji Yasunobu

筑波大学構造工学系
Institute of Engineering Mechanics
University of Tsukuba

abstract

As the physical performance is very complex, there are many factors which improve the physical performance, such as physically, mentally, technically. The relation of each factor make the problems be complex because of the fuzziness of human movement. We try to apply the probability linear regression for the mental disoreders , and to show the probability of improvement the physical performance.

1. はじめに

問題解決の重要な特徴には，目標が必要であるという点が示されている．この点からパフォーマンスを改善する上で，到達可能な具体的な目標を設定することは，非常に重要であるといえる．これは，様々な運動パフォーマンスの向上にも当てはまるといえる．本研究では運動パフォーマンスを剣道の素振り動作(面打ち)の剣先の打突速度とする．これは剣先のスピードが剣道のパフォーマンスに大きなウエイトを占めるからである．

本研究では剣道の打突速度の向上の可能性を，上体の上下動，移動距離から推定する方法を可能性線形回帰分析を用いて定式化することを目的とする．

2. 方法

2.1モデル

モデルは可能性線形システムとする．すなわち

$$Y_j = A_1 x_{j1} + \cdots + A_n x_{jn} \qquad (1)$$

ここで，ファジィ係数Aiを以下の図1とし，Ai =(α i,ci)で表す．

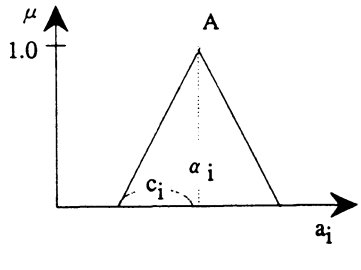


図1 Aiのメンバーシップ関数

このときYjは拡張原理から

$$Y_j = (\mathbf{a}x_j, \mathbf{c}|x_j|) \qquad (2)$$

ここで，$\mathbf{a} = (a_1, \cdots, a_n)$，$\mathbf{c} = (c1, \cdots, cn)$，$\mathbf{x}_j = (x_{j1}, \cdots, x_{jn})^t$，$|\mathbf{x}_j| = (|x_{j1}|, \cdots, |x_{jn}|)^t$である．

ファジィ係数Ai =(α i,ci)を求める問題は，次の線形計画問題に帰着できる．

$$\left.\begin{aligned} &\min \sum_{j=1}^{m} \mathbf{c}|x_j| = J(\mathbf{c}) \\ &subject\ to\ y_j \le ax_j + c|x_j| \quad (j = 1, \cdots m) \\ &\qquad yj \ge ax_j - c|x_j| \quad c \ge 0 \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

そこで，上記の線形計画問題を用いて剣道における打突速度の向上の可能性を検討する．

2.2 被験者

被験者は，筑波大学の大学院生，および学生6名である．被験者の基礎データを表1に示す．

表1:被験者の基礎デー

項目	平均値±SD
年齢	25.0±2.83
身長(cm)	167.0±4.32
体重	72.2±10.18
段位	2.2±1.95
経験年数	7.7±7.63

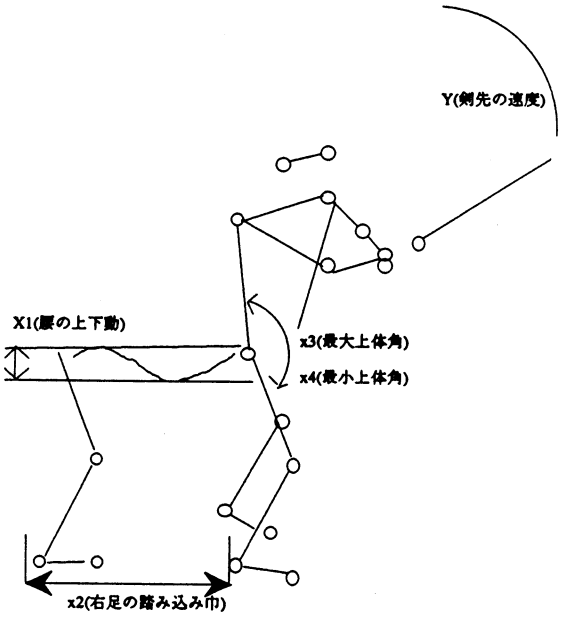
2.3測定項目

打突速度を推定するために，事前のアンケートにより測定項目を採用した．

独立変数
- 腰の上下動
- 右足の移動距離
- 上体角の最大値
- 上体角の最小値

従属変数
- 剣先の打突速度

これらの測定項目は3次元動作解析装置をもちいて測定した．
本研究で用いる推定モデルは，以下のモデルとした．
$Y=A_1x_1+A_2x_2+A_3x_3+A_4x_4$
ここで，x_1は上下動，x_2は移動距離，x_3は最大上体角，x_4は最小上体角である．これらの変数を図2に示す．



3. 結果

3.1 測定値の平均値と標準偏差

各測定値の平均値と標準偏差を表2に示す．

表2:平均値と標準偏差

項目	平均値±SD
上下動(cm)	17.19±0.709
移動距離(cm)	52.69±12.36
最大上体角(deg)	170.3±5.3
最小上体角(deg)	153.8±8.0
打突速度(m/s)	12.8936±2.3266

3.2推定式

前述の線形計画問題を解いて，被験者一人一人についてファジィ係数を求めた．これらのファジィ数は図1に示されるとおり，α_i(中心)とc_iの二つのパラメータで表現できる．推定式を以下に示す．

$Y_1 = (14.144, 2.247)x_2 + (46.506, 0)x_3$

$Y_2 = (4.42, 1.73)x_2 + (60.97, 0)x_4$

$Y_3 = (101.49, 0)x_3 + (0, 6.86)x_2$

$Y_4 = (5.541, 0)x_1 + (66.97, 17.64)x_3$

$Y_5 = (71.54, 0)x_3 + (0, 18.74)x_4$

$Y_6 = (69.83, 15.82)x_3$

これらの推定式は，$\alpha > 0$という拘束条件を用いている

3.3可能性指標(PI)

可能性の推定は可能性線形回帰分析を用いて行っているが，可能性線形回帰では推定結果は範囲として求められる．この範囲のうち，最も良い(大きいか小さいかは課題によって異なる)値を向上の可能性と定義し，これまでその有効性が示されてきた．さらにその可能性を基にして可能性指数(Probability Index，以下PI)を，向上できる可能性の程度を示す指標として算出した．

$$PI = \frac{\text{現在の値} - \text{必然性(necessity)}}{\text{可能性(probability)} - \text{必然性(necessity)}}$$

ここでprobabilityは可能性を，necessityは必然性を表す．それぞれ可能性線形回帰で求められた範囲のうち，最も良い値(probability)と良くない値(necessity)である．このPIは最も良い値(可能性)と最も悪い値(必然性)のどのあたりに現在いるかということを示すもので，100に近いほど可能性を満足しており，0に近いほどまだまだ可能性があることを示している．PIの概念を図3に示す．また測定値に基づく各被験者の打突速度の可能性指数を表3に示す．

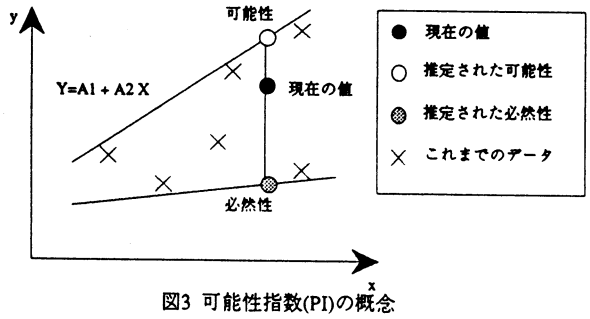


図3 可能性指数(PI)の概念

表3 可能性指数

	(可能性(m/s)，必然性(m/s))	可能性指数
Y1	(15.5249, 11.7038)	17.82
Y2	(12.4025, 10.3558)	211.00
Y3	(21.5396, 10.3558)	37.98
Y4	(15.1267, 8.9563)	192.14
Y5	(15.6971, 9.5279)	90.91
Y6	(15.1858, 9.4734)	105.40

4. おわりに

本研究では，可能性線形回帰分析(ファジィ理論)を用いて，打突速度を推定し，パフォーマンスの向上支援のために向上の可能性を示す手法を考案した．結果は．以下のようであった．

・可能性線形回帰を用いて，向上の推定範囲を求めることができた．
・求められた推定範囲の内最も良い記録を"パフォーマンス向上の可能性"と定義し具体的な到達目標として設定できた．
・可能性指標を考案し，向上支援のための具体的な指数を算出できた．

参考文献
[1]田中英夫:ファジィモデリングとその応用，朝倉書店，東京，1990.
千住鎮雄:線形計画法，共立出版株式会社，東京，1967.

[連絡先] つくば市天王台1-1-1 杉本光公
筑波大学体育センター
e-mail:sugimoto@sapec.tsukuba.ac.jp

THC3-2

可能性線形回帰分析における推定区間について

Estimation Interval in Possibility Linear Regression Analysis

永井栄一　堀内敦司　奥田徹示
Eiichi Nagai　Atsushi Horiuchi　Tetsuji Okuda
大阪工業大学
Osaka Institute of Technology

Abstract: This paper presents a property of estimation interval in Possibility Linear Regression analysis based on Linear Programming. The property is shown using a quantitative analysis by the computer simulation and compared with ordinary Least Squares Regression.

1．はじめに

可能性線形回帰分析は田中ら[1,2]により線形計画(LP)問題として定式化され，以後，様々な分野で応用されている．このＬＰ問題に基づく可能性線形回帰分析[2]の性質について，我々はコンピュータ・シミュレーションを用いた数量的分析を行い，最小二乗法による線形回帰分析との比較を通して，過去にその一部を示した[3,4]．今回は特に推定区間の性質について示し，データ数やデータの分布に基づくモデルの補正や修正について若干の考察を加える．

2．方法

以下の手順でコンピュータ・シミュレーションを行った．

1）二つの線形システム（式(1),(2)）を設定し，式(1)はシステム構造自体にあいまいさを持たない線形システム，式(2)はシステム構造自体にあいまいさを持つ線形システムとした．

$$y = 10 + 3x \qquad (1)$$

$$Y = (10,2) + (3,0.5)x \qquad (2)$$

2）入力変数xは，シミュレーションを一般的にするために［0，20］の一様乱数を用いて発生させた．次に，式(1)をもとにt乱数(自由度10)を4倍，式(2)をもとに，一様乱数を用いてデータを発生させた．なお，式(2)より得られる区間を一様乱数の区間とした．発生データ数は0～100個(5個きざみ)とした．

3）2)より得たデータをもとに可能性線形回帰分析[2](ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数:三角形,h=0)と一般的な最小二乗法による回帰分析を行い，可能性線形回帰モデル(可能性モデル：式(3))，統計的線形回帰モデル(統計的モデル：式(4))を同定した．

$$Y = (\alpha_0, c_0) + (\alpha_1, c_1)x \qquad (3)$$

$$y = a_0 + a_1 x \qquad (4)$$

4）同定した可能性モデルの推定区間，統計的モデルの観測値 yの90％信頼区間の左端(x=0)，中央(x=10)，右端(x=20)での値とその平均値を推定区間幅として求めた．なお，あいまいさを持つ線形システムを対象とした可能性モデルは式(5)に示す区間幅表現率も算出した．

$$\begin{pmatrix}\text{区間幅}\\ \text{表現率}\end{pmatrix} = \frac{\text{可能性モデル推定区間幅(平均)}}{\text{設定線形システム区間幅(平均)}} \qquad (5)$$

また，あいまいさを持たない線形システムを対象とした可能性モデルは，その推定区間幅が統計モデル(観測値y)の何％信頼区間に相当するか(信頼率換算値)を求めた．

5）2)～4)を1000回くり返し，両モデルの推定区間幅の平均値，区間幅表現率，信頼率換算値の平均値を求めた．

3．結果

あいまいさを持つ，持たない線形システムに対する両モデルの推定区間幅の平均値をそれぞれ図1，図3に示す．あいまいさを持つ線形システムに対する区間幅表現率の平均値を図2，あいまいさを持たない線形システムに対する信頼率換算値の平均値を図4に示す．

推定区間幅は対象線形システムがあいまいさを持つ，持たないに関らずデータ数が増加する

に伴い可能性モデルでは増加し，統計モデルでは減少した(図1,3)．あいまいさを持つ線形システムを対象とした場合，その推定区間幅は常に可能性モデルで小さかったが，あいまいさを持たない線形システムを対象とした場合，データ数の増加に伴い逆転した(図1,3)．区間幅表現率(あいまいさのある線形システムを対象とした場合のみ算出)はデータ数の増加に伴い高値となり，データ数15個で設定線形システムの持つ区間幅の約80％，35個で90％，70個で95％を表現していた(図2)．信頼率換算値(あいまいさを持たない線形システムを対象とした場合のみ算出)は区間幅表現率と同様の傾向を示し，データ数15個で統計的モデルの観測値yの80％信頼区間，25個で90％，70個で95％信頼区間とほぼ一致していた(図4)．

4．考察とまとめ

可能性モデルの推定区間は統計的モデルとは逆にデータ数が少ないと小さく，多いと大きくなる．そのためデータ数が少ない場合には大きく，多い場合には小さくなるよう補正や修正を行うことが必要となる．そのため，あいまいさを持つ線形システム(ここではデータは一様分布，あいまいさは入力変数に対して単調増加)が対象の場合，図２のような区間幅表現率，あるいはあいまいさの表現率[3,4]等を用いて補正や修正を行うことは有効であると考えられる．また，あいまいさを持たない線形システム(データが正規分布，t分布)が対象の場合，図４のような信頼率換算値を参考にして，同定モデルの補正等を考慮した方が良い場合もあると考えられる．

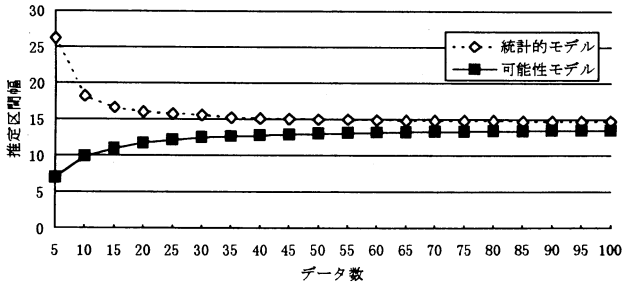


図１推定区間幅平均値(線形ｼｽﾃﾑ:あいまいさあり)

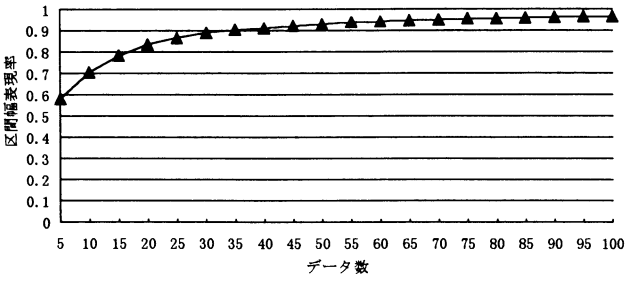


図２区間幅表現率(線形ｼｽﾃﾑ:あいまいさあり)

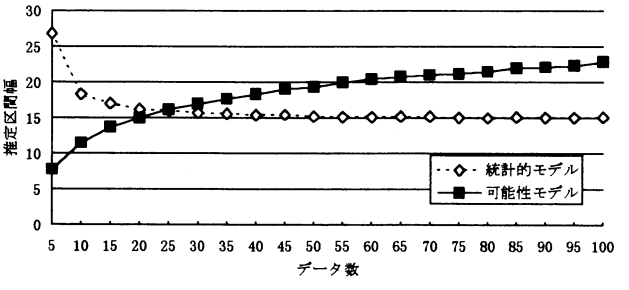


図３推定区間幅平均値(線形ｼｽﾃﾑ:あいまいさなし)

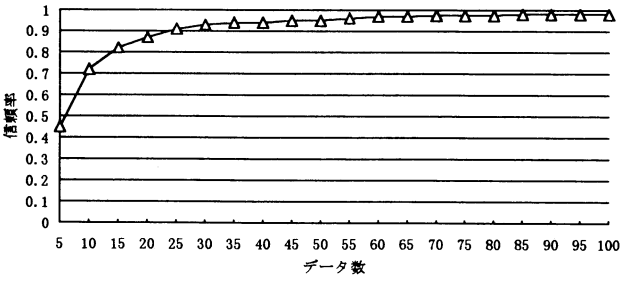


図４信頼率換算値(線形ｼｽﾃﾑ:あいまいさなし)

参考文献

[1]H. tanaka, S. Uejima and K. Asai: Linear Regression Analysis with Fuzzy Model, IEEE Trans. Systems Man Cybern. **12**, 903-907(1982)

[2]H. Tanaka: Fuzzy Data Analysis by Possibilistic Linear Model, Fuzzy Sets and Systems, **24**, 363-375(1987)

[3]永井，堀内，奥田：可能性線形回帰分析と統計的線形回帰分析の比較，日本ファジィ学会，第12回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集，121-122(1996)

[4]永井，堀内，奥田：可能性線形回帰分析に関する一考察，日本行動計量学会，第24回大会発表論文抄録集，82-83(1996)

連絡先

〒535　大阪市旭区大宮5-16-1
大阪工業大学経営工学科　奥田研究室
永井栄一
TEL:06-954-4328, FAX:06-952-6197

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THC3-3

同時方程式体系における可能性回帰モデルの導出

Estimate for Possibility Regression Model in Simultaneous Equations System

渡邊 匠*, 小沢 和浩*, 菅家 正康**

Takumi Watanabe*, Kazuhiro Ozawa*, Masayasu Kanke**

*法政大学経済学部, **(株)明電舎 太田工場 動力計測部

*Faculty of Economics, Hosei university

**Ohta Factory, Meidensha Corporation

abstract

In this paper, we estimate for a possibility regression model in a simultaneous equations system indirectly. We begin by obtaining the reduced form parameters of the model, and then we identify the structural form parameters. The reason why we use indirect approach is to identify the equations of the demand and supply model individually. In this paper, we explain our approach and our estimation with example data.

1.はじめに

本論では、同時方程式体系における可能性回帰モデルを、間接的な方法により導出する。可能性回帰分析は曖昧さを表現できる為に経済システムのモデル化に対して有用であると考えられている。経済システムでは多くの方程式が同時に成立する体系でのモデル化が不可欠である為に、そのような同時方程式体系においても可能性回帰分析が適用できる手法を確立するということは有意義である。

ここでは、まず誘導形パラメータを求め、そこから構造パラメータを識別するという方法をとる。体系の曖昧さを直接最小化する方法をとらずに間接的な方法を用いるのは、経済における需給均衡モデルなどについても個々の方程式を正確に識別する為である。

本論では全般にわたり、実際のデータを用いた推定を進め、本手法について述べていく。

2.問題設定

本論で推定を進めていくのは、以下のような需給関数に従う簡単なモデルである。

$$Q_t^d = \alpha_0 + \alpha_1 P_t \tag{2-1}$$

$$Q_t^s = \beta_0 + \beta_1 P_{t-1} \tag{2-2}$$

$$Q_t^d = Q_t^s \tag{2-3}$$

(2-1)式は需要関数、(2-2)式は供給関数である。この体系では、供給量 Q_t^s は前期の価格 P_{t-1} に対応する水準に決まり、今期の価格 P_t は今期の供給量がすべて需要される水準にきまるような市場を仮定している。

この体系を可能性回帰分析によりモデル化する為、構造形を以下のように設定した。

$$P_t = A_0 + A_1 q_t \tag{2-4}$$

$$p_t \in P_t \tag{2-5}$$

$$Q_t = B_0 + B_1 p_{t-1} \tag{2-6}$$

$$q_t \in Q_t \tag{2-7}$$

ただし、

$$A_i = (a_i, e_i)_L, i = 0,1 \tag{2-8}$$

$$B_i = (b_i, f_i)_L, i = 0,1 \tag{2-9}$$

のようにパラメータは対称三角型ファジィ数とし、中心と幅により表すこととする。

ここで、Q_t は計画供給量を示す。これは、(2-6)式に示されるとおり一期前の価格 p_{t-1} に応じ、ある程度の幅を持って決定される。市場での需給均衡量は q_t であり、Q_t は q_t を包含するものとする。一方その q_t に対し、市場において相応であると考えられる価格は P_t であり、これもまたある程度の幅を持つ。そして、実際に実現する価格は p_t であり、P_t はこれを包含する。

このモデルについてパラメータを推定しようとするときに用いることのできるのは、価格データ p_t と需給均衡量 q_t であり、いずれもこの体系の中で決定される変数である。したがって、適切な方法によりパラメータを推定する必要がある。

この場合において、(2-4)式をこの構造形のまま直接推定しようとしても、パラメータは正確に知ることができない。したがって、誘導形パラメータを推定し、構造パラメータを識別するという問題に直す必要がある。

3.モデルの導出

前述のモデルを実際に推定するにあたり、牛肉の小売価格と1世帯当たりの購入量の年次データ(1978～1994)を用いて、以降のパラメータ推定に用いることとした。

誘導形は次の様な可能性回帰モデルによって表される。

$$P_t = C_0 + C_1 p_{t-1} \quad (3\text{-}1)$$

$$p_t \in P_t \quad (3\text{-}2)$$

$$Q_t = B_0 + B_1 p_{t-1} \quad (3\text{-}3)$$

$$q_t \in Q_t \quad (3\text{-}4)$$

ただし、

$$C_i = (c_i, g_i)_L, i = 0,1 \quad (3\text{-}5)$$

である。

この誘導形のパラメータは通常の可能性回帰分析の手法により容易に求められる。また、(3-3)(3-4)式は構造形と同じ形であるから、間接的な推定方法をとる必要はない。ここでは以下のような結果になった。

$$P_t = (46.8,15.0)_L + (0.88,0.0)_L p_{t-1} \quad (3\text{-}6)$$

$$Q_t = (-707.3,0.0)_L + (31.1,1.6)_L p_{t-1} \quad (3\text{-}7)$$

推定の結果、パラメータに幅が 0 となった非ファジィ数が含まれるためにそれぞれ次式に改める。

$$P_t = C_0 + c_1 p_{t-1} \quad (3\text{-}8)$$

$$Q_t = b_0 + B_1 p_{t-1} \quad (3\text{-}9)$$

ただし、

C_0=(46.8, 15.0)$_L$　　c_1=0.88

b_0=−707.3　　B_1=(31.1, 1.6)$_L$

である。

(3-8)(3-9)式は(3-2)(3-4)式の包含条件により、それぞれ以下の不等式により表すことができる。

$$c_0 + c_1 p_{t-1} - g_0 \le p_t \quad (3\text{-}10)$$

$$p_t \le c_0 + c_1 p_{t-1} + g_0 \quad (3\text{-}11)$$

$$b_0 + b_1 p_{t-1} - f_1 |p_{t-1}| \le q_t \quad (3\text{-}12)$$

$$q_t \le b_0 + b_1 p_{t-1} + f_1 |p_{t-1}| \quad (3\text{-}13)$$

一方、構造形を示す(2-4)(2-5)から、

$$a_0 + a_1 q_t - a_0 - a_1 |q_t| \le p_t \quad (3\text{-}14)$$

$$p_t \le a_0 + a_1 q_t + a_0 + a_1 |q_t| \quad (3\text{-}15)$$

となる。誘導形パラメータから構造パラメータを識別するには、(3-10)～(3-13)式を変形し、(3-14)(3-15)式の包含関係を導き出せばよい。

価格や数量のデータに関しては負の値をとる場合を考慮する必要がなく、またこの例では変数が非常に少ないので、(3-10)(3-13)式から以下の不等式が容易に導かれる。

$$\left((c_0 - g_0) - \frac{b_0 c_1}{b_1 + f_1}\right) + \frac{c_1}{b_1 + f_1} q_t \le p_t \quad (3\text{-}16)$$

$$p_t \le \left((c_0 + g_0) - \frac{b_0 c_1}{b_1 - f_1}\right) + \frac{c_1}{b_1 - f_1} q_t \quad (3\text{-}17)$$

これらが(3-14)(3-15)式と対応しており、構造形(2-4)式が以下のように決定された。

$$P_t = (66.8,16.1)_L + (0.0283,0.00151)_L q_t \quad (3\text{-}18)$$

4.識別に関する問題について

このように、不等式の変形により構造パラメータを求める場合においても、通常の回帰分析と同様、式の数等により識別条件が存在する[1]。またその他にも、通常の回帰分析にはない問題が生じ得る。まず、構造形のファジィ係数の幅が負になってしまうということである。説明変数の増加に伴って被説明変数の曖昧さが減少するような場合、このような間接的な方法ではファジィ係数の幅を負として推定してしまうのである。このとき、形式的にはデータを加工するなど様々な対処の方法が考えられるが、経済などへの応用に際しては、その結果が理論的に妥当であるかどうかの検討を加え、データやモデルについても検証しなくてはならない。

また、負数による乗算により不等号は反転するため、包含関係を導くことができないということも考えられる。この場合構造パラメータの識別は不可能である。

これらはモデルの構造に関わらず用いるデータによって発生する動的な問題であると言え、対処法について考慮しておく必要がある。

5.まとめ

本論では、簡単な例題にしたがって同時方程式体系における可能性回帰モデルの導出に述べた。誘導形パラメータから構造パラメータを識別する問題が簡単な計算により行えることや、そのとき生じる可能性のある特有の問題について考察した。

同時方程式体系のモデルはその推定結果に対する検証も様々な点から行われるものであるが、ここではその問題について触れていない。また、ここでの例題のように幅を持った需給の関数が得られたときの均衡点や、安定性に関する検討も必要である。

6.参考文献

[1] 高萩栄一郎:「ファジィ回帰モデルによる連立同時方程式の係数推定」第 5 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.229-234(1989)

[2] 高萩栄一郎:「経済学におけるあいまいさの取扱い」日本ファジィ学会誌 Vol.4, No.6, pp.1021-1026(1992)

連絡先

〒194-02 東京都町田市相原町 4342
法政大学経済学部　　小沢 和浩
TEL:0427-83-2534, FAX:0427-83-2611
E-mail: kozawa@mt.tama.hosei.ac.jp

THC3-4

ファジィ数に基づく主成分分析
Principal Component Analysis Based on Fuzzy Numbers

藪内 賢之*, 和多田 淳三*, 中森 義輝**
Yoshiyuki YABUUCHI*, Junzo WATADA* and Yoshiteru NAKAMORI**

大阪工業大学*, 甲南大学**
Osaka Institute of Technology*, Konan University**

Abstract : In this paper, a fuzzy concept is employed to construct a principal component model which can deal with fuzziness, vagueness or possibility of a system, which is named a principal component analysis based on fuzzy numbers. The principal component analysis is to analyze a possibility of fuzzy numbers.

The principal component analysis based on fuzzy numbers has three formulations according the portions which the possibilities included in fuzzy numbers are embodied: 1) an eigenvalue, 2) an eigenvector and 3) both eigenvalue and eigenvector. In this paper, we discuss about the first formulation 1) that an eigenvalue is employed to deal with fuzziness of data.

The principal component analysis based on fuzzy numbers is employed in this paper to analyze the features of information technology industry. In this analysis, the financial ratio is employed as indices. And we evaluate the possibility of a company activity in information technology industry.

1. はじめに

主成分分析は，データのもつ意味を損なうことなく可能な限り少ない次元(特徴)を用いてデータを要約する分析手法である．従来の主成分分析 [1] は，統計学の概念を基に構成されている．つまり，主成分分析はあるシステムについてのクリスプなデータを用いて対象システムを分析することが目的である．分析対象となるデータが十分対象システムを表現していない場合に，データが対象システムを表現している度合いをメンバーシップ値として分析するファジィ主成分分析 [6] が提案されている．しかしながら，対象データがあいまいである場合データそのものをファジィ数として表現しなければならない [5].

このため，対象とするデータをクリスプな値ではなくファジィ数，あるいは区間値で表現された場合の主成分分析が望まれる．このため，本研究ではファジィ数を分析するための主成分分析法を構築する．

ファジィ数を分析する主成分分析の構築の方法としてシステムのもつ可能性を "1) 固有値", "2) 固有ベクトル", "3) 固有値と固有ベクトルの両方" の 3 つの方法で表現することが考えられる [4]．本研究では，"1) 固有値" でシステムの可能性を表現する方法について述べる．

また，応用例として情報産業の企業分析において本モデルを用いることでその特徴と有効性を示す．

2. ファジィ数に基づく主成分分析の構成

p 種類の属性値が n 組得られたとする．サンプル i の各属性値はファジィ数で表現され，以下のように表現する．

$$\mathbf{X}_i = [\mathbf{x}_{i1}, \mathbf{x}_{i2}, \cdots, \mathbf{x}_{ip}]$$
$$\mathbf{x}_{ij} = [x_{ij}^l, x_{ij}^c, x_{ij}^u] \quad (i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, p)$$

ここで，$x_{ij}^l, x_{ij}^c, x_{ij}^u$ はそれぞれ $\mathbf{x}_{ij}$ の下限値，中心値，上限値である．

ファジィ数 $\mathbf{X}_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ を用いてファジィ分散共分散行列 $\mathbf{V} = [\mathbf{V}^l, \mathbf{V}^c, \mathbf{V}^u]$ を計算する．$\mathbf{V}^l, \mathbf{V}^c, \mathbf{V}^u$ はそれぞれファジィ分散共分散行列 $\mathbf{V}$ の下限，中心，上限である．ファジィ分散共分散行列には以下の関係が成立する．

$$\mathbf{V}^l \subseteq \mathbf{V}^c \subseteq \mathbf{V}^u \tag{1}$$

ファジィ分散共分散行列は，その値が最小になるようにファジィ数の上限値あるいは下限値を組み合わせて最小となるものを $\mathbf{V}^l$，最大になるものを $\mathbf{V}^u$ とし，中心値を用いて計算したものを $\mathbf{V}^c$ とする．今，中心値について基準化したものを $y_{ij}^l, y_{ij}^c, y_{ij}^u$ とする．例えば，ファジィ分散共分散行列の下限値の (a, b) 成分 $\mathbf{V}_{ab}^l$ は以下のように求めることができる．

$L_i(\cdot) = U_i(\cdot) = \{l, c, u\}$ を定義し，$|y_{ia}^{L_i(a)} y_{ib}^{L_i(b)}|$ が最小となる $L_i(a), L_i(b)$ を探し，

$$\min_{L_i(a), L_i(b)} |y_{ia}^{L_i(a)} y_{ib}^{L_i(b)}|$$

その総和をファジィ分散共分散行列の下限とする．

$$\mathbf{V}_{ab}^l = \sum_{i=1}^{n} y_{ia}^{L_i(a)} y_{ib}^{L_i(b)}$$

ファジィ分散共分散行列の上限では，$|y_{ia}^{U_i(a)} y_{ib}^{U_i(b)}|$ が最大になる $U_i(a), U_i(b)$ を探すことになる．

以上のようにして，関係式 (1) を満たすようにファジィ分散共分散行列を定義する．

ファジィ固有値 $\mathbf{l} = [\lambda^l, \lambda^c, \lambda^u]$，ファジィ固有ベクトル $\mathbf{e} = [\mathbf{e}^l, \mathbf{e}^c, \mathbf{e}^u]$ を用いると，固有値問題から以下の関係が得られる．

$$\mathbf{V}^c \mathbf{e}^c = \lambda^c \mathbf{e}^c \tag{2}$$

ここで，$\lambda^l, \lambda^c, \lambda^u, \mathbf{e}^l, \mathbf{e}^c, \mathbf{e}^u$ はそれぞれファジィ固有値の下限値，中心値，上限値，ファジィ固有ベクトルの下限，中心，上限を示す．

また，ファジィ固有値には次の関係が成立し，

$$\begin{aligned} \lambda^l \le \lambda^c \le \lambda^u \\ \lambda^l \mathbf{e}^c \subseteq \lambda^c \mathbf{e}^c \subseteq \lambda^u \mathbf{e}^c \end{aligned} \tag{3}$$

ファジィ固有ベクトルには以下の関係が成立する．

$$\mathbf{e}_i' \mathbf{e}_i = 1, \mathbf{e}_i' \mathbf{e}_j = 0 (i \neq j) \tag{4}$$

第 k ファジィ固有値とファジィ固有ベクトルは以下の線形計画問題を解くことにより得られる．

$$\begin{aligned} &\max \quad \lambda^c \\ &\min \quad \lambda^u - \lambda^l \\ &\lambda^l \mathbf{e}^c \subseteq \lambda^c \mathbf{e}^c \subseteq \lambda^u \mathbf{e}^c \\ &\mathbf{e}_k' \mathbf{e}_k = 1, \mathbf{e}_k' \mathbf{e}_j = 0 \quad (k \neq j) \\ &\lambda_k \le \lambda_i \qquad (i \le k) \end{aligned} \tag{5}$$

上記ファジィ固有値問題では，固有値が最大となる主成分を求めているが，固有値の曖昧さ $\lambda^u - \lambda^l$ を最小にする多目的問題の構造になっている．

(5) 式から得られたファジィ固有値，及びファジィ固有ベクトルを用いることによりファジィ第 k 主成分は，

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_k &= [\mathbf{Z}_k^l, \mathbf{Z}_k^c, \mathbf{Z}_k^u] \\ &= [\mathbf{x}^l \mathbf{e}_k^l, \mathbf{x}^c \mathbf{e}_k^c, \mathbf{x}^u \mathbf{e}_k^u] \end{aligned} \tag{6}$$

となる．

第 k 主成分とファジィ属性値 $\mathbf{x}_i$ のファジィ因子負荷量 $\mathbf{r}(\mathbf{Z}_k, \mathbf{x}_i)$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(\mathbf{Z}_k, \mathbf{x}_i) &= [r(Z_k^l, x_i^l)^l, r(Z_k^c, x_i^c)^c, r(Z_k^u, x_i^u)^u] \\ r(Z_k^l, x_i^l)^l &= \frac{cov[Z_k^l, x_i^l]}{\sqrt{V(Z_k)^l V(x_i)^l}} \\ r(Z_k^c, x_i^c)^c &= \frac{cov[Z_k^c, x_i^c]}{\sqrt{V(Z_k)^c V(x_i)^c}} \\ r(Z_k^u, x_i^u)^u &= \frac{cov[Z_k^u, x_i^u]}{\sqrt{V(Z_k)^u V(x_i)^u}} \end{aligned} \tag{7}$$

により得られる．ここで，$V(\mathbf{Z}_k), V(\mathbf{x}_i), cov[\mathbf{Z}_k, \mathbf{x}_i]$ はファジィ主成分 $\mathbf{Z}_k$ とファジィ属性値 $\mathbf{x}_i$ の分散，及び共分散を意味する．

3. 情報産業における企業分析

応用例として，情報産業に分類される企業で 1990 年から 1994 年までの 5 年における財務指標 [3] を用いて企業分析を行う．

4. おわりに

システムの可能性を評価するモデルとしては，可能性回帰モデル [2] がよく知られている．本研究においてシステムの可能性を評価するモデルとしてファジィ数に基づく主成分分析を提案した．

本モデルでは，ファジィ数で与えられたデータ (属性値) を用いファジィ分散共分散行列からファジィ固有値やファジィ固有ベクトルを求め，システムの可能性を表現，評価することができる．応用例では，情報産業企業の分析を行い，本モデルの有用性を示した．

参考文献

[1] 奥野 忠一，芳賀 敏郎，久米 均，吉澤 正，多変量解析法，日科技連，1977

[2] Hideo Tanaka and Junzo Watada, Possibilistic linear systems and their applications to the linear regression model, Fuzzy Sets and Systems, Vol.27, pp.275–289, 1988

[3] 日本経済新聞社，日経経営指標 : 全国上場会社，1990–1994

[4] 山内 建二，藪内 賢之，和多田 淳三，中森 義輝，ファジィデータの主成分分析法の構成，第 11 回 ファジィシステムシンポジウム 予稿集，pp.241-242, 1995

[5] Junzo Watada, Hideo Tanaka and Kiyoji Asai, Fuzzy Discriminant Analysis in Fuzzy Groups, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.19, pp.261–271, 1986

[6] Junzo Watada and Yoshiyuki Yabuuchi, Fuzzy Principal Component Analysis and Its Application to Company Evaluation, *Proceedings of the Japan-Brazil Joint Symposium on Fuzzy Systems*, Campinas and Manaus, Brazil, July 19-27, 1994

連絡先

〒 535 大阪市旭区大宮 5-16-1
大阪工業大学 経営工学科
和多田 淳三
TEL 06-954-4327 (dial in)
FAX 06-952-6197
E-mail watada@dim.oit.ac.jp

THC4-1

計算機シミュレーションによる類似性指標の分類

Classification of similarity indices using computational simulation

吉川　歩，西村　武
YOSHIKAWA, Ayumi and NISHIMURA, Takeshi

京都工芸繊維大学　工芸学部　電子情報工学科
Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology

Abstract: Relationships between subjective judgments of similarity and similarity indices are important to treat fuzzy concepts adequately. For successful treatment of them, we need to pay sufficient attention to mathematical relationships among the similarity indices besides the relationships mentioned above. In this paper we evaluate the relationships among 30 similarity indices through computational simulation and clustering method. Moreover we discuss the finding in Zwick et al.(1987) and Yoshikawa et al.(1996) based on the obtained results.

1. まえがき

背景：ファジィ集合間の類似性指標は，ファジィ集合を用いて曖昧さを持つ対象を取り扱うシステムで重要な役割を担う．対象を適切に扱うためには，類似性指標が人の主観的な類似度の判断を適切に反映していることが不可欠である．このような観点から，*Zwick*ら[1]や吉川ら[2]はすでに心理実験を行い両者の関係を考察している．

意義：ところで，上記のような心理実験では被験者の負担も考慮して，数10程度の刺激が用いられる．そのため，その刺激，つまりファジィ集合の選択が偏ると，本来数学的には類似した性質を持つ2つの指標が主観的な類似度と異なった相関を示すこともある．さらに多数の指標との無意味な比較を回避するためにも，指標相互の関係を適切に把握することは重要である．

目的：本稿の目的は類似性指標の相互の関係を明らかにすることにある．以下では，まず計算機シミュレーション結果をもとに指標をグループ化し，相互の関係を明らかにする．次にその結果をもとに，*Zwick*らや吉川らの結果について考察を行う．

2. シミュレーションおよび解析手法

ファジィ集合の形状：**図1**にシミュレーションで使用したファジィ集合の形状を示す．全体集合[0,1]を10等分した11要素$\{e_0,\ldots, e_{10}\}$から任意の4要素を選択して構成される台形／三角形型メンバーシップ関数(MF)とした．ただし，一方の集合の台集合下限値はe_0=0に固定とした．またシングルトンは除外した．この設定で指標値が計算される全組合せ数は282,150であり，論理積集合が空集合となる組合せを除いたものは264,693であった．

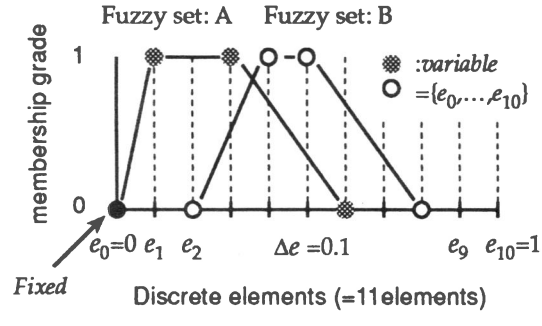


Fig. 1: Illustration of piecewise linear fuzzy sets used in the simulation

指標：**表1**に本稿で対象とした指標の名称を示す．文献[1,2,3]を参考に選択した．各指標の定義はそれぞれの文献を参照されたい．また距離を表現する指標は1から減じることにより類似度を表すように変換した．なお演算には区分線形型MF専用のアルゴリズム[4]を利用しているため，離散要素を利用したことによる演算精度の低下は生じていない．

解析手法：シミュレーションから得られた指標値をもとに指標間の相関係数を①全データ，②非空集合データのそれぞれについて求めた．次にこの相関係数を類似性の測度としてクラスタ分析を行った．クラスタ間の距離(非類似度)の計算には最長距離法を採用した．本稿のデータの場合，2つのクラスタの間の新しい相関係数は2つのクラスタの全メンバの間での最小値として与えられる．したがって最も厳しい条件で評価していることになる．

なお，因子分析法から算出される因子負荷量をもとに指標のグループ化も行った．本稿の場合，上述のクラスタ分析法による結果とほぼ同様の結果が得られたため，解釈が明確なクラスタ分析法の結果を用いて以降の説明を行う．

Table 1: Similarity indices used in the simulation and their clustering results

Index	used * Z	used * Y	min. correl.
height of logical product set	●	○	
height of algebraic product set		○	0.962
height of bounded product set		○	
height of drastic product set		○	
1-GLB of 1-level set for type-2 absolute difference set		○	1.000
relative cardinality of logical product set		○	
relative cardinality of algebraic product set		○	0.972
relative cardinality of bounded product set		○	
cardinality ratio of logical product set to logical sum set	○	○	
1-cardinality ratio of absolute difference set to logical sum set			
cardinality ratio of algebraic product set to logical sum set		○	0.957
cardinality ratio of bounded product set to logical sum set		○	
1-cardinality ratio of symmetrical difference set to logical sum set			
relative cardinality of drastic product set		○	0.959
cardinality ratio of drastic product set to logical sum set		○	
1-height of absolute difference set (dominat metric)	○		0.975
1-height of symmetrical difference set	○		
1-relative cardinality of absolute difference set (city-block metric)	○		
1-relative cardinality of symmetrical difference set	○		0.931
1-Euclidean metric (Minkowski metric)	○		
1-Euclidean distance between vectors(cardinality, gravity center)	○		1.000
1-Housdroff distance (sum over all level sets)	○		
1-Dissemblance index (sum over all level sets)	○		0.883
1-distance between gravity centers of fuzzy sets		●	
1-Housdroff distance (maximum value over all level sets)	○		0.887
1-Dissemblance index (maximum value over all level sets)	●		
1-Housdroff distance (for 1-level set)	●		0.926
1-Dissemblance index (for 1-level set)	●		
1-LUB of 1-level set for type-2 absolute difference set		○	1.000
1-gravity center of type-2 absolute difference set		●	1.000

* Z : Zwick et al. (1987), Y: Yoshikawa et al. (1996), ● : recommend index

3. 結果および考察

指標のグループ化：表1に相関係数r = 0.866 (r^2 = 0.75)までで形成されたクラスタと各クラスタのメンバー間での相関係数の最小値を示す．全組合せを用いた結果と非空集合となる組合せを用いた結果の間に顕著な差は認められなかったため，ここでは全組合せに関する結果についてのみ触れる．表より本稿で対象とした30の指標は13のグループに分かれることが見て取れる．本稿で使用した指標の多くは，基本となる演算について数種の特徴量を算出するという形態を取る(例えば，論理積(＝基本演算)の所属度最大値，相対濃度，濃度比)．表から，基本となる演算が異なる同一の特徴量がクラスタを形成する傾向があることが見て取れる．したがって，*t-norm*演算を複数採用することや，レベル集合間の距離に関連した指標を複数使用することは得策と言えない．

先行研究との比較：表1の2,3列に*Zwick*ら[1]と吉川ら[2]の研究で使用された指標を示した．●で示した指標は主観をよく反映する指標として推奨されているものである．表より，上述の理由から，両者とも効率的に指標候補が選択されてとは言い難い．とくに*Zwick*らの推奨している指標のうち，1レベル集合から算出された*Housdorff*距離と*dissemblance*指標は同一クラスタに含まれていることが見て取れる．他方吉川らについて見ると，*Zwick*らの使用した指標と重複しないように*t-norm*演算を中心に選択したことが，少数のグループへ指標が集中した原因と考えられる．また両研究で推奨されている指標は，2つのファジィ集合の要素方向の距離に関連した指標であることがわかる(論理積の所属度最大値については吉川ら[2]で問題点が指摘されている)．

4. まとめ

本稿では，主観的な類似度を反映したファジィ集合間の類似性指標を導出する際に不可欠な指標間の相互関係をシミュレーションを通して検討した．その結果から指標の選択法，先行研究の結果について考察を行った．

今後の課題として，実際の心理実験結果と本稿のグループ化の比較を行うこと，また選択の偏りによる影響の評価を行うことなどが挙げられる．

参考文献

[1] Zwick, R. et al.: Measures of similarity among fuzzy concepts: A comparative analysis, Int. J. of Approximate Reasoning, 1, 221-242 (1987)

[2] Yoshikawa, A. et al.: Relationship between sujective degree of similarity and some similarity indices of fuzzy sets, Proc. of IIZUKA'96, 818-821 (1996)

[3] Dubois, D. and Prade, H.: Fuzzy sets and systems; Theory and applications, Academic Press (1980)

[4] 吉川他：線形関数で表現される連続ファジィ集合に関する集合演算の計算法の改善について，第9回ファジィシステムシンポ予稿集，705-708 (1993)

連絡先 606 京都市 左京区 松ヶ崎 御所海道町
京都工芸繊維大学 工芸学部 電子情報工学科
ayumi@dj.kit.ac.jp, http://www-sip1.dj.kit.ac.jp/
TEL: 075-724-7496, FAX: 075-724-7400

THC4-2

ニューラルネットワークによるファジィ識別の性能評価

Performance Evaluation of Fuzzy Classification by Neural Networks

新居　学，石渕　久生
Manabu Nii　and　Hisao Ishibuchi

大阪府立大学工学部経営工学科
Department of Industrial Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract　In this paper, we examine the performance of a fuzzy classification method where the possibility area of each class is identified by the learning of a multilayer feedforward neural network. Our method does not always assign an input pattern to a single class because the possibility areas of different classes may overlap one another in the pattern space. First, we illustrate our fuzzy classification method. Next we examine its performance by computer simulations on a real-world test problem. Then we discuss the relation between our method and the reject option. Finally we extend our method to the case where a rejection penalty is explicitly given in classification problems.

1．はじめに

本研究では，ニューラルネットワークを用いたファジィ識別手法[1)]の性能を調べる．パターン識別問題において，クラス間の重なりはファジィ境界と考えることができる．入力パターンがファジィ境界に存在する場合は，ニューラルネットワークを用いたファジィ識別手法により，そのパターンが属する可能性のあるクラスの集合が得られる．

本研究では，まず，ニューラルネットワークを用いたファジィ識別手法について述べ，クレジット認可データの識別問題を用いてその性能を調べる．次に，識別拒否に対するペナルティを導入しファジィ識別手法の拡張を行う．

2．ファジィ識別

対象となる問題として，n次元パターン空間Ω内でのcクラス識別問題を考える．ここで，$\mathbf{x}_p=(x_{p1},x_{p2},...,x_{pn})$，$p=1,2,...,m$を学習用パターンとする．ファジィ識別手法では，$\Omega_k^{\mathrm{Pos}}$をクラス$k$の可能性領域とすると，以下の式を満足するように$\Omega_k^{\mathrm{Pos}}$が決定される．

$$\mathbf{x}_p \in \Omega_k^{\mathrm{Pos}} \text{ for } \forall\, \mathbf{x}_p \text{ in Class } k,\ k=1,2,...,c \quad (1)$$

式(1)は，「それぞれのクラスの可能性領域が，対応するクラスの学習用パターン全てを含んでいる」ということを意味している．入力ベクトル$\mathbf{x}=(x_1,x_2,...,x_n)$に対応するニューラルネットワークの出力値を$o_k(\mathbf{x})$とすると，それぞれのクラスの可能性領域$\Omega_k^{\mathrm{Pos}}$は，学習後のニューラルネットワークからの出力値により，以下のように決められる．

$$\Omega_k^{\mathrm{Pos}}=\{\mathbf{x} \mid o_k(\mathbf{x})\geq\beta,\ \mathbf{x}\in\Omega\} \text{ for } k=1,2,...,c \quad (2)$$

ここで，βは$0<\beta<1$であるようなしきい値である．式(1)と式(2)から，学習後のニューラルネットワークでは，以下の大小関係が成り立たねばならない．

$$o_k(\mathbf{x}_p)\geq\beta \text{ for } \forall\, \mathbf{x}_p \text{ in Class } k,\ k=1,2,...,c \quad (3)$$

式(3)を満たすようにニューラルネットワークを学習する．入力ベクトル$\mathbf{x}_p$に対する教師ベクトルを$\mathbf{t}_p=(t_{p1},t_{p2},...,t_{pc})$と次のように与える．

$$t_{pk}=\begin{cases}1, & \text{if } \mathbf{x}_p\in\text{Class } k,\\ 0, & \text{otherwise,}\end{cases} \quad (4)$$

一般的なバックプロパゲーション・アルゴリズムにおいて，誤差e_pは以下のように与えられる．

$$e_p=\sum_{k=1}^{c}e_{pk}=\sum_{k=1}^{c}(t_{pk}-o_{pk})^2/2 \quad (5)$$

ファジィ識別手法では，式(5)における誤差関数e_{pk}を，次式のように修正する．

$$e_{pk}=\begin{cases}(t_{pk}-o_{pk})^2/2, & \text{if } \mathbf{x}_p\in\text{Class } k,\\ \omega(u)\cdot(t_{pk}-o_{pk})^2/2, & \text{otherwise,}\end{cases} \quad (6)$$

ここで，uは現在の学習回数であり，$\omega(u)$は$0<\omega(u)\leq 1$で，$u\to\infty$のとき$\omega(u)\to 0$であるような減少関数である．もし$\mathbf{x}_p$がクラスkに属さなければ，$\mathbf{x}_p$に対する誤差e_{pk}は$\omega(u)$により減らされる．結果として，クラスkであるような入力ベクトルに対して，k番目の出力ユニットのみが強く学習されるようになる．したがって，十分な学習の後では，

次式が成立すると期待できる．

$$o_k(\mathbf{x}_p) \approx 1 \text{ for } \forall \mathbf{x}_p \text{ in Class } k,\ k = 1,2,...,c \quad (7)$$

式(7)より，十分な学習の後では，式(3)が満たされていると期待できる．式(6)を誤差関数に用いた場合の学習アルゴリズムは，一般的なバックプロパゲーション・アルゴリズムと同様に導出することができる．

3．数値実験

3．1　クレジット認可データの識別問題

性能評価のため，Quinlan [2] で用いられているクレジット認可データの識別問題[3] にファジィ識別手法を適用した．クレジット認可データの識別問題は，690 個のデータからなる 14 次元２クラス識別問題である．ニューラルネットワークの学習におけるパラメータは，慣性項係数 $\alpha = 0.9$，学習率 $\eta = 0.25$，しきい値 $\beta = 0.5$ とした．式(6)における $\omega(u)$ を $\omega(u) = 1/\{1+(u/5000)^3\}$ とし，20000 回の学習を行った．まず，学習用データに対する性能を表１に示す．表１は，異なる初期値から始めた 10 回の試行の平均を示している．次に，汎化能力を調べるために，10-hold cross-validation 法を用いて実験を行った．ニューラルネットワークの学習パラメータは学習用データに対する数値実験と同様である．結果を表２に示す．表２は 10-hold cross-validation 法を２回適用した平均を示している．

表１ 学習用データに対する性能

Original class	Classification results		
	Class 1	Class 2	Class 1 or Class 2
Class 1	354.3	9.1	19.6
Class 2	17.1	179.6	110.3

表２ 評価用データに対する性能

Original class	Classification results		
	Class 1	Class 2	Class 1 or Class 2
Class 1	313.5	25.0	44.5
Class 2	46.5	135.5	125.0

表１と表２からわかるように，誤識別パターン数は学習用データに対して 26.2 パターン（3.8%），評価用データに対して 71.5 パターン（10.4%）である．これは，文献２）の結果と比較しても低い値である．また，多くのパターンが「クラス１またはクラス２」とファジィ識別されていることがわかる．

3．2　識別拒否に対するペナルティの導入

ニューラルネットワークを用いたファジィ識別手法では，誤識別パターン数は減少しているが，ファジィ識別されるパターン数が増加している．すなわち，特定のクラスへの識別を拒否されるパターン数が増加している．ここでは，識別拒否に対するペナルティを導入することにより，ニューラルネットワークを用いたファジィ識別手法を拡張する．

個々の入力パターンに対して，γ_{error} と γ_{reject} を，それぞれ，誤識別と識別拒否のペナルティとする．このとき，例えば，$\omega(u)$ を次のように修正する．

$$\omega(u) = \max\{\frac{1}{1+(u/5000)^3},\ \frac{\gamma_{\text{reject}}}{\gamma_{\text{error}} - \gamma_{\text{reject}}}\} \quad \text{for } 1 \le u \le 20000 \quad (8)$$

上式を用いたファジィ識別手法をクレジット認可データに適用した結果を表３に示す．表３から，識別拒否に対するペナルティの大きさにより，識別拒否率と誤識別率の関係を調整できることがわかる．

表３ $\gamma_{\text{reject}} / \gamma_{\text{error}}$ と性能の関係（学習用データ）

$\gamma_{\text{reject}} / \gamma_{\text{error}}$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30
識別拒否率(%)	18.4	11.2	4.5	3.7	2.4
誤識別率(%)	3.3	3.8	4.4	4.5	4.8

4．おわりに

本研究では，ニューラルネットワークを用いたファジィ識別手法の性能を調べた．クレジット認可データの識別問題へ適用することにより，Quinlan [2] で報告された結果より低い誤識別率を持つことを示した．また，識別拒否に対するペナルティの導入により，識別拒否率と誤識別率を調整できることを示した．

参考文献

1) H. Ishibuchi and M. Nii: Possibilistic Fuzzy Classification Using Neural Networks, *Proc. of ICNN'97* (to appear).

2) J. R. Quinlan: *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA (1993).

3) Irvine Data Sets, available via anonymous FTP from *ics.uci.edu* in directory */pub/machine-learning-databases.*

連絡先：
〒593　大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学 工学部 経営工学科
石渕 久生
TEL: 0722-52-1161(Ext. 2377)
FAX: 0722-59-3340
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THC4-3

感性評価データの解析手法について

On Analysis of Intuitive Evaluation Data

川中 愛　　中森 義輝
Ai Kawanaka　　Yoshiteru Nakamori

甲南大学 理学部 応用数学科
Department of Applied Mathematics, Konan University

Abstract: This paper suggests two identification techniques of intuitive evaluation data as fuzzy objects in the factor space. The first technique maps individual data into the factor space constructed by the averaged data. The second technique derives fuzzy factor loadings expressed by interval fuzzy numbers, and identifies intuitive data as hyper-rectangular parallelepipeds. For both techniques, fuzzy distances between fuzzy objects are defined and compared through a classification problem of fuzzy objects.

1 はじめに

人間がある商品に対して抱くイメージはそれぞれ異なるものである。また，同じ言葉でその商品を評価しても，その評価尺度は異なるものである。ある商品に対する感覚的評価データを処理する際，このような人間の感性のバラツキや，言葉の曖昧性をどのように取り扱うかが問題となる。そこで，人間の感性のバラツキをその言葉の広がりとみなして処理する方法の有効性を，ファジィデータの因子分析法[1]と比較検討することによって示す。

なお，本研究では対象商品をシステムキッチンとし，「個性的ー一般的」「ゆったりしているーきゅうくつそう」などのシステムキッチンを評価する際に用いられる感性表現対を評価項目としたSD法[2]による，商品サンプル40枚，感性表現33組，評定者30人からなる感性データを用いる。

2 因子空間のファジィ対象

まず，評定者平均データを用いて従来の因子分析を行った。因子数は4で，第1因子は「様式」，第2因子は「雰囲気」，第3因子は「価格」，第4因子は「空間」を表す因子と命名した。このように因子分析の結果は意味空間を把握できるものとなったが，この方法ではデータの散布情報を平均値に集約することにより情報にロスが生じる。

そこで，感性表現・商品サンプル・評定者の3相データを扱える3相因子分析[3]の適用を試みた。しかし，今回のように商品サンプルと感性表現の数が多い場合，3相因子分析では次数が大きくなりすぎて評定者の分布は扱いにくいものとなった。したがって，以下のように，個人データを従来法の因子分析から求められた因子空間へ写像することにより，評定者のバラツキを考慮するという方法を採った。

2.1 個人データの因子空間への写像

まず，評定者平均データを用いて因子分析を行い因子負荷量 A，因子得点 F，独自因子 E を求める。因子得点と独自因子を用いて，次式により評定者 k の感性データ Z_k が因子空間へ写像される。

$$A_k = (Z_k - E)F^T(FF^T)^{-1} \qquad (1)$$

これを評定者全員に行った結果，評価データを評定者平均して求められた因子負荷量と，写像データを評定者平均したデータの最大誤差は0.14で，誤差の平均はほぼ0となった。よって，評定者データは因子空間

上へ写像できたと考えられる。このようにして，感性表現 i は因子空間において全評定者からなる雲のような広がりを持ったファジィ対象 O_i として認識される。

2.2 ファジィ対象のメンバシップ関数

因子空間内でファジィ対象として認識された O_i を円錐形のメンバシップ関数によって定義する。

$$\mu_{O_i}(z) = 1 - \min\left\{1,\ \|z\|_{O_i}\right\} \tag{2}$$

ただし，

$$\|z\|^2_{O_i} = z_i^{\top} P_{O_i}^{-1} z_i \tag{3}$$

$$P_{O_i}:\ p^i_{jj'} = \begin{cases} c_i^2 \lambda_{ij} & (j = j') \\ 0 & (j \neq j') \end{cases} \tag{4}$$

ここで，λ_{ij} は感性表現 i の分散共分散行列の j 番目の固有値，z_i は感性表現 i の局所座標系による感性データベクトル，c_i は超楕円体の半径を決定するパラメータである。このパラメータを決定する条件として，今回は中心から 80% の評定者を含むところまで c_i の値を増加していった。その結果，c_i は 2.268 から 3.114 までの値となった。

2.3 ファジィ対象間の距離

以上の手法によって求められたファジイ対象 O_i, O_j 間の距離を以下のようなアルファレベル距離で定義する [4]。

$$d^{\alpha}_{L(ij)} = \sup\left\{d\left(x, O_j\left(\alpha\right)\right) | x \in O_i\left(\alpha\right)\right\} \tag{5}$$

$$d^{\alpha}_{R(ij)} = \sup\left\{d\left(O_i\left(\alpha\right), x\right) | x \in O_j\left(\alpha\right)\right\} \tag{6}$$

ここで，$O_i(\alpha)$ は感性表現 i のメンバシップ値が α 以上のデータ集合，$d(x, O_j(\alpha))$ は点 x と集合 $O_j(\alpha)$ の距離を表し，

$$d\left(x, O_j\left(\alpha\right)\right) = \min\left\{d\left(x, y\right) | y \in O_j\left(\alpha\right)\right\} \tag{7}$$

と定義される。O_i と O_j の距離を，

$$d_{ij} = \max\left\{d_{L(ij)}, d_{R(ij)}\right\} \tag{8}$$

と定義する。

3 ファジィデータの因子分析

因子空間に感性表現のファジィ対象を定義するもう1つの方法として，ファジィデータの因子分析法が提案されている [1]。これは，相関係数を区間ファジィ数で表現することにより，相関係数行列の固有値さらには因子負荷量を区間ファジィ数として求める方法である。

3.1 ファジィ相関行列

まず，評定者の平均データによる相関行列を r_{ij} とし，このデータを用いて因子分析をしたときの独自因子の標準偏差を $D = \left(d_i^2\right)$ とする。ついで，各評定者の感性表現の相関行列を計算し，全評定者の相関行列の対応する (i, j) 成分の標準偏差 σ_{ij} を計算する。γ をファジィ度を考慮するパラメータとし，2つの量

$$r^L_{ij} = max\{-1,\ r_{ij} - \gamma\sigma_{ij}\} \tag{9}$$

$$r^R_{ij} = min\{r_{ij} + \gamma\sigma_{ij},\ +1\} \tag{10}$$

を定義する。これらを用いてファジィ相関行列 $\widetilde{R}$ を定義する。

$$\widetilde{R} = (\tilde{r}_{ij}) = \left(\left[r^L_{ij}, r^R_{ij}\right]\right) \tag{11}$$

つぎに，ファジイ相関行列を以下のように変更したものを用いてファジイ因子負荷量を求める。

$$\widetilde{R} - D = (\tilde{s}_{ij}) = \left(\left[s^L_{ij}, s^R_{ij}\right]\right) \tag{12}$$

$$\left[s^L_{ij}, s^R_{ij}\right] = \begin{cases} \left[r^L_{ij} - d_i^2, r^R_{ij} - d_i^2\right], & i = j \\ \left[r^L_{ij}, r^R_{ij}\right], & i \neq j \end{cases} \tag{13}$$

3.2 ファジィ因子負荷量

平均相関行列 R の固有値，固有ベクトルを λ_i，$\boldsymbol{e}_i$ と表す。ここに，

$$\lambda_1 = 16.148, \qquad \lambda_2 = 6.264$$
$$\lambda_3 = 4.282, \qquad \lambda_4 = 3.253$$

ファジィ相関行列 $\widetilde{R}$ に対応するファジィ固有値 $\tilde{\lambda}_i = [\lambda_i^L,\ \lambda_i^R]$ を以下の2つの問題を解くことにより求める。

(P_L)

$$\begin{aligned} &Maximize && \sum_i \lambda_i^L \\ &subject\ to \\ &\qquad 0 \ \leq\ \lambda_i^L \ \leq\ \lambda_i \\ &\left|\lambda_i^L e_{ij}\right| \ \leq\ \max\left\{\left|\sum_k s^L_{jk} e_{ik}\right|, \left|\sum_k s^R_{jk} e_{ik}\right|\right\} \end{aligned}$$

(P_R)

$$\begin{aligned} &\textit{Minimize} \quad \sum_i \lambda_i^R \\ &\textit{subject to} \\ &\qquad \lambda_i^R \geq \lambda_i \\ &|\lambda_i^R e_{ij}| \geq \min\left\{\left|\sum_k s_{jk}^L e_{ik}\right|, \left|\sum_k s_{jk}^R e_{ik}\right|\right\} \end{aligned}$$

だだし，e_{ij} は $\boldsymbol{e}_i$ の第 j 成分である。なお，γ が 1.5 のときのファジィ固有値は

$$\tilde{\lambda}_1 = [11.156, 19.790], \quad \tilde{\lambda}_2 = [6.201, 6.388]$$
$$\tilde{\lambda}_3 = [4.244, 4.235], \quad \tilde{\lambda}_4 = [1.461, 4.617]$$

次に，$\tilde{\lambda}_i$ を用いてファジィ因子負荷量 $\tilde{A}$ を以下のように推定する。

$$\tilde{A} = (\tilde{a}_{il}) = \left([a_{il}^L,\ a_{il}^R]\right) = \begin{cases} \left[\sqrt{\lambda_l^L} e_{li},\ \sqrt{\lambda_l^R} e_{li}\right], & e_{li} \geq 0 \\ \left[\sqrt{\lambda_l^R} e_{li},\ \sqrt{\lambda_l^L} e_{li}\right], & e_{li} < 0 \end{cases} \tag{14}$$

評定者平均の因子負荷量と共通性を用いて因子軸の回転を行う。その回転行列を $T = (t_{ij})$ とする。これを用いて，以下のように回転後のファジィ因子負荷量を求める。

$$\tilde{B} = (\tilde{b}_{il}) = \left([b_{il}^L,\ b_{il}^R]\right) = \sum_{j=1}^m t_{lj}(\times)\,[a_{ij}^L,\ a_{ij}^R] \tag{15}$$

$$t_{lj}(\times)\,[a_{ij}^L,\ a_{ij}^R] = \begin{cases} [t_{lj}a_{ij}^L,\ t_{lj}a_{ij}^R], & t_{lj} \geq 0 \\ [t_{lj}a_{ij}^R,\ t_{lj}a_{ij}^L], & t_{lj} < 0 \end{cases} \tag{16}$$

以上の方法では，相関行列の中心値として評定者平均を用い，各評定者の相関行列の要素の標準偏差により下限値と上限値を求めて分析を行っている。これは，2章の分析結果と比較したいためである。つまり，各評定者の相関行列の中央値を用いて分析を行うという方法も考えれるが，その場合，2章の方法と因子軸の回転が異なるため，比較が困難になるためである。

本節の方法により得られるファジィ因子負荷量の下限値，上限値は，2章の因子空間上に写像したファジィデータの評定者標準偏差を用いて算出した因子負荷量の下限値，上限値と，ファジィ度調節パラメータ γ を適切にとれば，ほぼ同じような値を示すことが数値実験により明らかとなった。このことより，ファジィデータの因子分析法は評定者の感性のバラツキを扱う方法として有効な手法であると言える。

3.3 対象間のファジィ距離

以上の手法によって，1つの感性表現はファジィ因子空間における超直方体で表せる1つの対象として認識される。それらをここでも O_i と表す。O_i, O_j 間のファジィ距離

$$\tilde{d}_{ij} = [\ d_{ij}^L,\ d_{ij}^R\ ] \tag{17}$$

を以下のように定義しよう。まず，各因子軸に沿った最小および最大距離

$$\delta_{ijl}^L = \min\left\{|x-y|\Big|^\forall x \in [b_{il}^L,\ b_{il}^R],^\forall y \in [b_{jl}^L,\ b_{jl}^R]\right\}$$

$$\delta_{ijl}^R = \max\left\{|x-y|\Big|^\forall x \in [b_{il}^L,\ b_{il}^R],^\forall y \in [b_{jl}^L,\ b_{jl}^R]\right\}$$

を計算し，ファジィ距離の下限値と上限値を次のように定義する。

$$d_{ij}^L = \left\{\sum_{l=1}^m (\delta_{ijl}^L)^2\right\}^{\frac{1}{2}}, \quad d_{ij}^R = \left\{\sum_{l=1}^m (\delta_{ijl}^R)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{18}$$

4 2つの方法の比較

ここでは，以上の2つの方法を感性表現群のグルーピングを行うことにより比較検討する。

4.1 感性表現群のカバーリング問題

感性表現データのカバーリング問題を，すべての変数が0と1に限られた整数計画問題（全0-1計画問題）とグラフ理論により，グラフ上の最適化問題として定式化する。この定式化の利点は，因子分析では行うことができなかった感性表現のグルーピングと代表感性表現を，ある基準のもとで数学的に同時に決定するところにある。まず，感性表現間の関係をグラフ

$$G = (V, E_\beta) \tag{19}$$

で表現する。グラフ $G = (V, E_\beta)$ において，頂点集合

$$V = \{1, 2, \cdots, J\} \tag{20}$$

は感性表現を表し，枝集合

$$E_\beta = \{\{i, j\} \mid i, j \in V;\ d_{ij} \leq \beta\} \tag{21}$$

は感性表現間の２項関係を表す。ここに，d_{ij} は感性表現間の距離を表し，２章の方法では α-レベル距離 d_{ij}^{α}，３章の方法ではファジィ距離 $\tilde{d}_{ij}$ の上限値 d_{ij}^{R} を用いる。また，β は感性表現間の距離の閾値であり，何通りかの値を設定して数値実験を行う。

代表感性表現を選定する際，すべての感性表現が少なくとも１つの代表感性表現と関係をもつようにし，かつ，代表感性表現の数をできるだけ少なくするという問題を考える。これは，グラフ $G=(V,E_{\beta})$ において頂点集合 $V_0 \subseteq V$ を，V_0 に含まれないいずれの頂点も V_0 に含まれるいずれかの頂点と隣接するように選ぶ中で，V_0 の要素数 $|V_0|$ が最小のものを求めることに相当する。このような頂点集合 V_0 は，グラフ $G=(V,E_{\beta})$ の支配集合と呼ばれる。支配集合の中で要素数 $|V_0|$ が最小のものは最小支配集合と呼ばれる。

感性表現間の２項関係を表す隣接行列 $A=(a_{ij})$ と，整数変数集合 $\{x_j\}$ を導入する。

$$a_{ij}=\begin{cases} 1 & \{i,j\} \in E_{\beta} \\ 0 & \{i,j\} \notin E_{\beta} \end{cases} \tag{22}$$

$$x_j=\begin{cases} 1 & j \in V_0 \\ 0 & j \notin V_0 \end{cases} \tag{23}$$

ただし，V_0 は代表感性表現の集合であり，以下の整数計画問題を解くことにより求める。

$$\begin{aligned} &Minimize && \sum_{j \in V} c_j\, x_j \\ &subject\ to && \sum_{j \in V} a_{ij}\, x_j \geq 1 \quad {}^{\forall} j \in V \end{aligned} \tag{24}$$

ここで，c_j は各感性表現に対する重みとして，２章の方法に対しては α-レベルにおける全評定者のデータを覆う最小の超楕円体の体積，３章の方法に対しては感性表現を表す超直方体の体積を用いる。これは，できるだけ感性のバラツキが小さい感性表現を代表感性表現として選定しようという意図からである。

4.2 比較・検討

因子空間へ全評定者を写像することによって感性表現をファジィ対象とみなし，代表感性表現を選定する方法と，評定者の分散値を考慮してファジィ因子空間を構成し，代表感性表現を選定する方法を試みた。数値実験により，どちらの方法もパラメータによって同じような結果を得ることができた。しかし，ファジィ因子分析のパラメータは写像による方法のパラメータよりも決定しにくく，解析者の主観に大きく依存してしまうという問題点がある。よって，評定者のバラツキを考慮する方法としてファジィ因子分析の適用も一手段ではあるが，因子空間へ写像した点をバラツキと見なす単純な方法も有効であると思われる。

5 おわりに

第１の方法でメンバシップ値を求めたが，メンバーシップ関数の中心を外れ値など全く考慮せず，全評定者の平均としていることに問題がある。また，中心を平均値としているため，中心を取り囲むように評定者が分布しているというファジィ対象もあった。そこで，感性データを扱うときは，三角型よりも台形型のメンバシップ関数の方が望ましいと思われる。

参考文献

[1] 中森義輝・佐藤和明・和多田淳三: 感性評価データのファジィ距離空間について. 第12回ファジィシステムシンポジウム, June 4-7, 東京, pp. 761-764, 1996.

[2] C. E. Osgood, G. J. Suci and P. H.T annenbaum: The Measurement of Meaning. Univ. of Illinois Press, 1957.

[3] 圓川隆夫: 多相データの因子分析法に関する研究. 日本経営工学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 101-106, 1980.

[4] M. Sato and Y. Sato: Fuzzy Clustering Model for Fuzzy Data. Proc. of 4th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp. 2123-2128, Yokohama, Japan, March 20-24, 1995.

連絡先: 川中　愛
〒658 神戸市東灘区岡本8-9-1
甲南大学大学院 自然科学研究科
情報・システム科学専攻
Tel:078-435-2533 Fax:078-452-5507
E-mail:kawanaka@edu3.math.konan-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THC4-4

ファジィデータ解析への期待—人間に対する実験・調査の視点から—

What will we expect from the fuzzy data analysis?: View points of processing human factor data

小田哲久
Tetsuhisa Oda
愛知工業大学
Aichi Institute of Technology

Fuzzy data analysis usually means fuzzy statistical analysis such as fuzzy regression analysis and fuzzy principal component analysis. This study claims the significance of treating the fuzzy data sets obtained through experimental or non-experimental research procedure on human factors. After some special features of human factor data are presented, a linguistic fuzzy logical model is proposed as a tentative alternative to the traditional linear model.

1. ファジィデータ解析に期待するもの

ファジィデータ解析は，分析技法開発者や技法ユーザーとしての個別科学技術の研究者を，伝統的な統計学の枠にとらわれない自由な発想に導くことが期待される．

自由な発想の根幹は，古典的な統計理論が基礎を置く，「確率論」の要求する厳密な仮定は現実の観測データについてはほとんど成立しえないと認識するところに始まる．ファジィ理論をデータ解析に応用する具体化作業は，比較的早くに着手された．その具体化の第一歩は，ファジィ回帰分析にその典型的な形がみられるように，古典的な統計解析技法の基本的枠組みを用いながらも，データのばらつきの原因が単に確率的誤差分布に従うのではなく，概念境界のあいまいさに起因する，ファジィネスによるものと考えるアプローチである．そこでは，誤差分布のかわりに「ファジィメンバーシップ関数(帰属度関数)」を仮定して，新たな統計解析技法となった．そのような技法におけるデータのちらばりに関する取扱は，旧来の統計分布を基礎とする技法に比較して，より正確なものとなり，心理調査，経営分析などの，ファジィ的要素の多いデータに関しては，より安心して使える技法となっている．

これらの技法は既に社会に認知され，一定の正しい評価がなされている．その成功の原因は，基本的に旧来の枠組みを採用しながら，そこに使われるデータが，分析技法の要求するような厳密な確率的にランダムなものといえないところを改良した点にある．つまり，技法利用者の視点からは，旧来の技法を実問題に適用する上の問題点として常に意識してきた部分を見事に解決しながら，手法そのものの狙いは変わらない，という点にある．

しかし，今後のファジィデータ解析は，こういう方法論がさらに洗練されるだけでなく，もう一歩，ファジィ理論の特徴を生かした，別な方向に向かう発展の道筋があってもよいと思う．以下，人間に関するデータを分析する者の視点から，ファジィデータ解析に関する基本的なニーズと，新技法開発のいくつかの方向性を，事例をあげながら解説する．

2．MF測定に関わる基本的問題

帰属度関数（Membership Function: MF）は，ファジィ理論の基礎として，常に意識され，また，その現実的な測定法が工夫されてゆく必要がある．データ解析に関連した内容として，次の様な研究テーマが考えられる．

・MFは，果たして測定可能か．
・MFは，確率的誤差に起因する，境界の不確定性と分離測定できるか．
・MFの基本モデルは，TypeIとTypeIIを比較したとき，どちらが適切か．
・個人のMFと，集団のMFは，どういう関係にあるか．

3．確率的誤差変動とファジィネスの分離

人間に関する観測データのうち，確率変動の部分は，MFに包含されるとみなして，すべてをファジィに吸収しようとする研究者が多いが，ファジィによる演算は，多分に幅広すぎる推定結果をもたらすなど，問題がある．やはり，確率的な部分や，確定的であっても，一見不規則に変動する部分（カオス的挙動など）は，可能な限り，分離したほうがよい．

4．個人データと集団のデータ

個人の応答と，集団の応答に関して，統計的な分析手段でも，ファジィネスの存在を意識せざるをえないケースがままある． 例えば，人物形容語について，その語の表わす社会的望ましさを1次元の「良い―悪い」尺度上に評定させてたとき，ほとんどの語が，良い側の応答と，悪い側の応答を必ず含む．つまり，人によって，同じ語を良くも悪くもとるということになる．しかしながら，不思議なことに，数十人程度の人数の2つの被験者群について，各語の平均評定値をとると，各語は両群とも，ほぼ同一の値を示す（尾関ら[1]）．一見，コミュニケーションなどとれそうにないほどの個人差を見た目には，集団レベルでの均一性が異常にすら感じられる．そして，そのような個人差が確率分布に集約できないことは，同一被験者からは類似応答が得られることで納得できる．ランダムネスは，サンプリング過程に存在するのであって，もともとの対象にランダムネスが存在するわけではない．この，従来の統計解析技法では取り扱いの困難だった，個人の応答（行動）の予測こそが，ファジィデータ解析の活躍しうる分野ではないか，と期待する．それは夢かもしれないが，個人の特性をうまく数量化できれば，不可能でなくなる．

5．ファジィ理論を測定技法に生かすための方策

ファジィ理論は，データの測定についても，新しいアイデアを提供する．

例えば，Heskethら[2]は，「ファジィ評定法」なる区間データを測定する方法を開発し，吉川ら[3]は「ファジィ範疇法」なる新技法を開発して，心理尺度構成法に関する新しいアプローチを提案している．小田[4]は，MF測定の方法を開発する過程で，FCR法という，評定尺度法の新技法を開発している．

これらは，いずれも，ファジィ理論の枠組みが，伝統的な測定技法では測定が無理なために，やむなく産み出された技法ともいえる．従来のデータを別の新しいデータ解析技法で分析し直すというアプローチだけでは，結果がこれまでと大きく変わらない可能性がある．その意味で，新しいデータ解析技法では，測定段階から，過去と違うものを開発することで，これまでにない独自性を主張することが可能となる．

6．多変量解析における線形システム

古典的な多変量解析技法のうち，代表的なものに，重回帰分析，主成分分析，判別分析，クラスター分析がある．これらは，さらに詳細な分析技法のオプションに分けられるが，その多くが変数の線形結合モデルを技法の中心に置いている．これは，数学的要請によるものであって，データ側の要求に合致したものとは限らない点に注意する必要がある．例えば，重回帰で求められる回帰式が実際の構造を反映しているとは必ずしもいえないし，むしろ，そうでない場合が普通であろう．予測がよく適合することと，構造が類似していることは同義でない．多項式近似でパラメータを増加させた場合がその例である．因子構造を線形モデルで抽出したとしても，やはりそれが現実の構造をどれだけ反映しているかは疑問である．従来，心理学領域では多変量データから，未知の構造を抽出しようとする際に，一旦，線形結合モデルとしての因子構造を求

め，それらを座標回転して，実際の変量との関連性の強さが最大となるようにして，その内容から，各因子の定性的な意味を解釈する．しかし，それが必ずしも適切に行えるとは限らないし，因子が求まっても，それが現実の構造をよく描写しているかどうかは不明である．

7．ファジィシステム同定

和泉ら[5],[6]による，線形ファジィシステムは，直観主義論理での推論規則を応用したアルゴリズムで，可能性システムと必然性システムをそれぞれ同定し，その両システムを一個の重みパラメータで線形結合したシステムである．この技法のアプローチは，ファジィデータの合理的な分析法に対して，ひとつの実際的な方向性を示している．しかし，可能性システムと必然性システムを線形結合したシステムは，実際的予測には役立つが，構造の理解には使えないという問題点を抱えている．これは，近年よく使われるようになった，ニューロモデルも同様である．

8．線形モデルへの決別

線形モデルの便利さはいうまでもない．しかし，その反面，普段は気がつかないが，不便さもある．ファジィデータ解析では，システム同定時に非線形演算を採用したならば，もう線形演算に固執する必要はない．もし，心理の世界を構成する構造モデルとして，線形モデルだけが有効と信じていると，次の様な問題の解決を放棄する結果になる可能性がある．

9．言語モデルへの橋渡しとしてのファジィデータ解析

林ら[7]は，人の性格を，欧米を中心とする諸研究から，５次元の基本構造から構成されると仮定して，各次元に１０項目の特性語（人物形容語）を置いた．この５０項目を自己評定させたが，その評定データの因子分析（主因子法，バリマックス回転）の結果をもとに，各因子名を，第１因子より，外向性(E)，勤勉性(C)，協調性(A)，知性(I)，情緒安定性(S)としている．

例えば，$E=.83x_1-.79x_2-.74x_3-.72x_4+.72x_5+.72x_6-.71x_7-.65x_8+.65x_9+.50x_{10}+\ldots$で，$x_{10}$以下の係数は，十分に小さい．ここで，この因子をAND,OR,NOTからなる言語論理表現に翻訳することを考える．そうすると，ここで大きな係数を持つ項目は，E次元に対して，OR結合

にせざるをえない．すなわち，$x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_6 \vee x_7 \vee x_8 \vee x_9 \vee x_{10} \Rightarrow E$　というわけである．（係数の差は無視した．）これは，必ずしも，分析者の意にかなうものではない．何故なら，本来，性格次元なるものは，下位の項目のAND結合で構成されるべきものと考えられるからである．ただし，現実には，下位属性を完全に備えた個体は存在しない可能性が大きい．結局の所，理念としての性格次元はAND結合であっても，現実の個体の性格次元はOR結合になるのかもしれない．その両結合モデルのバランスをとったのが線形結合モデルであり，従って実際的に有効であるともいえる訳だが，論理モデルの構築を必要とする場合，やはり無力である．

１０．上位概念は，下位概念の和集合か積集合か．

上で見たように，人間の性格は，内向性／外向性，など，５つの因子で説明できるとする，Big5モデルが，多くの研究で支持されているが，このような，因子分析的手法で抽出された諸概念は，その下位概念とどういう関係にあるのか，論理モデルに還元して言語ルール表現しようとしたとき，上位概念と下位概念の関係がどうなっているのか，実はあまりよくわからないということに気がつく．内向，外向などの上位概念が，本来，排他的に構成された概念ではないことも，問題を複雑にしているともいえる．すなわち，個体レベルでみれば，同一個体に内向と外向の両側面を包含していることも多分にありうることである．社会現象には，このように，概念境界があいまいなだけでなく，下位概念との関係が明瞭でない概念もありうりる．最下位要素のリストへの被験者応答を分析して，そこからより上位の概念を抽出してゆくような問題に対しては，いわゆる「包含分析」を拡張，発展させる方向で

の解決もありうる.

１１．論理モデルの直接的同定の可能性

ファジィデータから，論理モデルを直接的に同定することは，人間の用いている概念の構成を明瞭にする上で有効である.しかし,そのシステムは一意に定まらないとされ，何らかの基準で，問題によく適合するモデルの構造を設定してゆく必要がある.その際,線形システムから得られる利益には敢えて目をつむる必要がある.ここで，上で述べたような,「ファジィ的な階層構造をもつ問題」について,何か適切な同定方式が開発できないものであろうか.

１２．まとめ

以上，人間に関する実験や調査のデータを普段取り扱っている立場から，ファジィデータ解析への期待と,ささやかな提案を行った.主たる要旨は，次の通りである.

（１）人間に関するデータの解析では，実際データの挙動は，線形数学の世界とは異質の空間である.

（２）新分析技法の開発は，新しい測定技法とセットで開発する事で,より有効な技法となる.

（３）線形モデルは，問題の構造理解には直接役立たないことがある．ファジィ言語論理モデルを直接同定できるような技法の開発が期待される.

あとがき

本提案をまとめるにあたり，当企画セッションのコーディネータ,中森義輝氏（甲南大学）より,このテーマをご提示いただいた.このテーマは小生には重荷であったが，実験や調査のデータを実際に解析する者の立場から執筆させていただくことで,分析技法を開発する立場の方に,自分の使える技法を開発してもらえる機会となればありがたいことと思い，無鉄砲にもお引き受けすることにした．この機会を与えていただいた氏に深謝する．また，本研究の多くの部分が,林　文俊氏（愛知工業大学）との共同研究の中の議論から生まれたものである.尚,本原稿中の既存技法に関する認識は，開発者の意図を十分に理解できていない可能性がある.また,理論とその応用は日進月歩している．浅学故の誤りをご指摘いただければ幸いである.

参考文献

[1]尾関　守,小田哲久「性格特性用語の研究「」愛知工業大学研究報告,No.20,pp.149-156(1985)

[2]Hesketh,T.,Pryor,R.&Hesketh,B.:"An aplication of a computerized fuzzy graphic rating scale to the psychological measurement of individual differences," International Jornal of Man-Machine Studies, pp.21-35,Vol.29 (1988)

[3]吉川　歩，西村　武「ファジィ範疇法による心理尺度構成とその実験的検証」,日本ファジィ学会誌 Vol.5,No.4,pp.719-731 (1993)

[4]小田哲久「ファジィ多項目並列評定法の特徴について」日本経営システム学会誌，Vol.12,No1,pp.23-32 (1995)

[5]和泉孔二，田中英夫，浅居喜代治「ファジィ論理システムによる多変量解析モデルとその企業評価への応用」，日本経営工学会誌，Vol.36,No.1, pp.54-59 (1985)

[6]和泉孔二，田中英夫，浅居喜代治「直観主義論理体系に基づくファジィシステムの双対性」,電気通信学会論文誌，Vol.J66-D, No.10, pp.1114-1121 (1983)

[7]林文俊，小田哲久「ファジィ理論による性格特性５因子モデル(FFM)の検討，心理学研究,Vol.66,No.6,pp.401-408 (1996)

[8]林文俊「対人認知構造の基本次元についての一考察」，名古屋大学教育学部紀要（教育心理学），Vol.25, pp.233-247 (1978)

[9]小田哲久「人間行動モデルとしてのファジィ理論―適用の可能性と課題―」日本経営システム学会誌 Vol.10,No.1,pp.57-64 (1993)

(連絡先)

〒470-03　愛知県豊田市八草町八千草１２４７

愛知工業大学経営工学科　小田哲久

Tel 0565-48-8121　　Fax 0565-48-0077

E-mail　　t-oda@ie.aitech.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THD1-1

ファジィ指向型囲碁システムFOGの局面理解
Understanding of Game Situations in Fuzzy Oriented GO System FOG

横川　壽彦
YOKOGAWA,　Toshihiko

帝京平成大学　情報学部　文化情報学科
Faculty of Informatics,　TEIKYO Heisei University

This paper shows an outline of Fuzzy Oriented GO system FOG and its representations of game situations of GO in the open game. FOG has two basic components; Elementary GO system and Fuzzy Organized Engine. They communicate each other. Representations of situations in FOG are by concepts expressed by language (GO terms). Strategic rules simulating human player's knowledge are written by the represented concepts. Experimental results show that these rules can grasp macroscopic game situations in GO and compensate for reasoning based on the game tree search and pattern oriented knowledge.

1. はじめに

チェッカーやオセロ、チェスといった完全情報型のゲームの研究は人工知能研究の中で長い歴史を持っており、人間のチャンピオンクラスのシステムが開発されている。これらは探索のための高速のハードウェア・効率のよいソフトウェア上で静的な評価関数をいかに正確なものにするかということを主眼とする手法であった。これに対して、囲碁は非常に探索空間の広いゲームであるので、コンピュータパワーに頼った手法だけで解決することは困難である。そこで、種々のヒューリスティクスを利用する手法が提案されてきている[1][2][3]。

人間のプレーヤは言語（囲碁用語）で表現された言語的な知識を用いており、戦略決定や着手の意味の説明に用いている。そこで、人間の囲碁プレーヤの用いている言語的に表現されたルールを活用するために、ファジィ理論を用いた囲碁の実験システムFOGを提案した[4][5]。

本稿では、FOGにおける局面認識を取り上げ、序盤における石の強さと局面における重要領域の認識方法とその評価結果を報告する。

2. ファジィ指向型囲碁システムFOGの概要

ファジィ指向型囲碁システムFOG（Fuzzy Oriented GO System）は、UNIX上のX Windows Systemで動くプログラムで、C++言語を用いてインストールされている。FOGの概要を図1に示す。

FOGは、基本囲碁部EGO(Elementary GO System)とファジィエンジン部FOE（Fuzzy Organized Engine）に分かれる。EGOは、基本的な囲碁における処理（局面中に存在する石の位置情報から石間の連結情報・「石群」と呼ぶ石のグループ化と石群の基本属性に関する認識）を行う。また、対局・実験用ユーザインタフェースを持つ。一方、FOEは、ファジィ知識を利用した推論を行う。両者はUNIX上の別プロセスとして実現しており、通信をIPC（Inter Process Communication）機能を用いて行っている。

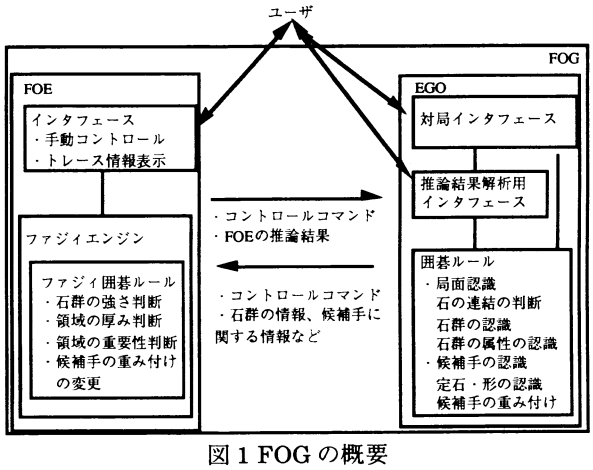


図1 FOGの概要

また、FOGは推論の個性化のための仕組みをあらかじめ用意しており、実験システムではそれらを意識的に組み合わせて使うことができるように構成している。

3. FOGの局面理解

FOGは、以下のようなプロセスで、局面を認識・推論し、次の着手を決定している。

(1) 各石群の強さを各石群の属性及びファジィルールより認識する。

(2) 各石群間の領域の重要性（及び「厚み」）を各石群

の強さとエネルギー、石群間の領域の幅などからにんしきする。

(3) 認識された領域重要性から、領域内及び領域隣接地点に存在する候補手へのファジィ重要性重みを決定する。

3.1 FOGにおける石の強さの理解

石の強さは、強い連結度合いでグループ化された一団の石（「石群」と呼ぶ）の持つ以下の属性によって判断される。

(1) 石群の眼の数
(2) 石群の囲っているテリトリの大きさ
(3) 石群を構成する石相互間の連結度合い
(4) 石群を構成する石が盤の端から近いか遠いか
(5) 石群を構成する石のダメの数

これらの推論に用いられる属性は、EGO の推論過程において認識され、石群を表現するオブジェクトの内部属性となっている。EGO は、FOE からの求めに応じてこれらの情報を通知する。

一方 FOE は、これらの情報を用いて石群の強さを認識する。現在の強さ認識アルゴリズムは以下の人間の知識を模擬的に表現するものとして実現している。

(1) 活きを得ることが容易な石群は強い。
  1a) 石群の眼の数が多いほど強い。
  1b) 石群の囲っているテリトリが大きいほど強い。
  1c) 石群のダメの総数が小さいほど弱い。
(2) 連結が強い石群ほど強い。
  2a) 石群を構成する各石相互間の連結度合いの平均を計算し、その距離が小さいほど強い。
  2b) 石群を構成する各石相互間の連結度合いを計算し、もっとも遠い隣接石間の距離が小さいほど強い。
  2c) 石群を構成する石の盤端からの距離を計算し、距離が大きいほど弱い。
(3) 石群が中央方向へ発展可能であれば弱くない。
  3a) 石群を構成する盤端からもっとも離れた石の盤端からの距離を計算し、距離が大きいほど強い。(ただし、一定以上の強さにはならない。)

基本的には、1a) および 1b)のルールから、石の基本的強さ度を計算する。その後、他のルールで補正計算を行う。ただし、石 1 個からなる石群については 1a)1b)の強さがうまく計算できない場合は、盤端からの距離とダメ総数を中心とした強さを用いる。

3.2 領域の重要性の認識

領域は、2 つの石群に挟まれた辺（盤端近くの領域）空間である。領域の重要性は、関係する石群の強さ、領域の幅（=関係する石群間の距離）、各色（白、黒）の存在する石からのエネルギーから認識される。

ルールは、関係する 2 石群が同色（味方どうし）の場合と、異色（敵どうし）の場合に分けられている。

たとえば、同色の場合のルールは以下のようになる。

ルール番号：A1
条件部：両方の石が強く、味方の石からのエネルギーが大きく、敵の石からのエネルギーが小さく、距離が大きいならば、
帰結部：0.5/重要+0.4/わからない+0.1/重要でない
...
ルール番号：A63
条件部：両方の石が強く両方の石からのエネルギーが小さく、距離が小さいならば、
帰結部：0.1/重要+0.5/わからない+0.9/重要でない

上記のルール A1 は、「広い領域で味方の両側の石が強い場合はやや重要である」という人間プレーヤの知識をルール化したものである。また、A63 は、「両側が味方の強い石である狭い領域は重要でない」という知識である。

また、敵味方が対峙している場合のルールは、以下のようになる。

ルール番号：B1
条件部：両方の石が強く、片方の色の石からのエネルギーが大きく、もう片方の色の石からのエネルギーも大きく、距離が大きいならば、
帰結部：0.8/重要+0.2/わからない+0.1/重要でない
...
ルール番号：B63
条件部：両方の石が強く、片方の色の石からのエネルギーが小さく、もう片方の色の石からのエネルギーも小さく、距離が小さい、
帰結部：0.2/重要+0.5/わからない+0.7/重要でない

上記のルール B1 は、「両側が強い石で敵味方対峙している広い領域は重要である」という知識である。また、ルール B63 は、「両側が強い石で敵味方対峙してる狭い領域はあまり重要でない」という知識となる。

条件部は各条件の AND 条件であるので、適合度は、各条件の適合度の最小値を取ることにしてある。帰結部のファジィ集合の各要素のメンバシップ値にその適合度をかけたものを、そのルールの帰結集合とする。最終的な重要性は、各ルールの OR 条件なので、各要素について、メンバシップ値のもっとも大きいものをメンバシップ値とするファジィ集合で表される。

3.3 着手のファジィ重要性重みの決定

着手のファジィ重要性重み（FW）は、次の式によっ

て計算される。

$$FW = \frac{VI - VU}{VI + VN + VU} \times K$$

ここで、VI, VU, VNは、それぞれ重要性認識ルールの帰結の、「重要」、「重要でない」、「わからない（Neutral）」のそれぞれの値である。また、パラメータKは、現在30としている。これは、EGO側の定石手順の評価値の最大値と同じ値を設定しているからである。これによってEGOの評価とFOEの評価の間にバランスを取っている。なお、定石とは、囲碁における隅部分における部分戦闘のある程度決まった手順（に関する知識）である。

ファジィ重要性重みは、すべての候補手に関して計算され、EGOにおいて着手重みと合算されてな各候補手の評価値となる。

4. 局面理解の実験結果

現在のFOGにおけるファジィルール、ファジィ集合は4種類の単純な局面を材料として調整したもの及び一般的な戦略知識をルール化したものである。これらを囲碁の問題集[6]の序盤の問題において実験した。

4.1 石の強さの理解

表1にFOGにおける石の強さに関する認識結果の評価を示す。これらは、20局面に出現する石の強さをFOGに判断させ、アマチュア4段格の人間囲碁プレーヤの判断と比較したものである。

石の強さは、以下の7段階とする。VS（非常につよい）、S（強い）、RS（やや強い）、MID（中間）、RW（やや弱い）、W（弱い）、VW（非常に弱い）。また、人間競技者とFOGの石群の認識がずれたものを、決定不能（ND）として別にした。

実験結果は、中間あるいはやや弱いと人間が判断するもの以外に関してはシステムの認識と人間の認識がかなり一致していることを示している。

一致しないケースの代表的なものは、石群が1個の石からなるもの（単独石群）である。図2に代表的な不一致例をあげる。たとえば、石群5、6を人間プレーヤはほとんど同じ強さであり、やや弱いと判断している。しかし、FOGでは、石群5は十分なテリトリを持ち、やや強い石、石群6はテリトリを持たない弱い石であると判断する。石群5のテリトリは、石群6が存在するがゆえにほとんど計算できない状態であるにもかかわらず、EGOにおいてはかなりテリトリが広いものであると判断されている。これは、もともとEGOにおけるテリトリ判断が石の強さのためのものでないことによる。FOGでは、石の強さ判定ルール 2c)を持つことによってこれを修正しているが、十分ではない。

表1 石群の強さの認識結果

人間による判断結果	FOGによる強さの判断結果								
	VS	S	RS	MID	RW	W	W	ND	合計
VS	12	4	0	2	3	0	0	0	21
S	14	8	4	3	0	0	0	2	31
RS	0	1	7	5	5	1	1	0	20
MID	0	0	21	1	6	5	0	0	33
RW	1	0	7	0	5	5	4	1	23
W	0	0	1	0	5	6	5	0	17
VW	0	0	0	0	1	2	1	0	4
合計	27	13	40	11	25	19	11	3	149

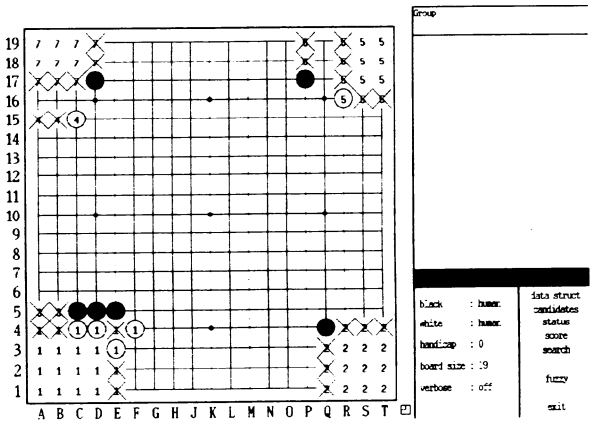


図2 強さ認識に失敗する例

4.2 領域の重要性の認識

表2にFOGによる領域の重要度認識結果を示す。これは、問題の解答となる着点（正解手）の存在する領域がシステムの評価では何番目に重要であると判断されているかという順序数によるランク評価である。なお、ファジィなしの場合は、各領域に存在するEGOによる評価値のもっとも高い候補手（正解手とは限らない）の評価値のランクである。

表を見てわかるように、EGOによる成功とFOGによる成功は約半分が違う局面である。分析すると、EGOによる評価が正しい場合は主に「定石」知識に基づく場合である。これに対し、FOGによる成功例は局面を大づかみにとらえた大場や急場といった判断によるものである。逆にFOGは、定石が進行中であるといった判断をしていないので、定石途中であるような問題では一部の場合をのぞいて対処できていない。

この結果は、FOEとEGOがそれぞれ正しく判断できる分野が異なり、組み合わせ方を工夫することで互いに補いあうことが可能であることを示している。

表2 領域の重要性の認識結果

ファジィなしの時のランク	FOGによる領域の重要性の認識結果						
	1	2	3	4	5	6	合計
1	11	3	2	2	2	1	21
2	3	0	0	0	0	0	3
3	5	1	2	0	0	0	8
4	2	1	0	0	1	0	4
5	1	0	0	0	0	0	1
6	1	0	1	1	0	0	3
合計	23	5	5	3	3	1	40

4.3 着手の重要性の認識

表3にFOEの評価するファジィ重要性重みによる候補手の評価値の改善度合いを示す。ランクは、正解手（あるいは正解手と同一の領域にある最大の評価値を持つ候補手）がFOGの評価値で何番目になっているかという順序数である。6局面においてファジィ重要性重みをつけることによって正しい候補手を選ぶことができている。また、正しい候補手を選択できなかったけれど、正解手のランクが大きくなる（候補手評価が改善される）例も少数存在する。一方、正解手のランクが下がる（ファジィ重要性重みが候補手評価に悪影響を及ぼした）ものは1例だけである。領域の重要性判断では異なるものを第1位としているEGOとFOEが、ファジィ判断による候補手の重み付けによる評価値補正をすることで、補完的に働いていることがわかる。

ただし、正解手の存在する領域中で正解手以外の候補手の評価値が高いものが存在する。これは、FOGにおける部分的な候補手評価がまだ十分でないことを示している。

表3　候補手の重要度の修正結果

ファジィなしの時のランク	FOG領域重要度による修正後のランク						
	1	2	3	4	5	6	合計
1	21	0	0	0	0	0	21
2	2	1	0	0	0	0	3
3	3	1	4	0	0	0	8
4	1	1	0	1	1	0	4
5	0	0	0	1	0	0	1
6	0	1	0	0	0	2	3
合計	27	4	4	2	1	2	40

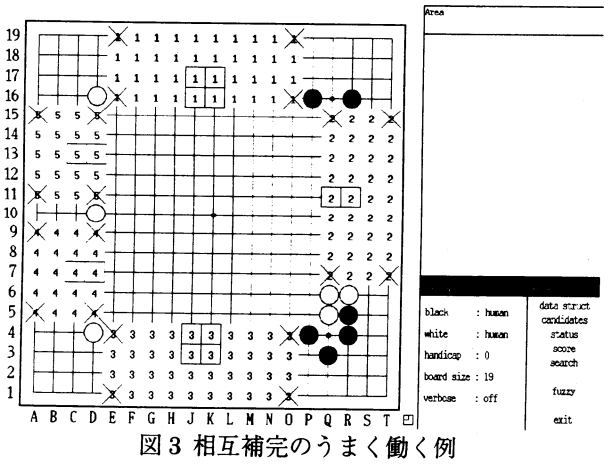


図3 相互補完のうまく働く例

5. おわりに

本稿では、ファジィ指向型囲碁システムFOGの実験結果から、FOGにおける局面認識へのファジィアプローチの有効性を示した。

FOGは、局面における石の強さ、距離などをファジィ表現することによって、言語的な人間の囲碁知識を表現する。領域の重要性をこのルールを用いて評価することによって、候補手の評価値を修正する。

40例について実験した結果から以下のことが言える。

(1) 石群の強さは、人間プレーヤに近づいているが、特に単独で群となっている石の強さの認識は改良する必要がある。

(2) ファジィによる重要性認識と非ファジィによる推論が正しく領域の重要性を認識できる局面は異なっている。

(3) ファジィ重要性に基づく重みを用いて候補手の評価値を変更することによって、ファジィによる推論と非ファジィによる推論が相互補完的に働いている。

今後の課題を以下に示す。

(1) 多様な例を試して、現在のルール、ファジィ集合の改良を行う。

(2) 用いるファジィ集合を変えるなどの方法で「弱気」「強気」といった個性や「厚み重視」「実利重視」といった碁の基本戦略の統一性を実現する。

(3) 先読み機能を充実させ、重要領域における手の選択を行うことができるようにする。特に、実例ベースの着手選択などを行えるようにすることで性能を向上させる。

参考文献

[1] 実近憲昭　ゲームとAI、人工知能学会誌、Vol 5、No.5、 pp.527-53、1990

[2] 実近憲昭　囲碁のコンピュータ化、BIT、Vol 20、No. 7、pp.35-43、1988

[3] 小谷善行、松原仁、大沢栄一　コンピュータは人間に勝てるか?!、情報処理、Vol 34、No. 3、pp.275-284、1993

[4] 横川壽彦　マクロな指向と判断～囲碁における局面理解～、技術研究組合国際ファジィ工学研究所(編)ファジィ思考による知的情報処理、コンピュータエージ者、pp.289-330、1995

[5] T. Yokogawa, J. Nishino, Y. Mizuno Macroscopic Understanding of the Game Situations in GO, Proceedings of the International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium pp. 1495-1502, 1995

[6] 日本棋院(編)　布石、手筋、詰碁タイムトライアル1,000、日本棋院、1991

問い合わせ先：〒290-01　市原市潤井戸字大谷2289-23
帝京平成大学　情報学部　文化情報学科
横川　壽彦
TEL 0436-74-7055　FAX:0436-74-3287
Email: yokogawa@ci.thu.ac.jp

THD1-2

囲碁の読み筋への意味付け

Acquisition of the significance of move sequence in the game of GO

西野順二 Nishino Junji
小高知宏 Odaka Tomohiro
小倉久和 Ogura Hisakazu

福井大学 工学部 情報工学科
Department of Information Science, Fukui University

Abstract : The game of GO is a new target to AI technique test bench because of the huge searching space of it. In this paper, we show a fomula expression of the purpose of a macro sequences in the game of GO using fuzzy sets which describes linguistic notions of plying heuristics. And then, we discuss how to generate macro sequences from its corresponding purpose to decide a particular move for realizing a play.

1 はじめに

筆者らはこれまで囲碁を対象として言語的情報処理との関係について、盤面の言語表現、言語に基づく着手決定モデル、手筋の言語表現や対局における相手の着手の意味を把握するシステム [1] などついての研究を行ってきた。本稿では、これまで扱ってきたような静的な一手ではなく、連続した一連の手すなわち「読み」に対して意味付ける手法について検討する。

現在の囲碁プレイヤの基本システム [2] に不足している判断の一つに、「読み筋」への大局的な意味付けがある。人間は一つの着手だけでなく、一連のシーケンスとして意味付けを行ない、状況認識・評価および戦略の策定に利用している。このような複雑な概念を表現処理するために、ファジィ理論を用い言語に基づいた手法が提案されている [3, 4, 5]。本研究では、この意味付けとそこで用いられる用語に関する知識をファジィ集合に基づいて表現するための定式化を試みた。

2 読み筋への意味付け

人間が行なっている探索は、AI手法で研究されている先刈り探索や α β 探索のようなさまざまな手法を有機的に統合した探索であり、機械的な探索とは一線を画していると考えられる。ここではこのような知的な探索を「読み」とよぶことにする。とくに囲碁における「読み」は一連の探索手順をマクロとみなして意味付け、あらかじめこの意味に基づいた探索戦略を取っている所に特徴がある。そこで、読みのプロセスを図1に示すような意味付けされた探索木ととらえ、意味から探索分岐を限定することを考える。

2.1 着手列

ある着手 m の列を $s = (m_1, m_2, \cdots, m_n)$ とし、S はすべての着手の列からなる集合とする。ここで「読み筋」を着手のファジィ部分集合 $\tilde{s} \subset S$ とその意味 $\tilde{p}$ の組 $(\tilde{s}, \tilde{p})$ と定義する。

着手生成をするクリスプなアルゴリズムの集合を A とし、Bをすべての盤面の状態の集合とする。クリスプな着手生成アルゴリズム $a \in A$ とは、ある盤面状態 $b \in B$に対して一つの着手系列 $s \in S$を生成するものである。ある盤面の状態 b_1にアルゴリズム a_2によって生成された着手系列 s_2を作用させ、新たな盤面の状態 b_2になるとして、

$$b_2 = s_2 \bullet b_1$$
$$s_2 = a_2 \circ b_1$$

と表すことにする。よってある盤面に着手生成アルゴリズムを作用させるとすると、

$$b_2 = (a_2 \circ b_1) \bullet b_1$$

と表せる。

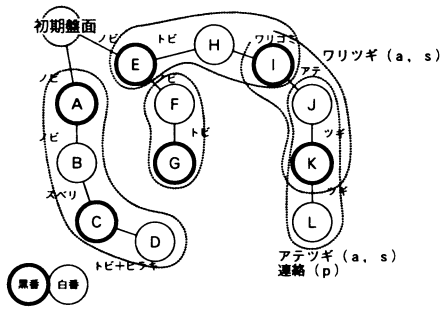


図 1: 読み筋への意味付け

2.2 複合目的と意味

読み筋の目的および意味とは、それぞれ読みの方向と結果の評価を与えるものである。これらはともに人間の知識として存在し、記号的な相互関係を持つと考えると以下のように表せる。

読み筋に付加する意味 $\tilde{p}$ を目的を表す概念ラベル o の集合 P 上のファジィ部分集合として定義すれば、

$$\tilde{p} = \sum_{o \in P} \mu_{\tilde{p}}(o)/o$$

と表せる。ここで、目的を表す概念ラベル o は A 上の手筋を表すアルゴリズムのファジィ集合 $\tilde{a}$ と関係付けられたラベルである。つまり、ある読み筋の目的 $\tilde{p}$ はファジィ集合の族となり、手筋を表すファジィ集合を $\tilde{a} \subset A$ とすると、

$$\tilde{p} = \sum \mu_{\tilde{p}}(\tilde{a})/\tilde{a}$$

となる。これは、レベル2のファジィ集合となっている。

ここで、ある場面 b にたいして、二つの目的 $\tilde{p}_1, \tilde{p}_2$ が与えられた時、その複合目的 $\tilde{p}_{combi}$ は

$$\tilde{p}_{combi} = \tilde{p}_1 \cap tildep_2$$

で与えることができ、

$$\tilde{p}_1 \cap \tilde{p}_2 = \sum_{o \in P} \mu_{(\tilde{p}_1 \cap \tilde{p}_2)}(\mu_{\tilde{p}_1}(o) \wedge \mu_{\tilde{p}_2}(o))/o$$

さて、この複合目的 $\tilde{p}_{combi}$ はファジィ集合の族

$$\tilde{p}_{combi} = \sum_{\tilde{a} \subset A} \mu_{\tilde{p}_{combi}}(\tilde{a})/\tilde{a}$$

と表せる。ここで、$\tilde{a}$ は対応する $o \in P$ があるものに限る。これを A を台集合とするファジィ集合と読み変えるために、次の式を用いる事にする。

$$\tilde{p}_{combi} \text{ on } A = \sum_{a_i \in A, \tilde{a}_j \subset A} \mu_{\tilde{p}_{combi}}(\tilde{a}_j)\mu_{\tilde{a}_j}(a_i)/a_i$$

2.3 あいまいな着手列

ある手筋ファジィ集合 $\tilde{a} \in A$ に対して、$b_1, \circ, \bullet$ から、$\tilde{s}_2 = \tilde{a} \circ b_1$ と $\tilde{b}_2 = (\tilde{a} \circ b_1) \bullet b_1$ を考える。

$$\tilde{a} = \sum_{a_i \in A} \mu_{\tilde{a}}(a_i)/a_i$$

とするとき、次のようになる。

$$\tilde{s}_2 = \sum_{a_i \in A} \mu_{\tilde{a}}(a_i)/(a_i \circ b_1)$$

$$\tilde{b}_2 = \sum_{a_i \in A} \mu_{\tilde{a}}(a_i)/((a_i \circ b_1) \bullet b_1)$$

2.4 着手木の生成

二つの着手列 $(m_1^1, \cdots, m_i^1)$ と $(m_1^2, \cdots, m_j^2)$ の先頭部分にサブシーケンスとして同じ並び $(m_1, \cdots, m_k), k < i, k < j$ があるとき、このふたつをマージして一つの着手木を生成することができる。マージされた木は $(m_1, \cdots, m_k, (m_{k+1}^1, \cdots, m_i^1), (m_{k+1}^2, \cdots, m_j^2))$ と表すことが出来る。この木に対してさらに次のように同一の部分並びをもつシーケンスをマージすることができる。$(m_1, \cdots, m_k, m_{k+1}^1, \cdots, m_l^1, m_{l+1}^3, \cdots, m_n^3)$ これによって出来る木は、

$$(m_1, \cdots, m_k, \\ (m_{k+1}^1, \cdots, m_l^1, (m_{l+1}^1, \cdots, m_i^1), (m_{l+1}^3, \cdots, m_i^3)), \\ (m_{k+1}^2, \cdots, m_j^2))$$

となる。

この操作によって着手列のファジィ集合 $\tilde{b}$ は各枝にグレードによる重みのついた探索木として扱うことができる。

3 おわりに

着手決定のアルゴリズムの集合上で名前付けされたファジィ集合を定義した。あらかじめラベルづけされた一連の探索の意味に対し、そのファジィ集合が探索方法の意味すなわち目的を表すとした。この目的から逆に、ファジィ集合表現されたアルゴリズムを介して、一連の着手列をファジィ集合として得る方法を定式化した。これら、アルゴリズム、意味、目的、をそれぞれ現実に定義することで意味を伴った探索が実現できると考えられる。このプロセスは、囲碁に限らずさまざまなゲームおよび問題探索に用いる事が出来るが、意味付け可能なアルゴリズムのファジィ集合を定義できる対象に限られる。

今後、意味付けのための諸問題、とくにファジィ集合とラベルの対応付けと言語的な分析の関連についての定式化と具体的な問題に対してファジィ集合やラベル付けのシステマティックな手法について検討する事が課題である。

参考文献

[1] 西野, 小高, 小倉. 囲碁の着手意味付けシステム. 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 467–470. 日本ファジィ学会, 1996.

[2] 斉藤康己. コンピュータ囲碁研究. 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 6, pp. 860–870, 1995.

[3] Ichiro Kobayashi and Michio Sugeno. An analysis of a fuzzy algorithmic text from the view point of daily language. In *FUZZ-IEEE96*, 1996.

[4] M.Sugeno. Toward intelligent computing. In *5Th. IFSA World Congress*, 6 1993.

[5] L. A. Zadeh. Fuzzy logic = computing with words. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol. 4, pp. 103–111, 1996.

問い合わせ先：
〒910 福井市文京3－9－1
福井大学工学部情報工学科
西野順二
nishino@rook.fuis.fukui-u.ac.jp
TEL: 0776-27-8968(ダイアルイン)
FAX: 0776-27-8751(事務室)

ファジィルールに基づいたマルチメディア情報獲得法の提案

A Proposal of Multimedia Information Acquisition Method Based on Fuzzy Rules

呉 甲錫　　廣田 薫

Kabsuk OH　　Kaoru HIROTA

東京工業大学大学院 総合理工学研究科

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

Abstract

Multimedia information data acquisition method based on fuzzy rules is proposed. Experiments have been done on visual and acoustic information of various cars on a general road, where fuzzy rules based on both information are used to identify the important time interval.

keywords: multimedia, fuzzy rule, real time processing

1 はじめに

人間が五感に依存して外界から知的に情報を獲得するのと同じように、計算機でカメラ、マイクなどの各種のセンサを用いてある目的のもとで有用な外界の情報を獲得することを目標とする。扱う情報は必然的に五感に基づくマルチメディア情報であるが、現状のマルチメディア技術も考慮して、ここでは主に映像 (動画像) および音情報を中心に考える。

本研究では、ファジィルール集合を用いて、各メディアによる観測情報を相互補間してから統合し、効率的にマルチメディア情報データを獲得する方法を提案する。具体的実験例として一般道路上のビデオ画像/音声情報を扱った。道路上を走行する車に対して、音圧の時間的傾きと強度を用いて、映像情報としていつ車が出現するかを予測するファジィルールを作る。さらに、音と動画像の両方を用いて、車が消え去る時刻を予測するファジィルールを作る。このファジィルールの判断から画面上に車が出現した時刻から消える時刻までのマルチメディア (画像、音) 情報データを実時間で獲得することを目標にした。2. では、マルチメディア情報の時系列化を述べる。3. では、一般道路上の車両情報の獲得実験について述べる。

2 マルチメディア情報の時系列化

人間は五感を用いて外界からの大量の情報の処理を瞬時に行っている。外界の刺激の 80%は視覚から取り入れているし、15%は聴覚からで、残りの 5%が味覚、嗅覚、触覚からだと言われている。従って、一つのメディアの情報だけでは自分の置かれた状況を完全に理解できないことも多い。従来、画像データの認識や音声データの認識等のように、各メディア毎に独立して研究が行われてきたが、それらを融合あるいは統合することによってより高度なマルチメディア情報認識が期待できる。そのためには情報観測部において効率的な実時間情報獲得が必須である。

本論文では、以上の観点からマルチメディア情報の入力に関して研究を行う。各メディアの観測情報を時系列データとして表す。すなわち、観測時刻 t における視覚 (Visual Information)、聴覚 (Acoustic Information)、味覚 (Gustatory Information)、嗅覚 (Olfactory Information)、触覚 (Tactile Information) 情報を $V(t)$,$A(t)$,$G(t)$,$O(t)$,$T(t)$ と表して、入力観測データは観測時間を T として

$$VAGOT_{\mathrm{T}} = \{V(t), A(t), G(t), O(t), T(t)\}_{t\in \mathrm{T}} \quad (1)$$

と表される。そして目標とすることは、認識などの目的に応じて、T の中から有用な部分集合

$$[t_s, t_e]\,(\subset \mathrm{T}) \quad (2)$$

を決定して、$VAGOT_{[t_s,t_e]}$を獲得することである。しかし、現状のマルチメディア技術および前述のように人間の視覚と聴覚に大きく依存した情報入力特性を考慮して、以下では主に視覚と聴覚の二つに限定したマルチメディア情報について考察する。

3 一般道路上の車両情報の獲得実験

一般道路上の車両や人物等の画像認識研究がいくつか報告されているが [2]、それらへの応用も考慮して、ここでは、ビデオカメラによる一般道路上の映像、音声情報を入力データ

$$\{V(t), A(t)\}_{t\in \mathrm{T}} \quad (3)$$

として、そこから映像として車両が現われてから消え去るまでの時間 (2) をファジィルールを用いて効率的に決定することを考える。

3.1 一般道路上の車両のデータ

実験の為に用意した車両の音と動画像のデータは、パーソナルコンピュータ (IBM 社,Aptiva,Pentium 150MHz) のビデオキャプチャボード (Ulead Systems 社, MediaStudio Version 3.0) を使用して作成した AVI ファイルである。AVI ファイルの画像は、10 フレ

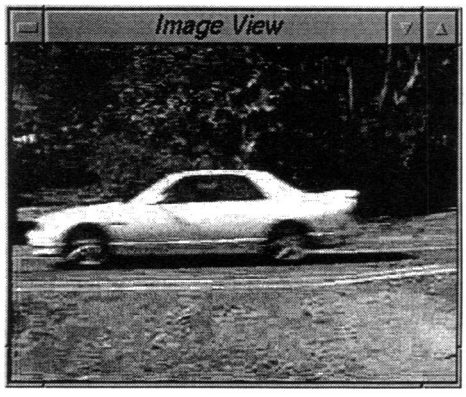


図 1: 道路上を走行する車の例 (1 フレーム分)

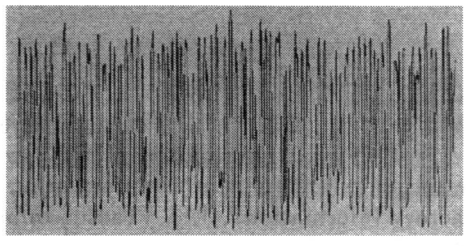


図 2: 図 1 の画像フレーム (100m 秒) に対する音

ーム/秒のサンプリング、RGB256 色、320X240 画素である。音に関しては、PCM 形式、8 ビット、11kHz のサンプリングである。実験に用いた画像の例を図 1にその音を図 2に示した。

3.2 ファジィルールの作成

本論文で使うファジィルールは IF – THEN 形式で、前件部のメンバーシップ関数は三角型で、後件部はシングルトンである。式 (2) の t_sを求めるルールは、音圧の時間的傾きと強度を入力として、出力は画面に車が現われている残り時刻の予測 (実際にはフレーム数) である。音圧の時間的傾きは、過去の五つのデータ $[\bar{A}(t), \bar{A}(t-1), ..., \bar{A}(t-4) : \bar{A}(\tau) = (1/N)\sum_{i=0}^{N-1} A(\tau - i), N = 5]$ を用いた線形回帰法で求めた。式 (2) の t_eを求めるルールは、現在の音の値とピクセルの値の平均値を入力として、出力は車が出現した時刻や車が画面から消え去る時刻である。このような二つのファジィルールを並列的に融合する事によって、人が歩いたり、速度が遅く音が小さい車等にも対応することができる。

3.3 実験結果

30 分間連続撮影したディジタルビデオデータから実験に使うデータ (一台だけ走る時) として、乗用車 18 台、ジープ 4 台、トラック 4 台、バン 4 台、合わせて 30 台分の車両情報を選び、実験を行った。t_sは車が出現する直前の (時刻に対応する) フレーム番号を、t_eは車が消え去った瞬間のフレーム番号を表し、これらを予測 (t_s^*, t_e^*) することで、$t_s \pm 1, t_e \pm 1$ フレームの範囲内の車両情報をリアルタイムで取得する事を目標とした。フレーム数で表した平均絶対誤差を表 1 に示した。大型の車両は t_s^*については音の変化が激しく、t_e^*については残映の影響が多く残るため誤差が大きくなった。しかし、得られた結果では、予測した時間区間は目標とした時間区間を包含している。従って必要な情報は失われていない。

表 1: 時刻推定実験誤差

車類	平均絶対誤差 (frame)	
	$\overline{\lvert t_s - t_s^* \rvert}$	$\overline{\lvert t_e - t_e^* \rvert}$
乗用車 (18)	0.833	1.778
ジープ (4)	1.500	1.500
トラック (4)	2.750	2.750
バン (4)	0.750	2.250

4 おわりに

本研究では、動画像と音声を中心とするマルチメディア情報を時系列データとして表し、それらのうちからファジィルールを用いて有用な部分を実時間で (周波数分析等の複雑な処理を用いず) 差分等の単純な演算にファジィルールを併用することにより、比較的単純な械器構成で効果的なマルチメディア情報の獲得を行うところに特徴がある。今後マルチメディア情報の認識やユーザインタフェースの開発 [1] を進めるためのマルチメディア情報観測の基本部分を述べた。

参考文献

[1] 中川 友紀子, 廣田 薫: マルチメディア計算機システムにおける意図理解型ファジィコミュニケーションシステムの提案, 計測自動制御学会第 2 回システム情報関連合同シンポジウム講演論文集 (富山), pp.351–354,1995

[2] Y.Nakagawa, K.Hirota and W.Pedrycz: Dynamic Image Understanding on General Roads in Japan Using Fuzzy Frame Knowledge Base with Spool Base, Int. J. of Scientia Iranica, Vol. 2,No. 4, pp.347–356,1996

連絡先
呉 甲錫
〒 226 横浜市緑区長津田町 4259
東京工業大学大学院 総合理工学研究科
システム科学専攻 廣田研究室
Tel:045(924)5682 Fax:045(924)5676
E-mail: oks@hrt.dis.titech.ac.jp

THD1-4

簡易言語ＥＤＬによるマルチメデイアのファジィ表現
Fuzzy representation of multimedia in a simple language EDL

中津山　幹男　　佐藤　智子
Mikio Nakatsuyama and Tomoko Sato

秋田公立美術工芸短期大学
Akita Municipal Junior College of Art and Craft

Abstract　EDL is a simple computer language of which commands are written in Japanese.　EDL is able to deal with drawing images and playing music by using Hyper Cards.　In this report, we describe about fuzzy representation for drawing a picture and playing an instrument.

1　はじめに

ＥＤＬは文系の学生が学ぶために開発中の言語であり、プログラムは日本語で書けるように仕様を作成している。文系の学生にとって英文でプログラムを書くこと自体に抵抗感があるように見受けられる。プログラミングの最初の例題では英語の意味そのものは理解できても、その動作まで正確に理解するのが難しい。理工系でもそうであるが、最初の段階で躓くのが英語にたいする抵抗感が大きいと思われる。日本語（漢字ならびに仮名）を用いてプログラム出来るように仕様を構成した。このプログラムをハイパーカードに落として使用する。[1] ハイパーカードを利用すると、容易に図を書くことができ、また簡単な楽譜の演奏も可能である。ここでは図面上に簡単な図形をおき、それを“より上に”あるいは“より右に”などの単語で位置を決められるようにした。“より上に”、あるいは“より右に”を実現するファジィ的表現について述べる。

2　ＥＤＬの仕様

BNFにより仕様の概要を説明しよう。[2]
＜平かな＞：：＝あ｜い｜う...｜を｜ん
＜カタカナ＞：：＝ア｜イ｜ウ...　ヲ｜ン
＜数字＞：：＝0｜1｜2｜3｜4｜｜5｜6｜7｜8｜9
＜特殊文字＞：：＝＊｜＋｜／｜－　＝　＜　＞｜、｜。｜．｜（｜）｜［　］｜｛　｝　％　“
＜英字＞：：＝a|b|c...y|z|A|B|C...Y|Z
＜漢字＞：：＝一｜乙　...　龍
＜文字＞：：＝ 平かな｜カタカナ｜数字｜特殊文字｜英字｜漢字
＜オペレータ＞：：＝+|-|*|/|^|div|mod|<|>|<=|>=|=|<>|contains|and|or|not
＜英数字＞：：＝＜英字＞｜＜数字＞｜＜英数字＞＜英数字＞
＜リスト＞：：＝＜文字＞　＜リスト＞＜文字＞
＜変数名＞：：＝英字｜＜変数名＞＜英数字＞
＜数＞　：：＝　＜数字＞　＜数＞＜数字＞
＜表現＞：：＝＜変数名＞｜＜数＞｜＜表現　＞　＜オペレータ＞　＜表現＞
＜代入文＞：：＝＜変数名＞　＝　＜表現＞
他にも多くのＮＢＦが存在するが煩瑣でありまた自明のものも多いので、ここでは省略し、次に予約語を規定しておく。

記述、始め、終わり、書く、もし、ならば、でなければ、そして、または、繰り返しの条件、繰り返す、読む、計算、フルート演奏、ハープシコード演奏、描画　、上、下、右、左、より、もっと、やや、大きい、小さい、高く、低く、線、円、方形、から、まで、太さ、長い、短い、goto

始めと終わりで括られたのが本体 Body とする。また、変数はリスト、数値のみを想定した。

3　ＥＤＬの記述例

リストは一つだけ記憶できるとし、大きさは変更できるようにしておく。リストの読み書きは次の通りとなる。プログラムの最初には記述と書くことにする。

```
記述
  始め
    読む
    書く
  終わり
```

ハイパーカードではデータの読み込みと書き出しが不得意な分野であるので、フィールドを使うかメッ

セージ欄を使う必要がある。いづれにしろリストの記憶場所は固定にしておく。整数あるいは実数の入出力は次のようにする。

```
記述
始め
  読む
  始め
      i,  j j,  k
  終わり
  書く
  始め
      i,  j j,  k
  終わり
終わり
```

4　ファジィ表現

画像を描く場合に図面のどこに位置した場合が最も適切かがしばしば重要となる。例えば線を図面の下方にあったとき上下に移動させることを考える。最初の位置を図1の太線 y で表す。

$$G = y = f_0(x) = \exp(-a x^2)$$

より下方は very や very very に習って y^2 や y^4 で表す。逆により上の方は $y^{1/2}$ や $y^{1/4}$ と置く事が出来る。第1図の横軸は線の図面上の位置を表し、縦軸はグレードを表す。より上、あるいはより下の心理的な曲線を h(x) で表す。h(x) との交点が正しい位置を示すが、第1近似として、ある位置 Xn から横軸に平行に線を引き交点 Xn+1 をより上方あるいはより下方の新しい位置とみなす。

$$Xn+1 = f_j^{-1}(f_i(Xn))$$

図2は線の移動の例である。また、上の位置にある時は次の式を使えばよい。

$$G = g(x) = \exp(-a(1-x)^2)$$

音楽の場合は周波数が対数的に変化するので、オクターブ単位で変化させるのが自然に思われる。

例　チューリップ

ハイパーカード上で楽譜は次のように書かれる。[3]

```
f4q  g4q  a4q  f4q  g4q  a4q
```

1オクターブ変えると次のように書きかえられる。

```
f5q  g5q  a5q  f5q  g5q  a5q
```

テンポについては標準は4分音符の数が1分間に40ないし２０８であるので標準値の2倍から半分までの変化を考えればよい。

色相についてはＲＧＢの大きさを、それぞれ r, g, b とし、r, g, b が3次元の空間ｘ、ｙ、ｚの成分とするとベクトル v が形成される。ベクトルの大きさを一定にして r を変えると g, b の値に変化が起こる。

5　むすび

プログラミングを楽しめるようにマルチメデイアを活用できる言語を開発中であり、さらにファジィ的手法で処理出来るように考案している。

参考文献

[1]G.Coulouris and H.Timbleby, Hyper Programming: building interactive programs with HyperCard, Addison-Weseley (1993)

[2]T. Pittman and J. Peters, The art of compiler design-Theory and Practice, Prentice Hall, Inc. (1992)

[3]大重、HyperTalk2.2 ハンドブック、ＢＮＮ (1994)

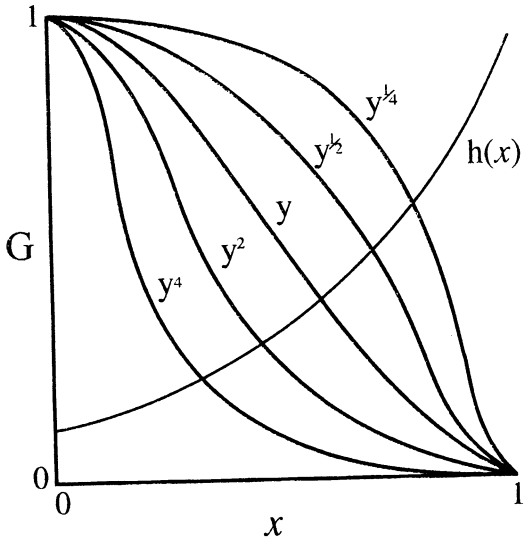


図1　G = fi(x)

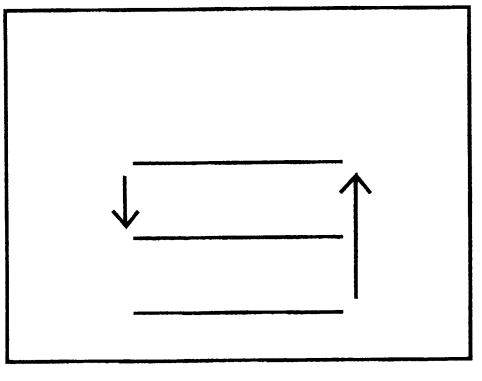


図2　線の移動

連絡先
〒010-16 秋田市新屋大川町１２―３
秋田公立美術工芸短期大学産業デザイン学科
中津山　幹男
E-mail: nakatsu@amcac.ac.jp

THD2-1

国連売買条約における事例の曖昧さの表現と類似性の判定

Representation and Similarity Assessment of Case with Fuzziness in CISG

廣田 薫　　徐 明強　　吉野 一*
Kaoru HIROTA　　MingQiang XU　　Hajime YOSHINO

東京工業大学大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
*明治学院大学
Meiji Gakuin University

Abstract

In a legal expert system based on CBR (Case Based Reasoning), legal experts interpret the article rule on the basis of precedent. Because there are the vagueness and indecisiveness in the judgement of the interpretation, the representation and inference of such cases can't be handled by the same means used for crisp cases. In our legal expert system, on the basis of the facts of precedent, the article rule is interpreted as a form of case rule. The judgement of case rule is represented by the concepts of membership and vagueness. The case rule is stored in the case base by means of fuzzy frames. The inference based on case rule is made by the degree of similarity of cases.

keywords: Case-Based Reasoning, Similarity, Fuzzy, CISG

1 はじめに

事例に法を適用する際には、事件の事実関係に基づき条文ルールを解釈し、事件の事実がこの解釈されたルールに当てはまるか否かの判断を行うが、この解釈と当てはめの判断は、常にある程度の曖昧さを伴う。このような曖昧さは、限定された言葉を用いて表現される法律概念を事実へ当てはめる際の適合性と知識自体の不確実性とに起因していると考えられる。したがって、CBR システムを構築する際には、事例表現は曖昧さを含んだ事例表現とする必要がある。

本研究では、曖昧さの含まれた事例を表現し、推論するために、ファジィ理論を導入する。membership と vagueness 両概念 [3] を用いて曖昧さが含まれた判断を記述する。さらに、ファジィ集合の類似性の判定方法を提案する。それに基づいて、国連売買条約の実際の判決事件を先例として、一つの相談事例について、法的ファジィ推論の実験を行う。

2 法的知識の表現

国連売買条約 (CISG) に例をとって考察しよう。申込の成立を判断するに際しては,「申し入れが十分に明確である」ということは重要な要件である。それらは CISG の 14 条に定義されている。

しかし、事件からの事実が、直接に、このルールの要件部に該当するかを明確に認定するのは難しい。そこで、事例は事件の事実関係に基づき条文ルールを適用する解釈で記述されている。条文ルールを適用するということは事件の事実がその条文の法律要求を充足するという判断を導出することができるように、事件の事実を条文のルールの要件へと結びつける具体化のルールを展開することである。ここに事例において創設されるルールを事例ルールと呼ぶ。

本研究では、Malev 事件 [1] を先例とする。この例では「申し入れが十分に明確である」に関して：

出来事の記述：
　エンジンはリストアップされている
　数量は飛行機が決まれば必要数が計算できる
　価格について：
　　Boeing エンジンシステムの価格がない
　　Boeing エンジンの価格は決まっている
　　エンジンシステムはカバー等を含む。

Malev 事件に対して、ハンガリーの最高裁では 14 条の (1) での代金が不明確であることを理由に、「申し入れが十分に明確ではない」と判決した。それに基づいて、物品の全体価格に対して、専門家が解釈した事例ルールの要件要素は次のとおりである。

- 物品の全体価格があるか
- 物品には価格が決まった部品があるか
- 部品の全体にとっての重要性か
- 価格が決まっていない部品の市場価格はあるか

事例ルールでは解釈および判断が常にある程度の主観的な要素を含むものである。このような曖昧さは、限定された言葉を用いて述べる際の適合性と、知識の不確実性とに起因していると考えられる。例えば、ある要件は「部品の全体にとっての重要性」であり、それに対する判断がはっきり言えないことが多い。事例ルールの適用の際にその要件が満たされているか否かの判断に曖昧さが伴うことから、曖昧さを処理するためにファジィ理論を導入する。

この曖昧さに対して、従来から用いられているファジィ理論の membership 概念と共に、確率集合論の拡張ファジィ表現で提案された vagueness 概念 [3] を用いる。特定の知識を限定された言葉で表現するときの適合性を membership で、また知識自身の不確実性を vagueness で表すことにする。vagueness は実際にその membership 関数の広がりを表現するものである。

事例ルールは当該法律効果をフレーム名とし、その各要件を表す命題をスロット名にし、各要件を判断する結果をスロット値とするフレーム形式で表現し、事例ベースに格納する。

3 類似性の判定に基づく推論

本研究においては先例は、事例ルールの形で解釈される。二つの事例間の類似性の判定は、事例ルールの各要件の判断結果の類似性に基づいて行う。

事例ルールの各要件の判断はファジィ集合で表される。したがって、事例ルールの各要件の判断結果の類似性の判定はファジィ集合の類似性の判定による。

ファジイ集合の類似性判定方法がいくつか提案されている [2]。しかし、本研究におけるファジィ集合はシングルトンになる場合があり、また、二つのファジイ集合が重ならない場合もある。[2] の方法などではそれを処理することができないので、以下の方法を提案する。

ある法律上の論点に関して、先例と設例は次のように記述できる。

先例: $P = \{P_i\}_{i=1}^{n}$

設例: $C = \{C_i\}_{i=1}^{n}$

P_i: 先例を解釈してその事例ルールの各要件の判断結果を記述するファジィ集合である

C_i: 設例に事例ルールをあてはめてその各要件について判断した結果を記述するファジィ集合である。

n は法律上の論点に関する事例ルールの要件の数である。

$S(P_i, C_i)$ は P_i と C_i 類似度である。これは二つファジィ集合がどの位似ているか否かを表す尺度である。

P_i と C_i の membership 関数はそれぞれ μ_{P_i} と μ_{C_i} とする。P_i と C_i の重心 $CG(P_i)$ と $CG(C_i)$ は以下の式で計算できる。

$$CG(P_i) = \frac{\int_{p_1}^{p_2} x\mu_{P_i}(x)dx}{\int_{p_1}^{p_2} \mu_{P_i}(x)dx} \quad (1)$$

$$CG(C_i) = \frac{\int_{c_1}^{c_2} x\mu_{C_i}(x)dx}{\int_{c_1}^{c_2} \mu_{C_i}(x)dx} \quad (2)$$

類似度 $S(P_i, C_i)$ の計算式は次のとおり。

$$S(P_i, C_i) = (1 - |CG(P_i) - CG(C_i)|) \quad (3)$$

事例ルールの各要件の判断結果の類似性の判定が導出されたら、論点に関するフレームの類似度を計算する。

$S(P,C)$ はフレーム P とフレーム C との類似度である。類似度 $S(P,C)$ の計算は次の式である。

$$S(P,C) = min(S(P_1,C_1), ..., S(P_n,C_n)) \quad (4)$$

その類似度 $S(P,C)$ はしきい値と比較する。類似度がしきい値より大きいと、設例は先例と同じ結論をもつ。しきい値より小さいと、設例は先例と同じ結論を得ることができない。

4 事例推論の実験

次の例を相談設例とする。

4月1日に、ニューヨークのAが日本商社Bのハンブルク支店に対して申し込みの手紙を発信した。手紙の内容はAがBに農業機械一式（但し、トラクターの代金は5万ドルであり、これにC社のレーキを設定したもの）を売るというものであった。なお、機械はアメリカの貨物船で運ぶとある。その手紙がBに届いたのは4月8日である。4月9日に、BはAに電話をかけて“申込みは承諾する、ただし機械は日本のコンテナ船で運ばれたし”と言った。

上記の設例について「申し入れが十分に明確である」かという論点について判断をするために、類似の事件として Malev 事件の判決が抽出されてきたとする。この先例を参考にして解を導出するためには、先に整理された物品全体の価格の明確性に関する事例ルールを援用する。

ユーザは、設例の出来事の記述から前述の事例ルールの各要件要素を充たしているか否かの判断を入力する。この入力結果に基づいて、第3章で提示した式 ((1)-(4)) に従って類似度を計算し、推論結果を出力する。

相談設例では、C社のレーキがA社のトラクター専用であるから、一般に市販されていないと認める。類似性の判定からの結論が先例の結論とおなじであり、すなわち、市場価格がないと判断され、「申し入れは十分に明確ではない」という結論が得られている。

5 むすび

国連売買条約の実際の判決事件を例として、事例を事例ルールとして表現した。事例ルールの各要件の判断を membeship 概念と vagueness 概念で記述した。その上に、ファジィmembership 関数の類似性の判定方法を提案した。相談事例について、事例類似性判定に基づく法的ファジィ推論の実験を行った。

現在は事例ベースがまだ小規模なものである。今後の研究目標としては、扱える事件の範囲を広げるために、事例ベースを拡張する。さらに、事例ベースの中に新しい事例と類似する先例を検索・抽出する方法にファジィ理論を応用する方法を開発する。

参考文献

[1] Kanl Brant: Recent Development, CISG, Journal of Law and Commerce, Vol.13:1, pp.11-16, 1993

[2] Shyi-Ming Chen,Ming-Shiow Yeh,Pei-Yung Hsiao: A Comparsion of Similarity Measures of Fuzzy Values, Fuzzy sets and Systems, Vol.72, pp.79-89, 1995

[3] Kaoru Hirota,Hiroteru Kurish, Hajime Yoshino: A Precedent-based Legal Judgement System Using Fuzzy Database, Int.J.of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, Vol.4, No.6, pp.573-580, 1996

[4] Edwina L. Rissland, Kevin D. Ashley: A Case-Based System for Trade Secretes Law, Proc. of ICALL'87, pp.60-65, 1987

連絡先:
徐 明強
〒 226 横浜市緑区長津田町 4259
東京工業大学大学院 総合理工学研究科
知能システム科学専攻 廣田 薫研究室
Tel: 045(924)5682 Fax: 045(924)5676
E-mail: xmq@hrt.dis.titech.ac.jp

THD2-2

鉄棒体操における動作知識のファジィ言語表現

Control knowledge for the horizontal bar gymnastic action represented by fuzzy language

田川聡洋 Akihiro Tagawa　西野順二 Nishino Junji　小高知宏 Odaka Tomohiro　小倉久和 Ogura Hisakazu

福井大学 工学部 情報工学科

Department of Information Science, Fukui University

Abstract : The purpose of this study is to represent player's behaviors knowledge for the horizontal bar gymnastic action in terms of fuzzy language. We has developed a kinetic simulator of a player at the horizontal bar gymnastic action. This model is coming from many links and joints. We realize player's behavior on a computer simulation by fuzzy language based on the human knowledge instead of mathematical expressions. The model of this knowledge was realized by hierarchical structured fuzzy control system.

1　はじめに

本研究は, 言語表現された動作知識を用いて非線形多変数系を制御することを目的としている.

動作知識の言語表現の試みを行う対象として, 器械体操の種目の一つであり初等体育教育にも含まれている鉄棒体操を取り上げた.[?],[?] 知識の獲得を行うため, まず, 実際に演技者が鉄棒をするのと同じような多関節からなるモデルをもとにシミュレータを構築する. これを制御することにより各種演技をコンピュータ上で実現する. 鉄棒運動シミュレータは非線形で干渉の多い多変数系である上, 非ホロノームな系であり, モデルに基づいた適切な制御系を設計することは難しい。このためなんらかの方法により, 大局的に有効な制御系を設計することが必要である。そこで, 一つの演技を実現しようとした場合, 肩や腰や膝などを連動させた複数の制御を, 時間に依存して最良のタイミングで行う必要がある. そこで, 体操競技教本や人の知識をもとにファジィ言語表現による制御 [?] を用いてコンピュータ上で実現することを目指す.

2　鉄棒体操演技シミュレーション

本研究では, 言語表現された動作知識を, 制御系として実現する枠組みとして図??のシステムを構成した. さまざまな指示や制御知識の表現方法に対応するため, 階層的な知識制御 [?],[?] を採用して実現した. 実験システムは, シミュレータとコントロール部から構成した. シミュレータは, 操作量である各関節のトルクから制御量である各関節の角度, 角速度, 角加速度を計算する. コントロール部は, 流れ制御部, 動作制御部, 反射動作部から構成し, 階層的な構造を持ち, 制御量から操作量を推論する.

コントロール部の詳細について説明する.

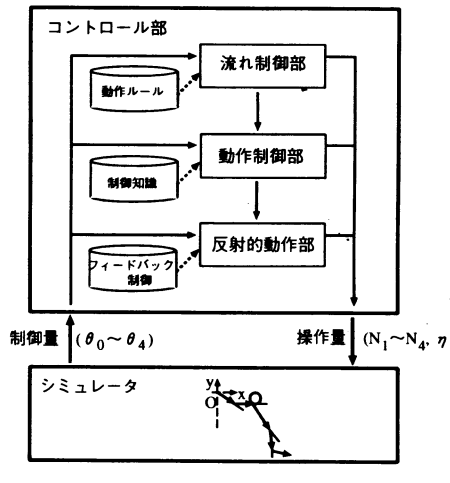


図 1: 実験システム構成

反射動作部

反射動作部では,「腰をまげる」など指示されたことをそのまま実行する. また,「ある姿勢」という感覚的な指示に対しての動作, そのままの姿勢を維持する動作を制御する. 動作制御部で, 推論された目標値とフィードバックゲインにしたがって feedback 制御を行う.

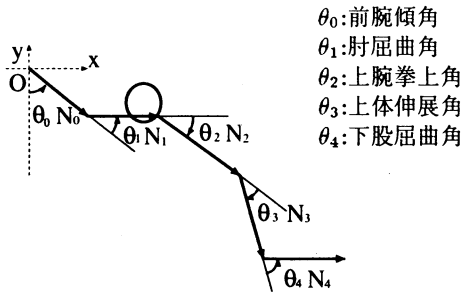


図 2: プレーヤーのモデル

動作制御部

動作制御部では,鉄棒体操における一つ一つの演技を行う. 例えば,「車輪」が該当する. 制御知識として,各動作要素を実現する上でのルールが複数存在する. 例えば,「車輪」の中には「真下を通過したら肩をまげる」というルールが含まれている. これから各関節に加えるトルクや姿勢の目標値を推論する. 「車輪」の方法や順序や「車輪」の中における各ステップのタイミングを制御する.

流れ制御部

流れ制御部では,演技における一連の動作やつながりを知識として持ち,より高度な判断を行う. 連続技のように技の順序を決定し,演技者の状態や現時点の演技動作から次の演技動作を判断する. また,次の演技に入るタイミングなど技の連続のために必要な処理の判断も行なう.

シミュレータ部について説明する.

演技者は,図??のように4関節と5つの剛体棒で,各剛体棒は一様な剛体としてモデル化した. 頭は簡単のため質量をゼロとした.

運動エネルギーを T, 重力によるポテンシャルエネルギー V として,ラグランジュ関数 $L = T - V$ により、$\theta_0 \sim \theta_4$に対するラグランジュ方程式から運動方程式を求めた. 運動方程式は4次のルンゲクッタ法により離散化し,シミュレーションを行った.

3 鉄棒体操演技動作知識と言語表現

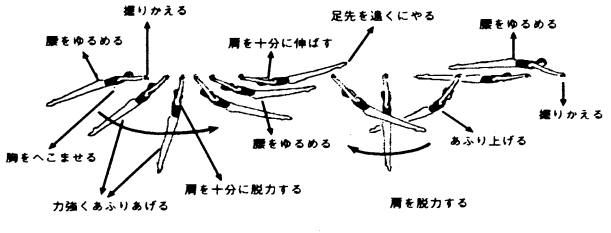


図 3: 懸垂振動の連続図 [6] より抜粋

3.1 動作知識の言語表現

鉄棒体操演技では,肘や肩や腰などの複数の関節を連動させた制御を,適切なタイミングで行う必要がある. そのようなタイミングを表す動作知識の特徴を,教本の中から抜粋した懸垂振動の演技を例にとり説明する. この図??は,左から右に時間が推移しており,演技者の状態が連続図により示されている.

連続図は,各時点での動作が言葉によって書かれている. この様に,動作知識は,「体がある状態に達したときに適切な動作を行う」という形で人間の頭の中にイメージとして存在する. 演技者が,鉄棒体操を行うためには体操の教本や人の知識をもとにしている.

以下では,「巴」と「け上がり」についての分析と構築した制御知識を示す.

3.2 後方浮支持回転

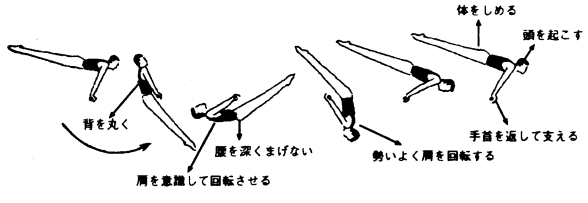


図 4: 巴の連続図,[6] より抜粋

これは,一般に「巴」と呼ばれる技である. 動作の説明を図??の連続図により示す.

この図??及び説明と経験者のインタビューから,巴は以下の四つの手順で行っていると考えられる. 各手順での動作知識は以下のようにまとめられる.

1. 脇を徐々にしめていく
2. 脇が少ししまったら腰をまげる
3. 脇がひらかないように勢いよく肩を回転させる
4. はじめの姿勢になるように腰を伸ばし,肩を伸ばす

このようにして獲得した鉄棒における動作知識を,人間が運動をイメージするのにより近い表現としてファジイプロダクションルールを用いて構成した. 獲得した動作知識は,動作制御部での制御知識である. 各手順での動作知識は表1のようにまとめられる.

このルールの後件部が反射的動作部に渡る. 反射的動作部に渡す部分を,言語で表現したものを図??の各枠に示す. 図??中の各枠の上部が後件部に対応している. これらの状態に肘,肩,腰,膝の表現は,図??の枠の下部のようになる. 各状態に対して図示したものが図??の下になる. ここで,枠中の rulc1 と各姿勢に記してある rulc1 は対応付けらている.

R1:if 脇がまだしまってない then 肩をまげる
R2:if 脇が少ししまった and 腰がまがってない then 腰を屈げる
R3:if 腰は屈がっている and 脇がひらきそう then 脇を強くしめる
R4:if 脇がしまっている and 膝下が初期姿勢に近づいた then 初期姿勢になるようにする

表 1: 巴の動作知識

R1:if 体がまっすぐでない then 体をまっすぐにする
R2:if 体をまっすぐ and 真下を通過 then 少し体を反る
R3:if 体を少し反る and 振れ戻りを感じた then 足首を鉄棒に近づける
R4:if 足首に少し近づいた and then 脇をしめて腰を伸ばす

表 2: 巴制御知識

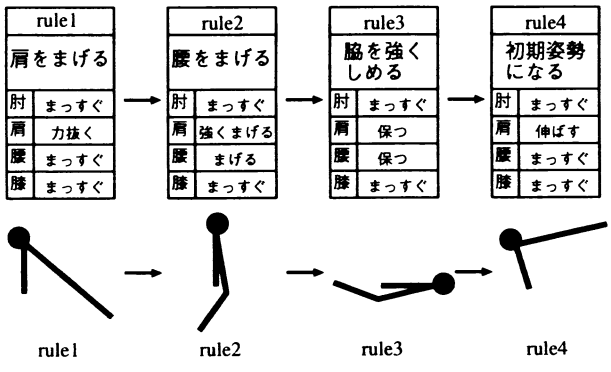


図 5: 巴の動作制御部知識

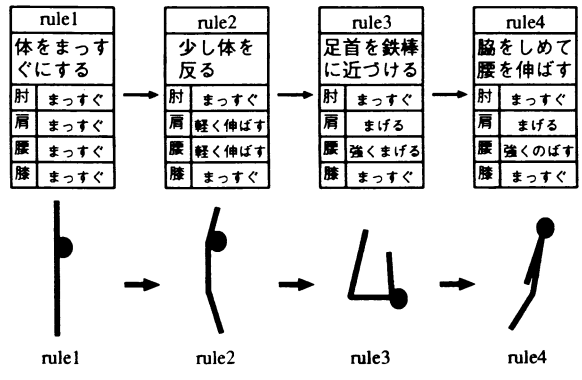


図 7: け上がりの動作制御部知識

3.3 け上がり

動作の説明を図??の連続図により示す.

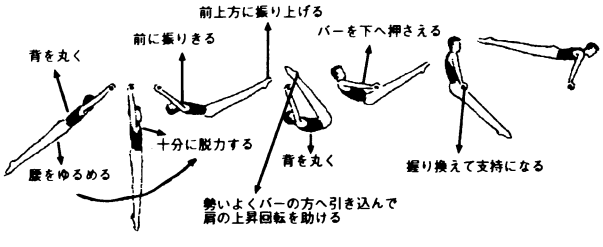


図 6: け上がり連続図,[6] より抜粋

け上がりは, 以下の四つの手順で行っていると考えられる. 各手順での動作知識は以下のようにまとめられる.

1. 体をまっすぐにする
2. 真下を通過したら少し体を反る
3. 体が止った時, 足首を鉄棒に近づける
4. 足首が鉄棒に近づいたら肩角度を狭めながら腰をバーに引きよせて, 腰を伸ばす

各手順での動作知識はこのようにまとめられる.

言語で表現したものは図??になる.

4 実験結果

4.1 後方浮支持回転

獲得した動作知識を用いてシミュレートした. 結果を図??の連続図により示す.

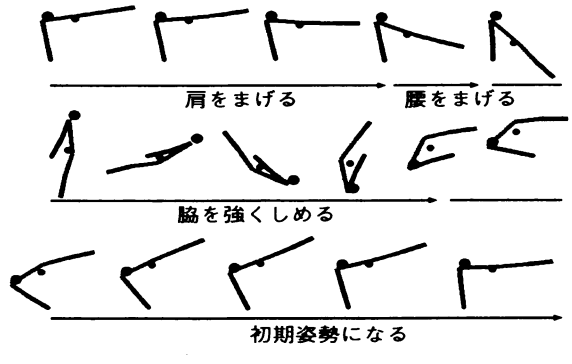


図 8: 連続図

図??において時間は左から右に推移している. 図??の中で, 演技者の重心位置は, 小さい黒い点で示した. 図??の連続図から巴が実現できていることが分かる.

4.2 け上がり

獲得した動作知識を用いてシミュレートした. 結果を図??の連続図により示す.

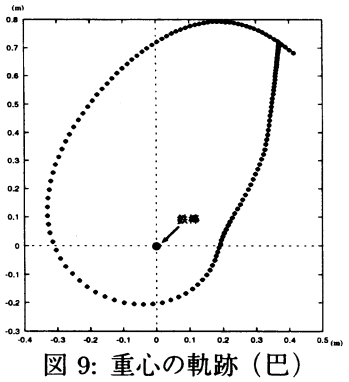


図 9: 重心の軌跡（巴）

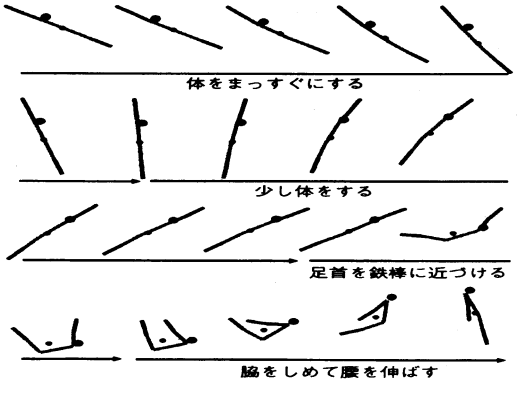


図 10: 連続図

図 10の連続図からけ上がりが実現できていることが分かる.

5 まとめと今後の課題

本稿では, 鉄棒運動シミュレータを構築し, 言語表現された知識を元に様々な演技を実現する制御を試みた. ここで, ファジィ理論を用いて言語表現された運動の知識を, 計算機上の制御系として実現する枠組みとして階層型制御システムを提案した. これは, 鉄棒の運動知識の構造, すなわち連続する複数の動作要素の流れによってひとつの演技が構成されるという分析に適合したものである.

今回は,「巴」と「け上がり」について, 制御規則を言語的な知識表現を元に構成し, 実験を行い良好な結果を得た. これまでの研究 [8] でも「振り上げ動作」と「大車輪」など, さまざまな演技について, 階層型制御系による実現をおこなってきた. これらは本報告も含めて,「足を引き上げる」のような部分的な動作知識を,「鉄棒の下を通過したら」という言語表現されたあいまいなタイミングの知識と組み合わせることで実現されている. 結果を総合してみると, 言語表現された鉄棒体操演技知識を実現する枠組みとして階層型制御系の有効性が確かめられた. またこの手法は, 部分の動作と全体の動作を人間の知識のもとで融合すると言う点から, 鉄棒運動に限らず, 不安定な対象で部分としての安定性を保証しつつ複雑なタスクを実現するうえでも有効であると考えられる.

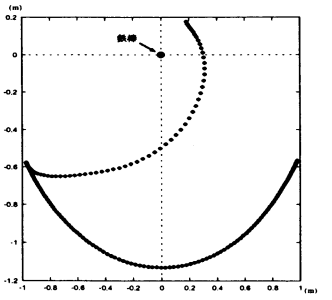


図 11: 重心の軌跡（け上がり）

今後は, これら一つ一つの演技を連続させた, いわゆる「連続演技」を実現する事が課題である. このためには, 各運動を正確にこなすだけではなく, 連続のために必要な事前および事後の補助動作などを知識化し表現するための枠組みが必要となる. 具体的には, 今回提案した階層型制御系のなかで, 流れ制御部での知識の構築を進める予定である.

謝辞

研究のきっかけを頂いた、長谷川健二先生、吉澤正尹先生に感謝いたします。

参考文献

[1] 田川聡洋, 西野順二, 小高知宏, 小倉久和 :「鉄棒体操における動作知識の言語表現の試み」平成 8 年度電気関係学会北陸支部連合大会 F-71,p.387

[2] 田川聡洋, 西野順二, 小高知宏, 小倉久和 :「鉄棒体操における動作知識の言語表現」平成 9 年度情報処理学会第 54 回全国大会 6G-8,p.2/169-170

[3] 菅野道夫 :「ファジイ制御」日刊工業新聞社 (1988)

[4] 安信誠二 :「ファジイ工学」昭晃堂

[5] 田中一男 :「アドバンストファジイ制御」共立出版

[6] 金子明友著 :「鉄棒競技教本 鉄棒編」不昧堂

[7] 京都大学体操研究会 :「体操競技研究」タイムス (1984)

[8] 田川聡洋, 西野順二, 小高知宏, 小倉久和 :「鉄棒体操における動作知識のファジイ言語表現」福井大学工学部紀要 (1997.3)

問い合わせ先 :
〒９１０ 福井市文京３－９－１
福井大学工学部情報工学科
田川聡洋
tagawa@rook.fuis.fukui-u.ac.jp
TEL: 0776-27-8968(ダイアルイン)
FAX: 0776-27-8751(事務室)

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THD2-3

粒度を考慮した時間表現の選択

A Method of Choosing Time Expressions with Granularity

松下 光範　　牧野 俊朗
Mitsunori Matsushita　　Toshiro Makino

NTT コミュニケーション科学研究所
NTT Communication Science Laboratories

Abstract: People use various expressions distinctively by granularity of subjects in order to communicate each other. It is necessary to achieve this ability on a computer that a choice of these expressions according to the granularity of the subject. Thus we consider about the choice process of the expression in consideration of a granularity. In this paper, we carried out the questionnaire regarding the use of time expressions and analyzed the feature of them. And then considered the procedure to choose a time expression based on these analysis results.

1 はじめに

我々は発話から話者の意図を理解し，適切に応答する対話システムの構築を目指しており，その足がかりとして計算機が発話を行なう際の表現の選択について研究している．人間はコミュニケーションを行なう際に状況に応じて様々な表現を使い分ける．様々な表現候補の中からある表現を選択するのは，その表現を用いることで自分の意図を適切かつ簡略に伝達できるからだと考えられる．したがって，発話において計算機が適切な表現選択能力を持つことは① 伝達意図の明瞭化，② コミュニケーションの円滑な持続，に繋がると考えている．

自然言語を用いて情報を表現する研究については文献 [1] や文献 [2] にあるように多く見受けられるが，これらはいずれも静的な状況下での話であり，動的な状況を考慮していない．人間は伝達したい内容を適切だと考える表現を用いて相手に伝達するため，どの表現を選択するかはその時々の対話の状況に依存し，対話の進行にともなって動的に変化する．このような状況下で表現を選択する手法を確立するために，まず，時間によって特徴付けられるイベントを対象として，その選択方法を粒度 (granularity) という観点を用いて考察する．粒度とは，同一の対象を観測する際の，対象と視点の「距離」の違いによる相対的な見方のことである．Euzenat は文献 [3] で，次のような短文を用いて粒度を説明している．

> 「平らな田舎道を走っているところを想像して下さい．あなたの前方に何かがあります．(a) あなたはトラックが家のわきにあり，それらは接しているようだ，と言うでしょう．(b) もう少し近づくと，それらの間にバンパーが存在していることを描写できるでしょう．(c) さらに近づくと，バンパーと家の間のすき間に気がつくでしょう．」

この短文では (a) が粗い粒度での見方に相当し，(b), (c) へと順に詳細な粒度での見方に移っている．もちろん，「距離」は空間的距離だけに限らず，心理的距離なども含む．また時間に着目した理由は，他の表現に比べて明確な階層構造を有しているためである．

本研究では，取り扱う対象を二人の話者間で行なわれるスケジュール調整に限定して議論を進める．スケジュール調整を選んだ理由は，時間表現が重要な役割を果たしていると考えられるためである．

2 スケジュール調整で用いる時間表現

我々の用いる時間表現は様々であり，一度に全てを取り扱うことは困難である．そこでそれらを分類し，対象とする時間表現を限定する．我々は時間表現を時間軸上の位置の特定という観点から次の 4 種類に分類した．

- 絶対表現
  カレンダーデート (年月日時分秒) や季節のように，人間が暦や時刻として認識し，その時間表現自身が時間軸上のある一点を示すものを絶対時間表現と呼ぶ．これらの時間表現は順序関係や相互関係が明確であり，人間が時間を表現する際の時間スケールとして利用されている．また，時間スケールとしては利用できないが，「文化の日」や「正午」などのように特定のカレンダーデートと一対一に対応する時間表現もこの範疇に入る．
- 相対表現
  4 分後や 6 年前など，ある時刻を基準にして相対的に表現されるものを相対時間表現と呼ぶ．

- 間隔表現
  3 時間や 4 日間など, 時間軸上の 2 つの時点の隔たりを表すものを時間間隔表現と呼ぶ.

- 関係表現
  時間表現どうしの関係を時間関係表現と呼ぶ. これについては Allen が 2 つのイベント (時区間) の関係を考慮するために 13 種類に分類した [4]. また, Euzenat は粒度変化に伴う時間関係の変化について Hobbs の提案した粒度の取り扱い [5] に基づいて論じている [3]. ただし, どのような場合に粒度の変化が生じるかについては触れていない.

スケジュール調整を行なうためには対象となるイベントの時間軸上での位置を特定する必要があるので, 本稿ではこれらの時間表現のうち, 絶対時間表現について取り扱うことにする. また, スケジュール調整を対象とするため, 未来時間に限定して考える.

未来時間に対する意識については, 木下によって報告されている [6]. 木下は未来の程度を表す修飾語 (主に副詞) を対象としてアンケート調査を実施し, 未来時間展望に関して考察を行った. その結果, 被験者 (男女大学生 407 人) の未来時間の概念には共通性があり, 時間的な曖昧さは絶対的な物理量としての時間に比例するのではなく, むしろ時間スケールに応じて増加することが確かめられた.

また, 未来時間のスケールを活動 (activity ; 行動や事態が継続して生じているか, または終わった直後に関するもの), 期待 (expectancy ; 行動の結果や目標の実現の確かさに関するもの), 希望 (hope ; 行動の結果について不確実さを含むもので願望, 欲望, 仮定を含む), 展望 (prospect ; 人類, 歴史, 宗教, 倫理, 宇宙的広がりを含むもの) に分類すると, 活動には秒, 分スケールが, 期待には分, 時, 日, 月スケールが, 希望には月, 年スケールが, そして展望には年スケールが各々対応することが見いだされた.

これは, 人間の未来に関する意識が無秩序ではなく, 未来の時間に対して活動したり, 期待したり, 希望したり, 展望することとかかわる力動的な秩序があり, 近い未来ほど具体性を帯びていることを示している.

ただし, この報告では現在からの時間的距離のみを対象としているため, 絶対時間表現に関しては触れられておらず, 現在の時点を基準とした相対時間表現についてのみ考察されている. また, 未来時間の一般的な分節構造を対象にしているため, 特定のイベントを意識した場合の意識の変化については不明である.

我々が対象とするスケジュール調整の場面では, 現在の時点からの時間的距離だけでなく, 対象のイベントをどの粒度で見ているのかによって時間表現の用いられ方が変わってくるように思われる. そこで, 絶対時間表現の用いられ方について分析するためにアンケート調査を実施した.

3 アンケート

人間がスケジュールについて対話する際の絶対時間表現の用い方を調べるためにアンケート調査を行ない, その結果に基づいて分析を行なった. 20 代後半から 30 代前半の男女 18 名を対象として選択式のアンケートを実施した. 質問にはスケジュール調整で用いられる表現の一例として, 次の 2 つの形式の単文を用意した.

質問形式 1 : [時間表現] にスキーに行きたい
質問形式 2 : [時間表現] にスキーに行く予定だ

[時間表現] には世紀, カレンダーデート, 季節, 旬, 週, 朝昼晩, 曜日, 午前午後の各時間スケールに所属する時間表現が入る. 1 つの質問形式につき 43 個の時間表現を用意したので, アンケートは計 86 個の質問で構成されている. なお, 木村によると質問形式 1 の「行きたい」は希望に分類され, 質問形式 2 の「行く予定だ」は期待に分類される.

各時間表現を含む単文に対して, 何の違和感もなく用いる (◎), 用いる場合もある (○), 用いることもできるがあまりいわない (△), 非常に違和感がある (×) の 4 段階で各被験者に評価してもらった. アンケートを実施した時期は 1997 年 2 月中旬で, アンケートを実施した際に, 現在の時点での印象に基づいて回答するように依頼した. このアンケートの結果から得られた結果を以下に示す.

[結果 1]

質問形式にかかわらず, 世紀や年などの極端に粗い時間スケールの表現と, 分や秒などの極端に細かい時間スケールの表現に対して被験者の殆どが × 印をつけていた. また質問形式 1 では時スケールの表現に対して △ 印ないし × 印をつけた被験者が多かったが, 質問形式 2 では時スケールの表現に対して ◎ 印ないし ○ 印をつけた被験者が多かった.

[結果 2]

被験者は, 長すぎる時間表現に対して違和感を感じている. 例えば, 「2 月 27 日にスキーに行きたい」という文に多くの被験者が ◎ 印をつけているのに対して, 「平成 9 年 2 月 27 日にスキーに行きたい」という文には ◎ 印をつけている被験者はわずか二人で, 半数以上の被験者が △ 印ないし × 印をつけていた.

また, アンケート実施後に各被験者に意見を尋ねた. 主要な意見は以下の 3 つに集約される.

[意見 1]

一緒に用いる時間表現の違いによって「スキーに行

く」という表現が様々に解釈できるという意見が得られた．例えば「2 月にスキーに行く予定だ」という文は，複数のスキーイベントを指しているとも，ある特定のスキーイベントを指しているとも解釈できるが，「2 月 27 日にスキーに行く予定だ」という文になると具体性が強くなり，「2 月 27 日 3 時にスキーに行く予定だ」という文になると，スキーに行くためにバスに乗るとか，家を出発するといったスキーをするための具体的な動作を想像するといった意見が多かった．

[意見 2]

「3 時にスキーに行く予定だ」や「3 時 25 分にスキーに行く予定だ」という文に対して，半数近い被験者が ◎ 印ないし ○ 印をつけていた．これらの単文が示している日時について尋ねた結果，被験者は各々「アンケート実施日の 3 時」，「アンケート実施日の 3 時 25 分」と考えていたことが分かった．

[意見 3]

アンケートを実施した日時が異なれば違和感なく用いる表現が幾つかあるという意見が得られた．例えば「平成 9 年 2 月にスキーに行きたい」という文に対して，殆どの人が △ 印ないし × 印をつけていたが，アンケート実施時期が平成 8 年 12 月であれば違和感を感じないという意見が多かった．

以上の結果と意見に基づいて，次のような考察を行なった．

[考察 1]

[結果 1] から，「行きたい」と「行く予定だ」という語尾の違いにより，違和感を感じる時間表現のスケールが異なっていることが分かる．これによって，絶対時間表現にも木下の報告のような分節が存在していると考えられる．ただし，この対応は表層的なものであり，常に同じではない．それは，[意見 1] に見られるように，同じ「スキー」という表現が複数の意図に受けとられていることから分かる．我々は，これを「スキー」というイベントを異なる粒度で見ているためだと考えている．すなわち粗い粒度での「スキー」は特定のスキーイベントを指すのではなく，抽象的なものを意図しているが，少し細かい粒度で見るとある特定のスキーイベントを意図していることになり，更に細かい粒度ではスキーイベントのうちの「出発する」や「バスに乗る」などの部分的な行為を意図する．

したがって，時間表現のスケールとイベントの粒度には対応関係が存在し，時間スケールに着目することで，このような意図の違いを認識できると考えられる．また逆に，ある意図を伝達したいと考えたとき，適切なスケールの時間表現を選択することで，より明確に伝達できると考えられる．

[考察 2]

本調査ではアンケートを実施した時点での印象に基づいて回答するように依頼したため，[意見 2] のように「3 時にスキーに行く」という，月や日の情報が欠落して時間軸上の位置を正確に特定できない文であっても違和感を感じていない被験者が半数近く存在したと考えられる．このことから，人間は無意識のうちに時間軸上のどの位置の話題であるか判断するための前提となる時間を仮定し，月や日などの上位の時間情報が与えられていない時間表現であっても，それを考慮することで時間表現を補完し理解していることが推測できる．

同様に，[結果 2] のように長すぎる時間表現に違和感を覚えるのは，前提となる時間により容易に補完できる情報まで表現の中に含まれているため，冗長に感じられるからだと推測できる．[意見 3] に関しても同様である．

我々は，このような話者の無意識に仮定する時間を話題時間と呼ぶことにする．もちろん，人間は常に話題時間を意識して対話をしているわけではないが，この話題時間を用いることで，計算機上で人間の行なうような表現選択を実現できると考えている．

以上の考察から，計算機が違和感のない時間表現を選択するためには次のことが分かればよいと考えている．

(1) 同じ表現で表されるイベントの，粒度の違いによる意図の変化

(2) 意図と時間スケールの関係

(3) 対話における話題時間

そこで，対話の場面において，これらを考慮して時間表現を選択する方法を考える．

4 時間表現の選択方法

二人の話者 A, B によるスケジュール調整の場面を想定する．各話者は自分の持つスケジュールデータを参照しながら，相手との合意を得るために対話する．各話者は話題時間を無意識に想定しながら，それに基づいて発話しているものと仮定する．話者 A が発話を行なった場合，聞き手である話者 B はその発話内容から話者 A の話題時間と意図を推測し，それに応じて応答する．話者 B は受けとった情報と自分のスケジュールデータからゴールを設定し，そのゴールへ到達するための戦略をたてて発話を行なう．以上の行為を交互に繰り返していくことで両者の想定する話題時間が詳細なスケールへと絞り込まれ，それに応じてスケジュールが決定されていく．したがって，発話を行なう際にはその時点での話題時間と自分の伝達したい意図を考慮して，最も適切な時間表現を選択することが求められる．

一方の話者を計算機に置き換えるには，次のような処理を順に行なえばよい．

(1) 話題時間の把握と意図の推測

相手の発話内容から話題時間を把握し，その意図を推測する．このときの手がかりは相手の用いた時間表現と相手の発話内容である．話題時間は対話を行なっている時刻をデフォルトとして考える．例えば，対話の行なわれている時刻が1997 年 4 月 1 日であるとする．「夏に長野に行きたい」という発話が話者 A によってなされた場合，この発話からだけでは「夏」がいつの夏を指しているのかが分からないが，デフォルトの話題時間を考慮することで，1997 年のことであると分かり，同時にこの発話における話題時間が「1997 年の夏」を意味していることが分かる．また，時間スケールから話者 A の意図の粒度は粗いことが分かるので，話者 A の意図は「夏に長野に旅行する日程を決めたい」と見なすのが妥当である．それに対して「3 日に長野に行きたい」という発話が行なわれた場合，話題時間は「1997 年 4 月 3 日」であり，その意図は，「3 日に長野に行くときの交通手段を決めたい」と見なすのが妥当である．

(2) ゴールの設定

(1) で推測した意図から，その対話のゴール粒度を判断する．先に示した例「夏に長野に行きたい」という発話の場合，その意図は「旅行日程の決定」であるので日のスケールで表される粒度まで話を詰めれば良いし，「3 日に長野に行きたい」の場合はという発話の場合，その意図は「交通手段の時刻の決定」であるので，「分」のスケールで表される粒度まで詰める必要がある．

(3) ゴールへ向けての戦略決定

二者間で合意を得るためにはゴールに向けて話題時間を絞り込んでいかなくてはならない．そこで話者 A の発話した時間表現に対して，話者 B は A の用いた時間表現より詳細なスケールの表現を用いて対話する．例えば話者 A が「7 月に行きたい」という発話を行なったとき，話者 B は「中旬に行こう」というように話者 A の提示した時間表現に内包される時間表現で発話する．それに対して話者 A の提示した時間表現に合意できずに代替案を出す場合には話者 A の提示した時間表現に包含されない時間表現を用いて発話する．話者 A の「7 月に行きたい」という発話に対して，話者 B が「8 月ならいいけど．」や「6 月の下旬ならいいよ．」という発話を行なう場合がこれにあたる．また，話者 A に対して話者 B が自分のスケジュールデータの概要を提示する場合 (合意できないが代替案をだせない，もしくはいつでもかまわない，など) は話者 A の提示した時間表現を包含する時間表現を用いて発話する．「夏は忙しい」という発話がこれに相当する．

(4) 表現の選択

相手に自分の意図を伝達するために状況に応じた適切な時間表現を選択する．ここでいう状況とは，話題時間，戦略，スケジュールデータのことである．自分のスケジュールデータと戦略からどの粒度での発話を行なうか決定し，それに適切な時間表現を選択する．そして，話題時間を考慮して，冗長性のない表現に修正する．

5 まとめ

本稿では時間表現のうち，時間軸上の位置を特定することができる絶対時間表現に焦点を当て，アンケートによってその用いられ方を分析した．それによって，話者の意図と時間表現の間には相関性があることと，話者は無意識のうちに前提となる時間を仮定していることが推測できた．そして，これらを反映した対話手法について考察した．

今後，相対時間表現や時間間隔表現に関しても同様にアンケート調査を行ない，分析することを予定している．

参考文献

[1] 馬野 : 「ファジィ集合に基づく自然言語の意味表現」, 情報処理, Vol.34, No. 1, pp.21-28 (1993).

[2] 江澤 : 「ファジィ修飾語」, 日本ファジィ学会誌, Vol.3, No.4, pp.59-64 (1991).

[3] Euzenat, J., "An Algebraic Approach to Granularity in Qualitatve Time and Space Representation," Proc. 15th IJCAI, pp.894-900 (1995).

[4] Allen,J. F.: "Towards a General Theory Action and Time," Artif. Intell., Vol.23, No.2, pp.123-154 (1984).

[5] Hobbs, J. R., "Granularity", Proc. 9th IJCAI, pp. 432-435 (1985).

[6] 木下 : 「未来時間の分節の研究 — 未来を表す修飾語を材料として — 」, 心理学研究, Vol.58,No. 4, pp.253-259 (1987).

[問い合わせ先]

〒239 横須賀市 光の丘 1-1

NTT コミュニケーション科学研究所

松下 光範

TEL: 0468-59-3766

FAX: 0468-59-3633

E-mail: mat@cslab.kecl.ntt.co.jp

自律分散系における柔らかい協調機構について（3）

Soft Cooperation by Distributed Autonomous Agents (3)

江澤 義典
Yoshinori Ezawa
関西大学 総合情報学部
Faculty of Informatics, Kansai University

Abstract

In the distributed artificial intelligence area, many research papers concerning the cooperations by several autonomous agents have been reported. Without any communications or negotiations, autonomous systems are shown to be able to achieve certain cooperations. In the last paper, a soft cooperation among several autonomous agents is formulated under a synchronization assumption. In this paper, we show that the synchronization-free agents system can do cooperations if each autonomous agent has a short-term memory.

1 はじめに

人工知能分野においては自律エージェントによる協調行動のモデルが様々な応用分野から注目を集めている [4, 5]。とくに、自律エージェント間に特別な支配従属関係とか通信機能がなくても協調動作が可能であるケースが興味深い。先の報告では、同一の戦略をインプリメントされた複数自律エージェント間の協調には反復状態からの脱出が困難となるので、それを回避する為には異質な戦略を有するエージェントが系に含まれている必要のあることを示した [7]。しかし、そこでは自律エージェント間での同期動作という制約が残されていた。本報告では現実的な追跡問題として "同期動作を前提としない協調機構" についてその問題点を検討する。

2 追跡問題における協調行動

分散人工知能の典型的な小問題である "追跡問題" を考える事にする [3]。

2.1 エージェントの移動空間

ロボットなどの自律移動エージェントのモデルとして一般性を失うこと無く次のように仮定する。

- 移動空間としては無限に広がる 2 次元格子状のセル空間を想定する。
- エージェントには青と赤の 2 種類があり、青エージェントが赤エージェントを追跡し赤エージェントは逃避行動をとるが赤のエージェントが占めているセルに青エージェントが到達すると追跡は達成されたことにする。
- 各エージェントは 1 ステップに 1 動作 (近傍セルへの移動が可能) を行なうが一時停止する場合もある。同色エージェントの動作は一斉に生起する (並列動作をする) が青と赤は逐次的に行動すると考える。すなわち、青のエージェントが行動する間に赤のエージェントは移動しないし、逆に赤のエージェントが行動している間にも青のエージェントは移動しない。
- 移動速度は青エージェントも赤エージェントも同一であると考える。

2.2 エージェントの自律性

各エージェントは '視野内に存在する他のエージェントと自己との相対位置情報 (距離情報および方角情報)' だけから、自己の動作を逐次的に決定する。このとき、他のエージェントがどのような戦略を取るかの情報は使わないという意味で自律的である。つまり、エージェント間の通信も無いと考えるし、エージェント間の同期動作も想定しない。

2.3 変形 Lieb コンフィギュレーション

近傍セルが左右上下の 4 方向に限られているときに赤エージェントが 1 個で青エージェントが 4 個以上の場合には、終盤の問題解決において「少なくとも 4 個のエージェントがターゲットを中心とした 4 分割領域を分担する Gasser モデルの Lieb コンフィギュレーションを保ちながらターゲットと各エージェントの距離を狭めることができるならば、必ずターゲットを捕らえることができる」ということが分かって

いる [3]。また、本研究の設定の様に 8 近傍セル（斜め上下左右を含む）モデルを採用した場合には、4 個以上のエージェントで 1 個のターゲットを追跡する問題になるので 4 近傍の場合の Lieb コンフィギュレーションを 45 度回転補正すれば良いことが分っている [6]。

3 エージェントの視野限界とは独立な協調

先の報告では、エージェントの視野に関して以下の仮定を設けていた [6, 7]。

1. 青エージェントの視野は制限せず、赤エージェントには視野限界がある。
2. 青エージェントは赤エージェントの視野限界を予め知っている。
3. 青エージェント間で赤エージェント視野の臨界領域での同期機構がある。

しかし、具体的な自律エージェントのモデルを考えるとき、第 1 の仮定はやむを得ないにしても、第 2 の仮定は現実的とは言えないし、第 3 の仮定はある意味ではエージェントの自律性を損なう恐れがある。そこで、本報告ではエージェントの視野限界に関する仮定は第 1 のものだけに限った場合に、エージェント間の協調動作が可能となるメカニズムを考えることにする。

赤のエージェントは視野内の青エージェントを認識した場合には逃避行動を起こすのであるから、青エージェントが単純な追跡戦略を採ったのでは、追跡側の配置が Lieb コンフィギュレーションに到達できても、それを保ちながらの追跡は困難となる。

そこで、1 次記憶に直前の戦略情報を保存しておき、各時点での行動を決定するデータとして参照できると仮定する。この仮定はエージェントの自律性を損なうことは無いし、各エージェントに膨大な記憶機構を要求するものでもない。実際には、直前の行動で想定した相互距離が相手エージェント（赤）の動きによって実現できていない場合には、次善の策として包囲網を拡大する戦略を採用することが可能になる。

そして、包囲網のサイズが赤エージェントの視野限界を越えた場合には赤エージェントが逃避行動をとらなくなるので、視野臨界の外で青エージェントによる協調的包囲が可能になる。

4 おわりに

通信エージェントが含まれない自律分散系であっても協調的な追跡を可能とする条件として、青エージェント間の同期機構を想定した為に結果としてデッドロック状態がもたらされていた。本報告では、青エージェントに 1 次記憶機構を導入することにより、エージェント間の協調機構が実現できデッドロックを回避できることが分かった。今後の発展としては、エージェントの視野が固定的でなく動的に変化する場合の協調機構 [8] や、いわゆるファジィ視野 [1, 2] を有するターゲットを追跡する場合についてエージェント間の協調機構を検討する事は有意義である。

参考文献

[1] L. A. Zadeh: Fuzzy Algorithms, Information and Control, Vol. 12, (1968).

[2] K. Tanaka and M. Mizumoto: Fuzzy Programs and Their Execution, in Zadeh et al. eds, Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and DecisionProcesses, Academic Press, (1974).

[3] 大沢英一・沼岡千里・石田亨: 分散人工知能における標準的小問題, コンピュータソフトウェア, Vol. 10, No. 3, pp. 3 — 19, 日本ソフトウェア科学会, (1993).

[4] 伊藤正美:自律分散, 文部省科学研究費補助金 (重点領域研究) 研究成果報告書, (1994).

[5] 所真理雄: マルチエージェントシステム研究の目指すもの, コンピュータソフトウェア, pp. 78 — 84, 日本ソフトウェア科学会, (1995).

[6] 江澤義典・森戸健一・植村知正: 自律分散系における柔らかい協調機構について, 第 11 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 113 — 114, 日本ファジィ学会, (1995).

[7] 江澤義典: 異質エージェントを含む系における柔らかい協調機構について, 第 12 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 911 — 912, 日本ファジィ学会, (1996).

[8] L. J. Kohout: The need to integrate "Soft computing" methods with "Computing with words" approaches in distributed robotic system, 1st Online Workshop on Soft Computing, August (1996).
http://www.bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp/wsc1/papers/p010.html

問合わせ先
〒 569 – 11 高槻市霊仙寺町 2 – 1 – 1
関西大学総合情報学部
江澤義典
Tel & Fax: 0726(90)2450
Email: ezawa@res.kutc.kansai-u.ac.jp

ファジィモデルによる最適化に関する考察

Studies on Optimization with Fuzzy Models

領家美奈*, 田村坦之*, 中森義輝**

Mina Ryoke*, Hiroyuki Tamura* and Yoshiteru Nakamori**

*大阪大学大学院基礎工学研究科, **甲南大学理学部応用数学科

*Department of Systems and Human Science, Osaka University

**Department of Applied Mathematics, Konan University

Abstract: In this paper, an optimization with fuzzy models describing non-linear systems is discussed. Here, the optimization is the inverse problem to determine input values for desirable output values. It is difficult to get them because of nonlinearity of the system as well as the existence of plural solutions. The fractional programming is used to estimate the input values in this paper, and comparison with the genetic algorithm is presented briefly.

1 はじめに

本研究では、高木・菅野ファジィモデルによって記述された非線形システムの最適化について述べる。これは具体的には、システムの出力に望ましい状態を与えたとき、どのような入力状態であればそういった望ましい状態を得ることができるのかという逆問題について考察することに相当する。ファジィモデルは非線形モデルであるため解を得ることも困難であるうえに、その解は一通りではない。また、与えられた「望ましい解」の起こりやすさも考慮しつつ最終的にはいくつかの入力状態を起こりやすさとともに提示できることを目指す。

2 ファジィモデルと最適化の定式化

高木・菅野型ファジィモデルは次のように記述されるルール群から成るルールベース型モデルである [1]。ルール R^i は次のように記述される。

$$\text{Rule } R^i: \quad \text{if } \boldsymbol{z} \text{ is } F^i, \text{ then } \boldsymbol{y} = \boldsymbol{g}^i(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{a}_0^i + A^i \boldsymbol{x} \tag{1}$$

ここで、$\boldsymbol{y} = (y_1, y_2, \cdots, y_r)^{\mathsf{T}}$ は目的変数ベクトルである。$\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_s)^{\mathsf{T}}$ は後件部変数のベクトルであり、$\boldsymbol{z}=(z_1, z_2, \cdots, z_t)^{\mathsf{T}}$ は前件部変数ベクトルである。しばしば、それら二つの変数集合 $\{x_1, x_2, \cdots, x_s\}$ と $\{z_1, z_2, \cdots, z_t\}$ は互いに相関関係を持っている。F^i は同定された前件部変数に関するメンバシップ関数 $f^i(\boldsymbol{z})$ を持つファジィ部分集合を示す。c をルールの数とすると、$\Omega = \{\boldsymbol{a}_0^i \in R^r,\ A^i \in R^{r\times s};\ i = 1, 2, \cdots, c\}$ で表される線形回帰モデルの係数は後件部パラメータと呼ばれる。予測値 $\hat{\boldsymbol{y}}$ は次式によって求められる。

$$\hat{\boldsymbol{y}} = \frac{\sum_{i=1}^{c} f^i(\boldsymbol{z}^*) \cdot \boldsymbol{y}^i(\boldsymbol{x}^*)}{\sum_{i=1}^{c} f^i(\boldsymbol{z}^*)} \tag{2}$$

ここで $\boldsymbol{x}^*$ と $\boldsymbol{z}^*$ は入力変数の入力値を示す。各ルールの適合度を次に定義する。まず、クラスタ i に属するデータ集合からメンバシップ関数を次のように定義する。

$$\mu_j^i(z_j^i;\ p_{j1}^i, p_{j2}^i, p_{j3}^i, t_{j1}^i, t_{j2}^i) = \begin{cases} \exp\left\{-\dfrac{(z_j^i - p_{j2}^i)^2}{2(t_{j1}^i)^2(p_{j1}^i - p_{j2}^i)^2}\right\}, & z_j^i \le p_{j2}^i \\ \exp\left\{-\dfrac{(z_j^i - p_{j2}^i)^2}{2(t_{j2}^i)^2(p_{j3}^i - p_{j2}^i)^2}\right\}, & z_j^i \ge p_{j2}^i \end{cases} \tag{3}$$

ここで、p_{j1}^i, p_{j2}^i と p_{j3}^i はクラスタ i に含まれるデータ集合から得られる四分位点である。特に第2四分位点は前件部変数の軸上のデータ分布の中央値を表す。それらのうちのいくつかが等しいときには $p_{j1}^i < p_{j2}^i < p_{j3}^i$ の関係を保つように小さな揺らぎを与えることにする。また、t_{j1}^i, t_{j2}^i (>0) はチューニングパラメータである。デフォルト値 1.0 を持つが、モデル同定のときには最適化される。モデル同定の詳細は文献 [2][3] に譲る。ルール R^i に対応するメンバシップ関数を次のように定義する。

$$f^i(\boldsymbol{z}) = \prod_{j=1}^{t} \mu_j^i(z_j^i;\ p_{j1}^i, p_{j2}^i, p_{j3}^i;\ t_{j1}^i, t_{j2}^i) \tag{4}$$

ファジィモデルによる最適化の目的は、ファジィモデルの出力 $\boldsymbol{y} \in \boldsymbol{R}^r$ の望ましい状態を得るための入力

値ベクトルを求めることである。問題 (P) を次のように定式化する。

$$(P) \quad y(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z}) = \frac{\sum_{i}^{c} f^i(\boldsymbol{z})\, g^i(\boldsymbol{x})}{\sum_{i}^{c} f^i(\boldsymbol{z})}, \quad \boldsymbol{x},\boldsymbol{z} \in S$$

$$\longrightarrow \text{Min. (Max. or desirable value)} \tag{5}$$

$$\text{subject to} \begin{cases} f^i(\boldsymbol{z}) = \prod_{j=1}^{t} \mu_j^i, \\ g^i(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{a}_0^i + A^i\, \boldsymbol{x} \end{cases} \tag{6}$$

3 Fractional Programming

問題 (P) では、分母分子にそれぞれ入力変数が含まれているためこのまま入力値ベクトルを求めることは困難である。そこで、目的関数を新たに定式化しなおして入力ベクトルを求めるアプローチをとる [4]。ここでは簡単のために、目的変数がひとつであるモデル $(r=1)$ について述べる。r が 2 以上のとき、同時に複数の目的関数を扱うことになる。問題 (P) に関する次のパラメトリック問題 (P_q) を定義する。

$$(P_q) \quad J(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z},y(\hat{\boldsymbol{x}},\hat{\boldsymbol{z}}))$$
$$= \sum_{i=1}^{c} f^i(\boldsymbol{z}) g^i(\boldsymbol{x}) - y(\hat{\boldsymbol{x}},\hat{\boldsymbol{z}}) \sum_{i=1}^{c} f^i(\boldsymbol{z}), \quad \boldsymbol{x},\boldsymbol{z} \in S$$
$$\longrightarrow 0 \tag{7}$$

ここで制約条件は 式 (6) と同様である。$y(\hat{\boldsymbol{x}},\hat{\boldsymbol{z}})$ はある入力値ベクトル $(\hat{\boldsymbol{x}},\hat{\boldsymbol{z}})$ が与えられたときのモデルの出力である。次にアルゴリズムを簡単に述べる。初期値として入力値ベクトルを与えて予測値を求める。さらに、与えられた入力値ベクトルでの微分係数を求め、それにより入力値ベクトルを更新する。更新された入力値ベクトルを新たに用いて、目的関数が収束するまで、または各入力変数の定義域を越えるまで繰り返す。

4 問題点と今後の課題

(P_q) は、目的関数のよりシンプルな構造のために数値的に (P) より扱いやすい。しかしながら、目的関数は凸関数であるという仮定のもとに Fractional Programming は適用されるので、初期値により解を求めることが困難な場合がある。更に入力値ベクトルを求めるうえで問題となるのは、各入力変数をどの程度の幅で更新するかを意味するパラメータの設定の困難さである。このパラメータに大きい値を用いると各入力変数の定義域を容易に越える場合があり、小さい値を用いると収束が非常に遅くなる。収束速度が異なるもうひとつの理由に入力値ベクトルでの微分係数の大きさがある。微分係数には各ルールに属する重み $f^i(\boldsymbol{z})$ が含まれるのでそれらも更新に影響を与える。これらの連動した動きに対応するパラメータの適切な設定方法は今後の課題に含まれる。また別の視点からみると、各ルールの適合度が目的関数の微分した式に含まれるのでメンバシップ関数の形によって収束の速さが異なることがわかる。このことよりモデルに使用するメンバシップ関数の形状について議論することができる。

Fractional Programming に関する諸問題を回避するためと複数の入力値ベクトルを同時に得るために遺伝的アルゴリズム [5] によるアプローチが考えられる。実際に適用すると、Fractional Programming より「望ましい答え」により近い入力値の組合せを得る場合がある。しかしながら、起こりやすさ等の考察が加えられていないため、非常に可能性の低い組合せを提示する場合がある。入力変数の組合せの起こりやすさを規範にいれて遺伝的アルゴリズムを適用することを今後おこなう。

Fractional Programming を適用する場合にも初期値を乱数により与えて、またパラメータをいくつか変化させることにより複数の入力値ベクトルを求めることができる。入力値ベクトル群を求めて合理的にモデルにルールを内挿することも今後の課題のひとつである。

さらに、得られているモデルを用いて「望ましい解」の起こる確率 (起こりやすさ) と入力値の各変数のメンバシップ値の積 (すなわち、ルールの適合度と全データを用いたメンバシップ関数を用いたモデル自体への適合度) を各手法ごとに求め比較し手法の善し悪しについて調べる。また複数の目的変数を持つ場合についても検討する。この場合、個々の問題に応じた多目的問題の定式化をおこなう。

参考文献

[1] T. Takagi and M. Sugeno: Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-15, No. 1, pp. 116-132, 1985.

[2] Y. Nakamori and M. Ryoke: Identification of fuzzy prediction models through hyperellipsoidal clustering. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 24, No. 8, pp. 1153-1173, 1994.

[3] 領家美奈、中森義輝: 適応型ファジィクラスタリングによる分類と回帰の同時分析. 日本ファジィ学会誌 Vol. 8, No. 1, pp. 136-146, 1996.

[4] Reiner Horst and Panos M. Pardalos (eds.): Handbook of Global Optimization. Kluwer Academic Publishers, pp. 495-608, 1995.

[5] D. E. Goldberg: *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.

連絡先： 領家 美奈
〒 560 豊中市待兼山町 1-3
大阪大学 大学院 基礎工学研究科
Tel: 06-850-6378 Fax: 06-850-6341
E-mail: ryoke@tamlab.sys.es.osaka-u.ac.jp

THD3-2

ファジィモデリングにおけるルール獲得基準の検討

An Investigation of Criteria in Making Rules on the Fuzzy Modeling

福元 伸也　宮島 廣美　岸田 一也　長澤 庸二
Shinya Fukumoto Hiromi Miyajima Kazuya Kishida Yoji Nagasawa
鹿児島大学 工学部
Faculty of Engineering, Kagoshima University.

ABSTRACT : In this paper we suggest the "goodness" of models using the information criterion AIC. The information criterion AIC is a statistic to estimate the badness of models. When we usually make the fuzzy rules, we aim to minimize inference error and the number of rules. But these conditions are the criteria to acquire an optimum rule-model by using the training data. In the general case of fuzzy reasoning, we aim to minimize the inference error for not only given training data, but also unknown data. So we have introduced an information criterion based on AIC into the appraised criterion for estimating the acquired fuzzy rules. Experimental results are given to show the validity of using AIC.

1 はじめに

ファジィモデルを自動的に構築するためのさまざまな研究が行われている．これらの研究では，ルールの後件部に実数値を用いて学習を簡単化するもの [1] やルールを自動的に増やしていくもの [2]，自動的に削除するもの [3] などがある．これらのファジィルールの自動生成手法では，ルールの選択規準に推論自乗誤差を用いることが多い．

本論文では，ファジィモデルの選択規準に情報量規準を用い，従来の推論自乗誤差のみを用いた場合との比較を行う．数値実験では，1次元の関数近似を行った．

2 削除型ファジィモデル

削除型ファジィモデル [3] では，学習の初期設定として，あらかじめ多くのルールを与えておき学習を開始する．そして，メンバシップ関数の中心値 c_{ij} と幅 b_{ij} と後件部の実数値 w_i を調整しながら学習を繰り返す．

削除するルールの選定はまず，いくつかのルールの中の1つを仮に削除して推論誤差を計算する．次にこのルールを元に戻して別のルールを同様に削除して推論誤差の計算を行なう．この作業を存在するすべてのルールに対して行い，そのなかで最も推論誤差の小さくなるときのルールを実際に削除するルールとする．すなわち，推論誤差に対する影響が最も小さいルールが削除の対象となる．この削除型ファジィモデルは，たくさんのルールから学習をスタートすることにより，多くのルールに入出力データの関係を埋め込んでいくので，入出力データの情報が構築されたルールの中に分散して記憶されるという特徴を持つ．

3 情報量規準ＡＩＣ

情報量規準ＡＩＣは統計モデルの善し悪しを判断するために赤池氏により導入された尺度である．統計モデルにおいてＡＩＣは推論誤差の小さいモデルを選択するための基準になる．従ってＡＩＣをファジィモデルの選択に適用してみることにする．ファジィモデルのパラメトリックモデルとして次式を用いる．

$$P(w,\sigma\ ;x,y_r)=\frac{R(x)}{(2\pi\sigma)^{\frac{L}{2}}}exp(-\frac{|y_r-\varphi(w;x)|^2}{2\sigma^2}) \quad (1)$$

ただし，(w,σ) は，チューニングされるパラメータ，(x,y_r) は，学習用データ，$R(x)$ は，入力の確率密度，L は，出力変数の次数，$\varphi(w;x)$ はファジィモデルによって得られる推論出力で，次式で表される．

$$\varphi_i(w;x)=\frac{\sum_{j=1}^{H}w_{ij}\cdot(\prod_{k=1}^{K}T_{jk}(x_k))}{\sum_{j=1}^{H}(\prod_{k=1}^{K}T_{jk}(x_k))} \quad (2)$$

ただし，H はルール数を表し，K は入力変数の次数，$T_{jk}(x_k)$ は次式に示すようなメンバシップ関数である．

$$T_{ij}(x_j)=\begin{cases}1-\frac{2\cdot|x_j-c_{ij}|}{b_{ij}} \\ \quad (c_{ij}-\frac{b_{ij}}{2}<x_j<c_{ij}+\frac{b_{ij}}{2}) \\ 0 \quad \text{(otherwise)}\end{cases} \quad (3)$$

ここで，M_{ini}をルールの削除を行う前のモデルで，且つ，いくつかのパラメータを含むモデルとする．また，M_{ini}からパラメータをチューニングし，ルールが削除された後に得られるモデル全体からなる集合をΘとする．パラメータ (w,σ) が与えられたとき，

$$l(w,\sigma) = \sum_{i=1}^{N} logP(w,\sigma\ ;x_i,y_{ri}), \qquad (4)$$

の値は，対数ゆう度を表す．もし，それぞれのモデル M $(\in \Theta)$ に対して，$l(w,\sigma)$ を最大にする (w,σ) が存在すると仮定すると，情報量規準は次のように定義される．

$$I(M) = -2l(w^*,\sigma^*) + 2F_0(w^*) \qquad (5)$$

ただし，(w^*,σ^*) は，最ゆう推定量を表し，$F_0(w^*)$ は，次式のようなパラメータの個数を示す．

$$F_0(w^*) = 2 \times D \times NR + NW + 1 \qquad (6)$$

D:入力変数の次数
NR:入力変数当たりのメンバシップ関数の数
NW:後件部の実数値 w の数
最終項の+1 はσの自由度を表す．

4 数値実験

ここでは，既知の関数を使ってその関数を同定し，推論モデルを構築する．次の３つの関数を近似する．

$$(i)\ y = \begin{cases} \sin(\frac{\pi}{2}x) & (-1 \le x \le 0) \\ x & (0 < x \le 1) \end{cases}$$

$$(ii)\ y = \begin{cases} \cos(\frac{\pi}{2}x) & (-1 \le x \le 0) \\ 1-x & (0 < x \le 1) \end{cases}$$

$$(iii)\ y = \frac{(x\ e^{2x^2})/7.39 + 1}{2}$$

それぞれの関数の定義域は，$[-1,1]$ であり，出力は，$[0,1]$ に正規化する．学習用入出力データ (x_1^p, y_r^p) を P $(= 1000)$ 個与える．また，入力データは，平均 0，分散 1.0 の正規分布に従うものとし，しきい値は 0.007 とした．

表 1: 関数近似

	ルール数	推論誤差	学習回数	$I(M)$
関数 (i)	6	7.41	172	79.0
	5	6.34	173	◇ 55.4
	• 4	7.58	254	75.9
関数 (ii)	7	5.86	568	◇ 47.8
	6	6.59	601	60.9
	• 5	7.07	816	59.8
関数 (iii)	7	4.13	133	◇ 27.8
	6	5.03	135	41.3
	• 5	6.54	165	51.6

推論誤差は $\times 10^{-3}$　• は最終的に得られたモデル．
◇ は $I(M)$ の最低値．

この関数近似の結果を表 1 に示す．表 1 は，削除型モデルを用いて得られた結果で，推論誤差は未学習データを使用したときの誤差を示している．$I(M)$ の値は，小さい方が良いモデルを示している．

表より，それぞれの関数において，削除型ファジィモデルを用いて得られたルールモデルと情報量規準で良い値を示したモデル（例えば関数 (i) では，前者がルール数 4 のモデルで，後者がルール数 5 のモデル．）で違いが生じた．いずれの関数の場合も，情報量規準 $I(M)$ で得られたモデルの方が推論誤差が小さくなった．このことは，削除型ファジィモデルでの学習アルゴリズムが推論誤差のみを基準としているのに対し，情報量規準 $I(M)$ を用いた場合は，推論誤差とルール数などの他のパラメータも考慮しているので，このような違いが生じたと思われる．

5 まとめ

ファジィ推論モデリングにより得られたルールモデルに対し，モデルの良さを表す基準として情報量規準を用いた．情報量規準はもともと観測されたデータに対する統計的モデルの悪さを示すための統計量であるが，これをファジィモデリングのルールモデルの選択にも使えることを示した．今回，得られた推論モデルに対し情報量規準を用いたが，今後は，この規準を学習アルゴリズムの中に組み込むことを考えたい．

参考文献

[1] 市橋英友・渡辺俊彦：”簡略ファジー推論を用いたファジーモデルによる学習型制御” 日本ファジィ学会誌，Vol.2, No.3, pp.429-437(1990).

[2] 荒木昭一・野村博義・林　勲・若見昇：”ルールを逐次的に生成するファジーモデリングの一提案”，日本ファジィ学会誌，Vol.4, No.4, pp.722-732(1992).

[3] 宮島廣美・福元伸也・石塚洋一：”ルールの削除に基づくファジーモデリング”，信学論 (A)，J77-A,11,pp.1555-1562(1994).

[4] 赤池弘次：”情報量規準 AIC とは何か”，数理科学，No.153,pp.5-11(1976).

[5] 栗田多喜夫：”情報量基準による３層ニューラルネットの隠れ層のユニット数の決定法”，信学論 (D-II)，J73-D-II,11,pp.1872-1878(1990).

[6] S.Fukumoto,H.Miyajima,K.Kishida,Y.Nagasawa : "An Examination of Fuzzy Model Using AIC", Proc. 1996 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp.157-160(1996).

問い合わせ先：〒８９０ 鹿児島市郡元１－２１－４０
鹿児島大学 工学部 情報工学科
福元 伸也
ＴＥＬ ０９９－２８５－８４５３
ＦＡＸ ０９９－２８５－８４６４
Ｅ－ｍａｉｌ fukumoto@ics.kagoshima-u.ac.jp

直交線形関数による階層化ファジィモデリング

Hierarchical Fuzzy Modeling Based on Ortho-Linear Functions

菊池 浩明
Hiroaki Kikuchi
東海大学
Tokai University

高木 昇
Noboru Takagi
富山県立大学
Toyama Prefectural University

中西 祥八郎
Shouhachirou Nakanishi
東海大学
Tokai University

Abstract: This paper studies hierarchical fuzzy modelings based on a special class of fuzzy switching functions, ortho-linear functions, which can be expanded with $n-1$ two-variable functions so that $f(X) = \phi_1(x_1, \phi_2(x_2, \phi_3(x_3, \ldots, \phi_{n-1}(x_{n-1}, x_n))))$. After some ropeties of the ortho-linear functions are clarified, fuzzy linear modeling scheme is proposed, and is estimated to be $O(n^2)$.

1 はじめに

有限個の学習データからそれを近似するモデルを同定する問題を考える．モデルに十分な自由度を許すならば，その学習にかかるコストは問題の規模に指数関数的である．もし，大規模な問題を意味のあるいくつかの小さな部分問題に分割することが出来れば，それらを階層的に積み上げることで効率的なモデリングが与えられる．これが階層化モデリングの考え方である．

しかしながら，階層化による学習コストの削減と引き替えに，モデルの表現能力は制約され，関数的に不完全になる点が指摘されている [4]．いかなるモデリングを用いても階層化モデルでは決して表現できない関数を直交展開不能といい，全ての関数に対するその比が変数の数の極限値で 0 に収束することが示されている．更に，たとえ直交という条件，すなわち，部分関数における変数の集合が互いに素であることを弱めても，この不完全性は解消しない．[7] では，3 変数の 2 値関数において，1 変数の多重を認めても表現出来ない 24 個の関数が示されている．直交展開不能な関数の集合は思いのほか大きく，たとえ多重にしても関数の表現能力が劇的に向上するわけではない．

しかし，これらの結論は，階層化モデリング自体の有効性を否定するものではない．誤差を最小化する近似モデルを短時間で求めるという現実的な要請には，直交展開可能な関数で十分な場合が多い．実際，これまでの多くの研究 [1] [2] が階層化モデリングの有効性を確かめてきている．我々の知識の論理構造は，もしかすると意外とシンプルで，直交展開可能な関数だけで表現しきれる程度の複雑さであるかもしれない．そこで，本研究では，直交展開可能な関数の集合の内側について考察を行なう．

2 基本定義

2.1 直交展開

定義 2.1 Kを k個の要素からなる有限集合 $K = \{1, 2, \ldots, k\}$ とする．n-変数 k値関数とは，写像 $f : K^n \to K$ である．x_iを Kの値をとる変数，$X = (x_1, \ldots, x_n)$ を n 変数の組とする．Xの**分割**とは，

$$X_1 \cup \cdots \cup X_l = X, \quad X_i \cap X_j = \emptyset, i \neq j$$

となる l個の Xの部分集合 $X_1, \ldots, X_l$である．$l = n$ の時，その分割は**完全**，$l = 1$ の時，**自明**という．

定義 2.2 n-変数 k値関数 $f : K^n \to K$について，自明でも完全でもない分割 $X_1, \ldots, X_l$があり，

$$f(X) = F(\varphi_1(X_1), \ldots, \varphi_l(X_l))$$

を満たす写像 $F, \varphi_1, \ldots, \varphi_l$が存在する時，かつその時に限り，$f$は**直交展開可能**であるという．

直交展開は，一意に決まるとは限らない．

定義 2.3 fに対して複数の直交展開が可能であるならば，その中の関数の最大段数を fの**直交位数**という．直交位数が $n-1$ であるような直交展開可能な関数

$$f(X) = \phi_1(x_1, \phi_2(x_2, \ldots, \phi_{n-1}(x_{n-1}, x_n) \cdots))$$

を **直交線形** (ortho-linear) という．直交線形な関数の集合を OL とおく．

次に示す概念は，論理設計の分野で定義されているものであり，2値関数についてのみ定義されている．

定義 2.4 全て2変数の関数に直交展開出来る2値関数を **disjunctive network** という．

全て2入力ユネイト関数 (AND, OR, NAND, NOR) と否定 (NOT) に直交展開出来る2値関数を **fanout free** 関数という．

高々一つの他の関数を含むユネイト関数に直交展開できるfanout free関数を **unate cascade** 関数という．

各々の関数の集合を，DN, FF, UC とおく．

ここで，fanoutとはゲートの出力がドライブできるゲートの数であり，DN, FF, UCのいずれも，全てゲートのfanoutは1である．ユネイトでない2変数関数には，排他的論理和と積の2つがある．従って，これらの間には図1の関係がある．本稿では，この中で最も制約の強い直交線形関数について考える．

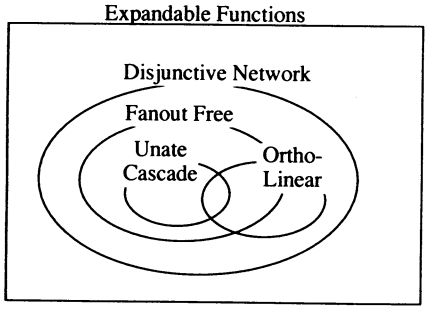


図 1: 直交展開可能に属するクラス

2.2 直交線形関数の性質

定義 2.5 n 変数の関数 $f(x_1,\ldots,x_n)$ について，$X=\{x_1,\ldots,x_m\}$ と $Y=\{x_{m+1},\ldots,x_n\}$ を行と列として展開した真理値表を **展開表** とよぶ．展開表の**列パターン**，すなわち，

$$\Psi_X=\{f(\boldsymbol{a},Y)|\boldsymbol{a}\in\{0,1\}^m\}$$

で定義される $n-m$ 変数関数の集合を Xについての**展開関数集合**とよぶ．展開関数集合の要素の数$\mu=|\Psi|$を**列（行）複雑度**と呼ぶ．

定理 2.1 ある2値関数 fが Xについて直交展開可能ならば，かつ，その時に限り，その列複雑度は $\mu_X\leq 2$.

上の例の式は，条件を満たしており，実際に次のように直交展開される．

$$\begin{aligned} f(x,y,z,w) &= (\overline{x}\vee y)(z)\vee(x\overline{y})(\overline{zw}\vee zw)\\ &= \phi(x,y)z\vee\overline{\phi(x,y)}(\overline{zw}\vee zw)\\ &= F(\phi(x,y),z,w)\end{aligned}$$

ファジィ論理関数における展開関数集合を次のように拡張定義する．

$$\Psi_X=\{f(\boldsymbol{a},Y)|\boldsymbol{a}\in\{0,.5,1\}^m\}$$

例えば，ファジィ論理関数

$$f(x,y,z)=xyz\vee x\overline{x}y\overline{z}\vee xy\overline{yz}$$

の展開表は表1のようになる．ここで，最下位行に列パターンの種類を示している．この例においては，列パターンは A,B,Cの三種類しかなく，その展開関数集合は次のようになる．

$$\Psi_{xy}=\{\psi_A(z),\psi_B(z),\psi_C(z)\}=\{0,0.5,z\}$$

従って，$\mu_{xy}=3$ である．

表 1: ファジィ論理関数の展開表

x	0	0	0	.5	.5	.5	1	1	1
$z\backslash y$	0	.5	1	0	.5	1	0	.5	1
0	0	0	0	0	.5	.5	0	.5	0
.5	0	0	0	0	.5	.5	0	.5	.5
1	0	0	0	0	.5	.5	0	.5	1
	A	A	A	A	B	B	A	B	C

Ψ_Xは $n-m$ 変数関数の集合であり，全ての V_3^{n-m} の元$\boldsymbol{a}$について $\phi(\boldsymbol{a})\succeq\psi(\boldsymbol{a})$ となるものを $\phi\succeq\psi$と定めることで，元の間にあいまいさの半順序関係を考えることができる．

しかしながら，$\boldsymbol{a}$ には定数 0.5 が入ることもあるため，展開関数集合の要素にはファジィ論理関数でないものが生じることに注意が必要である．例えば，先の例の $\psi_B(z)=0.5$ はもはやファジィ論理関数ではなく，定数 0.5 を認める正則多値関数になっている．

展開関数集合 Ψ_Xを，V_3^mからそれ自身 $\{\psi_1,\ldots,\psi_l\}$ への写像とみなすと都合が良い．例えば，表2は上の例の展開関数集合の例である．このような写像について，明らかに次の性質がある．

補題 2.1 Ψ_Xはあいまいさの半順序関係について単調である．

定理 2.2 ファジィ論理関数が Xについて直交展開できるための必要十分条件は，$\mu_X\leq 3$ である．

表 2: 展開関数集合より得られる写像

$y\backslash x$	0	.5	1
0	A	A	A
.5	A	B	B
1	A	B	C

系 2.1 fが直交線形関数であるならば，$\mu_{x_i} \leq 3$ となる変数 x_iが一つ以上存在する．

定理 2.3 ある変数 x についての列複雑度が $\mu_x = 1$ であるとき，かつ，そのときに限り，その関数は x に依存しない，すなわち，don't care である．

定理 2.4 2 値，ファジィ ，k値線形関数の総数，$OL(2), OL(F), OL(k)$ はそれぞれ次式で与えられる．

$$\begin{aligned} OL(2) &= (n-1)!(n-1)2^{2^2} \\ OL(F) &= (n-1)!84 \\ OL(k) &= (n-1)!(n-1)k^{k^2} \end{aligned}$$

3 線形モデリング

直交線形の性質をいかした階層化モデリングのアルゴリズムを与える．

3.1 アルゴリズム

Input: m 個の学習入力データ $A^1 = (\boldsymbol{a}_1, \ldots, \boldsymbol{a}_m) \subset V^n$ とそれについての直交線形関数 $f : A^1 \to V$.

Step 1: f を 3 値に量子化する．

Step 2: 変数集合 x の全ての変数 x_iについて，μ_{x_i} を最小化するものを選ぶ．

Step 3: 選ばれた変数 x について，A^2を次のように直和に分解する．

$$\begin{aligned} A_1^2 &= \{(a_1, \ldots, a_{i-1}, a_{i+1}, \ldots, a_n) \\ &\quad | \boldsymbol{a} = (a_1, \ldots, a_n) \in A, a_i > 0.5\} \\ A_0^2 &= \{(a_1, \ldots, a_{i-1}, a_{i+1}, \ldots, a_n) \\ &\quad | \boldsymbol{a} = (a_1, \ldots, a_n) \in A, a_i < 0.5\} \\ A^2 &= A_1^2 \cup A_0^2 \end{aligned}$$

Step 4: A^2 について同様に Step 2, 3 を再帰的に適用し，A^{n-1}になるまで繰り返す．

Step 5: A^{n-1}について，ファジィ論理関数のあてはめを行ない，誤差を最小化する 2 変数の関数 $\phi_{n-1}(x_{i_{n-1}}, x_{i_n})$ を求める．

Step 6: 同定された関数ϕ_{n-1}の値と $n-2$番目に選ばれた変数 $x_{i_{n-2}}$ について，A^{n-2}との誤差を最小化する 2 変数の関数$\phi_{n-2}(x_{i_{n-2}}, \phi_{n-1})$ を求める．

Step 7: 同様に Step 5,6 を繰り返し適用し，ϕ_1 までを同定する．

Output: $f : A^1 \to V$ を近似する直交線形関数

$$F(X) = \phi_1(x_{i_1}, \phi_2(x_{i_2}, \ldots, \phi_{n-1}(x_{i_{n-1}}, x_{i_{n-2}})$$

3.2 例

4 変数の入出力が次のように与えられている．

$$\begin{aligned} f(0.8, 0.2, 0.3, 0.6) &= 0.6 \\ f(0.6, 0.8, 0.2, 0.4) &= 0.6 \\ f(0.9, 0.3, 0.7, 0.1) &= 0.7 \\ f(0.7, 0.8, 0.4, 0.4) &= 0.7 \\ f(0.2, 0.7, 0.6, 0.6) &= 0.2 \\ f(0.8, 0.1, 0.7, 0.6) &= 0.4 \end{aligned}$$

これを量子化し，各変数について展開した結果を，表3の 3 値の真理値表に示す．単調性を満たすように拡張すると，それぞれの最小のμは，3, 3, 4, 2 となり，x_1 について展開するのが最もよいことがわかる．同様の手続きを繰り返すことにより，x_1, x_2の順に直交展開される．こうして，x_3, x_4についてあてはめを行ない，$\phi_3(x_3, x_4) = x_3 \neg x_4 \vee x_3 \neg x_4$を得る．同様にして，次が得られる．

$$\begin{aligned} \phi_2(x_2, \phi_3) &= x_2 \vee \phi_3 \\ \phi_1(x_1, \phi_1) &= x_1 \phi_2 \\ &= x_1(x_2 \vee (x_3 \neg x_4 \vee x_3 \neg x_4) \end{aligned}$$

3.3 評価

アルゴリズムの計算量を見積もる．Step 2 で各変数について列複雑度を計算するため，n 回の計算が $n-1$ 回繰り返される．あてはめについては，全て 2 変数のあてはめでよいので，やはり $n-1$ 回でよい．結局，$O(n^2)$ となる．やはり同様の直交展開関数である DN については，全ての部分集合について計算する必要があるので，平均で $O(2^n \log n)$ のオーダになってしまう．

表 3: ファジィ論理関数の展開表

x_1	0			.5			1		
x_2	0	.5	1	0	.5	1	0	.5	1
$x_4 \backslash x_3$	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1
0			1				1		
.5				0		1			
1			1				0		

x_1	0			.5			1		
x_3	0	.5	1	0	.5	1	0	.5	1
$x_2 \backslash x_4$	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1
0							1		1 0
.5		0							
1			1				1	1	1

x_1	0			.5			1		
x_2	0	.5	1	0	.5	1	0	.5	1
$x_3 \backslash x_4$	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1
0							1		1
.5		0							1
1							1 0		

x_2	0			.5			1		
x_3	0	.5	1	0	.5	1	0	.5	1
$x_1 \backslash x_4$	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1	0 .5 1
0					0				
.5									
1	1		1 0				1	1	

表 4: アルゴリズムの計算量

線形関数	DN	ファジィ論理関数
$O(n^2)$	$O(2^n \log n)$	$O(2^{n+1} n!(n+1)^2$

次に，変数 n に対して，十分なデータの個数 m を考える．2 値で n 変数あるときの真理値表のセル数は 2^n. よって，あるひと組が同じ列に そろう確率は $1/2^n$ である．m 個あれば，可能な組の数は ${}_mC_2$であるので，そろう列数の期待値は $1/2^n {}_mC_2$ といえる．例えば，$m = 8, n = 3$ ならば，3.5 列である．

同様に本質的に 3 値であるファジィ論理関数についていえば，$2/3^{2n}_m C_3$である．ただし，実際には，単調性を考慮しなくてはならないため，より少ない数となることが予想される．

4 結論

直交線形関数の性質について調べ，効率的なあてはめアルゴリズムの可能性を示した．実際にデータにあてはめ，モデルとしての意味を考察することを，今後の課題とする．

参考文献

[1] 古橋武，中岡謙，森川幸治，内川芳樹，多段ファジィクラシファイアシステムによる制御知識獲得，日本ファジィ学会誌，Vo.6, No.3, pp.603-609, 1994

[2] 市橋秀友，“階層型ファジィモデルと多層型ニューラルネットワークの関数近似能力の比較”，第 8 回ファジィシステムシンポジウム，pp.193-196, 1992

[3] Grant Pogosyan, “On Orthogonal Expansion of Logic Functions,” Note on Multiple-Valued Logic in Japan, Vol.18, No.16, 1995

[4] 菊池浩明，大竹章裕，中西祥八郎，“階層化ファジィモデリングの関数的完全性について”，第 5 回インテリジェントシステムシンポジウム，pp.429-434, 1995

[5] 高木，菊池，中西，“ファジィ論理関数の直交展開”，第 11 回ファジィシステムシンポジウム, 1996, pp.385-388

[6] 菊池，高木，中西，“ファジィ論理関数の非直交展開”，第 11 回ファジィシステムシンポジウム, 1996, pp.389-391

[7] 菊池，高木,「直交展開可能性について」，多値論理研究ノート，Vol. 19, No. 3, pp.1-8, 1996

THD3-4

推移的矛盾を利用したファジィ構造モデリング
Fuzzy Structural Modeling using Transitive Inconsistency

三田村 保　　大内 東
Tamotsu Mitamura　Azuma Ohuchi
北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract : Fuzzy Flexible Interpretive Structural Modeling (FISM/fuzzy) is a fuzzy version of Flexible Interpretive Structural Modeling (FISM). The process of construct the structure of complex systems by FISM/fuzzy is called the FISM/fuzzy session. The process of FISM/fuzzy is consist of three sub-processes; embedding, partitioning and extracting and drawing process. The embedding process is to construct internally a fuzzy reachability matrix model of the structure of the information supplied by the developer.
In this paper, an algorithm to make a fuzzy reachability matrix from a user's fuzzy matrix using the transitive inconsistency. Use of the algorithm makes it possible to do an efficient Fuzzy Structural Modeling.

1. はじめに

構造モデリングとは，対象問題を構成要素集合とその上に定義される二項関係に注目し，有向グラフ等を用いて解析する手法である．代表的な手法として ISM(Interpretive Structural Modeling)[1] があり，二項関係をファジィ二項関係に拡張した FSM[2] がある．

著者らは柔軟かつ効率のよいファジィ構造モデリングとして「 FISM/fuzzy (Fuzzy Flexible Interpretive Structural Modeling) 」 を提案している [3][4][5]. FISM/fuzzy は，対話的に構造モデリングを試行するが，アンケート調査等の集計されたデータから構造を抽出することはない．

本稿では，一対比較行列からファジィ可到達行列を生成するアルゴリズムを提案する．Fuzzy Warshall[6] によるファジィ可到達行列，FSM による修正行列と比較し，検討する．

2. 理論的背景

本稿で使用する主な記号と定義について記述する．

• $N = \{1, 2, \cdots, n\}$: 要素集合．$J = N \times N$ とする．

定義 2.1 (ファジィ行列) ファジィ行列とは，行列 Mの (i, j) 要素のを m_{ij}と書く．すなわち

$$M = [m_{ij}].\ 0 \leq m_{ij} \leq 1 \quad i, j \in N \tag{1}$$

定義 2.2 (演算)
ファジィ行列 Mの値 m_{ij}, m_{lm}に対して次の演算を定義する．

$$m_{ij} m_{lm} = \min(m_{ij}, m_{lm}) \tag{2}$$

$$m_{ij} + m_{lm} = \max(m_{ij}, m_{lm}) \tag{3}$$

$$m_{ij} @ m_{lm} = \begin{cases} 1 & : m_{ij} \leq m_{lm} \\ m_{lm} & : m_{ij} > m_{lm} \end{cases} \tag{4}$$

定義 2.3 (ファジィ可到達行列)
ファジィ可到達行列とは，行列 Mが以下の条件を満たす．

$$m_{ii} = 1 \tag{5}$$

$$m_{ij} \geq m_{ik} m_{kj} \tag{6}$$

定義 2.4 (部分的既知なファジィ行列)
部分的既知なファジィ行列とは，その行列の要素が上限値と下限値をもつ行列である．行列 Mの (i, j) 要素の下限値を$\underline{m}_{ij}$，上限値を$\overline{m}_{ij}$と

書く．すなわち

$$M = [\underline{m}_{ij}, \overline{m}_{ij}] \quad (7)$$
$$0 \leq \underline{m}_{ij} \leq \overline{m}_{ij} \leq 1 \quad i,j \in N$$

ここで，(i,j) 要素の値が $\underline{m}_{ij} = \overline{m}_{ij}$ のとき，既知要素，$\underline{m}_{ij} < \overline{m}_{ij}$ のとき，未知要素とする．

定義 2.5 (ファジィ部分可到達行列)

行列 M がファジィ部分可到達行列であるとは，行列 M が部分的既知なファジィ行列でかつ以下のファジィ反射性とファジィ部分可到達性を有する．

ファジィ反射性：行列 M の対角要素は既知で値は 1 である．

$$\underline{m}_{ii} = \overline{m}_{ii} = 1 \quad (8)$$

ファジィ部分可到達性：行列 M がファジィ部分可到達であるとは，全ての要素の三組 (i,j,k) が以下の条件を満たす．

$$\underline{m}_{ij} \geq \min(\underline{m}_{ik}, \underline{m}_{kj}) \quad (9)$$
$$\overline{m}_{ij} \geq \min(\overline{m}_{ik}, \underline{m}_{kj}) \quad (10)$$
$$\overline{m}_{ij} \geq \min(\underline{m}_{ik}, \overline{m}_{kj}) \quad (11)$$

定義 2.6 (含意規則)

未知の (i,j) 要素の値 $[\underline{m}_{ij}, \overline{m}_{ij}]$ を $[\underline{m'}_{ij}, \overline{m'}_{ij}]$ としたとき，以下の 4 通りの規則を適用すれば，(l,m) 要素の値 $[\underline{m}_{lm}, \overline{m}_{lm}]$ は新たな値 $[\underline{m'}_{lm}, \overline{m'}_{lm}]$ となる．ただし，$0 \leq \underline{m}_{ij} \leq \underline{m'}_{ij} \leq \overline{m'}_{ij} \leq \overline{m}_{ij} \leq 1$ とする．

min − min 含意：

$$\underline{m'}_{lm} = \underline{m}_{lm} + \underline{m}_{li}\underline{m}_{jm}\underline{m'}_{ij} \quad (12)$$

max − max 含意：

$$\overline{m'}_{lm} = \overline{m}_{lm}((\underline{m}_{il}\underline{m}_{mj}) @ \overline{m'}_{ij}) \quad (13)$$

min − max 含意 (1)：

$$\overline{m'}_{lm} = \overline{m}_{lm}(\underline{m'}_{ij} @ (\underline{m}_{jl} @ \overline{m}_{im})) \quad (14)$$

min − max 含意 (2)：

$$\overline{m'}_{lm} = \overline{m}_{lm}(\underline{m'}_{ij} @ (\underline{m}_{mi} @ \overline{m}_{lj})) \quad (15)$$

3. ファジィ構造モデリング

ファジィ構造モデリングとは，システムの構成要素集合とその上に定義されるファジィ二項関係に注目し，システムの構造を解析する手法である．その階層構造を抽出するためには，ファジィ二項関係を反射的かつ推移的性質を有するファジィ擬順序関係とし，その関係行列であるファジィ可到達行列として表現する方法が一般的であり，Fuzzy Warshall のアルゴリズムがある．また FSM は，しきい値 p において可到達性を満たすように修正行列を生成し，その修正行列より従属関係を抽出している．以下に Fuzzy Warshall アルゴリズム，FSM による修正行列生成アルゴリズムを示す．

[Fuzzy Warshall アルゴリズム]

ファジィ行列 M からファジィ可到達行列 M^* を生成する．

1. $M^* = M$
2. for k = 1 to n
   $m^*_{ij} = \max(m^*_{ij}, \min(m^*_{ik}, m^*_{kj}))$

[FSM による修正行列生成アルゴリズム]

1. 行列 M の修正行列 M' を作成する．
2. 行列 M のファジィ可到達行列 M^* を作成する．
3. $M' = M$
4. if $p > m_{ij}$ and $p < m^*_{ij}$ then
   $m'_{ij} = m^*_{ij} \quad \forall (i,j) \in J$

Fuzzy Warshall, FSM の各アルゴリズムは，利用者の一対比較の推移性を考慮したものであるが故に元の一対比較行列と違う階層構造ができる．これは，一般に利用者は全ての関係の推移性を考慮して一対比較をしていないためである．

本稿では，利用者の一対比較の推移性矛盾を利用したファジィ可到達行列生成アルゴリズムを提案する．

3.1 FISM/fuzzy によるファジィ可到達行列生成アルゴリズム

FISM/fuzzy による生成アルゴリズムは，利用者の一対比較行列であるファジィ行列 M の要素対矛盾度を計算する．矛盾度とは各要素対がファジィ可到達性に矛盾している度合いである．その矛盾度を利用してファジィ可到達行列 M' を生成するものである．

3.2 矛盾度計算

一対比較行列より要素間の関係の矛盾度を計算する．定義2.3より一対比較行列 Mで推移的矛盾が生じる場合三組 (i,j,k) において

$$m_{ij} < m_{ik}m_{kj} \tag{16}$$

である．よってこの場合，推移的無矛盾な状態になるためには，m_{ij}, m_{ik}, m_{kj}のいずれかを以下のように修正しなければならない．

$$m_{ij} = m_{ik}, m_{kj} \tag{17}$$

$$m_{ik} = m_{ik}(m_{kj} @ m_{ij}) \tag{18}$$

$$m_{kj} = m_{kj}(m_{ik} @ m_{ij}) \tag{19}$$

要素対間の矛盾度 A 以下のように定義する．任意の要素の三組 (i,j,k) に対して推移的矛盾が生じる場合

$$\begin{aligned} A((i,j),(i,k)) &= A((i,j),(k,j)) \\ &= m_{ik}m_{kj} \\ A((i,k),(i,j)) &= A((i,k),(k,j)) \\ &= m_{ik}(m_{kj} @ m_{ij}) \\ A((k,j),(i,j)) &= A((k,j),(i,k)) \\ &= m_{kj}(m_{ik} @ m_{ij}) \end{aligned}$$

とし，無矛盾である場合，上記の A の値は0とする．要素対間の矛盾度 A から任意の要素対 (i,j) の矛盾度 $C1$, $C2$ を以下に定義する．

$$C1(i,j) = \sum_l \sum_m |A((i,j),(l,m))| \tag{20}$$

$$C2(i,j) = \sum_l \sum_m |f((i,j),(l,m))| \tag{21}$$

$$f((i,j),(l,m)) = \begin{cases} 1 & : A((i,j),(l,m)) > 0 \\ 0 & : otherwise \end{cases}$$

矛盾度とは各要素対がファジィ可到達性に矛盾している度合いである．矛盾度 $C1$ は，要素間の推移的矛盾を帰属度を用い，$C2$ は推移的矛盾の回数を用いている．この矛盾度の少ない要素対の値の変更を最小限に抑えることで，利用者の一対比較行列に近いファジィ可到達行列が生成できる．

3.3 FISM/fuzzy による生成アルゴリズム

矛盾度を利用したファジィ可到達行列生成アルゴリズムについて述べる．

---

begin

1. $J' = J$
   M'を初期化する．
   $\underline{m'}_{pq} = 0; \quad \forall(p,q) \in J$
   $\overline{m'}_{pq} = 1; \quad \forall(p,q) \in J$
   $\underline{m'}_{pp} = \overline{m'}_{pp} = 1; \quad \forall p \in N$
2. 各要素対 (p,q) について矛盾度 Cを計算する．
3. 矛盾度 Cで要素対をソートする．
4. while $J' \neq \phi$ do begin
   矛盾度 Cの少ない要素対 $(p,q) \in J'$を選ぶ．
   if $\overline{m'}_{pq} > \overline{m}_{pq}$ then begin
   $\overline{m'}_{pq} = \overline{m}_{pq}$;
   (p,q) 要素から他の要素への
   max − max 含意を実行する
   end;
   if $\underline{m'}_{pq} < \underline{m}_{pq}$ then begin
   $\underline{m'}_{pq} = \underline{m}_{pq}$;
   (p,q) 要素から他の要素への
   min − min 含意，
   min − max(1) 含意，
   min − max(2) 含意を実行する．
   end;
   $J' = J' - \{(p,q)\}$;
   end;

end.

定理 3.1 生成された行列はファジィ可到達行列となる．

3.4 実験と考察

実験方法は，一対比較行列をランダムに生成し，各アルゴリズムにより生成された行列と比較し，検討する．一対比較行列は，対角要素の値は1でその他は {0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 } より一様乱数を用いて設定する．その一対比較行列から本論文で提案するアルゴリズムおよび既に提案されている方法 (Fuzzy Warshall, FSM) によりファジィ可到達行列 M^*および修正行列

表 1: 数値実験 (1000 回)

	10	20	30	40	50
Fuzzy Warshall	0.41(0.71)	0.49(0.79)	0.50(0.80)	0.50(0.80)	0.50(0.80)
FSM(p =0.25)	0.18(0.20)	0.20(0.20)	0.20(0.20)	0.20(0.20)	0.20(0.20)
FSM(p =0.50)	0.30(0.40)	0.35(0.40)	0.35(0.40)	0.35(0.40)	0.35(0.40)
FSM(p =0.75)	0.38(0.59)	0.44(0.60)	0.45(0.60)	0.45(0.60)	0.45(0.60)
FSM(p =1.00)	0.41(0.71)	0.49(0.79)	0.50(0.80)	0.50(0.80)	0.50(0.80)
FISM/fuzzy1(回数)	0.23(0.44)	0.29(0.54)	0.32(0.58)	0.34(0.60)	0.35(0.62)
FISM/fuzzy2(帰属度)	0.26(0.46)	0.30(0.56)	0.31(0.60)	0.31(0.63)	0.31(0.65)

数値:変更量 (変更要素数)

(FSM) を求める．FSM ではしきい値αを 4 種類 ($\alpha = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$) 用いている．

数値実験結果を表 1に示す．表 1では列に要素数 n，行には各種の生成方法，行列値には要素数における各種の方法により生成された行列と一対比較行列との差分を求めている．一対比較行列と生成された行列との差分は行列間のユークリッド距離と変更された行列要素数を算出し，行列要素数 ($n(n-1)$) で割った値を求めている．

$$\text{変更量 (距離)} = \frac{\Sigma|m^*_{ij} - m_{ij}|}{n(n-1)} \qquad (22)$$

$$\text{変更要素数} = \frac{\text{変更箇所数 } (m^*_{ij} \neq m_{ij})}{n(n-1)} \qquad (23)$$

$$M = [m_{ij}] : \text{初期行列}$$
$$M^* = [m^*_{ij}] : \text{生成された行列}$$

表より FISM/fuzzy を用いたアルゴリズムで求めた可到達行列が利用者から得た一対比較行列から変更点，変更量が共に少ないファジィ可到達行列を求めている．FSM は，変更要素数，変更量が少ない要因としては，しきい値α以上による半推移律を仮定しているため，ファジィ可到達行列を生成していないためである．しかし，FISM/fuzzy は FSM と比較し，同程度以下の変更量でファジィ可到達行列を生成している．他のアルゴリズムでは，関係の推移性のみを重要視し，関係の度合が強い要素対を重要視しているのに対し，本稿で提案しているアルゴリズムは，利用者の一対比較を重要視し，かつ推移的無矛盾なファジィ可到達行列を生成している．

4. おわりに

本論文では，利用者の入力した一対比較行列の矛盾度分析を行い，利用者の意志を尊重したファジィ可到達行列を生成するアルゴリズムを提案し，他のアルゴリズムとの比較実験を通して，その有効性を述べた．

参考文献

[1] J. N. Warfield: *Societal Systems-Planning, Policy and Complexity*, John Wiley & Sons (1976)

[2] Tazaki, E., Amagasa, M.: Structural Modeling in a Class of Systems Using Fuzzy Sets Theory, *International Jounal for Fuzzy Sets and Systems*, Vol 2. No 1, pp. 1-17(1979)

[3] 三田村，大内: ファジィ構造モデリングにおけるファジィ推移的具象化の理論とアルゴリズム，情処論, Vol. 35, No. 2, pp. 301-308(1994)

[4] 三田村，大内: FISM/fuzzy の推移的具象化における戦略の検討，日本ファジィ学会誌，Vol. 7, No. 2, pp. 102–109(1995)

[5] 三田村，大内: ファジィ可到達行列モデルの修正理論とアルゴリズム，日本ファジィ学会誌，Vol. 8, No. 4, pp. 725–733(1995)

[6] 水本: ファジィ理論とその応用，サイエンス社 (1989)

問い合わせ先

〒 060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
北海道大学工学部システム情報工学専攻
複雑系工学講座調和系工学分野
三田村 保
Tel: (011)706-6497　Fax: (011)706-7834
e-mail: mitamura@huie.hokudai.ac.jp

THD4-1

推論結果が複雑にならないファジィ推論法とそのファジィモデリングへの応用

A fuzzy inference method with a simple shape conclusion and its application to fuzzy modeling

島川　学
Manabu Shimakawa
弓削商船高専
Yuge National College of Maritime Technology

村上周太
Shuta Murakami
九州工業大学　工学部
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: We proposed a new fuzzy inference method [2][3], in which the fuzzy relation is represented by the membership functions of the antecedent and consequent parts. The strong point of the proposed method is that the membership function of an inferred conclusion has a simple shape and thus its meaning can be interpreted easily. In this paper, the proposed method is introduced, and then it is applied to fuzzy modeling of a non-linear function.

Keywords: Fuzzy inference, Fuzzy relation, Fuzzy modeling, Non-linear function.

1．はじめに

ファジィ関係が含意規則によって求められる従来の一般的なファジィ推論法[1]の場合，推論結果を表すメンバーシップ関数の形状が複雑になり易く，それゆえ，そのままでは推論結果の意味の解釈が困難であった．通常は，重心法などによって代表値を求め，利用している．従って，従来のファジィ推論法による推論結果は実数値として取り扱われていた．

我々は，ファジィ関係を求める際に含意規則を用いない，新しいファジィ推論法を提案した[2][3]．この推論法では，ルールの後件部がいくつかのパラメータで決まるメンバーシップ関数によって与えられられると仮定し，そのメンバーシップ関数を用いてファジィ関係を定義する．この推論法によって求められる推論結果は，メンバーシップ関数の形状が複雑にならず，その意味の解釈も容易である．

本稿では，その提案したファジィ推論法を紹介し，その応用として非線形関数のファジィモデリングに適用した事例を示す．

2．推論結果が複雑にならないファジィ推論法

2.1　ファジィ推論法

提案したファジィ推論法を，次に示すような m 入力 1 出力を持つ n 個のルールの場合について説明する．

$$IF\ x_1\ is\ A_{i1}\ and \cdots and\ x_m\ is\ A_{im}\ THEN\ y\ is\ B_i\ (i=1,\ldots,n)$$

ここで，$x_1,\ldots,x_m$ は入力変数，y は出力変数，$A_{i1},\ldots,A_{im},B_i$ はファジィ集合とする．また，ファジィ集合 B_i は，(1)式で表されるように，位置を表す r 個の定数パラメータ $p_{i1},\ldots,p_{ir}$ と高さを表す s 個の定数パラメータ $h_{i1},\ldots,h_{is}$ で定義されるものと仮定し，メンバーシップ関数 f によって(2)式のように特性づけられる．

$$B_i=\{p_{i1},\ldots,p_{ir},h_{i1},\ldots,h_{is}\} \qquad (i=1,\ldots,n) \qquad (1)$$

$$\mu_{B_i}(y)=f(p_{i1},\ldots,p_{ir},h_{i1},\ldots,h_{is},y) \qquad (i=1,\ldots,n) \qquad (2)$$

ただし，全てのルールの後件部は，同じメンバーシップ関数 f で定義される必要がある．このメンバーシップ関数 f をメンバーシップ定義関数と呼ぶ．

メンバーシップ定義関数の例として，位置を表す3個の定数パラメータと高さを表す1個の定数パラメータで定義される三角型メンバーシップ関数 $f_\Delta(p_1,p_2,p_3,h_1,y)$ を **Fig. 1** に示す．

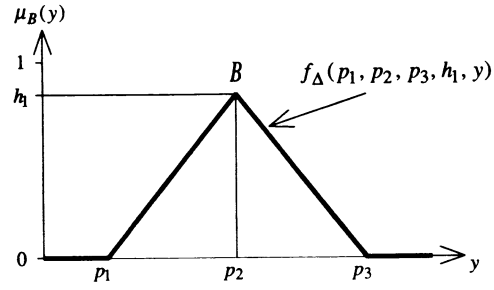


Fig. 1 Example of definition membership function, triangular type membership function, $B=\{p_1,p_2,p_3,h_1\}$.

提案したファジィ推論法では，ファジィ関係 R はメンバーシップ定義関数 f によって定義される．メンバーシップ定義関数 f のパラメータは，各ルールの前件部の適合度を重みとして，位置を表す r 個の定数パラメータの荷重平均と，高さを表す s 個の定数パラメータの荷重和とする．$\mathbf{x}=\{x_1,\ldots,x_m\}$ とすると，そのメンバーシップ関数 $\mu_R(\mathbf{x},y)$ は，次式のように表される．

$$\mu_R(\mathbf{x},y)=f(p_1^*(\mathbf{x}),\ldots,p_r^*(\mathbf{x}),h_1^*(\mathbf{x}),\ldots,h_s^*(\mathbf{x}),y)\wedge 1 \qquad (3)$$

$$p_k^*(\mathbf{x})=\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(\mathbf{x})\cdot p_{ik}}{\sum_{i=1}^{n} w_i(\mathbf{x})} \qquad (k=1,\ldots,r)$$

$$h_\ell^*(\mathbf{x})=\sum_{i=1}^{n} w_i(\mathbf{x})\cdot h_{i\ell} \qquad (\ell=1,\ldots,s)$$

$$w_i(\mathbf{x})=\prod_{j=1}^{m}\mu_{A_{ij}}(x_j) \qquad (i=1,\ldots,n)$$

$\mu_{A_{ij}}(x_j)$ は，ファジィ集合 A_{ij} のメンバーシップ関数である．

入力変数 x_j に A_j' $(j=1,\ldots,m)$ というファジィ集合が入力として与えられた場合，得られる出力 B' は，入力とファジィ関係 R との sup-min 合成（$\circ$）によって求められる．

$$B'=(A_1'\times\cdots\times A_m')\circ R \qquad (4)$$

$$\mu_{B'}(y)=\sup_{x_1,\ldots,x_m}\left[\left(\bigwedge_{j=1}^{m}\mu_{A_j'}(x_j)\right)\wedge\mu_R(\mathbf{x},y)\right] \qquad (5)$$

ファジィ関係 R のメンバーシップ関数 $\mu_R(\mathbf{x}, y)$ が，分解原理を用いて次式のように表されるものとする．

$$\mu_R(\mathbf{x}, y) = \max_{\alpha\in(0,1]}\left[\alpha \wedge \chi_{R_{\overline{\alpha}}}(\mathbf{x}, y)\right] \tag{6}$$

$$\chi_{R_{\overline{\alpha}}}(\mathbf{x}, y) = \begin{cases} 1 & if\ \ y \in R_{\overline{\alpha}}(\mathbf{x}) \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{7}$$

$$R_{\overline{\alpha}}(\mathbf{x}) = \left\{ y \,\middle|\, \mu_R(\mathbf{x}, y) \geq \alpha \right\} \tag{8}$$

ここで，$\chi_{R_{\overline{\alpha}}}(\mathbf{x}, y)$ はメンバーシップ関数 $\mu_R(\mathbf{x}, y)$ のある α ($\alpha \in (0,1]$)に対する弱 α カットの定義関数であり，$R_{\overline{\alpha}}(\mathbf{x})$ はその α レベル集合である．この α レベル集合 $R_{\overline{\alpha}}(\mathbf{x})$ は，メンバーシップ定義関数 f によって決まり，また入力変数 $\mathbf{x}$ に依存する．

このとき，求めるべき出力 B' は，分解原理を用いて以下のように定義される．

$$\mu_{B'}(y) = \max_{\alpha\in(0,1]}\left[\alpha \wedge \chi_{B'_{\overline{\alpha}}}(y)\right] \tag{9}$$

$$\chi_{B'_{\overline{\alpha}}}(y) = \begin{cases} 1 & if\ \ y \in B'_{\overline{\alpha}} \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{10}$$

ここで，$\chi_{B'_{\overline{\alpha}}}(y)$ は，メンバーシップ関数 $\mu_{B'}(y)$ の，弱 α カットの定義関数である．また，$B'_{\overline{\alpha}}$ は，そのレベル集合であり，次式で定義される．

$$\begin{aligned} B'_{\overline{\alpha}} &= \left\{ \cup R_{\overline{\alpha}}(\mathbf{x}) \;\middle|\; \alpha \leq \mathop{\wedge}_{j=1}^{m} \mu_{A'_j}(x_j) \right\} \\ &= \left\{ \cup R_{\overline{\alpha}}(\mathbf{x}) \;\middle|\; \forall j, \alpha \leq \mu_{A'_j}(x_j) \right\} \end{aligned} \tag{11}$$

入力としてファジィ集合が与えられた場合に出力を求めることは，実数値が与えられた場合と比較して，複雑である．しかし，その出力は，α レベル集合によって定義されるので，それを離散化することによって，導出される．

2.2 ファジィ関係

Fig. 2 は，“y is about x”というファジィ関係を表している．このようなファジィ関係を部分的に次の２つのファジィルールで記述する場合について考える．

R_1: *IF* x *is* “about 10” *THEN* y *is* “about 10”
R_2: *IF* x *is* “about 20” *THEN* y *is* “about 20”

ただし，ルールに含まれるファジィ数を **Fig. 1** に示した三角型メンバーシップ関数を用いて次のように定義する．

“about 10” = { 0, 10, 20, 1 }
“about 20” = { 10, 20, 30, 1 }

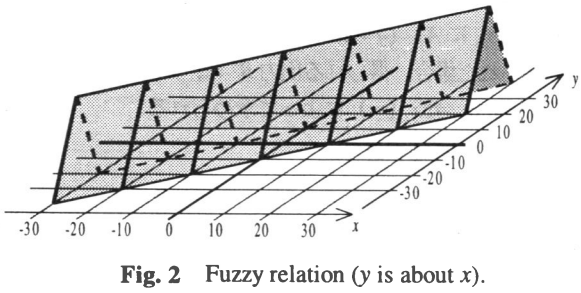


Fig. 2 Fuzzy relation (y is about x).

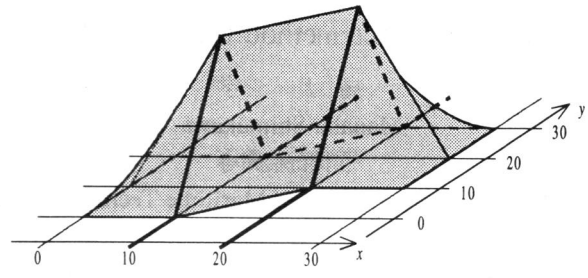


Fig. 3 Fuzzy relation R of the two fuzzy rules.

この２つのルールのファジィ関係 R を表すメンバーシップ関数 $\mu_R(x, y)$ は，(3)式より次のよう定義される．

$$\mu_R(x, y) = f_\Delta(p_1^*(x), p_2^*(x), p_3^*(x), h_1^*(x), y) \wedge 1 \tag{12}$$

$$p_1^*(x) = \frac{w_1(x)\cdot 0 + w_2(x)\cdot 10}{w_1(x) + w_2(x)}$$

$$p_2^*(x) = \frac{w_1(x)\cdot 10 + w_2(x)\cdot 20}{w_1(x) + w_2(x)}$$

$$p_3^*(x) = \frac{w_1(x)\cdot 20 + w_2(x)\cdot 30}{w_1(x) + w_2(x)}$$

$$h_1^*(x) = w_1(x)\cdot 1 + w_2(x)\cdot 1$$

$$w_1(x) = \mu_{10}(x), \quad w_2(x) = \mu_{20}(x)$$

ここで，$\mu_{10}(x), \mu_{20}(x)$ は，ルールの前件部の命題“about 10”，“about 20” を特性づけるメンバーシップ関数である．**Fig. 3** は，この２つのルールのファジィ関係 R を表している．

この図から分かるように，このファジィ関係は **Fig. 2** に示した“y is about x”というファジィ関係を部分的にうまく表現していることがわかる．そして，さらにファジィルールを拡張することで全体的なファジィ関係を表現することが可能である．

2.3 推論過程

(a) 入力が実数値の場合

入力 A' として $x = 14$ (実数値) が与えられたとして，そのときの出力を求める．入力値 $x = 14$ は，シングルトン型メンバーシップ関数

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 1 & if\ \ x = 14 \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{13}$$

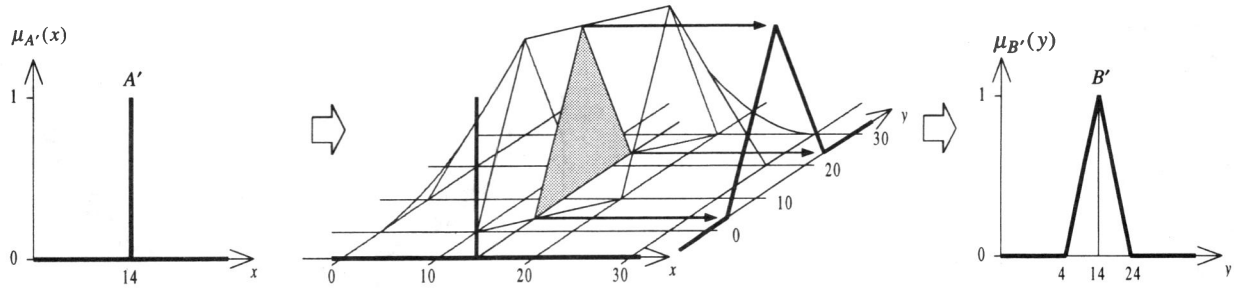
で特性づけられるファジィ集合と考えることができる．

最終的に得られる出力 B' は，sup-min 合成によって

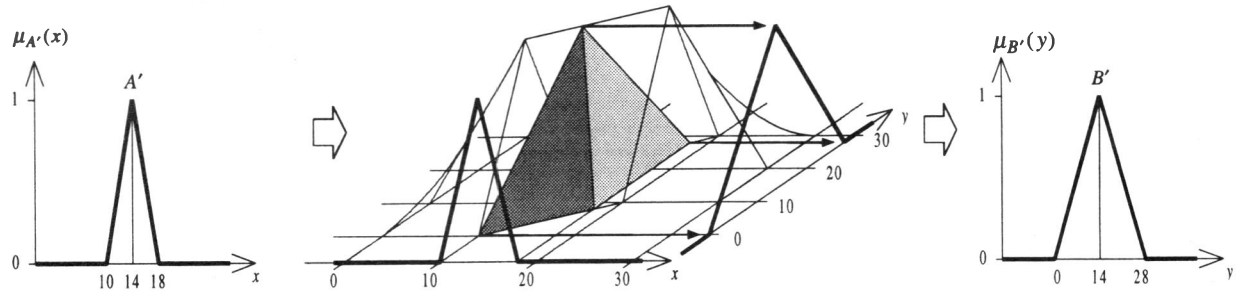
$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \sup_x\left[\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)\right] \\ &= \mu_R(14, y) \\ &= f_\Delta(p_1^*(14), p_2^*(14), p_3^*(14), h_1^*(14), y) \wedge 1 \\ &= f_\Delta(4, 14, 24, 1, y) \end{aligned} \tag{14}$$

$$B' = \{4, 14, 24, 1\} \tag{15}$$

となり，“およそ 14” として解釈することができる．このときの推論過程を **Fig. 4** (a) に示す．



(a) Real number input case, x=14.



(b) Fuzzy set input case, $A' = \{10, 14, 18, 1\}$.

Fig. 4 Fuzzy inference processes using the proposed method.

(b) 入力がファジィ集合の場合

入力 A' として“およそ 14” (={10, 14, 18, 1})という三角型メンバーシップ関数で定義されるファジィ集合が与えられたとして，そのときの出力を求める．(12)式で表されるファジィ関係 R の α レベル集合 $R_{\overline{\alpha}}(x)$ は，次のように定義される．

$$R_{\overline{\alpha}}(x) = \left\{ y \,\middle|\, y \in [R_L, R_U] \right\} \tag{16}$$

$$R_L = \frac{p_2^*(x) - p_1^*(x)}{h_1^*(x)}\alpha + p_1^*(x)$$

$$R_U = \frac{p_2^*(x) - p_3^*(x)}{h_1^*(x)}\alpha + p_3^*(x)$$

出力を求めるために，α を離散化し，それぞれの α における α レベル集合 $B'_{\overline{\alpha}}$ を計算する．まず最初に，$\alpha = 0.0^+$ の場合を計算する．このとき入力 A' の α レベル集合 $A'_{\overline{0.0}^+}$ は，

$$\begin{aligned} A'_{\overline{0.0}^+} &= \left\{ x \,\middle|\, 0.0^+ \le \mu_{A'}(x) \right\} \\ &= \left\{ x \,\middle|\, x \in [10.0, 18.0] \right\} \end{aligned} \tag{17}$$

である．

従って，出力 B' の α レベル集合 $B'_{\overline{0.0}^+}$ は，(11)式および(16)式より，

$$\begin{aligned} B'_{\overline{0.0}^+} &= \left\{ \cup R_{\overline{0.0}^+}(x) \,\middle|\, 0.0^+ \le \mu_{A'}(x) \right\} \\ &= \left\{ \cup R_{\overline{0.0}^+}(x) \,\middle|\, x \in [10.0, 18.0] \right\} \\ &= \left\{ y \,\middle|\, y \in [0.0, 28.0] \right\} \end{aligned} \tag{18}$$

となる．

同様にして，$\alpha = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ の場合について計算すると，それぞれの α レベル集合 $B'_{\overline{0.25}}$, $B'_{\overline{0.5}}$, $B'_{\overline{0.75}}$, $B'_{\overline{1.0}}$ は，

$$\begin{aligned} B'_{\overline{0.25}} &= \left\{ y \,\middle|\, y \in [\ 3.5, 24.5] \right\} \\ B'_{\overline{0.5}} &= \left\{ y \,\middle|\, y \in [\ 7.0, 21.0] \right\} \\ B'_{\overline{0.75}} &= \left\{ y \,\middle|\, y \in [10.5, 17.5] \right\} \\ B'_{\overline{1.0}} &= \left\{ y \,\middle|\, y \in [14.0, 14.0] \right\} \end{aligned} \tag{19}$$

となる．

これらの α レベル集合を図示すると，**Fig. 5** のようになる．この出力 B' は，三角型メンバーシップ関数を用いて

$$\mu_{B'}(y) = f_\Delta(0, 14, 28, 1, y) \tag{20}$$

$$B' = \{0, 14, 28, 1\} \tag{21}$$

と表される．このときの推論過程を **Fig. 4** (b) に示す．この出力も“およそ 14”と解釈することができるが，入力が実数値の場合と比較してサポート区間が拡がっていることに注意されたい．このように，入力があいまいになると，推論によって得られる出力のあいまいさも増加する．しかし，出力を表すメンバーシップ関数の形状が複雑にならずその意味の解釈が容易である点が，このファジィ推論法の特長である．

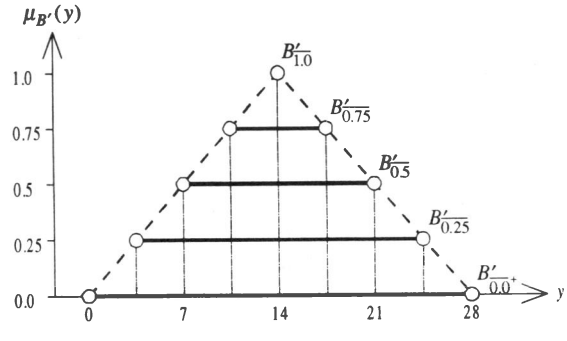


Fig. 5 Discrete inferred conclusion in the fuzzy set input case.

3. 非線形関数のファジィモデリング

提案したファジィ推論法の応用として，次に示す1入力1出力の非線形関数のファジィモデリングを行う．

$$y=\begin{cases}-x & (-1\le x<0)\\ x^2 & (0\le x\le 1)\end{cases} \qquad (22)$$

モデリングに用いるデータには，平均0.0，分散0.05^2の正規分布N(0.0, 0.05^2)ノイズが影響しているものとする．このノイズは±0.1~0.15程度の拡がりがあり，**Fig. 6** はその分布の様子を示している．

モデリングの準備として，ルールの前件部を**Fig. 7** のように，7つにファジィ分割しておく．従って，求めるべきファジィモデルは，7つのファジィルールによって構成される．

$$IF\ \ x\ is\ A_i\ \ THEN\ \ y\ is\ B_i \qquad (i=1,\ldots,7) \qquad (23)$$

$$B_i=\{p_{i1},p_{i2},p_{i3},h_{i1}\} \qquad (i=1,\ldots,7) \qquad (24)$$

各ルールの後件部のファジィ集合B_iは，**Fig. 1** に示した三角型メンバーシップ関数で表されるものとし，その各パラメータをモデリングデータをもとに最急降下法によって求める(但し，h_{i1} $(i=1,\ldots,7)$は1.0に固定)．

このような条件の下で，1000組のモデリングデータを用いてモデリングを行った．その結果を**Fig. 8** に示す．モデリング誤差の分散はモデリングデータに含まれるノイズの分散にほぼ等しく，モデリングデータの98.4%の個数がモデル出力のサポート区間内に収まっていることを確認した．

この結果から，提案したファジィ推論法を用いたファジィモデルは，非線形関数の入出力関係と，ノイズによるモデリングデータの不正確性をうまく表現していることがわかる．

4. おわりに

本稿では，我々の提案したファジィ推論法を紹介し，その応用として非線形関数のファジィモデリングに適用した事例を示した．提案したファジィ推論法による推論結果は，メンバーシップ関数があまり複雑にならないことから，その定性的な意味の解釈が容易であるという特長をもっている．すなわち，このことは，推論結果を言語的に表現することが可能であることを示唆している．このようなことから，ファジィ推論の結果から人間が何らかの判断を行う必要があるような，人間の介在するシステムに対して，このファジィ推論法は有効であると考える．

また，このファジィ推論法をファジィモデリングに適用した場合，そのファジィモデルは，対象となるシステムの入出力関係を表現するだけではなく，入出力間のファジィ関係を表現するものである．非線形関数のファジィモデリングへ適用した事例では，ファジィモデルが，対象となるシステムの非線形構造だけでなく，データに含まれる不正確さも表現できることが明らかになった．含意規則を用いてファジィ関係を求める従来の方法で，このようなファジィ関係を表現することは困難であった．

今後の課題は，推論によって得られる出力のメンバーシップ関数から，その出力の持つ定性的な意味を解釈して，言葉によって表現することである．そして，実システムに適用し，その有効性を検討することである．

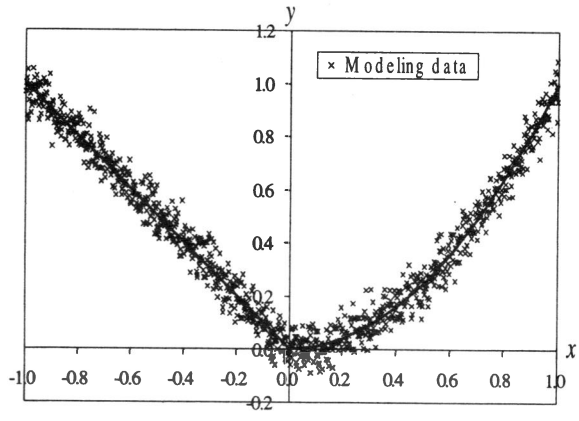


Fig. 6 Modeling data.

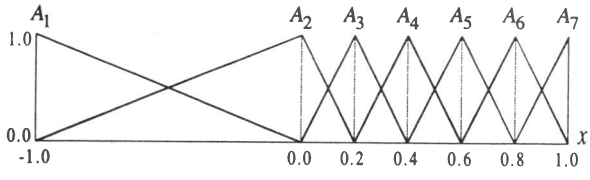


Fig. 7 Fuzzy divisions in the antecedent part.

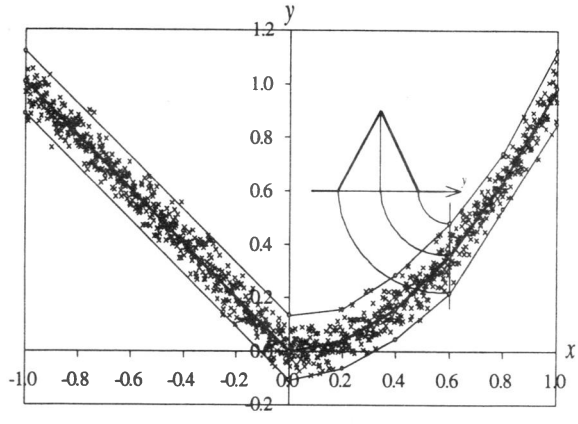


Fig. 8 Modeling result.

参考文献

[1] 水本：ファジィ推論(2)，日本ファジィ学会誌，Vol.4, No.3, pp.35-46 (1992)

[2] 島川，村上：ファジィ推論法の一提案とファジィモデリングへの応用，計測自動制御学会，第15回SICE九州支部学術講演会予稿集，pp.319-322 (1996)

[3] 島川，村上：プラントのファジィモデリングとファジィ予測制御，日本機械学会[No.96-37]，第6回インテリジェントシステム・シンポジウム講演論文集，pp.227-230 (1996)

【問い合わせ先】

〒794-25　愛媛県越智郡弓削町下弓削1000

弓削商船高専　電子機械工学科

島　川　　学

TEL: 0897-77-4655, FAX: 0897-77-4695

E-mail: shima@mech.yuge.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THD4-2

HIGH DIMENSIONAL FUZZY MODELING APPLIED TO NON-LINEAR REACTION KINETICS

Gancho VACHKOV Masayoshi KOBAYASHI

Department of Chemical Systems Engineering,
Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, 090 Kitami-Shi
Fax: +(81) 157 - 24-7719
E-mails: vachkov@betta.chem.kitami-it.ac.jp e50000@cc.kitami-it.ac.jp

ABSTRACT: In this paper a so called *sequential method* of creating high dimensional fuzzy models by repeatedly performing one-dimensional fuzzy modeling is described. The method uses one-dimensional fuzzy models from the type of Takagi-Sugeno models and is applicable in the case of experimental data being taken in a systematic way, by changing only one input parameter at a time. First a number of the so called *serial fuzzy models* are created, which are later used to create the so called *cross fuzzy model* in the next input space and so on. Even if such procedure takes longer time for a single point calculation (prediction), it allows to calculate and precisely evaluate any point in the highly sparse experimental space.

The above proposed method and the specialized software created have been used in investigation on the approximation abilities of a non-linear model of a reaction kinetics. The simulated reaction by experimental data was CO oxidation on ZnO as a catalyst. The simulation results have proved the high efficiency and accuracy of the proposed fuzzy modeling method.

INTRODUCTION

Most real industrial processes impose difficult simulation problems since they are usually of highly non-linear and high dimensional nature. Complex chemical reactions are typical examples of such processes since usually their internal mechanism is described by several possible pathways. In addition quite often there are no enough experimental data to fit all the model parameters. This fact leads to inability of creating high-dimensional models or to creating models with poor prediction results, when using Neural Networks with small number of experimental (training) data.

At the same time Fuzzy modeling was a field of intensive research in the last decade, especially after the significant works of M. Sugeno and co-workers [1,2] where it has been proved that the so called Takagi-Sugeno fuzzy models (or TS models) can be considered as "universal approximators". In other works [3,4] different modifications of the fuzzy models, or comparison with other modeling techniques was also a matter of research.

In this paper a special *sequential fuzzy modeling method* of creating high dimensional fuzzy models is proposed. The method repeatedly performs one-dimensional fuzzy modeling procedure in each dimension of the input space separately. This procedure is applicable in the quite often case when the experimental data have being taken in a systematic way, by changing only one input parameter at a time. Thus a series of one-dimensional TS fuzzy models (called serial models) is created. They are later used to produce data for creating another one-dimensional model (the so called cross model) in the next input space dimension and so on. Even if such modeling procedure takes longer time for a single point calculation (prediction), it allows to calculate and precisely evaluate any point in the highly sparse experimental space, when creation of a high dimensional model is impossible or quite inaccurate.

STRUCTURE OF THE ONE-DIMENSIONAL FUZZY MODELS

As well known [1,2,3], the structure of each rule R of the TS fuzzy model with k inputs $x_1, x_2, ..., x_k$ and one output y is as follows:

R: IF (x_1 is A1 AND x_2 is A2 AND ... AND x_k is Ak) THEN $y = f(x_1, x_2, ..., x_k)$ (1)

where A1, A2, ..., Ak are fuzzy sets with linear membership functions, from the type of SMALL and BIG and $f(...)$ is most often a linear function of the inputs $x_1, x_2, ..., x_k$. Thus the number of model parameters to be tuned by the available experimental data is as follows: k+1 parameters for the rule's consequent (parameter tuning) and In such case the complete TS fuzzy model in the k-dimensional input space will consist of 2^k rules from the above type R thus having the following number of tuning parameters:

1) 2x2xk structure (premise) parameters, being the borders of each membership function from the type of SMALL and BIG for each input;

2) $(k+1).2^k$ consequent parameters (in the linear case only).

Obviously the tuning procedure of such model with higher order is a hard task being solved by different ways, mainly by using backpropagation training [3,5] methods without a guarantee for obtaining the global optimum.

In the same time, the one-dimensional TS fuzzy

model is very simple one having just 4 premise parameters and 4 consequent parameters (in the linear case). Therefore it should be much easier to tune such a model by using less experimental data. In addition small changes can be made in order to improve its simulation abilities for a high non-linear processes, namely:

a) by introducing a non-linear consequent part of each rule;

b) by introducing non-linear membership functions for SMALL and BIG. Further a relatively simple and *smooth* **S** and **Z** shaped membership functions are used, as shown in Fig. 1. :

S-shaped Membership Function:

$IF(X > B0 \wedge X \le B)$ *THEN* $Y = 2[(X - B0)/D]^2$ (2)

$IF(X > B \wedge X < B1)$ *THEN* $Y = 1-2[(B1-X)/D]^2$ (3)

$IF(X \le B0)$ THEN $Y = 0.0$ (4)

$IF(X \ge B1)$ THEN $Y = 1.0$ (5)

where $D = B1 - B0$ and $B = (B0 + B1)/2$

Z-shaped Membership Function:

$IF(X > A1 \wedge X \le A)$ *THEN* $Y = 1-2[(X - A1)/D]^2$ (7)

$IF(X > A \wedge X < A0)$ *THEN* $Y = 2[(A0-X)/D]^2$ (8)

$IF(X \le A0)$ THEN $Y = 0.0$ (9)

$IF(X \ge A1)$ THEN $Y = 1.0$ (10)

where $D = A0 - A1$ and $A = (A1 + A0)/2$

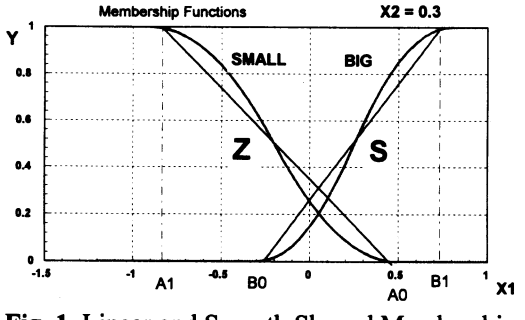


Fig. 1. Linear and Smooth Shaped Membership Functions

The non-linear consequent part of the two possible rules R1 and R2 have the following polynomial form:

$$R1: IF\,(X\ is\ SMALL)\ THEN\ y_1 = \sum_{i=0}^{p_1} a_i x^i \quad (11)$$

$$R2: IF\,(X\ is\ BIG)\ THEN\ y_2 = \sum_{i=0}^{p_2} b_i x^i \quad (12)$$

where p_1 and p_2 represent the order of the model for each rule (usually $p_1 = p_2 = p$). As shown later, a non linearity up to $p = 3$ is quite sufficient for obtaining satisfactory simulation results even for a highly non-linear cases.

If f_1 and f_2 denote the fuzzified values for SMALL and BIG respectively, in the case of one-dimensional fuzzy model they are equivalent to the truth values of the respective rules R1 and R2. Therefore the final weighted average defuzzification procedure is simply written as:

$$Y = \frac{f_1 y_1 + f_2 y_2}{f_1 + f_2} \quad (13)$$

PROCEDURE OF TUNING THE ONE-DIMENSIONAL FUZZY MODELS

Tuning of such a model is much simpler because of smaller number of parameters, but even in this case it consists of 2 steps, as follows:

1. *Lower level:* tuning of consequent parameters a_i and b_i with fixed premise parameters.

2. *Higher level:* tuning of the premise parameters (borders of the membership functions) A1, A0 (for SMALL) and B0, B1 (for BIG).

While the lower level tuning can be performed easily by the least squares method as in [1,2], the higher level tuning is a nonlinear optimization task. Here we propose a simple scanning method for optimization. Even being an exhaustive search method it is not difficult to be performed for such small sized models. Fig. 2. gives a graphical representation of this simple process in the case of division of the input space X into 3 intervals.

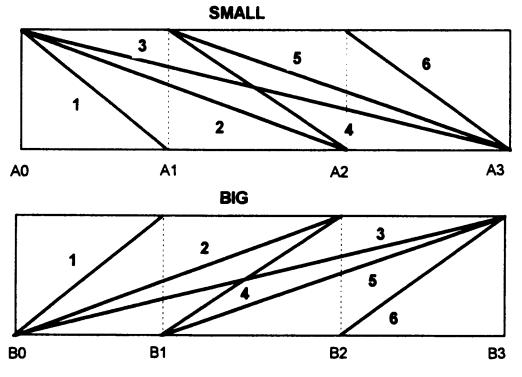


Fig. 2. Scanning the Membership Functions Locations in the Case of Division into 3 Intervals

If m denotes the number of intervals for both membership functions SMALL and BIG, then the number of iterations It for the scanning procedure is growing (as shown in Fig. 3.) according to the following formula:

$$It = \left(\frac{m(m+1)}{2}\right)^2 \quad (14)$$

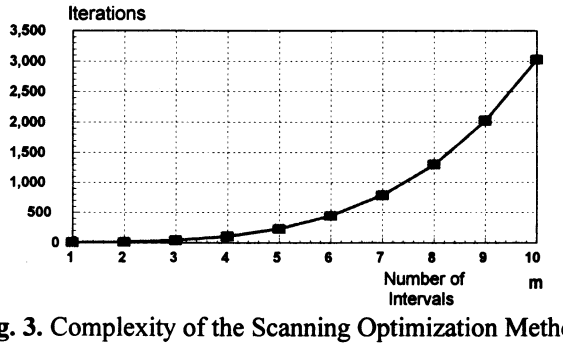


Fig. 3. Complexity of the Scanning Optimization Method

THE OUTLINE OF THE PROPOSED SEQUENTIAL FUZZY MODELING METHOD

The following test example is further used to illustrate

graphically the idea of the proposed sequential fuzzy modeling method in the high-dimensional space:

$$Y = \frac{13}{33}a + 0.3X_1 + \frac{7}{19}b + 0.2X_2 = f(X_1, X_2) \quad (15)$$

where :

$$a = \sin\left(\frac{16X_1}{3+4X_1^2}\right) \quad \textit{and} \quad b = \sin\left(\frac{8X_2}{1+2X_2^2}\right) \quad (16)$$

This example is *similar* to that one used in [5] (with slightly changed coefficients) and serves as a typical case of a highly non-linear process, as shown in Fig. 4.

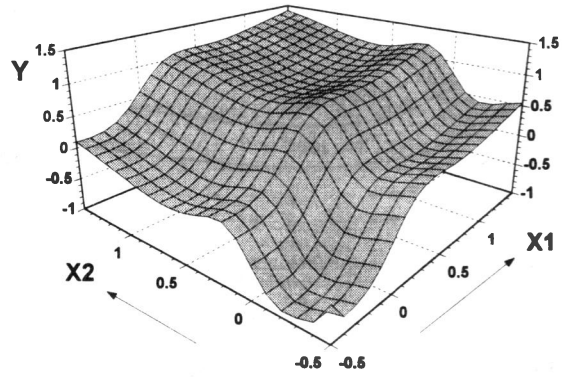


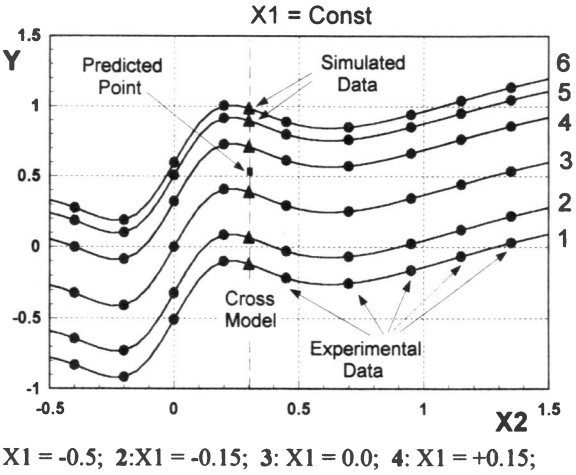
Fig. 4. 3-D Plot of the Non-linear Test Example

The idea of the Sequential Fuzzy Modeling method can be explained in the following steps:

1) Choose one input space dimension, let say X2 and create a number of n one-dimensional fuzzy models, called further serial models as:

$$Y = f_i(X2), \quad \text{with} \quad X1_i = \text{const}, \quad i = 1,2,...,n \quad (17)$$

Actually the choice of the first dimension to start with is decided by the way in which the real experiments have been taken systematically. Illustration of this procedure for $n = 6$ is presented in Fig. 5.



1: X1 = -0.5; **2**:X1 = -0.15; **3**: X1 = 0.0; **4**: X1 = +0.15; **5**: X1 = +0.5; **6**: X1 = +1.0

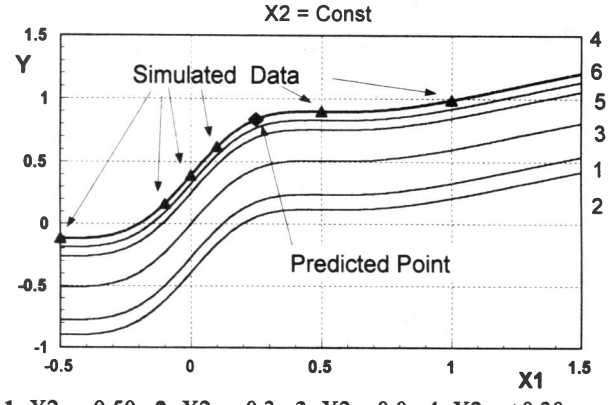
Fig. 5. Creation of One-Dimensional Serial Models by use of Experimental Data

2) Generate n new (*simulated*) data in the next input space dimension by using the created serial fuzzy models in Step 1.

3) Create a *new* one-dimensional fuzzy model in the new input space dimension called cross model, in the same way as the serial models.

4) Calculate the cross model for a desired new point in the two-dimensional input space to get the so called *simulation* (predicted) point.

The above steps are graphically depicted in Fig. 6.



1: X2 = -0.50; **2:** X2 = -0.3; **3:** X2 = 0.0; **4:** X2 = +0.30; **5:** X2 = +0.60; **6:** X2 = +0.90

Fig. 6. Creation of One-Dimensional Cross Model by use of Simulated Data from the Serial Models

Of course, the procedure of creating cross model can be repeated as many times as many new points have to be simulated (predicted).

ACCURACY OF THE FUZZY MODELS

It is easy to conclude from the above steps that the accuracy as well as the generalization abilities of each serial and cross model are from crucial importance for the correct prediction of the new points. A specialized software in FORTRAN-77 was written for creating, tuning and checking the one-dimensional fuzzy models with both linear and smooth-shape membership functions add different model orders. Fig. 7. shows the simulation results in the case of S and Z type of membership functions and order 0,1 and 2. Practically the model of order 2 coincides completely with the original curve.

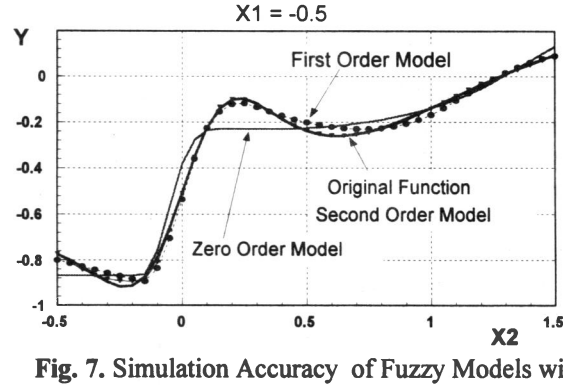


Fig. 7. Simulation Accuracy of Fuzzy Models with Different Orders

The obvious better accuracy of the models with smooth membership functions is illustrated in Fig. 8.

Fuzzy models with higher order possess an over-fitting tendency, equivalent to the over-training problem with the Neural Networks [5]. This tendency is shown in

Fig. 9. Therefore it is suggested that at least a few experimental points should be left for a test data set.

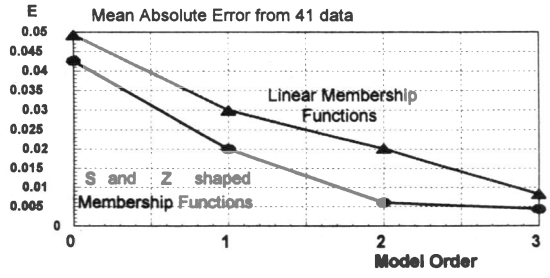


Fig. 8. Accuracy of the Fuzzy Models with Different Shapes of Membership Functions

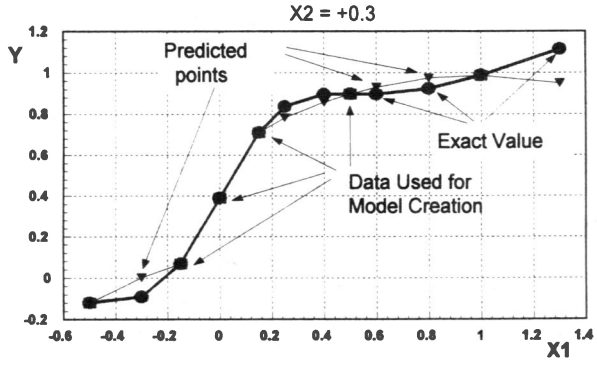


Fig. 9. Over-fitting Simulation Problem

APPLICATION OF THE SEQUENTIAL FUZZY MODELING METHOD FOR SIMULATION OF CHEMICAL REACTION KINETICS

The above explained and tested method has been used to simulate a steady-state reaction rate by use of experimental data taken in a systematic way. The simulated reaction is CO oxidation on ZnO as a catalyst. This is a typically non-linear process, going into two different reaction pathways, described by the pathway models of Langmuir-Hinshelwood (L-H) and Eley-Rideal (E-R) [6]. The respective reaction rates are denoted by $r_{L\text{-}H}$ and $r_{E\text{-}R}$. The total reaction rate r_{total} is calculated as:

$$r_{total} = r_{L\text{-}H} + r_{E\text{-}R} = f(P_{CO}, P_{O2}, T) \qquad (18)$$

Even in the case of P_{O2} = const, the two-dimensional relationship $r_{total} = \varphi(P_{CO}, T)$ is of still highly non-linear form with both maximum and minimum points.

A number of experimental data have been taken so that n experimental curves $r_{total} = f(P_{CO}, T_i)$; i = 1,2,...,n were available. The simulation problem is to predict the reaction rate r_{total} for a new (unknown) point $\{P_{CO}', T'\}$ by avoiding creation of a two-dimensional model due to the big number of model parameters to be adjusted simultaneously.

Fig. 10. shows the experimental curves $r_{total} = f(P_{CO}, T_i)$; i = 1,2,3,4, corresponding to the temperatures T = 130, 160, 165 and 170 [°C]. By using the sequential fuzzy modeling method many new points were simulated (predicted), in order to draw the same type of relationship for the following new temperatures: T = 135, 140 and 150 [°C]. As seen in Fig. 11. the prediction results are quite satisfactory with the prediction error E growing when the distance between the experimental points and simulated ones is enlarging. Similar accuracy was achieved by using a two-dimensional Neural model with Backpropagation training [5] but it required much more computing time (dozens of thousands training epochs).

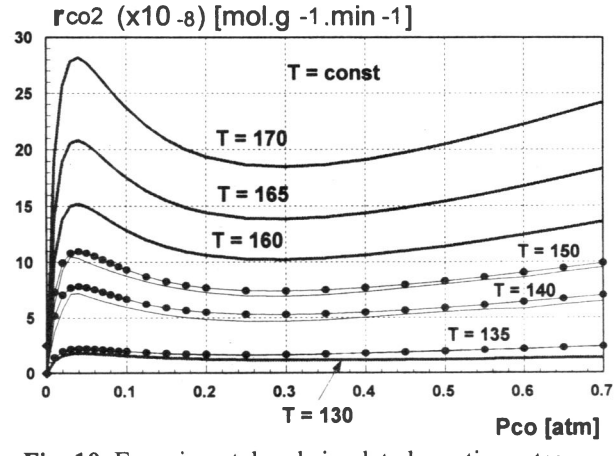


Fig. 10. Experimental and simulated reaction rates

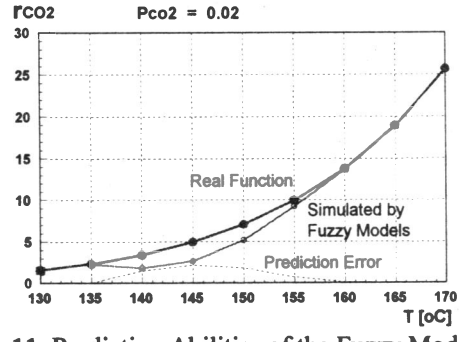


Fig. 11. Prediction Abilities of the Fuzzy Modeling

REFERENCES

1. Takagi T. and M. Sugeno, Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15, No. 1, 1985, 116-132.

2. Sugeno M. and K. Tanaka, Successive Identification of a Fuzzy Model and Its Applications to Prediction of a Complex System, *Fuzzy Sets and Systems*, 42, No.3, 1991, 315-334.

3. Yager and D. Filev, Essentials of Fuzzy Modeling and Control, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 1994, 388.

4. R. Rovatti and R. Guerrieri, Fuzzy Sets of Rules for System Identification, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, v. 4, No. 2, May 1996, 89-102.

5. T. Junge and H. Unbehauen, Artificial Neural Networks for Modelling of Nonlinear Systems, *Proc. of EURACO Network:* Tutorial Workshop on Control of Nonlinear Systems: Theory and Applications, 13-17 May, 1996, Algarve, Portugal, 231-251

6. M. Kobayashi, B. Golman, T. Kanno, Diversity of the Kinetics of Carbon Monoxide Oxidation on Differently Prepared Zinc Oxides, *J. Chem. Soc., Faraday Transactions*, v.91, No. 9, 1995, 1391-1398.

THD4-3

並列ファジィ処理による自動車運転特性のモデリング

A Fuzzy Modeling for Driving Behaviours of Vehicle using Parallel Fuzzy Processings

○五反田 秋彦（電通大）　木村 誠志（電通大）　本多 中二（電通大）
板倉 直明（電通大）　猪飼 國夫（(株）エム・アイ・ベンチャー）

○Akihiko GOTANDA, Seiji KIMURA, Nakaji HONDA and Naoaki ITAKURA,
University of Electro-Communication, Chofu-city, Tokyo
Kunio YIKAI, MI Venture's Corp., Sekibara 1-12-13, Adachi-ku, Tokyo

Abstract: In this paper, we show a new vehicle model for a traffic simulation system. We have already developped and reported an original traffic simulation system (MITRAM).

To model actual behaviours of vehicles on road, we adopted two level fuzzy inference. The lower level describes some trained driving skills in the other hand. The upper level is assigned to meta-fuzzy logic which simulates driver's conscious driving operation. Using this model, we obtained a good results to overtake a slow running car.

Keywords: *Modeling, Traffic, Inference*

1　はじめに

多量なファジィ演算を行なう処理系として、筆者等は多段2入力論理構造を提案し、さらにこれをハードウェアで高速処理できることも示した [1, 2, 3, 4]。この機構を用いることにより、様々な対象を多段2入力論理構造によって構成された推論網で表現でき、かつ高速に処理することができる。また、このハードウェア（FIU: Fuzzy Inference Unit）は1つの入力情報セットに対して4通りの異なる推論結果を同時に得ることができる（図1）。そこで本稿では、この特徴を利用して、人間が行なう自動車運転の様々な局面を適切に分割してモデリングし、それにより運転操作を合理的にかつ高速に処理することができることをいくつかの走行パターンをもとに検証する。

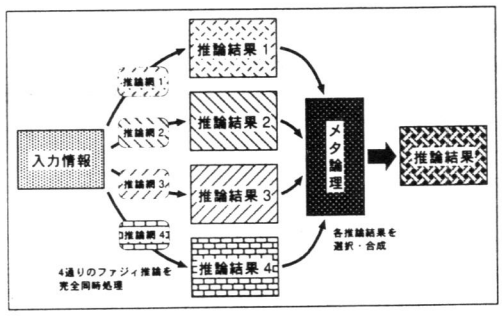


図 1: Inference in the FIU

2　モデリング

本研究においては、運転者はあらかじめ設定されたルート（「レーン」）を忠実に辿るものとし、モデルにおいてはステアリング操作は考慮しない。したがってモデルでは加減速操作が中心であり、さらに、交差点での右折や車線変更・追い越しといった明示的な意志決定を伴うものと、車の流れや道路幅、信号の表示状態などをもとに無意識に行なっているものに分類して扱う。すなわち、モデリングにあたって運転操作を「意識的な判断」とスキルなどの「無意識的な操作」の両面に分け、その組合せで最終的な運転操作を得るものとする。その上で、「無意識」の操作を着目対象から4つの推論網に分割し、その推論結果を集めて「意識的」に判断を行なう構造をとっている（図2）。この構造では、「意識的」な部分は各（無意識な）論理の上位に位置することから、「メタ論理」と呼ぶ。

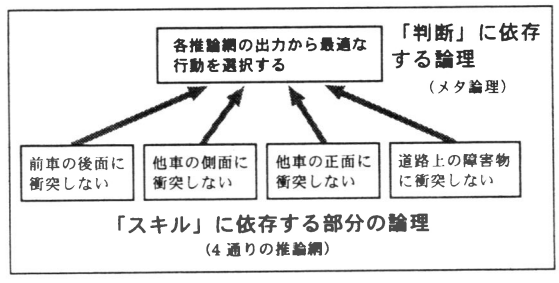


図 2: Model structure and its elements

各部分は、具体的には注目範囲内に存在する次のものにそれぞれ着目して操作量を決定する。

1. 「後面に衝突しない」論理
   自車の直前の車（前車）とその前の車（前々車）
2. 「側面に衝突しない」論理
   合流するレーンがあれば、そのレーンで合流点に最も近くにいる車両（合流車）
3. 「正面に衝突しない」論理
   交差するレーンがあるか、自車の右側のレーンが逆方向であれば、交差地点（または自車位置）の最も近くにいる車両（対向車）
4. 「障害物に衝突しない」論理
   駐車車両や横断中の人、停止信号を表示している信号の停止線など
5. メタ論理
   上記 1〜4 の 4 つの論理網から出力された推論結果をもとに、その状況で最適な操作量を選択・決定する

このような観点から構成された論理網の一部を図 3 に示す。

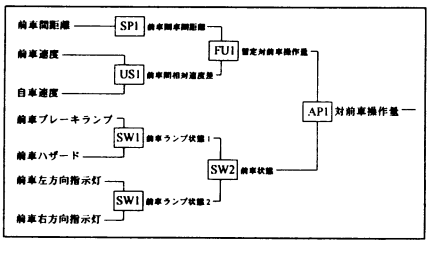


図 3: One part of inference network

3 モデリングの検証

以上の手順でモデリングを行なった推論網について、実際に FIU 上で推論を実行して動作の検証を行なった。ここでは「交差点内での右折」について示す。

図 4の状態から推論を開始したところ、3 秒後に右折が完了した（図 5）。またメタ論理に関しても、初期状態では合流車に対する操作量が採用されていたものが、0.4 秒後には対向車に対する操作量に、さらにその後 0.9 秒で前車に対する操作量へと、状況に応じて採用する操作量が切り替わることも確認された。

なお、「追い越し」についても、同様にして動作が確認された。

4 結論

今回のモデリングの結果、FIU を用いて運転操作をシミュレートすることができた。車両を取り巻く状況の局面によって推論網を分割することにより、FIU の

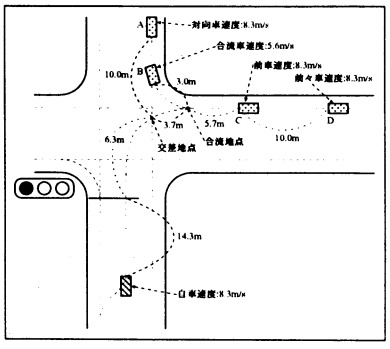


図 4: Initial state

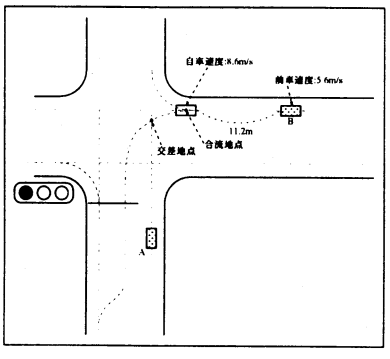


図 5: State after 3 seconds

構造ともあいまって、合理的かつ効率的にシミュレーションを行なえることを示すことができた。

参考文献

[1] 猪飼・本多, “微視的道路交通シミュレーションの高速化のための専用ファジィプロセッサの作成”, 1992 第 8 回ファジィシステムシンポジュウム

[2] YIKAI K., HONDA N. & SATOH A.: “A Fuzzy Processor Consisting of Memory and Controlling LSI”, Fifth IFSA World Congress ’93 in SEOUL Vol.2 pp789-792

[3] 猪飼・五反田・板倉・本多: “ハードウェアファジィ推論ユニットの単独動作の評価”, 第 6 回 FAN シンポジュウム ’96

[4] 五反田・猪飼・板倉・本多: “ハードウェアファジィ推論ユニット用シミュレータによる多段推論構造の検証”, 第 6 回 FAN シンポジュウム ’96

問合せ先

〒 182
東京都調布市調布が丘 1-5-1
電気通信大学 電子情報学科 本多研究室
五反田 秋彦
E-mail: gotanda@fs.cas.uec.ac.jp

THD4-4

可動ノズルを用いた大空間空調に関するファジィモデリングの研究

A Study of a Fuzzy Modeling on the Heating and Air-Conditioning System with the Variable Direction Nozzles in Large Scale Indoor Space

土田孝弘* 植田俊克** 柴野俊弘**
Takahiro TSUCHIDA* Toshikatsu UEDA** Toshihiro SHIBANO**
鈴木正美** 萩野剛二郎* 本多中二*
Masami SUZUKI** Kojiro HAGINO* Nakaji HONDA*

* 電気通信大学 ** 新菱冷熱工業株式会社
* University of Electro-Communications ** Shinryo Corporation

Abstract: In the case of controlling a heating and air-conditioning system in large scale indoor space, since positions of mounting sensors are usually restricted, it is difficult to obtain reliable air temperature and air velocity distributions in some area. These estimations are therefore required to realize an effective control. In this paper, a method for the estimations through a fuzzy model is presented. Main advantages in this method is that both fuzzy rules and their membership functions are automatically determined by using input-output data. An application of this method to the estimations of the air temperature and velocity distributions in large scale indoor space is considered to show its effectiveness.

1 はじめに

ホールやドームといった大規模な空間を制御対象とした空調を行うにあたって，吹出し口の方向・角度を任意に設定でき，そして自由に回転・往復させて吸気を行うことの可能なノズルを用いた空調システムが研究されている [1]．このようなシステムでは従来の制御系による処理のみでは不十分なことが多く，新しい制御方式の開発が求められている．このような制御システムを構築するにあたり，制御対象の複雑な空間温度分布等の特性を把握し，予測することが重要となる．大空間空調における温度特性などの物理法則に基づく精緻なモデルが開発されているが，これを実時間制御に用いることは難しい．そこで，大空間空調の温度特性などを気流実験による測定データから，ファジィ推論形式に従ってモデリングする手法が研究されている [2]．これは精度をある程度犠牲にしても，大局的な特性を的確に捉え，また簡便に利用できるという視点に立つモデリングである．

一方，複雑なシステムに対するファジィモデリングの手法として，高木・菅野のファジィモデリングが提案されている [3]．これは推論規則の If-Then 規則において，後件部に線形関数を用いて推論するものである．これに対して，本手法は，後件部を簡略化させ，シングルトンとしている．本手法の特徴として，入出力データよりファジィ推論のルールを自動的に抽出・構成でき，またルールを言語的に読み換えることでモデルの構造を解り易く把握できるといった点が挙げられる．

本研究では，提案したファジィモデリングの方法を用いて大空間空調における温度特性，風速特性のモデリングを行い，重回帰分析による線形式，および GMDH (Group Method of Data Handling) [4] によるモデリングの結果と比較し，検討する．

2 ファジィモデリング

本ファジィモデルリング（FM）で用いられる入出力ファジィ関係を Rとすると，Rは

$$R_i : \text{if } x_1 \text{ is } A_{1i} \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } A_{ni} \text{ then } y \text{ is } B_i \qquad (1)$$

の形式の複数のルールから構成される．ここで i は i 番目のルールを示し，また，$x_1, \cdots, x_n$を前件部変数，yを後件部変数と呼ぶ．$A_{1i}, \cdots, A_{ni}, B_i$はファジィ集合で表されるので，ファジィ変数と呼ばれる．本ファジィモデリングでは，$A_{1i}, \cdots, A_{ni}$を三角型ファジィ変数で表し，B_iをシングルトン（非ファジィ値）とする．

ファジィモデリングの構成手順を以下に示す．

1) 測定データを M組のトレーニングデータと N組のチェッキングデータに分ける．そこでまず前件部変数に関するファジィ変数のメンバーシップ関数を図1のように与える．これを入力変数 $x_i (i = 1, \cdots, n)$ に関する初期メンバーシップ関数とする．

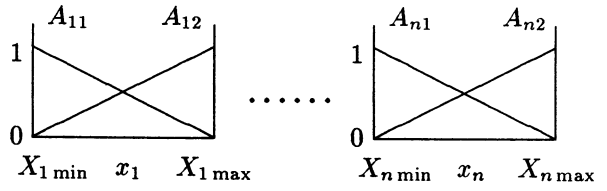


図 1: 初期メンバーシップ関数

すなわち，これによりこれらのファジィ変数の組み合せによる $2\times\cdots\times 2=2^n$ 個の前件部の組合せが準備される．

2) トレーニングデータの k 番目のデータ組 $(x_{1k},\cdots,x_{nk},y_k)$ に対して，各入力データ x_{ik} のメンバーシップ値 P_{ij_ik} を求める．

$$\begin{aligned} P_{1j_1k} &= A_{1j_1}(x_{1k}) \\ & j_1=1,\cdots,r_1 \text{ (最初は } r_1=2) \\ &\vdots \\ P_{nj_nk} &= A_{nj_n}(x_{nk}) \\ & j_n=1,\cdots,r_n \text{ (最初は } r_n=2) \end{aligned} \tag{2}$$

3) 前件部の組合せの l 番目について k 番目のデータのその前件部に対する適合度を求める．

$$\omega_{lk}=\min[P_{1j_1k},\cdots,P_{nj_nk}] \tag{3}$$

適合度を $j_1,\cdots,j_n$ におけるすべての組み合わせについて求める．なお，そのすべての組み合せの総数は

$$J=r_1\times\cdots\times r_n \tag{4}$$

通りである．

4) すべてのトレーニングデータに対して 2), 3) の操作を行なう．そして，l 毎に

$$S_l=\bigvee_{k=1}^{M}\omega_{lk} \tag{5}$$

を求める．このとき，S_l を与えた k が k' であったとすると k' 番目のデータが l 番目に最も適合したものとして，その後件部の B_l を $y_{k'}$ として，ルールを形成する．また，S_l が複数存在する場合，それらの $y_{k'}$ の平均値を B_l とする．

5) すべてのルールを求めて，それぞれそのファジィ関係

$$R_l = A_{1j_1}\times A_{2j_2}\times\cdots\times A_{nj_n}\times B_l \tag{6}$$

を求める．さらにこれらすべてのルールを集約して

$$\begin{aligned} R &= R_1\cup R_2\cup\cdots\cup R_J \\ &= \bigcup_{l=1}^{J} R_l \end{aligned} \tag{7}$$

を得る．これを本モデルの入出力ファジィ関係とする．

6) h 番目のチェッキングデータと，得られたファジィ関係 R_l より出力を合成（推論）する．その手順はまず R_l への前件部値 $(x_{1h},\cdots,x_{nh})$ の適合度

$$\begin{aligned} P_{1j_1h} &= A_{1j_1}(x_{1h}) \\ &\vdots \\ P_{nj_nh} &= A_{nj_n}(x_{nh}) \end{aligned} \tag{8}$$

を求める．次に

$$\omega_l=\min[P_{1j_1h},\cdots,P_{nj_nh}] \tag{9}$$

を求める．この ω_l が R_l とデータとの適合度となる．

7) 非ファジィ化法（重心法）により推論値 $\hat{y}_h$ を得る．

$$\hat{y}_h=\frac{\sum_{l=1}^{J}\omega_l\times B_l}{\sum_{l=1}^{J}\omega_l} \tag{10}$$

8) 出力推論誤差 $|y_h-\hat{y}_h|$ を求める．

9) 全チェッキングデータに対する出力推論誤差を求め，適当に決めた ε（推論誤差の許容値）に対し

$$\max|y_h-\hat{y}_h|>\varepsilon \tag{11}$$

ならば 8) で計算した誤差の最大値を与える h 番目の入力データ $x_{1h},\cdots,x_{nh}$ を頂点として図 2のようにメンバーシップ関数を新たに生成して 2) へ戻る．(しかし，この値を頂点とするメンバーシップ関数がすでに追加されていた場合には，その次に大きな誤差を与える入力データを頂点として追加する)

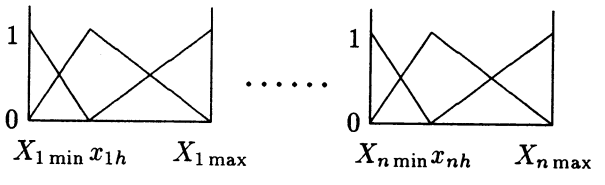


図 2: 分割されたメンバーシップ関数

10) 誤差の最大値が ε 以下ならば，そこで終了する．

3 モデリング

3.1 大空間における気流実験

本研究は，文献 [1] にて行われた大空間における気流実験の測定データに基づき，大空間の任意の地点における温度，風速特性を表すモデルの構築を行う．今回のモデリングではノズルの回転・往復動作を行わず，全て固定とした測定データを用いる．測定は表 1に示すようにノズル条件を変化させ，図 3に示す 60 地点で温

度，風速を測定している．なお，室温は20[℃]となっている．

表 1: ノズル条件

吹出し口温度 [℃]	10, 15, 20, 25, 30
吹出し口風速 [m/s]	2.5, 5.0, 7.5, 10.0
吹出し口角度 [deg]	0, 8, 15

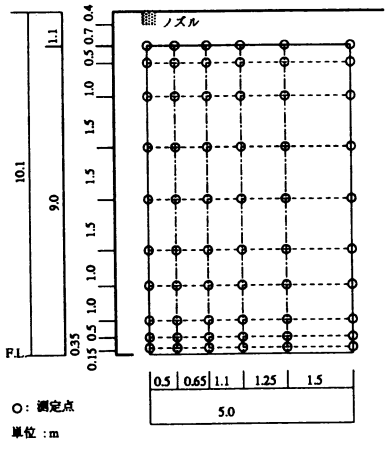


図 3: 実験室内の測定点の配置

3.2 モデリング結果

2で示した本手法の手順を用いて，推論誤差の許容値を$\varepsilon = 5$，および$\varepsilon = 2$として，それぞれについてモデリングを行なった．また，同じ条件の下に重回帰分析による線形式とGMDHによるモデリングも行なった．なお，トレーニングデータとチェッキングデータは，図4に示すように測定点の位置で分けた．

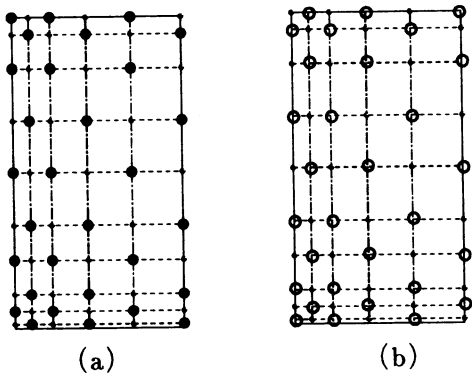


図 4: トレーニングデータ（a），チェッキングデータ（b）

表2，3に測定データに対するモデルの精度を示す．なお，温度特性における温度y_iの範囲は，

$$10.0 \leq y_i \leq 30.0 \ \ [℃], \tag{12}$$

風速特性における風速y_iの範囲は，

$$0.0 \leq y_i \leq 10.0 \ \ [\mathrm{m/s}], \tag{13}$$

モデルの精度を評価する誤差平均は，

$$\frac{\sum_{i=1}^{m} |y_i - \hat{y}_i|}{m} \tag{14}$$

より求めている．ここで，mはデータ数，y_iは測定値，$\hat{y}_i$は推論値を示す．図5，6では導出されたメンバーシップ関数の最終形を示す．さらに図7，8に測定値，GMDH，およびファジィモデリングの$\varepsilon = 5$，$\varepsilon = 2$での，ノズル条件（温度 [℃], 風速 [m/s], 角度 [deg]）$= (-10, 7.5, 15)$での温度特性，風速特性を等高線で示す．

表 2: モデルの精度比較（温度特性）

	誤差平均	標準偏差
線形式	0.65	0.84
GMDH	0.54	0.65
FM（$\varepsilon = 5$）	0.47	0.44
FM（$\varepsilon = 2$）	0.29	0.38

表 3: モデルの精度比較（風速特性）

	誤差平均	標準偏差
線形式	0.61	0.70
GMDH	0.39	0.48
FM（$\varepsilon = 5$）	0.33	0.53
FM（$\varepsilon = 2$）	0.17	0.25

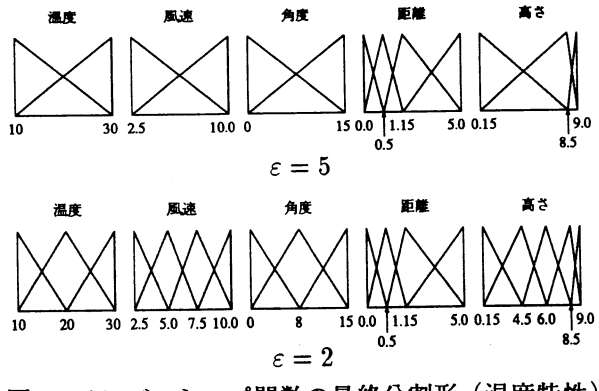


図 5: メンバーシップ関数の最終分割形（温度特性）

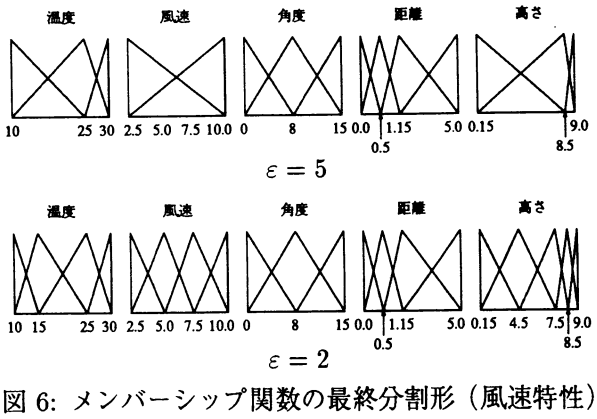


図 6: メンバーシップ関数の最終分割形（風速特性）

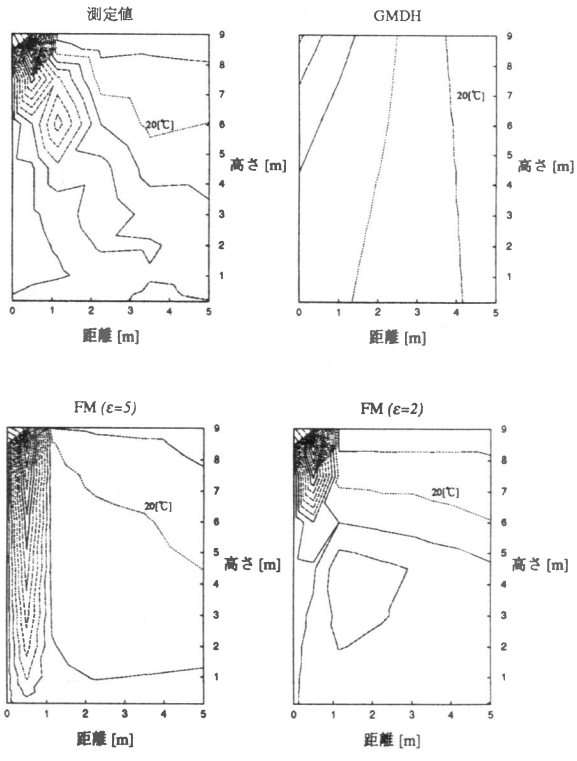


図 7: 温度特性（等高線は 0.5[℃] 間隔）

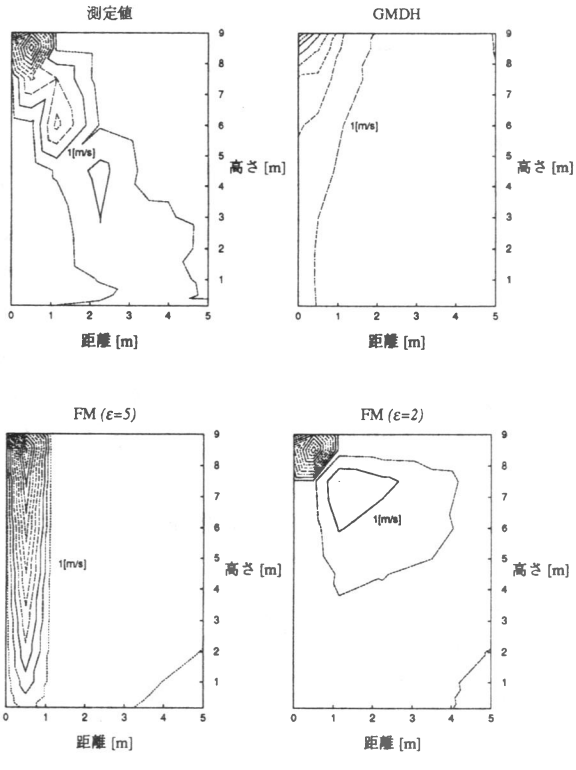


図 8: 風速特性（等高線は 0.5[m/s] 間隔）

3.3 考察

表2，3に示す結果より，本手法は線形式，GMDH と比較して，精度がよく，ばらつきも小さいことがわかる．図7，8の等高線の図において，測定値と各々のモデリングの推論結果とを比較すると，GMDH はどちらも細かい特性が表せていない．一方，$\varepsilon = 5$ では，測定値全体に対する誤差平均を小さく抑えているにもかかわらず，給気が空間に対して斜めに吹出すノズル条件に対して，給気が下向きに吹出されている．これはルールがまだ不足していることを示しおり，特性を十分反映しているとは言い難い．これらに対して，$\varepsilon = 2$ では特性をかなりよく表していることがわかる．

しかし，図5，6が示すように，モデルの精度を追求すると，メンバーシップ関数が細かくなり，その組合せによりルール数も増加する．このようにモデルの精度とルール数の間にトレードオフ関係があり，データの特性に応じて，いかに合理的にルール数を減らすかといった検討も必要となる．

4 おわりに

本研究では，大空間空調における温度特性，風速特性のモデリングの一つの手法を提示した．今後の課題として，ファジィモデリングの他の手法との比較，例えば文献 [3] の手法との比較を予定している．また，本研究ではノズルが単数個で固定状態であった．今後はさらに特性が複雑になるノズルの回転・往復動作や複数台設置といった条件を含めたモデリングを行う予定であり，同時にそれに基づいた制御方式の確立を目指す．

参考文献

[1] 三國恒文，植田俊克，岡田勝行，貝塚正光，‘大空間に吹出される噴流の気流特性に関する研究（第1報）’，空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，C-31（1992-10），PP.669-672.

[2] 新田核也，柴野俊弘，萩野剛二郎，本多中二，‘大規模空間内温度特性のモデル化’，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，TE4-5，PP.425-426，(1994).

[3] T. Takagi, M. Sugeno, ‘Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control’, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS,MAN,AND CYBERNETICS, VOL. SMC-24, NO. 5, (1985).

[4] A. G. IVAKHNENKO, ‘Polynomial Theory of Complex Systems’, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS,MAN,AND CYCBERNETICS, VOL. SMC-1, No.4, (1971).

[連絡先]
〒182 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 電子情報学科 本多研究室
土田孝弘
TEL： 0424-83-2161(3113)
FAX： 0424-88-8125
E-mail： tsuchida@fs.cas.uec.ac.jp

THE1-1

ファジィ推論による感情の分析

An analysis of emotions by using fuzzy reasoning

○川島康広*　菅野直敏　米山忠暲

○Yasuhiro Kawashima　Naotoshi Sugano　Tadaaki Yoneyama

玉川大学工学部

Faculty of Engineering, Tamagawa University

Abstract. Plutchik(1980) chose eight patterns out of the fundamental behavioral patterns, and named them genuine emotions, furthermore he showed some emotions using a combination of genuine emotions. Usually, human emotions are vague, and the emotions diversely change for stimulus from the outside. Regarding both of emotion and stimulus as a fuzzy set, we inferred the mixture of emotions from two genuine emotions.

1．はじめに

感情は非常に曖昧でありかつ不明瞭でもある。相手が今どのような感情を抱いているのか、いやそれ以前に自分の感情を完全に理解することさえ難しい。時として感情は理性の働きを妨げるばかりか、人間を非合理的な行動に走らせてしまうこともしばしばである[1) 2)]。

このように感情というものは、理性によるコントロールが難しいうえ、よくわからない存在である。しかしながら、人間関係を円滑にするためには、相手の感情状態を推測し、更に、自分の感情状態も理解する必要があり、その感情をこちらの意図した感情に遷移させることも時には重要であるはずである。感情の遷移過程は推測できないだろうか。Plutchik(1980)の感情モデルに基づきながらファジィ推論を試みる。

2．Plutchik 感情モデルの概要

Plutchik は、進化という観点から多くの動物に共通する基本的行動パターンを８種類にまとめ、感情の出現がこれらの行動パターンと直接関連づけられていることを示した。この基本的行動パターンに一対一に対応している感情を純粋感情と呼び、さらに幾つかの感情を２つの純粋感情の組み合わせで説明した［図1］。ここで純粋感情とは「受容」「恐れ」「驚き」「悲しみ」「嫌悪」「怒り」「予期」「喜び」の８つを指し、これらを組み合わせた感情を混合感情と呼ぶ。隣同士の純粋感情を組み合わせたものを一次混合感情と呼び、例えば、「喜び」と「受容」の混合感情は「愛」であり、「喜び」と「予期」の混合感情は「楽天」である。次に一つ離れた純粋感情の組み合わせを二次混合感情と呼ぶ。例えば「受容」と「驚き」の組み合わせで「好奇心」と言う具合である。最後に二つ離れたものを三次混合感情と呼び、「喜び」と「驚き」で「嬉しさ」を表す[3) 4)]。なお、三つ離れた純粋感情の組み合わせは打ち消し合って無感情になるため、四次混合感情は定義されていない。



図１．感情の円環モデル

3．感情の推論

個々の対象に関する感情の状態は、刺激や経験などの影響を入力として変化し遷移すると考えられる［図2］。

純粋感情において、「恐怖」と「怒り」、「喜び」と「悲しみ」、「受容」と「嫌悪」、「驚き」と「予期」は、それぞれ正反対の感情である。同様に混合感情においても、例えば、「嬉しさ」と「悲観」、「楽天」と「失

*現在、(株)日立インフォメーションテクノロジー

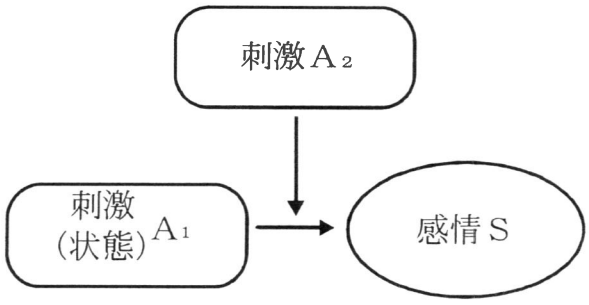


図2．感情の遷移

望」は正反対の感情になる。これら正反対の感情同士の組合わせを一つの軸とみなし、任意に選んだ2つの純粋感情とその混合感情をこの軸に対応させてメンバーシップ関数を定義する［図3］。さらに、それぞれの感情の度合いを表す尺度として「少し」・「まあまあ」・「とても」を用いる。

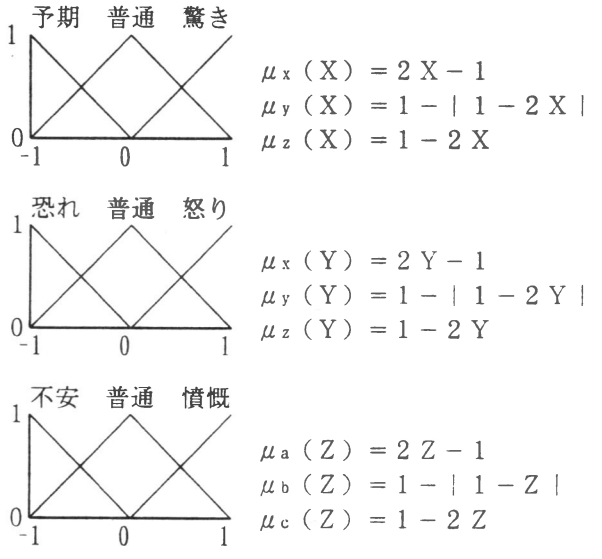


図3．メンバーシップ関数

通常、外部からの刺激や経験・感情状態などには大きさがある。そこで、刺激・状態（入力A 1, A 2）と感情（出力S）の対応関係は以下の推論規則に従うものとし［図4］、ファジィ推論を行う。最後に後件部の重心を出力結果とする［図5］[5) 6)]。

この推論が妥当であったかアンケート調査を行ったところ、六割の被験者から推論通りの回答が得られた。

4．今後の課題

この推論システムにおいて、今後は以下の3点について改善していきたい。

①Plutchik の感情モデルにおける不明瞭な点、及び今回のアンケート調査にそぐわなかった点の改善。

②今回は2つの純粋感情の組合わせを一意（クリスプ）に決定してしまったが、混合感情同士のオーバーラップしている点を見つけて、ファジィ集合として扱いたい。純粋感情についても同様である。

③Plutchik は混合感情を決定するさい色彩モデルを参考にしたそうであるが、それではファジィカラーネーミングシステムに似せた感情ネーミングシステムなるものは創れないだろうか、検討したい[7)]。

		刺激 A2		
		怒り	普通	恐れ
刺激 A1	驚き	憤慨	憤慨	普通
	普通	憤慨	普通	不安
	予期	普通	不安	不安

図4．推論規則

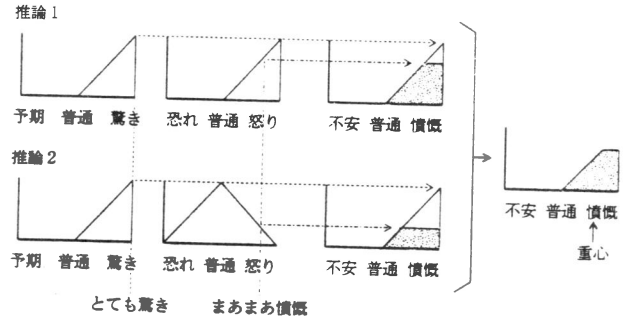


図5．ファジィ推論

参考文献

1）南博(1994)：心理学がわかる辞典．日本実業出版社
2）戸田正直(1992)：感情．東京大学出版会
3）齋藤勇(1986)：感情と人間関係の心理．川島書店
4）福井康之(1990)：感情の心理学．川島書店
5）洲之内、山下(1995)：ファジィ情報分析．共立出版
6）中島、竹田、石井(1994)：ファジィ理論入門．裳華房
7）大貫、菅野(1997)：ファジィカラーネーミングシステムⅢ．ノンエンジニアリング・ファジィ研究会 第7回ワークショップ講演論文集ｐｐ 48～49
8）川島、菅野(1997)：ファジィ推論による感情の分析．ノンエンジニアリング・ファジィ研究会 第7回ワークショップ講演論文集ｐｐ 56～57

THE1-2

知情意の工学的モデルの試作と適用

Model of Knowledge, Emotion and Awareness

○橋本　智己，山口　亨
○Tomomi HASHIMOTO and Toru YAMAGUCHI

宇都宮大学工学部情報工学科
Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utunomiya University

Abstract　The purpose is to make a model of knowledge, emotion and awareness, and to use it for an agent. The agent is a locomotion robot. Knowledge is AI using top-down system. Emotion is switch of awareness, and awareness is pointer of knowledge. This agent adapts some environments. Experimental show the effectiveness of this method.

Keyword : Emotional computing, Hierarchical knowledge, Locomotion robot

1. はじめに

人工知能とは，生物の知識処理を工学的に模倣したものである．模倣された知識処理には，設計者が決めたagentの行動目的を達成する手順が示されている．しかし，人間は，五感からのセンサ情報とセンサ情報によって想起される経験した事柄（記憶）と，そして，経験した時に，どのような感情を抱いたかによって，状況に応じて行動目的（意識）をかえる事ができる．予め決定された行動しかとれないagentでは，状況に応じて柔軟に対応する事が出来ない．この問題を解決するには，状況に応じて知識処理をかえる事ができる何らかの機構が必要である．清野は，瞬間的に切り替わる意識のモデルを示した[1]．このモデルの問題点は，感情を考慮していない点と，意識を1つと限定している点である．

今，agentとして外部環境を自分の目的にあわせて変更出来ない移動ロボットを想定する．ここで，agentが既に所有している知識に対して内部もしくは外部環境が変化した場合，新たな知識の獲得，あるいは修正が必要である．知識獲得に関しては，どのように新規知識を既存の知識に加えるのか，一方，知識修正に関しては，何を修正すればよいのか，という事を明確にする必要がある．この場合，センサを含めた全体システムを考慮しなければならない．なぜなら，知識修正には環境からの情報を何らかのセンサを通して入手する必要があり，センサと知識とを分離してシステムを構築すれば，必要な情報を望ましい形で得る事は難しいからである．さらにこれらのセンサは，ある意図（intention）を持って制御される必要がある．ここで矛盾することは，ある意図を持ってセンシングするには何らかの情報が必要であるが，その情報は制御すべきセンサから得られるものであり，事前に得ることは出来ない，という点である[2]．この矛盾を解決するには何らかの予測機構がセンサに付随して必要となる．

以降，第2章では，agentの置かれた環境に応じて，適切な知識処理を選択できるように，知情意（知識処理，感情，意識）の工学的モデルを構築する．第3章では，知情意の工学的モデルを移動ロボットに適用する．

2. 知情意の工学的モデル

「知」とは，複数の知識処理であり，並列処理される．「感情」とは，「意識」のスイッチである．「意識」とは，個々の知識処理のポインタ（pointer）

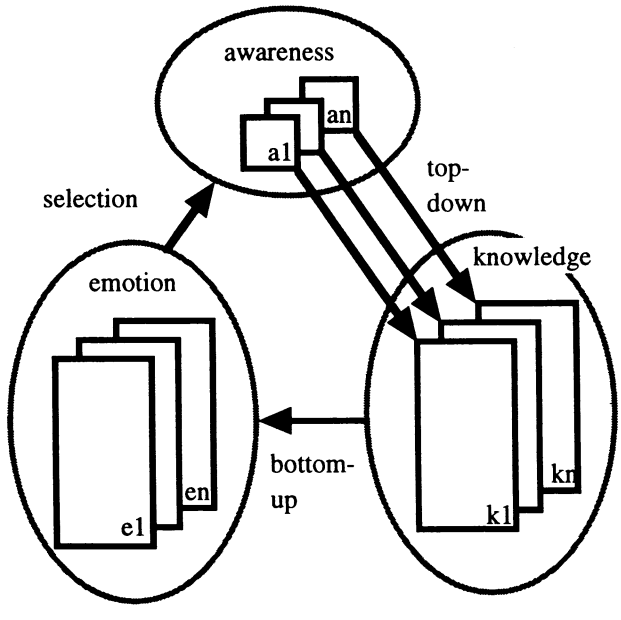
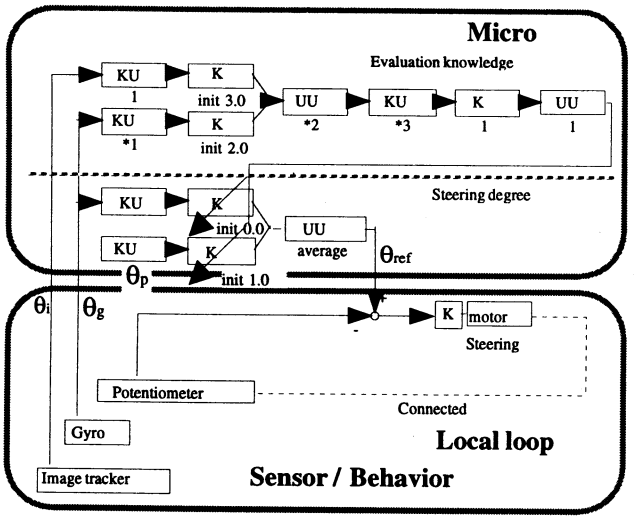


Fig.1 Model of Knowledge, Emotion and Awareness



*1 $\theta e = a\int \theta g dt + b.$

*2 *If* $\theta i \geq \theta e$ then $\theta c = \dfrac{\theta i}{K(0,+1)}$,

else $\theta i < \theta e$ then $\theta c = \dfrac{\theta i}{K(0,-1)}$.

*3 $\text{etemp}(t) = \dfrac{1}{2}(\theta p(t) - \theta c(t))^2$, $e(t) = f(\text{etemp}(t))$,

$w(t+1) = F(e(t), w(t))$,

$K(0,-2) = w(t)$, next $K(0,-2) = w(t+1)$.

Fig.2 Knowledge construction for internal environment

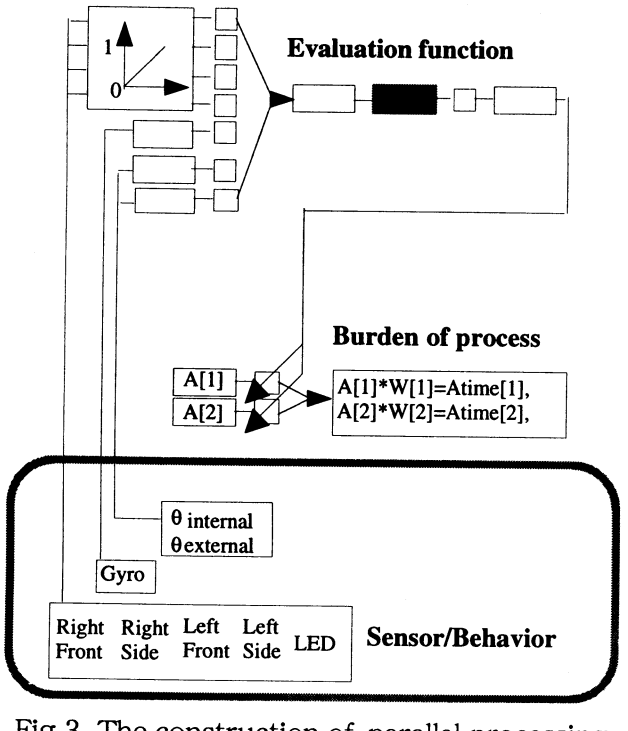


Fig.3 The construction of parallel processing system.

である．知情意の工学的モデルをFig.1に示す．Fig.1に示すように，感情によって選択される意識は異なる．そして，一つの意識に一つの知識処理が対応する．従って，agent の置かれた環境が同じであっても，違う行動が選択される可能性がある．また，これらの知識処理は，TSS (Time Sharing System) をモデルにして，並列に処理される．処理時間が短くても，長期間処理されていれば，選択された知識処理の答えが得られる事が期待できる．

3. 2つの知識処理と知情意の工学的モデルへの適用例

今，移動ロボットの目標を，単純な直進動作とする．この時，移動ロボットの内部と外部環境変化に対応する知識構造をロボットに持たせる．内部環境変化に対応する知識構造をFig.2に示す．階層知識構造内部では，Micro knowledge 層が実際にとるべきステアリング角度を決定し，Local loop で比例制御によってステアリングを制御する．システムは，階層化された複数段の知識を順次切り替える事によって環境の変化に対応する．また，内部と外部環境変化に対応する知識処理は，Fig.3に示す知識構造によって時分割処理される．

4. おわりに

第2章では，agent の置かれた環境に応じて適切な知識処理を選択できるように，知情意（知識処理，感情，意識）の工学的モデルを構築した．第3章では，知情意の工学的モデルを移動ロボットに適用した．トップダウン的な処理による，既存の知識の修正法について述べ，センサ情報を用いた上位層の知識が，下位層の知識もしくはセンサの重みを修正するという形の予測機構実現の例を示した．

参考文献

[1] 清野 躬行，”脳の連想記憶モデル”，日本神経回路学会主催，日本神経回路学会第6回全国大会講演論文集，10月18-20日，pp.326-333，1995

[2] 山崎 弘郎，石川 正俊：”センサフュージョン”，pp.29-32，コロナ社，1992

[問い合わせ先]
〒321 栃木県宇都宮市石井町2753
橋本 智己
電話/FAX : 028-689-6259
E-mail :
tomomi@sophy.infor.utsunomiya-u.ac.jp

THE1-3

マルチメディアの支援による感性的美術教育の一手法

A Study of Art Education for Developing Students' Perceptive Capability Supported by the Multimedia

飯田　誠　　清原　知二　　長尾　尚　　藤吉　誠

Makoto Iida　Tomoji Kiyohara　Takashi Nagao　Makoto Fujiyoshi

OSAKA SHIN-AI COLLEGE　OSAKA SHIN-AI　Hitachi Zosen Co. Ope.

Department of Primary Education　MEDIA CENTER　Technical Institute

Abstract — *It is said that we are living in the "multimedia age". The most important thing is how to make the best use of the multimedia. There is always some gap between an image on the computer screen and the real thing. The need to make this distinction, particularly in the filed of art education, takes on great importance.*

With this distinction in mind, the inevitable limit of the computer in the educational field could be easily realized. Our task is to show this fact to everybody concerned in art education. How to analyze and evaluate the qualitative data, which tends to be influenced by psychological factors, in order to assess what the learner acquires from the image on the screen, is our other task. This study is part of the scientific research supported by the Educational Ministry. The aim is to delve into the sacred realm called "art", the computer was supposed to have no role to play. For this aim, we need to discuss the future of art education from three different perspectives: art, computer, and education.

1. はじめに

現代は高度情報化社会と言われているが、教育の分野においてもコンピュータの積極的活用が望まれている。本学院では１２０インチのリア式ツイン・プロジェクタを備えたメディアセンタを開設し、コンピュータを活用した新しい学習環境の創造を積極的に推進してきた。すでに日本史授業に画像データベースを応用し顕著な成果をおさめている。ここから得たノウハウを美術教育にも応用し、マルチメディア授業の効果を一層高めることが本研究の目的である。

しかしながら、日本史教育と美術教育とでは、その目的とするところに著しい差があり、必然的にアプローチも異なったものにならざるを得ない。とくに、美術教育においては、教授者と学習者の間で、個人の感性が著しく異なる場合が多いため、学習者の感性を引き出し、教授者と同じレベルに育てるには相当な困難を伴う。最近、感性情報処理が一段と脚光を浴びてきているが、研究の途についたばかりで、未だ感性の本質を捕らえるにはいたっていない状況である。本稿では、美術教育という、従来コンピュータが入りこむことが困難であった感性的な分野に、マルチメディアを利用する教育手法について述べている。

2. 美術教育へのコンピュータ導入の難しさ

一般に、科学技術と芸術とは相反する立場にある。科学技術が客観的、論理的、定量的、であるのに対して、芸術は主観的、直感的、定性的である。現代の科学技術の粋といえるコンピュータと美術の関係も然りである。表 1. に示すのが美術教育コンピュータ支援システム作成の際の目的と必要な要素技術である。

表１　コンピュータ支援美術教育システム

No.	目　的	達成手段	ｴｷｽﾊﾟｰﾄ能力	要素技術
1	美術に興味をもつ 感性ｲﾒｰｼﾞを育てる	感性ソフト	画家 感性イメージ	ファジィ ニューロ
2	五感に訴える 感性を刺激する	ﾏﾙﾁﾒﾃﾞｨｱ	教師、画家 システム操作	ﾏﾙﾁﾒﾃﾞｨｱ ＶＲ
3	データを分類する 効率よく提供する	画像ＤＢ	ｺﾝﾋﾟｭｰﾀ ＤＢ管理	知的ＤＢ 検索技術
4	ばらつきの無い教育 教師の負担軽減	ＣＡＥ シナリオ	教師 教育手法	学習方法 評価手法
5	ｸﾞﾛｰﾊﾞﾙな情報 国際的なＰＲ	ｲﾝﾄﾗﾈｯﾄ ｲﾝﾀｰﾈｯﾄ	ｺﾝﾋﾟｭｰﾀ 情報収集	ｴｰｼﾞｪﾝﾄ ﾈｯﾄﾜｰｸ

この表から解るように画家、コンピュータ技術者、教師がそれぞれ、専門分化したエキスパートであることもシステム化を難しくしている要因である。これらの専門分野のギャップをいかにコンピュータを利用して埋めるかが重要なポイントである。

3．美術教育におけるコンピュータ利用の長所

コンピュータ支援画像DBには次のような長所がある。

（1）バーチャルではあるが多くの画像を取り扱える。

（2）簡単に修正できる。（オリジナルを残したまま）

（3）拡大、縮小、比較が容易である。

（1）は重要で、言い換えれば実物無しで相応の効果をあげられるという事である。電子美術館などは典型的な例である。

4．マルチメディア教育方法

教育方法としては以下のような2段階の試験を行ない、結果をアンケートとして収集した。

試験① まず、私（飯田）の描いた絵を対象として受講生に

（1）従来のスライドによる授業

（2）実物を見せる（実際の絵を鑑賞）。

（3）画像DBによる授業

すべての授業終了後、それぞれのメディアとしての良否を比較アンケートした。 結果は、しごく当然といえるが、実物 ＞ コンピュータ画像＞ スライドの順となった。しかし、注目すべきは、ごく少数の受講生がコンピュータの方が実物より良いと答えている点にある。本物とは比較のしようもないが、とりあえず、きれいで扱いやすいのでメディアとしては良いという理由であろう。

次に、イメージの育成のための試験②として、2つのモデル画像と5つの画像の一覧比較により、同一イメージのものを選択させる方法を採った。条件として、絵画から受けるイメージは複合的要因によるため、表象的事項（ポーズ、人数、男女、色調等）によらず、各人の直感、感性で判断し、選択するように指示した図1がその一例である。合わせて、基本的な感性スケールを4つ用意しどのラベルが適切かを記入させるようにした。回答は5つのうち、最適：◎、適する：○、やや適する：△という優先順位をつけ、それぞれに重みづけをして、集計時に係数掛けしている。















図1　画像ＤＢによるイメージの評価方法

今回は受講対象が短大生で、かなり教材のレベルを高いものとしたため、アンケート結果にはかなりのバラツキがみられた。この結果を踏まえて、複合要因を分解し、例えば、最初は構図のみという単一要因で試験し、除々に要素を増やし複雑化していく、一種の強化学習のようなカリキュラムを考えている。

5．まとめと今後の予定

美術教育にコンピュータを導入する際の基礎研究として、実際の教育現場で、画家、教育者、コンピュータの専門家の間で美術教育における技術的課題を整理した。また、それらの課題をどう解決すべきかを検討した。これらは一つの要素技術ではとても解決できるはずもないが、ファジィ、ニューロ、エージェント等の知的情報処理技術がどうしても必要である。今後、これらを積極的に活用していきたい。

また、感性情報処理としてシステムを発展させていくには、どうしても、現状のコンピュータの限界を把握しておく必要がある。これらの限界をブレークスルーする将来のコンピュータには、ヒューマンメディアとして「人間の個性を感知し、それに適応する処理が行える」能力が必要不可欠であろう。具体的には日立造船(株)で進められている感性エージェントの研究等（本シンポジウムで発表）が参考になると思うので参照されたい。

今後の予定であるが、基礎研究は終了し、今年度は実務レベルでの研究に入る予定である。また、本校の特徴を活かした新たな調査テーマとして、次の3点を考えている。

1） 幼稚園から短大までの年代別の感性イメージの相違。

2） 海外協力校と国別の感性イメージの相違。

3） 大型スクリーンを用いてのマルチメディア美術教育の限界

6．謝辞とあとがき

本研究は文部省科研研究の一環として行われたが、画像DB、マルチメディアに関しては、日立造船（株）電子・制御システム事業部の木原氏に、教育の立場からは、摂南大、木下教授にご指導頂きました。紙面をかりて深謝の意を表します。また、貴重なデータ提供に協力願った受講生諸君にも心から謝意を示したい。これを機に、芸術に興味を持ち、感性豊かな「本物」を理解できる人間として育って欲しい。本研究がそのためのトリガーとなればと願っている。

＜連絡先＞

〒536 大阪市城東区古市　2 - 7 - 30

大阪信愛女学院短期大学　美術研究室

飯　田　　誠　ＴＥＬ(06) 939 - 4391

THE1-4

SAKANA (Search Agent for Kansei Applied Navigation Assistant)
感性情報処理を応用した画像データを検索キーに用いた、WWWナビゲーションシステム。
SAKANA (Search Agent for Kansei Applied Navigation Assistant)
A WWW navigation system using image data as search key applied of kansei infomation process

服部隆二† 藤吉 誠† 山崎秀城‡ 近藤邦雄‡
Ryuji Hattori† Makoto Fujiyoshi† Hideki Yamasaki‡ Kunio Kondou‡

†- 日立造船 技術研究所 ‡- 埼玉大学 工学部 情報工学科
†- Hitachizosen Technical Research Center
‡- Department of Infomation and Computer Science, Saitama University

概要

We propose the Web document searching system SAKANA that consists of network search agent and Kansei analysis agent for Image document on the World Wide Web. Kansei agent analyses color attribution of Image document and calculates Kansei degrees such like "temperture","clearness" automatically.we use the network agent so that we can construct Image Kansei attribute database for search on WWW server much easily. you can search WWW Image document from Kansei Attribute space by Java applet embeded in a Web page.

1 はじめに

インターネットの発達は、不特定多数人々への情報発信、ネットワークによる膨大な電子化された各種情報へのアクセスを可能にした。その中でも World Wide Web (WWW) は従来に比べ、かなり低コストで多様な形式での情報発信を可能にし、インターネット= WWW と言った認識を社会全般まで広げるにいたった。

一方 WWW の様な非定型的な情報源から、特定の要求に見合った情報を効率よく探すの事はリンクを辿っていくネットサーフィンのみでは極めて困難である。そこで Yahoo や Alta Vista、Lycos と言った WWW 上での情報検索エンジンが発展した。また WWW サーバーの中には特定のテーマに限定されるが、分類・整理され、内容に応じた URL へのリンクをまとめた Directory サービスも発展した。[5]

こうした従来の検索エンジンの対象は、テキスト情報を対象とした物であるが、WWW 上にある情報には、テキスト以外にも画像・音声等のデータも多く、そうしたデータを駆使して閲覧者の感性に訴えかける WWW Site も多い。こうした画像等のデータを検索に有効に活用すれば、WWW 上での情報検索をより便利になるであろう。本論文ではネットワークエージェント [3] [4] と感性情報処理 [1] を応用した WWW 上の画像検索システムについて提案・考察を進める。

2 システム構成

本システムの基本構成は3つのレイヤーとそこに収まる7つのエージェントモジュールからなる。(図 1)

各レイヤーの内容について以下の通りである。

User I/F ユーザーとの I/F 、ユーザーからの要求まとめて適切なパラメータとして Model Layer の Agent へ引き渡す。

System I/F System (WWW Server など) との I/F 、Model Layer からのリクエストに応じて、Network 上のリソースから必要なデータを取得して、それを Model layer の Agent へ送信する。

Model 人間の感性モデルや対象となる画像データに関する知識を保持して感性情報処理を利用して、画像の感性スケールを算出し、画像データに対する検索キーを決定する。

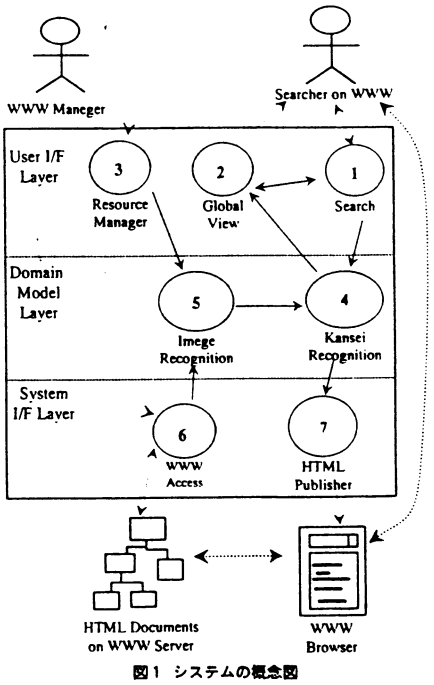


図1 システムの概念図

画像データの感性検索用キーの算出は対象となる画像の性質に強く依存する。そこで感性情報処理を行うモジュールを Model Layer として独立させ、システムを3層にした。これにより一番、変更、拡張が要求され

る感性モデルの部分を独立して修正できるので、システムに柔軟性、拡張性をもたらすことになる。またネットワーク越しに Model Layer を共有して、画像処理作業の CSCW への拡張も可能になるであろう。

また、各エージェントに関する役割・機能は以下の通りである。

Search Agent 感性検索用 (User I/F)

Global Viewer 感性スケールのブラウジング、検索補助用 (User I/F)

HTML Publisher 検索結果の HTML ファイル化 (User I/F)

Resource Maneger 感性検索キー Index の管理用 (User I/F)

Kansei Recognizer 感性スケールの保持・管理

Image Recognizer 画像特徴（色彩情報）の計算・管理

WWW Access Agent WWW 上の画像 Document を収集する Web Robot(System I/F)

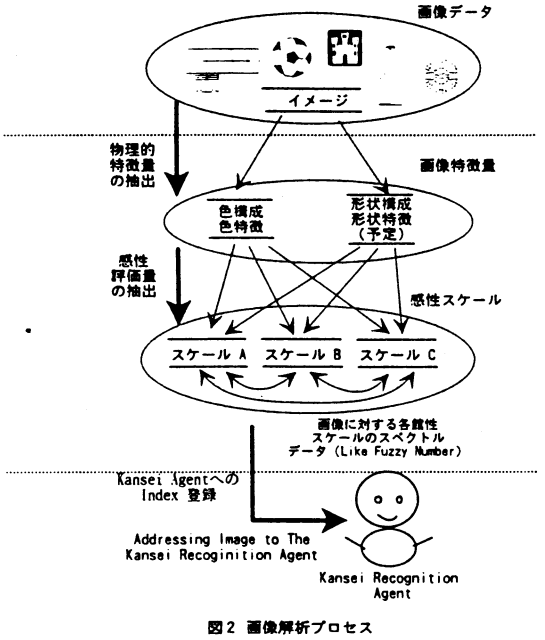


図2 画像解析プロセス

3 Model Layer の構成

Model Layer についてもう少し詳しく述べる。Model Layer は Kansei Recognizer からなる感性理解サブシステムと、Image Recognizer からなる画像理解サブシステムからなる。画像データに対するユーザーの感覚的な印象の度合いをあらわす値を感性スケール値と定義する。感性理解サブシステムにおいて、Kansei Recognizer は検索用キーとしての感性スケール値と画像データ URL との対の Index リストをユーザーの感性の知識として保持している。

また Image Recognizer は 算出した画像特徴（配色情報）[2] と画像の URL の対のリストを知識として持つ。また画像特徴から感性スケール値を計算して、Kansei Recognizer へ登録する役割も担う。(図2)

画像検索の場合、検索キーの Index の構成や検索そのもので、テキスト検索と違いユーザーの要求を定式的に扱うのは難しいので、膨大な量の WWW 上の画像データを効率よく、適切な形で分類するのは困難である。画像の感性情報処理で選られた知見をエージェントに知識として与え、こうしたプロセスをできる限り自動化させる事で、ユーザーの負担を軽減し、使い勝手の良い検索システムを構築する事ができる。

4 おわりに

感性情報処理を利用して、Web Server 上の画像データの色彩情報から検索用 Index を構築し、感性イメージで検索を行うためのシステムを提案し、それを実現するためのフレームワークについて、検討、考察を進めた。実装については、User I/F Layer は Java Applet として、Model Layer と System Layer は Java ベースの Object Request Broker である HORB を用いて行っている。

参考文献

[1] 黒田, 近藤, 猪原, 諸原, 中島, 竹内, 佐藤, 島田：テキスタイル画像データベースの感性検索とデザインのための統合化システムとその応用, 第9回 NICOGRAPH 論文集,pp.113-122 (1993).

[2] 諸原, 近藤, 佐藤, 島田：テキスタイルデザイン画像におけるイメージ・カラーの選定法情報処理学会論文誌,Vol.36,No2 pp.329-337,(1995).

[3] 木下、菅原：エージェント指向コンピューティング,SRC,(1995).

[4] 西田：ネットワーク社会とエージェント -擬人化された人工システム - , 情報処理,Vol.38,No1,pp.10-15 (1997).

[5] 服部：ネットワークエージェントによる情報収集と流通, 情報処理,Vol.38,No1,pp.30-36 (1997).

連絡先：〒 551 大阪市大正区船町 2-2-11
Tel 06-551-9472, Fax 06-551-9876
Email:hattori@elec.lab.hitachizosen.co.jp

ファジィ言語表現による似顔絵生成の試み

facial caricature drawing system based on a fuzzy linguistic expression

西野順二 Nishino Junji　島崎素子 Shimasaki Motoko　小高知宏 Odaka Tomohiro　小倉久和 Ogura Hisakazu

福井大学 工学部 情報工学科

Department of Information Science, Fukui University

Abstract : In this paper, we discuss how to generate facial caricature from linguistic expression which is the external and internal characteristics of a person, using linguistic information processing. For this purpose, a caricature drawing system which have seventeen parameters is constructed. This 17 dimensional parameter vector space is called facial space. Linguistic expressions, therefore, are defined as fuzzy subsets on the facial space. Linguistic combine operations are defined as fuzzy set operations. Examples of facial caricature are shown.

1 はじめに

本研究は似顔絵処理システムの構築を通して、知的情報処理における言語の役割について調べる事を目的としている。情報処理機器および通信インフラの高性能化にともない、日常的にいわば洪水ともいえるほどの情報がやりとりされている。この社会環境の中で、大量データの中から有用な情報を利用しやすい形へと再構成し提示するため、新しい情報処理の手法が研究されている。このようななかで、ファジィ理論に基づく知的情報処理 [1] や、Computing with Words[3] は、情報の持つ本質的な意味構造を抽出し利用するために、ファジィ理論を軸として「言語」に基づいた情報の表現と処理をめざして提案されている。

筆者らのグループはこれまで物理的な現実の事象と概念および言語との関係を、囲碁を対象として取り上げ考察を行なってきた [2, 6]。本研究では、あらたな対象として似顔絵を描くプロセスを取り上げ、言語表現と概念の関係が具体的な世界 (似顔絵空間) のなかで、どのような構造を持つか調べる事を試みた。似顔絵をコンピュータで生成するため、3章で説明する似顔絵システム [7] を構築した。このシステムでは、17個のパラメータから顔の絵を構成することができ、ある顔の様相は 17 次直積空間上の一点として表される。

人間が描く似顔絵は、単純な線で描かれているにもかかわらず、特徴をシンプルかつ確実にとらえ、さらにその特徴を誇張 (デフォルメ) することができる。似顔絵生成とデフォルメのプロセスについては、平均顔からの偏差を用いたアプローチ (Piccaso システム [8]) が提案されている。しかし、実際に描かれる似顔絵は、必ずしも平均からの偏差のある部位を強調したものではなく、似顔絵の対象者の個性や日常といった画像以外の部分つまり、環境あるいは状況のコンテクストの影響が強い。このような影響を数値的な関係としてシステム構造表現する事は難しく、むしろ言語的で大雑把な表現の方が適切であると考えられる。

このような考え方によって、似顔絵をファジィ集合で表現することについては、岩下ら [5] の研究などがある。このなかでは、主として、よりイメージに近い似顔絵の獲得を主眼に、鼻や目の大きさやバランスと言った詳細な情報をファジィ集合を用いて表現し、適切な言語ヘッジを探すことで似顔絵を生成している。

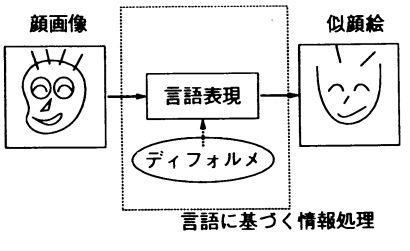


図 1: 言語に基づく似顔絵作成プロセスの概念図

本研究で用いた、言語に基づいて人間が似顔絵を描くプロセスを図 1に示す。図に示すように、まず、対象者の顔の様子 (顔画像) から、大雑把なイメージを言語表現として抽出する。そして、対象者のプロフィー

ルなど画像外の情報を言語的に表現し、イメージの表現と融合する。最後に、これらを実際に似顔絵として生成する。

本研究では、図1の後半部分となる言語表現から似顔絵を生成するシステムを構築した。今回は、前半のプロセス、すなわち顔写真から特徴を理解してプロフィールと融合する部分は人間が行うこととし、言葉で表現された特徴を与える事にした。

2 特徴の言語表現

人間の顔の特徴は単に目や鼻の造形といった位置情報の集積ではなく、より広い意味を持った高次の情報である。例えば「目が大きい」という特徴を表す言葉の意味には、文字通りの目の大きさだけでなく、他の部位との位置関係や顔全体に対する比率など、複数の情報が含まれている。このような複合概念を表現するために、(後で述べる) 似顔絵顔を表す１７次元パラメータ直積空間上の、多次元ファジィ集合として表現する。

特徴を表現する言葉は人それぞれ違っており、数多くある。システムが扱う言葉を特定するため、予備的な実験を行なった。実験の方法は、(１) 複数の似顔絵 (文献 [4] など) を被験者に提示し、(２) その顔を表現する言葉を記述してもらい、(３) 集計するという手順で行なった。この結果から、顔を表現する言葉は大きく３つのレベルに分けられる事が分かったまず目や口などの部分造形についての具体的な記述のレベル、つぎに顔全体に対する雰囲気の記述のレベル、そして表情の記述のレベルの３つである。今回は表情のレベルについては扱っていない。これら、顔の各部位の特徴や雰囲気を表現した言葉を特徴語と呼ぶことにする。予備実験で得られた特徴語のうち、実験で扱ったものを表1に示す。

また、基本的な特徴語だけでは表現の制約が厳しすぎるので、表現力を増すために修飾語を用いる。修飾語として、「やや」 $(yaya(\mu(x)) = \mu^{1/2}(x))$ と「とても」 $(totemo(\mu(x)) = \mu^2(x))$ を使用することにした。

ファジィ集合の同定は次のようにして行なった。

1) 最も特徴語にふさわしい顔を作り、このときのパラメータ値の組 (１７次元ベクトル) をその語の代表値とする。

2) １７のうち１つのパラメータ値を変化させ、印象の変わらない下限 x_2 と上限 x_3 を判定する。

3) さらに値を変化させ、特徴語に当てはまるといえる限界値の下限 x_1 と上限 x_4 を判定し、図2に示すようなファジィ集合を生成する。

4) 2と3を残り１６パラメータについて繰り返す。

具体的なレベル	目	大きい, 小さい, 細い, 丸い, タレ目, ツリ目
	鼻	大きい, 小さい, 低い, 高い
	口	大きい, 小さい
	眉	たれている, 上がり気味
	髪	ロング, セミロング, ショート
	輪郭	丸顔, 面長, 四角, 三角
雰囲気	雰囲気	かわいい, きつい, やさしい, 活発, おとなしい, 知的

表 1: 特徴語とその分類

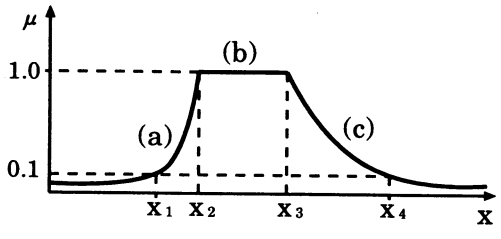


図 2: メンバーシップ関数

今回、メンバーシップ関数には、すそが広がっている形を用いており、各点のグレード値は必ず0より大きい。これはファジィ集合演算を行ったとき、その結果が空集合となることを防ぐためである。x_1, x_2, x_3, x_4 の値からメンバーシップ関数を求める式を以下に示す。

$$\mu_A(x) = \begin{cases} e^{\frac{log_e 0.1(x-x_2)}{x_1-x_2}} & x < x_2 \\ 1.0 & x_2 \leq x \leq x_3 \\ e^{\frac{log_e 0.1(x-x_3)}{x_4-x_3}} & x > x_3 \end{cases} \quad (1)$$

例として、「かわいい」に対応するファジィ集合のパラメータをを表2に示す。

3 似顔絵生成システム

3.1 似顔絵モデル

本研究で扱う顔は、目、鼻、口、眉、髪、輪郭の6つの部品から成っている。これらの部品の描画は、表2に示した１７個のパラメータによりコントロールされる。これらのパラメータはおもに図3に示したよう

パラメータ名	x_1	x_2	x_3	x_4
瞳の大きさ	26	35	35	40
目の傾き	-10	-4	-4	7
目の距離	97	100	100	120
目の大きさ	50	62	62	70
鼻の長さ	35	51	51	55
鼻の高さ	15	30	30	37
鼻の位置	0	10	10	18
口の大きさ	20	43	43	58
口の位置	16	20	20	28
顔の幅	30	36	36	40
顎の長さ	51	55	55	63
顔の形	16	20	20	22
目と眉の幅	14	16	16	30
眉の上がり具合	20	26	26	30
髪の長さ	140	200	300	300
前髪の長さ	18	22	22	30
おでこの幅	-4	0	0	9

表 2: 「かわいい」に対するファジィ集合

な、各部分の長さを変更し、よってその表情および、顔の形態が変化する。パラメータは実数上で定義されるが、内部的には整数値に切捨てて利用している。

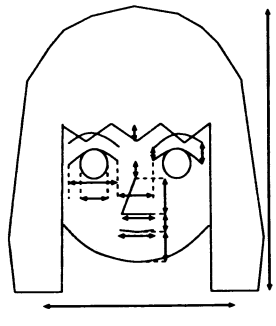


図 3: パラメータの種類

3.2 似顔絵生成システム

システムは、図4に示した入力部、演算部、出力部、特徴語知識から構成されている。特徴語知識は、特徴語とそれに対応するファジィ集合を格納したデータベースである。

入力部では、表1に示した特徴語を選択し、選択された語は入力語ファイルを介して演算部に渡される。演算部では 受け取った特徴語をキーとして特徴語知識からファジィ集合を読み込、ファジィ演算を行い、述べる処理を通じて１７個のパラメータ値を決定する。このパラメータ値は、出力部に渡されたのち描画座標への変換演算を経て似顔絵の描画に用いられる。

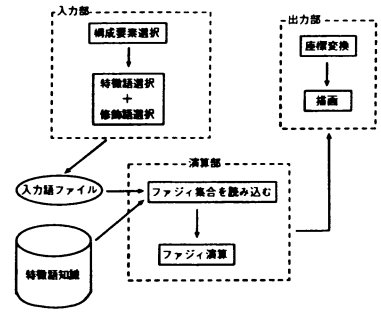


図 4: システム構成図

このシステムにおいて、複数入力された特徴は互いに連言の関係にあるとして扱う。すなわち複数の特徴を同時に満足するような顔を生成するために、「かつ」を表す (MIN による) ファジィ集合積演算を用いている。出力部へ渡すため、演算結果のファジィ集合でグレードの最大値を与える点をもとめパラメータ値とする。ここで、特徴語のファジィ集合は１７次直積空間上にあるため、ファジィ集合演算もこの直積空間上で行うが、今回は簡単のため各一つのパラメータ毎の積演算を行ない円筒拡張した結果を直積に再変換した。このため、演算結果は１７次空間上で行なった場合と多少異なっている。

4 実験

主にシステムの動作を確認するため次のような実験を行なった。

(1) 被験者が写真を見て作成した特徴語から似顔絵を生成し、元の写真と比較する。

(2) 被験者が写真を見て特徴語から生成した似顔絵と、写真を見て直接パラメータを指定して作った似顔絵を比較する。

(3) 特徴語と、それから生成した似顔絵を見て作成した特徴語を比較する。

(4) 特徴語の組合せを変えながら似顔絵を生成し特徴語の意味を比較する。

ここでは、(4) の例を図 5に示す。言葉の意味にあった、ほぼ期待どおりの特徴を反映した顔が得られている。

この結果を見ると各言葉のもつ意味が、言語的演算 (「かつ」) に対してもある種の制限を与えていることが分かる。たとえば表 3のようにまとめると、「きつい」顔の場合には「目が大きい」という特徴語との

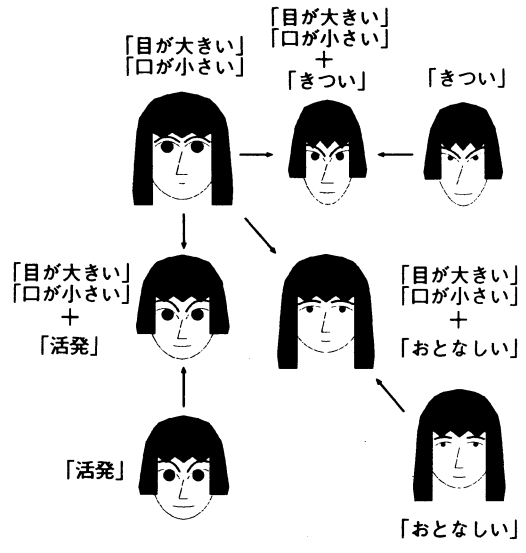


図 5: 実行例

連言による効果が、両特徴の中間値として現われて来る。これと比較して、一方の「おとなしい」顔の場合には「目が大きい」の効果が弱く、連言による顔「目が大きい＋おとなしい」もより「おとなしい」に近い目の大きさとなっている。同様のことが、「活発」顔の連言における口の大きさと「おとなしい」との比較にも見られる。これは、演算の方法を変えているからではなく、被演算ファジィ集合の形状が違うことが原因であるが、言語とファジィ集合および演算とを対応させて考えるときに興味深い。

5 おわりに

似顔絵を表現するために、17 次元パラメータ空間 (似顔絵空間) を設定し、顔を表現する特徴語をその空間上のファジィ集合とすることにより、絵と言葉の意味との対応付けを試みた。さらに集合演算を加え、言語に基づいて似顔絵を生成するシステムを構築した。このシステム上でいくつかの実験を行ない、言葉による入力から似顔絵を生成できることを確認した。

これまで、言語とファジィに関する研究の多くが象徴的な小さい例にとどまっていたのに対し、似顔絵空間を設定することで具体的な意味の分析と言語の関係について調べる方法論の可能性を見ることができた。これは、言語使用域を似顔絵に限定したことになり、言語のシステムと意味のシステム構造との対応関係についての考察がしやすくなったことを意味する。

	目が大きい	連言	きつい
瞳の大きさ	40	26	16

	目が大きい	連言	おとなしい
瞳の大きさ	40	20	14

	口が小さい	連言	おとなしい
口の大きさ	20	35	44

	口が小さい	連言	活発
口の大きさ	20	60	76

表 3: パラメータ値の変化

今後は、顔モデルの改良や特徴表現語の拡張といった基本的なシステムの充実とともに、デフォルメプロセスの実現と、写真から言語表現への変換プロセスの実現が課題である。後者のプロセスの実現のためには、似顔絵に言語使用域を限定した言語のシステムについてさらに検討を加え、状況／話者に応じた意味の変化や演算システムの変化を扱う必要がある。

参考文献

[1] M.Sugeno. Toward intelligent computing. In *5Th. IFSA World Congress*, 6 1993.

[2] Junji Nishino and Michio Sugeno. Fuzzy programs based on context of situation. In *FUZZ-IEEE/IFES 95*, pages 765–772, 1995.

[3] L. A. Zadeh. Fuzzy logic = computing with words. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 4:103–111, 1996.

[4] 山藤章二. 顔事典. 朝日新聞社, 1995.

[5] 岩下 志乃. 言葉を用いた似顔絵の作成. In 第 *12* 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pages 455–458. 日本ファジィ学会, 1996.

[6] 西野, 小高, and 小倉. 囲碁の着手意味付けシステム. In 第１２回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pages 467–470. 日本ファジィ学会, 1996.

[7] 島崎素子. ファジィ言語表現による似顔絵生成の試み. 卒業論文, 福井大学 情報工学科, 1997.

[8] 奥水大和. 似顔絵とコンピュータ. In 第７回日本顔学会イブニングセミナー：リーフレット. 日本顔学会, Jan. 1997.

問い合わせ先：
〒９１０ 福井市文京３－９－１
福井大学工学部情報工学科
島崎素子, 西野順二
{nishino,simasaki}@rook.fuis.fukui-u.ac.jp
TEL: 0776-27-8968(ダイアルイン)
FAX: 0776-27-8751(事務室)

THE2-2

顔表情を用いた人間とコンピュータとの会話 － 道に迷った場を例にして －

Communication with Facial Expressions between Human and Computer －In the Case of Losing Oneself －

鬼沢武久† 枡田行央‡

Takehisa ONISAWA† Yukiou MASUDA‡

† 筑波大学構造工学系 Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba

‡ 筑波大学理工学研究科 Master's Program in Science and Engineering, University of Tsukuba

（現在、松下電器産業（株）、Currently, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.）

Abstract － This paper considers a route decision system which reaches an instructed destination as an example of human-computer interaction by the use of verbal information and non-verbal information, i.e., facial expressions. The system is given an instructed destination by linguistic terms. Fuzziness inherent in linguistic terms is dealt with by a fuzzy set. The system expresses emotions through facial expressions according to the system's situation. Facial expressions are dealt with by a neural network model. The system has also personified personality. The system's response is dependent on the personality. The paper shows that the soft computing technology is useful to human-computer interaction.

1．はじめに

人間同士のコミュニケーションでは、バーバル情報と呼ばれている言語情報以外に身振り、手振り、顔の表情、声のトーンなどのノン・バーバル情報[1]を統合的に処理してコミュニケーションに役立てている。そして、バーバル情報とノン・バーバル情報は補完的な役割を果たしており、両者がうまく活用されることによって円滑なコミュニケーションが行われる[2]。しかも、バーバル情報にしろ、ノン・バーバル情報にしろ、あいまいさが含まれているにもかかわらず、人間はそれを上手に解釈してコミュニケーションに役立てている。一方、人間とコンピュータとのコミュニケーションでは、マルチメディア技術が発達してきているとはいえ、ノン・バーバル情報はまだ少なく、あいまいさを許容していない。人間とコンピュータとのコミュニケーションを円滑なものにするためには、ノン・バーバルな情報を付加するとともにあいまいさを許容することが必要である。

本稿では、ソフトコンピューティング技術が人間とコンピュータとの会話にとって有効であることを示すために、言葉（バーバル情報）と顔の表情（ノン・バーバル情報）の統合の場として、目的地が言葉で与えられたとき、その道順を理解、処理、実行する経路決定システム[3]を考える。そして人間とシステムとのコミュニケーション[4]では、バーバル情報以外に、システムの状態に応じた顔の表情を表現することによって、人間にとって感覚的に把握しやすい視覚情報を提供し、より円滑なコミュニケーションを実現する。また、システムに擬人的に性格を付与し、その性格の違いに応じて応答のしかたを変えるなど、人間同士のコミュニケーションを模倣している。これらのシステムは、筆者らが先に提案したシステム[3][4]と比べるとコミュニケーションの内容が豊富になっている。

2． 経路決定システム

2．1 教示獲得

2．1．1 初期教示入力部

初期教示入力部は、出発地点から目的地までの道順の教示をすべて自然言語で教示者が与える部分である。教示内容に足りない情報があれば、システムは教示者にその情報を質問する。教示者が教示に用いる言葉としては、「ちょっとだけ進む」、「約ｘＫｍ進む」、「数Ｋｍ進む」、「ずっと行く」や「左に曲がる」、「公園を探す」、「交差点を見つける」などがある。

2．1．2 コミュニケーション部

初期教示入力部で与えられた教示をもとにして教示を実行した結果、見つかるはずの特徴物（建物、交差点、ポストなど）がみつからないなど教示が実行できなくなった、つまり、道に迷った場合に、その特徴物までの道順を尋ねるなど、目的地へ行くのに必要な道順について教示者とやりとりする部分がコミュニケーション部である。再教示を受け、その教示を実行し、特徴物を見つけた後の道順は以前教示された道順を参考にして進んでいく。その他、

コミュニケーション部分では、第三者側からシステムに対する地図情報の問い合わせに関する応答も行える。その応答のしかたはシステムに付与された性格に依存する。これらは筆者らが先に提案したシステム[3][4]では備わっていない機能である。

2．1．3　ファジネスの扱い

本システムでは、教示に用いられる自然言語に含まれる意味のあいまいさを図1、図2に示すようなファジィ集合を使って表現する。

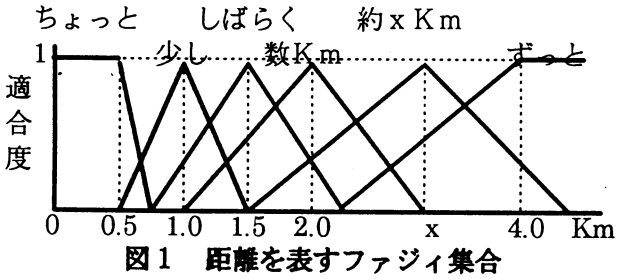


図1　距離を表すファジィ集合

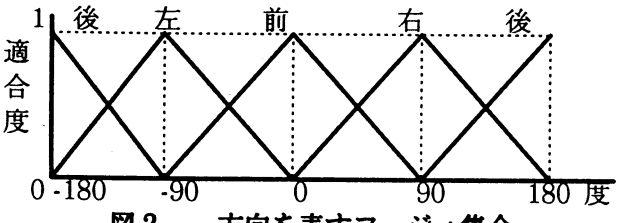


図2　　方向を表すファジィ集合

2．1．4　形態素解析

教示者から自然言語で与えられる教示を理解するために、本システムでは形態素解析[5]を行っている。本システムは、あらかじめ教示文で使用される単語を登録した辞書を持っており、それを用いて単語単位の認識を行っている。

2．2　教示実行部

教示実行部では、経路を走行する際にセンサ（本研究では、システムがいる地点から半径２５０ｍ以内の領域に入る特徴物は認知できるとしている）に入る町の特徴物の情報を地図情報として記憶する。本稿では、交差点を特徴地点として抽出し、自分の位置を特定する。なおシステムは、環境中で自分がいる周囲の地図情報のみしか得ることができない。

システムは教示情報と地図情報をもとにして実行の経路計画を立てる。つまり、はじめて行く地点は教示情報を用い、既に地図情報としてわかっている地点に関しては地図情報として得た情報を使って経路を決定する。

教示実行部では、「右に曲がる」や「約１Ｋｍ進む」などの教示と自分の周囲から得た地図情報とを比較して行動を決定する。この比較には、与えられた教示の意味を表すファジィ集合をＡ、システムが知覚した距離や方向を表すファジィ集合をＢとして、以下に定義される２つのファジィ集合の適合度を使用する。

$$DM = \frac{1}{2}\{Sup(A \cap B) + Inf(A \cup B^C)\} \qquad (1)$$

B^C は B の補集合であり、∩と∪はそれぞれ、ファジィ集合の共通集合と和集合である。

適合度はいくつかの経路の候補に優先度をつける、または、与えられたしきい値と適合度を比較することによって経路を選択するために用いられる。

2．3　表情表現部

本稿では、６つの基本感情である、喜び、悲しみ、驚き、怒り、恐れ（不安）、嫌悪を考え、それぞれをシステムの状況に応じて顔の表情を用いて表現する。図３に示すように教示実行部から「距離に対する適合度」、「システムがこれまでに歩いた距離」、「現在地から目的地までの距離」、「目的地に到着」などの情報を得て、喜び、恐れ（不安）の感情の程度をファジィ推論で求める。そのファジィルールの一例を表１に示す。また疲労は感情ではないが、実際に歩いた距離を d_1、出発地点から目標値までの推定距離を d_2 とすると、（２）式を用いて汗の粒の大きさを決める。

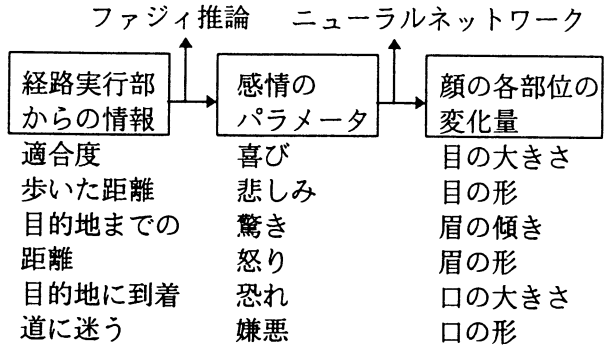


図3　表情表現部

表1　適合度が増加中の場合の喜びの程度

適合度	目的地までの距離				
	VS	S	M	B	VB
VS	M	M	S	VS	VS
S	M	M	S	S	VS
M	B	B	M	S	S
B	VB	B	B	M	M
VB	VB	VB	B	M	M

VS:very small, S:small, M:medium, B:big, VB:very big

$$s = \begin{cases} 0.0, & d_1 \le d_2 \\ \dfrac{d_1 - d_2}{2 \times d_2}, & d_2 < d_1 \le 3 \times d_2 \\ 1.0, & 3 \times d_2 < d_1 \end{cases} \qquad (2)$$

経路決定システムは道に迷いそうになると第三者に道を尋ねるが、教示実行中のシステムの状況に応じて表現される顔の表情をみて第三者から話しかけることもできる。このとき、会話の内容によりそのつど対応する感情が喚起され、それに伴い顔の表情も変化する。表2に感情が変化するケースとの対応について示す。また擬人的にシステムに性格として、各感情の感じやすさを敏感、普通、鈍感のどれかを持たせる。具体的にはファジィ推論によって推論された感情の程度と比較するためにしきい値を設定している（敏感＝0.3、普通＝0.5、鈍感＝0.7）。敏感だと感情を感じやすくなり、鈍感にすると感じにくくなる。例えば、怒りを敏感に設定するとすぐに怒る短気な人、不安を敏感に設定するとすぐに道を確かめるなど慎重な性格を擬人的にシステムに持たせることができる。また、表3に示すように会話の内容もシステムの感情により変化する。

表2　感情が変化するケースと対応する感情

感情が変化するケース	喚起され得る感情
いきなり話しかけられた	驚き
相手に道を教えてもらえない	怒り、悲しみ、嫌悪、恐れ
道を教わった	喜び
道を間違えていることが判明	驚き、悲しみ
何度もしつこく話しかけられる	怒り、嫌悪

表3　システムの感情による会話の変化

システムの感情	会話の変化
普通の場合	第三者がシステムに道を尋ねることができる
不安を感じている	システムが道を尋ねるまたは、道があっているか確認する
疲労している	システムが不平をこぼすまた、怒り、嫌悪の感情を感じやすくなる
怒っている	会話をシステム側から打ち切って立ち去る
喜んでいる	他者に対して寛大になる（怒り、嫌悪を感じにくくなる）

3．シミュレーション

図4の地図で、以下の教示を経路決定システムに与える。（1）少し先の交差点を右に曲がる。（2）しばらく進んで左に曲がる。（3）少し行って右に曲がる。（4）少し行ってカラオケ屋を見つける。指示された経路は、Start－A－B－C－G－H－Goalである。この場合、教示者とシステムの「少し」に対する感覚が異なったために、経路決定システムは、交差点Hまで進まず、手前の交差点Cで曲がる。経路決定システムは地点Eまで進むが、教示（4）のカラオケ屋が見つからず、不安な表情を表し、「カラオケ屋への行き方を教えて下さい」とカラオケ屋への道を尋ねる。ここで、（1）後ろにちょっと行くと教えた段階で、道を間違えていたことがわかったので、E'のような表情を示す。そして、（2）右に曲がって1KM進むと教えてやると、正しい道順

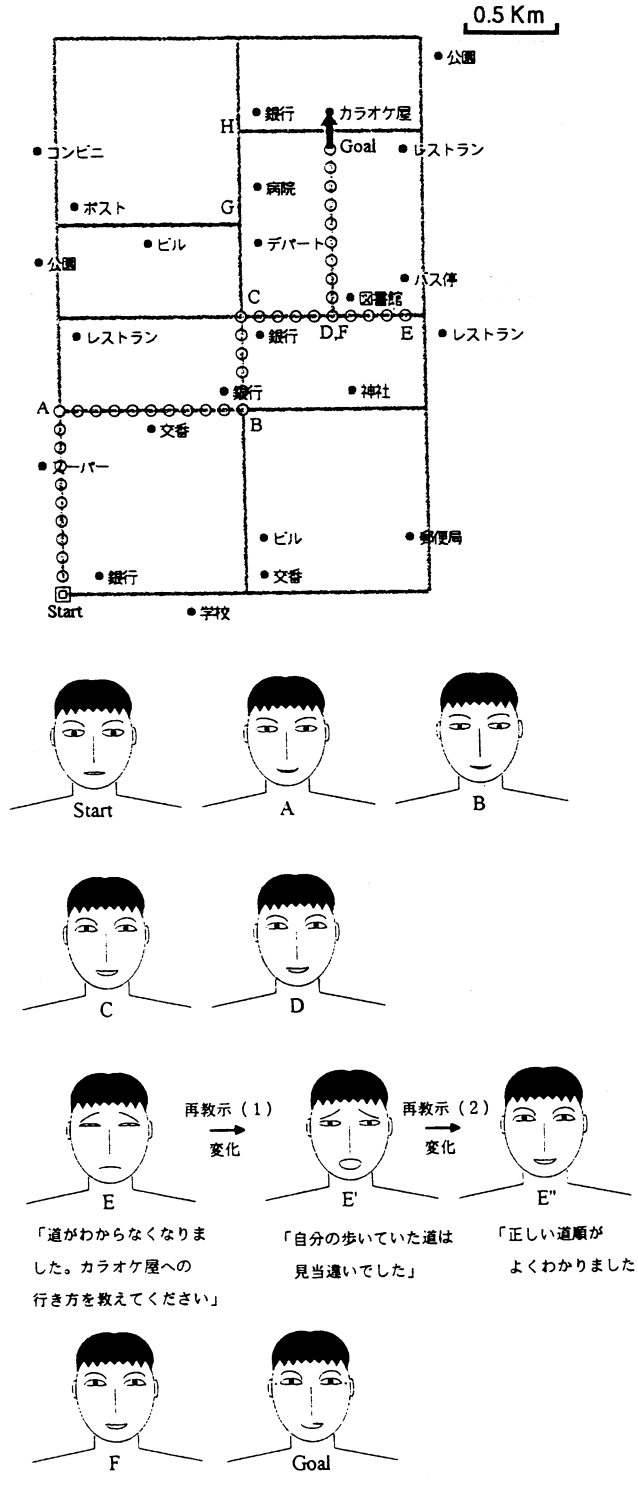


図4　シミュレーション例1

がわかり E"のような喜びの表情を示す。目的地に到着して喜びの表情を示すが、かなり長い距離を歩いたために汗を流している。なおこの例では、各感情の感じやすさを「普通」と設定している。

上と同じ教示例で、交差点Dを越えたところで第三者から話しかけてみる。そのときの表情を図5に示す。突然話しかけられたことにより、驚きの表情D'を示す。この場合、システムはカラオケ屋が見つからず、不安を感じているので、話しかけてきた人間に本当にこの先にカラオケ屋があるかどうかの確認を行っている。ここで故意に道の情報を教えてやらないと、システムは D"のように怒りの表情をみせる。この場合も各感情の感じやすさを「普通」と設定している。

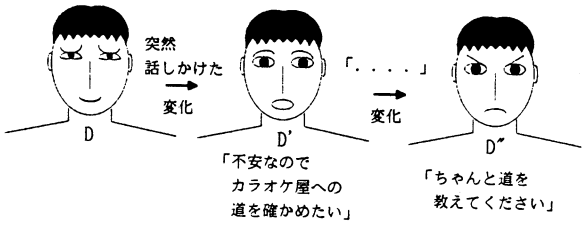


図5　シミュレーション例2

上と同じ教示例で、システムの性格として怒りの感じやすさを「鈍感」に、恐れの感じやすさを「敏感」に設定する。そのときの表情を図6に示す。D地点で突然話しかけると驚きの表情を示すが、システムの質問に応じなかったところ、怒りの表情を示さず、嫌悪、悲しみ、恐れなどが入り混じった表情を表している。しかし、恐れ（不安）を感じやすくしているため、再度、「道を教えてください」と相手に尋ねている。

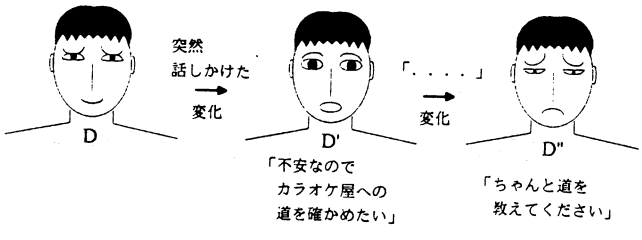


図6　シミュレーション例3

上と同じ教示例で、驚きの感じやすさと恐れの感じやすさを「鈍感」にする。そのときの表情を図7に示す。突然、第三者から話しかけられてもシステムは驚かず、また、楽観的なため、道を確認することもせず、逆に、話しかけてきた相手に道を教えようとしている。

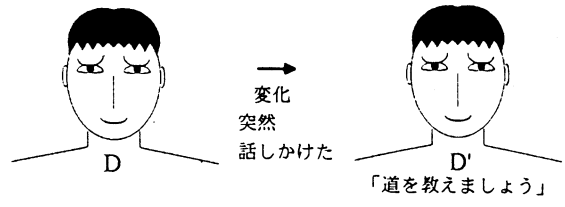


図7　シミュレーション例4

4．おわりに

本稿では、ソフトコンピューティング技術を用いた人間とコンピュータとの会話の例として、ある目的地までの道順が言葉で与えられたとき、目的地に到達するシステムについて述べた。また、システムの状況に応じて、システムの感情を顔の表情を使って表すことによって視覚情報を与えた。本稿では、さらにシステムに擬人的に性格を付与し、その性格によって応答のしかたを変えている。道順の教示という極めて限定された場ではあったが、言葉と顔の表情を用いた会話の一例であり、あいまいさを許容しなくては実現できない場である。言葉に対する理解の違いから道に迷う例もあり、人間同士の対面コミュニケーションの一つの側面を示すこともできたと考えられる。

参考文献

[1] 黒川隆夫：ノンバーバルインタフェース、オーム社、1994
[2] 樋口一枝、戸田正直：コミュニケーションの認知科学、人工知能学会誌、Vol.7, No.5, pp.764-771, 1992
[3] 岩田満、鬼沢武久：顔の表情表現と結びつけた経路決定システム、日本ファジィ学会誌、Vol.8, No.3, pp.532-540, 1996
[4] T.Onisawa, Y.Masuda and M.Iwata: A Route Decision System with Human Interaction and Facial Expression Model, Proc. of the 1996 Int'l Fuzzy Systems and Intelligent Control Conference, pp.137-146, 1996
[5] 伊藤雅俊：日本語処理系学、C MAGAZINE 9, 10合併号、ソフトバンク社、pp.22/52, 1995

連絡先：〒305　つくば市天王台１－１－１
筑波大学構造工学系　鬼沢武久
TEL　0298 53 5060　FAX　0298 53 6471
E-mail: onisawa@esys.tsukuba.ac.jp

感情を考慮した絵の言語表現
Linguistic Expression of Picture Using Inference Model of Human Emotions

岩田 満
Mitsuru IWATA

鬼沢武久
Takehisa ONISAWA

筑波大学大学院工学研究科
Doctoral Program in Engineering,
University of Tsukuba

筑波大学構造工学系
Institute of Engineering Mechanics,
University of Tsukuba

Abstract: This paper describes a model which creates the linguistic representation about some objects drawn in a picture. Fuzzy sets are employed in the reasoning part to deal with fuzziness inherent in linguistic representations. The model infers the subjective matter on the object, e.g., the relation between objects, from the objective picture information, e.g., the spatial distance. Some simulation results show that this model can create the appropriate linguistic representations about images and the effectiveness of this model is confirmed.

1 はじめに

人間は画像情報を，経験や知識を柔軟に用いて認識，理解をし，内容を言語で表現することが容易にできる．ところが，コンピュータ上で画像の内容を処理し，それを人間が理解できるように言語で表現することは非常に困難である．

本研究では，人間が行うような柔軟な画像処理をコンピュータ上で実現する第一段階として，絵に登場するオブジェクトに関する客観的な情報から主観的な事柄を推論し，その言語表現を生成するモデルを構築する．そして，構築したモデルを用いて幾つかのシミュレーションを行い，本モデルの有効性を確認する．本研究では，文献[1]で行われているオブジェクトの空間的配置の言語表現以外にも，行動や感情についての推論もあわせて行っている．

2 モデルの構造

構築する言語表現生成モデルは，図 1 に示すように絵情報処理部，関係推論部，言語表現生成部の 3 つの構成要素からなる．

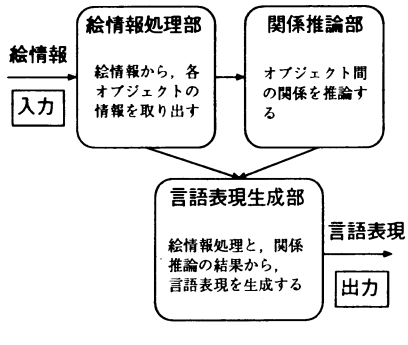


図 1 モデルの構造

2.1 絵情報

システムへの入力は，画像に登場するオブジェクトの情報をあらかじめ記述したものである．この情報を本研究では絵情報と呼ぶ．入力する絵情報は表 1 のような，オブジェクトに関する客観的な情報である．

表 1 絵情報

項目	内容	項目	内容
Name	名前	EyeShape	目の形
Location	位置	EyebrowSlant	眉の傾き
Direction	向き	EyebrowShape	眉の形
Area/Size	幅と高さ	MouthSize	口の大きさ
EyeSize	目の大きさ	MouthShape	口の形

2.2 絵情報処理部

絵情報処理部では座標の変換と，表情から感情への変換を行う．

2.2.1 座標の変換

奥行きのある画像では，二次元の画像上の距離と実際の距離とは異なっている．そこで遠近法を考慮した座標の変換を行う．ここでは，画像に図 2 のようなメッシュを描き，二次元画像上のオブジェクトの位置 (x, y) と向き θ をそれぞれメッシュ上の位置と向きに変換している．位置と向きの原点と正方向はそれぞれ，図に示す通りである．

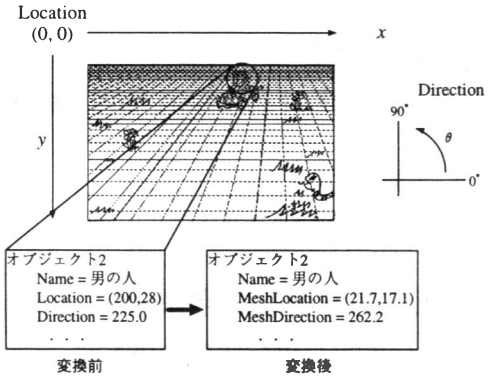


図 2　座標の変換

2.2.2　表情から感情への変換

オブジェクトの表情は 6 種類のパラメータ「目の大きさ」,「目の形」,「眉の傾き」,「眉の形」,「口の大きさ」,「口の形」で表される．これらのパラメータから，6 種類の感情「喜び」,「悲しみ」,「驚き」,「怒り」,「恐れ」,「嫌悪」[2]の程度を推察する．感情の推察には，アンケートより得られた対応情報を BP 学習法で学習させた 6 つのニューラルネットワークを使用している[3].

2.3　関係推論部

関係推論部では，二つのオブジェクトの位置関係などの導出を行う．ここでは，距離，方向，可視程度，識別程度，行動についての推論を行っている．

2.3.1　距離と方向

オブジェクト間の距離と方向は，オブジェクトのメッシュ上の位置と向きから計算する．例として，二つのオブジェクト A と B のメッシュ上での位置と向きを図 3 のようにとる．この時，オブジェクト A-B 間の距離は図上の d であり，オブジェクト B の配置方向は θ_1，オブジェクト A から見た B の配置方向は θ_2 である．また，オブジェクト A から見た B の向きは θ_3 である．図の例の場合，オブジェクト B はオブジェクト A の正面にあり(θ_2)，対面している(θ_3).

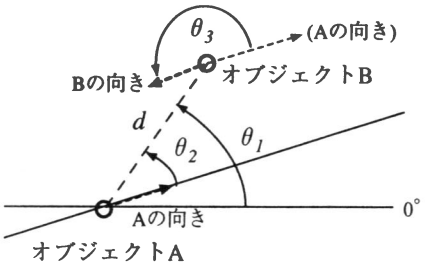


図 3　距離と方向

2.3.2　可視程度

可視程度は，相手に気付いている度合いを表す．ここでは，オブジェクト間の距離 d と相手の配置方向 θ_2 を入力とした表 2 のルールを使用し，ファジィ推論[4]を行い，最後に重心法[4]による非ファジィ化を行ってクリスプ値を得る．

表 2　可視程度のルール

距離	相手の配置方向		
	正面	やや正面	正面でない
かなり近い	見える	見える	見えない
近い	見える	やや見える	見えない
中くらい	やや見える	やや見える	見えない
遠い	やや見える	見えない	見えない
かなり遠い	見えない	見えない	見えない

2.3.3　識別程度

識別程度は，相手が誰か(何か)を見分けることができる度合いを表す．推論には，可視程度と相手の向き θ_3 を入力とした表 3 のルールを使用し，ファジィ推論での導出を行う．識別程度は，お互いが向かい合っているほど高い値となる．

表 3　識別程度のルール

可視程度	相手の向き		
	対面	やや対面	対面でない
見える	識別できる	識別できる	識別できない
やや見える	識別できる	やや識別できる	識別できない
見えない	識別できない	識別できない	識別できない

2.3.4　行動

ここで推論する行動とは，声をかける，車に乗るなど二つのオブジェクトによって起こされる行動である．行動は，ルールベース推論によって推論される．図 4 にルールの一例を示す．

ルール記述中の「かなり近い」,「近い」,「下」などは後で説明する言語表現(ファジィ・ラベル)である．ここでの推論はファジィ推論とは異なり，ルール全ての類似度を計算し，最も類似度の高いルール 1 つを選択するという手順で行われる．

ルール 1
IF
　オブジェクト名 1=「男の人」
　オブジェクト名 2=「車」
　距離=「かなり近い」or「近い」
　配置方向=「下」
THEN
　行動=「車に乗る」

図 4　ルールの例

2.4　言語表現生成部

言語表現生成部では，絵情報処理部と関係推論部との結果から言語表現を生成する．言語表現として生成する内容は，

- 場所の説明
- オブジェクトのプロパティ
- 推論されたオブジェクトの関係

である．

2.4.1　場所の説明

場所の説明は，道路や草原など背景要素のうち，面積の最も大きなものや絵の中心にあるものを出力している．

2.4.2　オブジェクトのプロパティと関係

オブジェクトのプロパティと関係については，以下の表 4 に示すように言語への変換(ファジィ・ラベルへの分類)を行う．

表 4　ファジィ・ラベル

項目	ファジィ・ラベル
位置(左右)	かなり左，左，中央，右，かなり右
位置(奥行き)	かなり奥，奥，中央，手前，かなり手前
大きさ	かなり小さい，小さい，中くらい，大きい，かなり大きい
向き・配置方向	右，右上，上，左上，左，左下，下，右下
距離	かなり近い，近い，中くらい，遠い，かなり遠い
可視程度	見えない，やや見える，見える
識別程度	識別できない，やや識別できる，識別できる
感情の程度	なし，少し，かなり，非常に

3　シミュレーション例

これまでに説明した言語表現生成モデルを用いてシミュレーションを行った．

3.1　シミュレーション結果

図 5 のシーンをもとにして作成した絵情報(図 6)をモデルの入力とした．このシーンでは，3 つの背景要素「海」，「空」，「太陽」と，3 つのオブジェクト「男の人」，「ボート」，「サメ(のヒレ)」が登場している．この時，モデルが出力した言語表現は図 7 の通りである．これを人間が理解しやすいように書き換えたものを図 8 に示す．

3.2　シミュレーション結果の考察

モデルの出力には，背景の要素である「海」が場所の説明として示されている．オブジェクトである「男の人」，「ボート」，「サメ(のヒレ)」に関する記述の表示は，より大きなオブジェクト，より画面の中心に存在するオブジェクトからの順となっている．

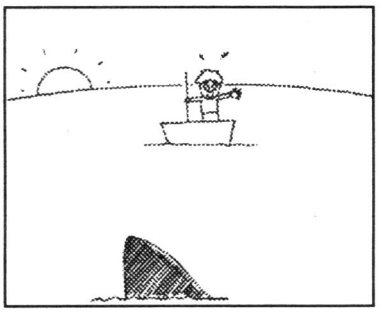


図 5　絵情報作成のもとになったシーン

背景 1
　Name = 海
　Location = (165,141)
　Size = 55571
背景 2
　Name = 空
　Location = (158,21)
　Size = 14225
背景 3
　Name = 太陽
　Location = (48,43)
　Size = 750
オブジェクト 1
　Name = 男の人
　Location = (177,76)
　Direction = 270.0
　Area = (51,46)
　EyeSize = 1.00
　EyeShape = 0.50
　EyebrowSlant = 0.36
　EyebrowShape = 0.55
　MouthSize = 1.00
　MouthShape = 0.50
オブジェクト 2
　Name = ボート
　Location = (165,97)
　Area = (64,20)
オブジェクト 3
　Name = サメ(のヒレ)
　Location = (135,232)
　Direction = 0.0
　Area = (78,59)

図 6　シーンの絵情報

シーン：海
名前：ボート
位置(左右)：中央
位置(奥行き)：中央
大きさ：小さい
男の人の距離：近い
男の人の方向：上
サメの距離：遠い
サメの方向：下

名前：男の人
位置(左右)：中央
位置(奥行き)：中央
向き：下
大きさ：小さい
感情：かなり驚き，少し恐れ
行動：ボートに乗る
ボートの距離：近い
ボートの方向：下
ボートの可視：見える

ボートの識別：識別できる
サメの距離：かなり遠い
サメの方向：下
サメの可視：やや見える
サメの識別：識別できない

名前：サメ(のヒレ)
位置(左右)：中央
位置(奥行き)：かなり手前
向き：右
大きさ：中くらい
ボートの距離：遠い
ボートの方向：上
ボートの可視：見えない
ボートの識別：識別できない
男の人の距離：かなり遠い
男の人の方向：上
男の人の可視：見えない
男の人の識別：識別できない

図 7　モデルの出力結果

- 海のシーンです．
- 小さなボートが画面中央にあります．
- 下を向いた小さい男の人がボートの上方向の近い距離にいます．その男の人はボートに乗っています．男の人はかなり驚き，少し恐れの表情をしています．その男の人はサメ(のヒレ)をやや見ることができますが，識別することはできません．
- 右を向いた中位の大きさのサメ(のヒレ)がボートの下方向のかなり遠い距離にいます．そのサメ(のヒレ)はボートと男の人を識別することはできません．

図 8　読みやすく整形した出力結果

最初に表示されたオブジェクトである「ボート」を中心とし，その他のオブジェクトとの位置関係が出力されている．このように，出力された位置関係や感情などは主観を含めた言語表現となっていることがわかる．今回は，出力結果検証のためのアンケートなどは特に行っていないが，出力を見ただけでも，もとになった絵のだいたいの構成を想像することが可能である．

問題点として，図8の下線部分で「男の人がサメ(のヒレ)を識別できないのにかなり驚いている」と記述されている．これは男の人がサメ(のヒレ)と対面していないためであるが，ここではサメ(のヒレ)のようなものが識別できるという推論をすべきである．また本研究では，可視や識別程度の推論と感情の推論は独立に行われているが，「サメ(のヒレ)のようなものが識別できるのでかなり驚いている」のような，原因-結果の推論がさらに必要であることがわかる．

4　おわりに

本研究では，客観的な絵情報から主観的な事柄を推論し，言語表現を生成するモデルを構築した．シミュレーション結果から，与えられた絵のおおまかな内容が理解できる程度に言語表現が得られており，本モデルの有効性が確認できた．

これは人間の知的行動の一例ではあるが，さらに柔軟な処理をコンピュータ上で実現することで，画像データベースへの応用や，物語等の発想・創造活動支援の分野に応用できると考えられる．

現段階では，複数の絵情報を入力した場合でも，それぞれ独立したシーンとみなして処理を行っている．今後は，入力した絵情報が四コマ漫画のように時間的に連続したものととらえ，シーンの変化も考慮に入れた言語表現が出力できるモデルへ拡張する予定である．また，行動の推論部分などで様々な入力に対応できる事例ベース推論のような推論手法を実装することにより，ルール・事例の収集や推論手順などの点において，より柔軟な処理が可能になるものと期待できる．

参考文献

[1]増井重弘，寺野寿郎，関口俊宏: ファジィ論理を用いた風景画の画像理解，日本ファジィ学会誌，Vol. 6, No. 5, pp. 1000-1011, 1994.

[2]P. Ekman and W. V. Friesen 著，工藤力 訳: 表情分析入門，誠信書房, pp. 1-277, 1987.

[3]北崎幸子，岩田満，鬼沢武久: 顔の表情モデル，第 5 回ワークショップ講演論文集，日本ファジィ学会ノンエンジニアリング・ファジィ研究会，pp. 80-83, 1995.

[4]本多中二，大里有生: ファジィ工学入門，海文堂，1989.

連絡先

〒305　つくば市天王台 1-1-1
筑波大学　構造工学系／工学システム学類　鬼沢研究室
岩田　満
TEL: 0298-53-6188　　FAX: 0298-53-6471
E-mail: miwata@onisawa-gw.esys.tsukuba.ac.jp

言葉による似顔絵描写に関する研究 - 線種による影響 -

A Study on Facial Caricature Drawing with Linguistic Expressions - Influence of Line Thickness on Facial Expressions -

岩下 志乃
Shino IWASHITA
筑波大学工学研究科
Doctoral Program in Engineering,
University of Tsukuba

鬼沢 武久
Takehisa ONISAWA
筑波大学構造工学系
Institute of Engineering Mechanics,
University of Tsukuba

Abstract: This paper considers a facial caricature drawing using information on a human face, i.e., face shape, features of a face, hair and position of features, which is expressed with linguistic terms. Fuzziness inherent in the linguistic term is expressed by a fuzzy set, and it is reflected to the line thickness. A drawn facial caricature can be modified by the use of linguistic terms. An example of a facial caricature, which is drawn by the present process, is shown.

1 はじめに

似顔絵というのは、顔の特徴を簡単な線で表現することができる。しかも、特徴を誇張することによって、その人の個性をよりわかりやすく表現している [1]。

従来の似顔絵作成システムでは、画像処理 [2] を行い、特徴点を取り出してそれを基にして似顔絵を作成しているものが多い [3]。しかし、画像から似顔絵を作る場合、顔を正確に表現することはできるが、その人の持つ印象や性格などは表現することは難しい。そこで、筆者らはこれまでに言葉で顔の特徴を表現することで画像だけからはわからない人間の特徴を似顔絵で表すモデルの構築を行ってきた [4]。

本論文では、言葉を用いて作成された似顔絵を顔の各部位、部位と部位の位置関係、線種のそれぞれについて修正を行い、それがどのような効果をあげるかについて考察する。

2 似顔絵作成モデルの全体構造

本システムは、入力部、出力部、修正部で構成されている。システムの全体構造を図 1 に示す。

2.1 入力部

まず顔型を丸、卵、三角、四角、ホームベース型の 5 つの形から選び、性別を選ぶ。次に、部位（目、鼻、口、眉、耳）の特徴を「副詞＋特徴語」の組合せで入力する。副詞は「とても」「かなり」「けっこう」「少し」「ちょっと」の 5 つから選ぶ。特徴語は各部位について要素ごとに分類されており、その中から当てはまるものを選択する。

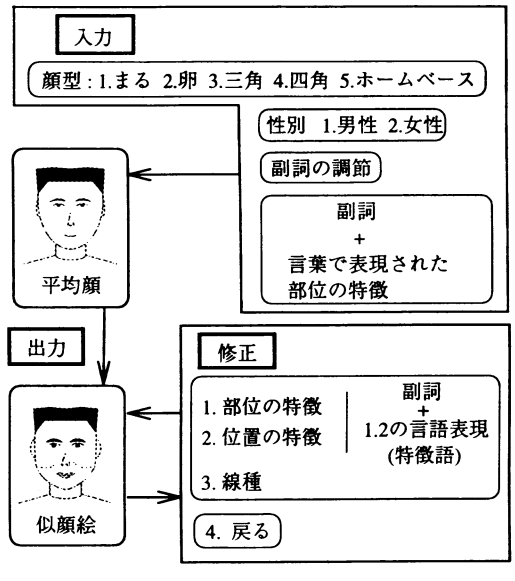


図 1 システムの概要

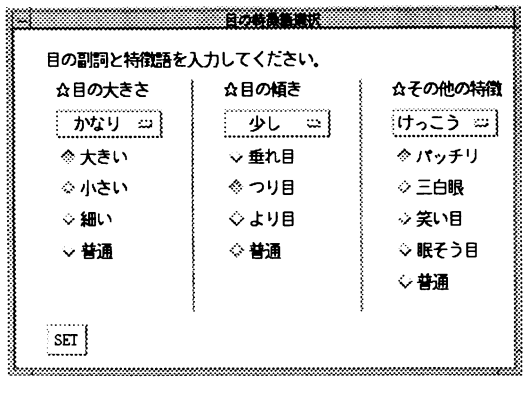


図 2 目に対する入力インターフェース

入力のインターフェースの例を図2に示す。例外として、髪の毛は、言葉で表現するのがとても困難であるため、図3のようなサンプルから最も近いものを選択することで入力を行う。サンプルは入力インターフェースによって選択された髪の長さと、すでに選択された性別に適応したサンプルが提供される。

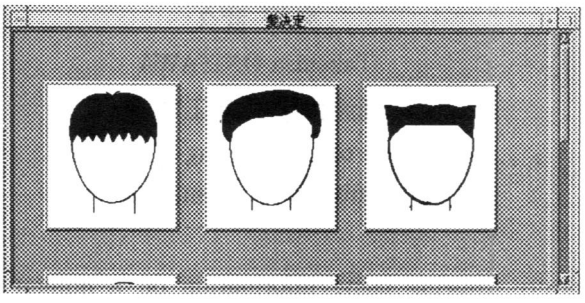
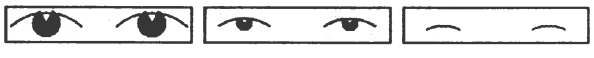


図3　髪の毛選択ボード (男性)

2.2　出力部

入力部で入力された副詞と特徴語を用いて、部位の持つパラメータを平均顔から変化させ、似顔絵を出力する(図4)。



最大 (+1)　←　普通 (0)　→　(-1) 最小

図4　目の大きさの平均顔からの変化

2.3　修正部

出力結果が似顔絵を作成した人のイメージと合わない時のために、修正をおこなうことができる。修正部でも入力部と同じように「副詞＋特徴語」の組合せを用い、何度でも修正を行うことができる。

3　特徴語によるパラメータ変化

顔の各部位は、形状の要素とパラメータを持っている。特徴語は要素ごとに分類されており、選択された特徴語によって各部位のパラメータ値が変化する。例えば、目は横幅、縦幅、角度、瞳の位置（上下・左右）の5つのパラメータをもっており、表1のような要素、特徴語を持っている。変化方向は特徴語ごとに設定された方向であり、変化量は副詞によって調節される。

表1　目の持つ要素・特徴語

要素	特徴語
大きさ	大きい、小さい、細い、普通
角度	垂れ目、つり目、普通
その他	パッチリ、三白眼、眠そうな目、普通

各部位について同様にパラメータの最大値が決められている。まず、要素ごとにパラメータを作成する。要素iのパラメータjのファジイ集合の中央値$r(i,j)$は、副詞に対応する値を$f(0 \leq f \leq 1)$、そのファジィ集合の最大値を$r_{max}(i,j)$、最小値を$r_{min}(i,j)$とすると式(1)(2)で求められ、すべての要素を考慮したパラメータjの値は、式(3)(4)で求められる。

$(i=1)$

$$r(i,j) = f \times r_{max}(i,j) \quad \text{特徴語の変化方向が正} \quad (1)$$

$$r(i,j) = f \times r_{min}(i,j) \quad \text{特徴語の変化方向が負} \quad (2)$$

$(i=2,3,\cdots,m)$

$$\begin{aligned} r(i,j) &= (1-|r(i-1,j)|) \\ &\quad \times r|(i,j)| + r(i-1,j) \qquad (3) \\ r(final,j) &= r(m,j) \qquad (4) \end{aligned}$$

4　パラメータの修正

すべての部位において入力が終わり、最終パラメータ通りの似顔絵が出力されても、その似顔絵が意図したものと違っていた場合、言葉を用いて修正を行う。

使用される副詞は「もう少し」「もっと」「だいぶ」の3種類である。まず、修正したい部位（目、鼻、口、眉、耳、髪型、輪郭、位置、線）を選び、「副詞＋特徴語」の形で言葉を入力し、入力された言葉に応じて、真理値限定を用いてパラメータの値を変更する。

目、鼻、口、眉、耳については、修正するときの特徴語は最初の入力時に使用された言葉と同じ種類の言葉が用意されている。輪郭については「顔の幅」「あごの長さ」「ほおの特徴」について修正できる。位置については「目と目の距離」「目と鼻の距離」「目と口の距離」「眉と目の距離」について修正できる。線については、各部位ごとに「はっきり」「ぼんやり」から選択して修正することができる。

ファジィ集合の修正には、ファジィ真理値限定[5]を適用する。3つの副詞の真理値を図5のように定義し、これを用いて真理値限定されたファジィ集合(FT')は、

$$FT' = FT \quad is \quad T, \qquad (5)$$

と表され、FT'は、

$$\begin{aligned} \mu_{FT'} &= \mu_T \circ \mu_{FT} \\ &= \mu_T(\mu_{FT}), \qquad (6) \end{aligned}$$

で求まる。ただし、μ_T, μ_{FT}, μ_TはそれぞれFT', FT and Tのメンバーシップ関数である。式(5)(6)によって得られたファジィ集合は、図6のようになり、「増やす」場合は右側、「減らす」場合は左側のファジィ集合を用いる。

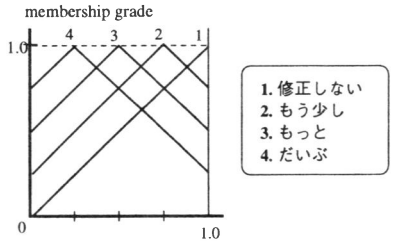


図5　修正のための副詞のメンバーシップ関数

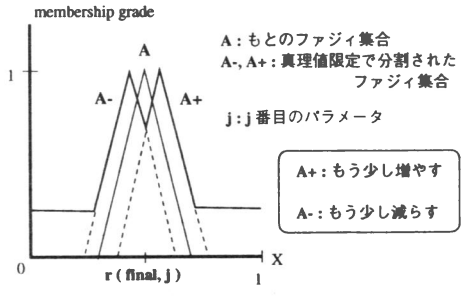


図6　真理値限定されたファジィ集合

また、線種について修正を行う場合は、図7のような真理値を用いて修正を行う。「はっきり」「ぼんやり」に対して真理値限定を行い、修正されたファジィ集合の面積が線種に反映される。線の太さは面積に比例し、線の濃さは面積に反比例する (図8)。よって、「はっきり」の場合は濃くて細い線で、「ぼんやり」のときは薄く太い線に修正される。

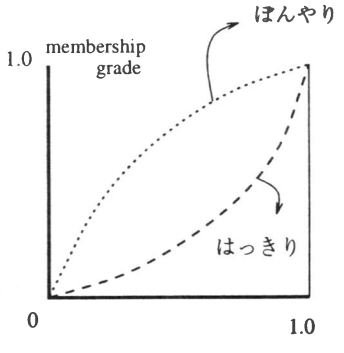


図7　線種の修正のためのメンバーシップ関数

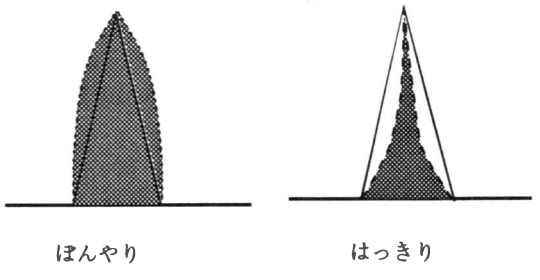


図8　線種への反映

同じ要素についての修正量は、図9のように前回の移動方向に依存するようになっており、今回と前回の移動方向の変化について、パラメータの値 ($r(k)$) と上限 ($r_{sup}(k)$)、下限 ($r_{inf}(k)$) の計算が下記の4つに場合分けされる。ここで、k は修正回数、$p(-1 \leq p \leq 1)$ は副詞による移動割合を示している。

$$(+) \rightarrow (+): \quad r(k) = r(k-1) + p \times (r_{sup} - r(k-2))$$
$$r_{sup}(k) = r_{sup}(k-1), r_{inf}(k) = r(k-1)$$

$$(+) \rightarrow (-): \quad r(k) = r(k-1) - p \times (r(k-1) - r(k-2))$$
$$r_{sup}(k) = r(k-1), r_{inf}(k) = r(k-2)$$

$$(-) \rightarrow (+): \quad r(k) = r(k-1) + p \times (r(k-2) - r(k-1))$$
$$r_{sup}(k) = r(k-2), r_{inf}(k) = r(k-1)$$

$$(-) \rightarrow (-): \quad r(k) = r(k-1) - p \times (r(k-1) - r_{inf})$$
$$r_{sup}(k) = r(k-1), r_{inf}(k) = r_{inf}(k-1)$$

ここで、r_{sup}, r_{inf} はそれぞれ修正できる最大値、最小値である。

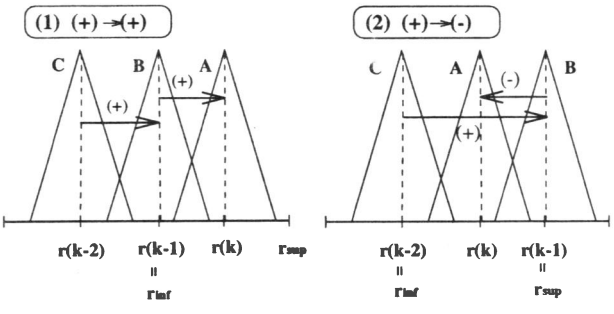


図9　パラメータ値の変化例

値が収束してしまうとそれ以上の変化は望めなくなるために何回か前の状態に戻ることも可能である (図10)。

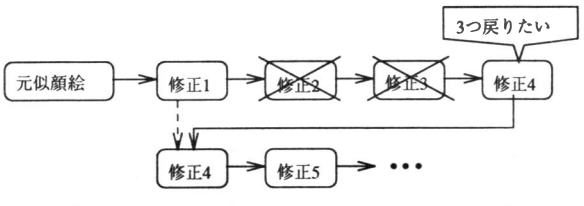


図10　「3つ戻す」場合の状態復帰方法

5　シミュレーション例

本研究で作成したシステムを用いて、似顔絵作成のシミュレーションを行った例を示す。

5.1　シミュレーション結果

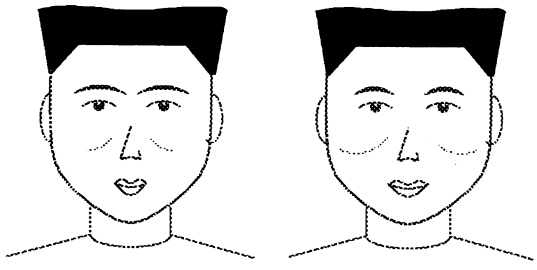
モデルとして、プロ野球解説者の江川卓氏の似顔絵を作成する。表2に示すような入力を行ったときの似顔絵を表3のような修正語で修正する。出力画像と修正画像を図11に示す。

表2　入力語

要素	特徴語
顔型	ホームベース
性別	男性
目	少し大きい、少しパッチリ
鼻	結構上向き、小鼻が結構大きい
口	少し小さい、かなり厚い
眉	少し太い、結構長い、少し上がっている
耳	とても大きい

表3　修正語

要素	修正語
口	もう少し大きい
眉	もっと太い、もっと短い
顔の幅	もう少し広い
ほお	だいぶふっくら
目と目の距離	もう少し離れている

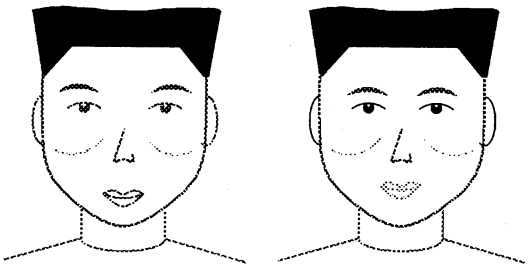


(a)　(b)

図11　出力画像と修正画像

5.2　部位の位置・線種による違い

部位の位置と線の太さ、濃さが似顔絵に与える影響について示す。図12-(a)は、図11-(b)について、目と目の距離、鼻と口の距離をだいぶ離した例である。また、図12-(b)は図11-(b)について、目と耳をもっとはっきりと、口をもう少しぼんやりとした線で描くように指示した似顔絵である。



(a)　(b)

図12　位置・線種による違い

5.3　シミュレーションに対する考察

始めの入力に対して、出力では言葉をかなりうまく反映した似顔絵を得ることが出来た。修正語からわかるように、目、鼻、耳に対してはイメージとの差はあまりなく、口、眉に対してはすこし言葉のイメージと出力画像の違いがあった。

図12-(b)と図11-(a)を比較すると、まったく同じ部位であるのに位置が違うとまったく別人のような似顔絵が作成される。よって、部位と部位の位置関係は、似顔絵作成において重要な要素であることがわかる。

線の太さ、濃さについては、強調したい目、耳を「はっきり」とし、あまり特徴的でない口を「ぼんやり」とすることで、印象の違いが現れた。

6　おわりに

本研究では、言葉を反映させた似顔絵を作成し、言葉によって修正可能なモデルを作成した。言葉による入力が困難と思われる髪の毛に対しては、言葉ではなくサンプルを用いることによって入力が簡単になった。

今回、位置関係を考慮したことにより、似顔絵は微妙な部位の操作によってイメージを大きく変えてしまうことがわかった。また、線種を変えることによってもイメージの違った似顔絵が作成できる。今後、誇張した似顔絵を描く場合にこれらの性質を応用できるだろう。

参考文献

[1] Sarah V. Stevenage: Can caricature really produce distinctiveness effect?, British Journal of Psychology, pp.127-146(1995).

[2] Michel Grabisch, Jean Figue, Marie-Pierre Charbonnel: "Analysis and Modelling of Face Images, Proceeding of the 4th International Conference on Soft Computing", pp.761-764(1996.10)

[3] 村上和人, 奥水大和："似顔絵コンピュータＰＩＣＡＳＯ-コンピュータは本当に似顔絵を描けるか-", 第4回日立中研研究会予稿集,pp.65-74(1996.6)

[4] 岩下志乃, 鬼沢武久："言葉を用いた似顔絵の作成", 第12回ファジィシステムシンポジウム予稿集,pp.455-458(1996.6)

[5] D.Dubois and H.Prade: Fuzzy sets and systems -Theory and applications, Academic Press, London, p.176(1980).

連絡先

〒305 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学構造工学系／工学システム学類 鬼沢研究室
岩下 志乃
TEL : 0298-53-6188　FAX : 0298-53-6471
E-mail : iwashita@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

THE3-1

ファジィ・ニューラルネットワークによるハンカチデザインのための感性評価モデル
Kansei Evaluation Model for Handkerchief Design Using Fuzzy-Neural Networks

小松 由香　　亀井 且有
Yuka KOMATSU　　Katsuari KAMEI
立命館大学
Ritsumeikan University

Abstract: The human emotional model called "Kansei" is vague. That is why it is difficult to understand. Kansei Engineering is a method which shows the relationships between Kansei and physical design elements, and it is a powerful method for understanding Kansei. Quantification Method I, one of the techniques in Kansei Engineering, is a well-known regression method. However, the problems of this technique are that treatment of non-categorical design elements such as color is difficult, and that the validity of the model decreases if we do not have enough samples.

In this paper,we try to solve these problems with fuzzy-neural networks, and apply this technique to Kansei Engineering for handkerchief design. Finally, we construct Kansei evaluation models for handkerchief design and show the validity of the models.

1 はじめに

近年，社会全体が「人間重視」の動きにあり，「感性の時代」と呼ばれるようになった．このような背景のもと，大きく進展した研究分野が感性工学である．感性工学は“感性を物理的デザイン要素に翻訳し，感性に合った商品を設計する技術”と定義されており[1]，モノに対する感性の定量化手法として捉えることができる．本稿では，感性工学にもとづいて得られる「なぞり感性」を感性評価モデルと呼ぶ．

感性工学の一般的な手順は，(1)感性を表現する形容詞の収集，(2)評価実験による感性の抽出，(3)感性とデザインの関係の定量化である．この定量化段階において最も多く用いられている手法が数量化理論Ⅰ類であり，デザイン要素と感性の関係を一次元的に表す．

しかし，数量化理論Ⅰ類にはいくつかの問題点が存在する．まず，色や長さなど連続値をとるデザインアイテムが含まれる場合の適用についてである．数量化理論Ⅰ類では，デザイン要素を質的に扱うため，量的変数に対してもカテゴリー分割を行う必要がある．また，デザインに対する感性評価モデルは，微妙なニュアンスの違いを表現するため多変数になることが多い．感性評価がデザインカテゴリーの線形和で表現される数量化理論Ⅰ類では，カテゴリーの組合せ数とともに必要サンプル数が指数関数的に増加する．しかし，現実に扱うことのできるサンプルの数には限界があり，結果的に，外挿したサンプルに対するモデルの適合度は低下する．

本稿では，これらの問題に対して，ファジィニューラルネットワーク(Fuzzy Neural Network : FNN)を用いた階層化ファジィモデリングを適用し，より自然で人間に近い感性評価モデルの構築を試みる．なお対象としては，サンプルとして身近にあり，種々の感性情報を含むハンカチを用いる．

2 ハンカチデザインのための感性評価実験

2.1 実験手順

2.1.1 形容詞の収集　“美しい”や“上品な”など，ハンカチに対するイメージを表す形容詞を収集し，意味的に対の形になるよう整える．

2.1.2 基本形容詞の抽出　収集した形容詞対を用い，ハンカチに対するSD法評価実験を行う．SD尺度は5段階とし，次のように各段階に対して1から5の数値を与える．

男らしい 5 4 3 2 1 女らしい

なお，被験者は女子大学生17人であり，使用したハンカチは5枚である．評価結果を因子分析にかけ，ハンカチに対する感性を代表する基本形容詞を抽出する．

表1に因子分析の結果を示す．形容詞は，F1の“かわいらしさ”やF2の“目新しさ”のような10の因子軸にそって空間内に散在している．この中から，偏りなく基本形容詞を選定するため，各形容詞の因子負荷をデータとして因子分析にかける．因子負荷の相関係数が0.7以上の形容詞はまとめ，他のいずれの形容詞とも0.7以上の相関をもたない形容詞はそのまま選定する．その結果，表1において網掛けした22個を基本形容詞として抽出した．

2.1.3 デザイン要素の決定　本研究では，ハンカチのデザインを構成するデザイン要素として柄，色を用い，11アイテム42カテゴリーに分割する．

2.1.4 数量化理論Ⅰ類による感性モデルの構築[2]　2.1.2で抽出した22個の基本形容詞を用い，SD法評価実験を行う．被験者は女子大学生30人，使用するハンカチは36枚である．各基本形容詞に対し，被験者による評価平均値を外的基準として数量化理論Ⅰ類にかける．

2.2 実験結果

数量化理論Ⅰ類により分析した22個の基本形容詞のうち，“斬新な—ありふれた”の結果を表2に示す．

表1　因子分析結果

形容詞＼因子	F1	F2	…	F10
ロマンチックな，ロマンチックでない	0.797	-0.057		0.068
愛らしい，愛らしくない	0.701	-0.083		0.254
かわいい，かわいくない	0.674	-0.014		0.501
親しみやすい，親しみにくい	0.673	-0.220		0.258
やさしい，きつい	0.672	-0.088	…	0.358
清楚な，清楚でない	0.539	-0.255		0.416
ソフトな，ハードな	0.507	0.078		0.431
ユニークな，ユニークでない	-0.145	0.779		0.022
斬新な，ありふれた	-0.103	0.779		0.121
ユーモラスな，ユーモラスでない	-0.052	0.771	…	-0.050
奇抜な，平凡な	0.009	0.741		-0.162
カジュアルな，カジュアルでない	0.254	0.062		-0.206
スポーティな，ドレッシーな	-0.189	0.169	…	0.080
美しい，美しくない	0.099	-0.072		0.850
おしゃれな，おしゃれでない	0.233	-0.011		0.693
シックな，シックでない	0.242	0.054		0.685
さわやかな，うっとうしい	0.326	0.048		0.624
エレガントな，エレガントでない	0.371	-0.185	…	0.617
豪華な，豪華でない	0.092	0.221		0.584
落ち着いた，落ち着かない	0.342	-0.111		0.530
上品な，下品な	0.365	-0.268		0.504
魅力的な，魅力的でない	0.408	0.289		0.477
累積寄与率(%)	11.863	21.738	…	74.290

表2　数量化理論Ⅰ類による分析結果

アイテム	カテゴリー	スコア	重要度
柄の種類	花柄	0.489	1
	ストライプ	0.444	
	ライン	-1.175	
	チェック	-1.034	
	からくさ模様	0.795	
	幾何学模様	-0.037	
地（色相）	赤	-0.074	2
	黄	0.673	
	緑	0.043	
	青	0.179	
	紫	-0.421	
柄1（色相）	赤	0.366	3
	黄	-0.344	
	緑	-0.714	
	青	-0.447	
	紫	-0.283	

3　ファジィ・ニューラルネットワークによる感性評価モデルの構築

3.1　ファジィ・ニューラルネットワークによる感性評価モデル

3.1.1　階層化ファジィモデル　ファジィモデリングは，ファジィ推論を用いて対象システムの入出力関係を表現する手法であり，複雑な非線形システムをファジィルールにより言語的に記述する．ファジィモデリングにおいても多入力の場合ルール数が増加するが，ルールの階層化を行うことによって入力空間の分割数を低減できる．従って，十分な数のサンプルを得ることが困難な場合でも，モデルを精度よく同定することが可能である．古橋らの提案した階層化ファジィモデリング手法[3,4]は，構造が未知の非線形対象に対し，FNNによりモデルを同定するものである．本研究では古橋らの手法にもとづき，感性評価モデルの構築を試みる．

図1に階層化ファジィモデルの構成を示す．図は3入力（x_1, x_2, x_3），1出力（y）のシステムを2層に階層化した例である．y^{1*} は第1層の推論値であり，第2層の推論値 y^{2*} がシステムの出力値である．

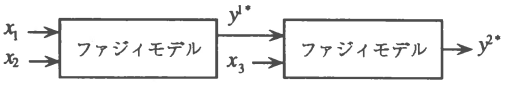


図1　階層化ファジィモデル

各層には次式で表される簡略化ファジィ推論を用いる．

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_{i_1 1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i_2 2} \text{ then } y = f_i \quad (i = 1,2,\cdots,n_R) \tag{1}$$

$$\mu_i = A_{i_1 1}(x_1) A_{i_2 2}(x_2) \tag{2}$$

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^{n_R} \mu_i f_i}{\sum_{i=1}^{n_R} \mu_i} \tag{3}$$

R^i は i 番目のファジィルール，$A_{i_1 1}, A_{i_2 2}$ はファジィ変数，f_i は定数，n_R はルール数，μ_i は R^i の前件部適合度，y^* は推論値，添字 i_j は i 番目のルールにおける入力 x_j の前件部メンバーシップ関数の種類を意味する．

各階層のファジィモデル同定にはFNNを用いる．図2に，2入力1出力，各入力に対する前件部メンバーシップ関数がともに3種類の場合のFNN構成例を示す．図中の f は，次式に示すシグモイド関数を内部関数としてもつユニットである．

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \tag{4}$$

w_c，w_g はメンバーシップ関数の中心及び傾きを，w_f は後件部定数を表し，これらの結合荷重はバックプロパゲーション法によって学習する．

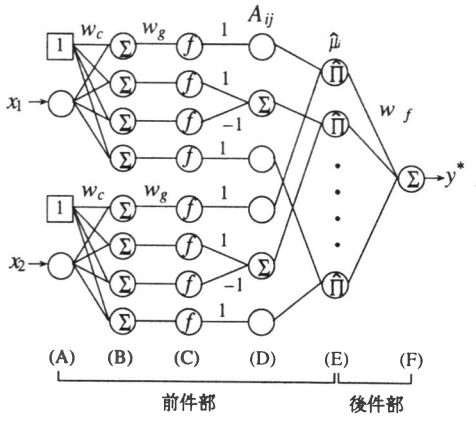


図2　FNNの構成

3.1.2　階層化ファジィモデリング手法　まず，入出力データを2つのグループA,Bに分割する．次に以下のステッ

プにより，階層化を行う．

ステップ1：第1層の前件部構造選択

各グループのデータを用い，入力変数を1つとしてFNNを構成し，前件部メンバーシップ関数および後件部定数を学習する．グループAのデータから得たモデルA，グループBのデータから得たモデルBを用いて，精度および汎化性の総合規範C

$$C=\sqrt{\sum_{i=1}^{n_A}(y_i^A-y_i^{AA})^2+\sum_{i=1}^{n_B}(y_i^B-y_i^{BB})^2}+\sqrt{\sum_{i=1}^{n_A}(y_i^{AB}-y_i^{AA})^2+\sum_{i=1}^{n_B}(y_i^{BA}-y_i^{BB})^2} \quad (5)$$

n_A, n_B ：A,Bのデータ数，y_i^A, y_i^B ：A,Bの出力データ，y_i^{AA}, y_i^{BA} ：モデルAによるy_i^A, y_i^Bに対する推論値，y_i^{AB}, y_i^{BB} ：モデルBによるy_i^A, y_i^Bに対する推論値

を求め，規範Cが最小となるFNNの入力変数を選択する．入力変数を逐次追加してFNNを構成し，Cが大きくなれば，選択を中止する．

ステップ2：第1層のファジィモデルの詳細調整

ステップ3：第2層の前件部構造選択

ステップ4：第2層のファジィモデルの詳細調整

ステップ$2n$-1：第n層の前件部構造選択

ステップ$2n$：第n層のファジィモデルの詳細調整

第n層のファジィモデルの前件部と後件部のパラメータを詳細に調整する．得られた第n層のファジィモデルの規範Cが第$n-1$層のCより小さければ，次のステップへ進む．大きければファジィモデリングを終了する．

3.1.3 感性評価モデルへの適用 色相，明度，彩度および各層の出力値に対し，図3のメンバーシップ関数を設定する．なお，各層の出力値に対するメンバーシップ関数は，5段階SD尺度に対応した[1,5]を台集合とする．

柄の種類および柄の大きさは，質的変数として扱い，図4のようにFNNを構成する．図中，柄の種類x_2は$x_{2i}=\{0,1\}$ ($i=1,2,\cdots,6$) を値としてとり，これを(D)層への入力とする．すなわち，質的変数が取り込まれた場合，この変数に対する(A)～(C)層は存在せず，後件部についてのみ学習を行う．

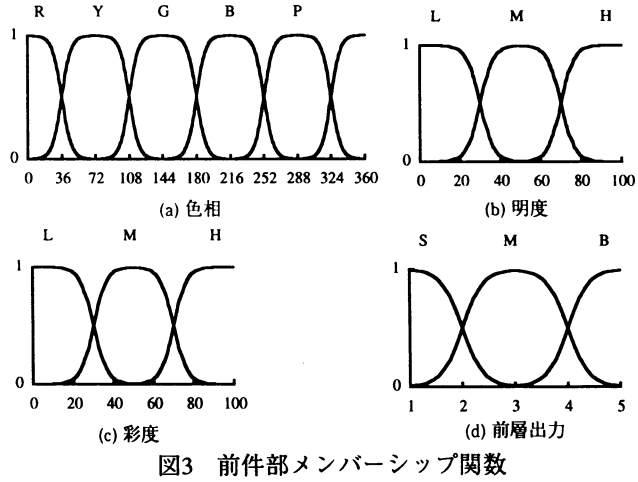


図3 前件部メンバーシップ関数

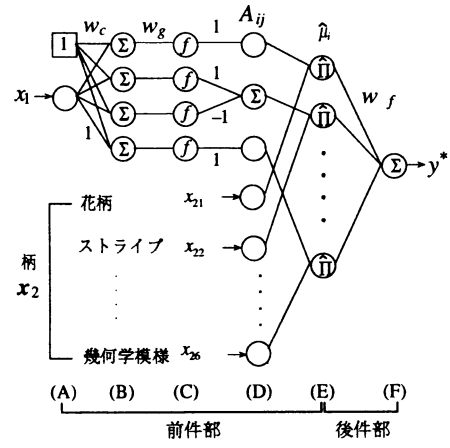


図4 質的変数に対するFNNの構成

表3のx_i ($i=1,2,\cdots,11$) を入力変数，2.1.4における被験者の評価平均値を出力とし，各基本形容詞について階層化ファジィモデリングを行う．

表3 入力変数の対応

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
アイテム	柄	柄の大きさ	地			柄1			柄2		
			H	L	S	H	L	S	H	L	S

3.2 実験結果

表4に，変数選択結果を示す．

表4 変数選択結果

	基本形容詞	layer1			layer2		
1	上品な，下品な	1	5				
2	スポーティな，ドレッシーな	1	2				
3	鮮やかな，鮮やかでない	1	2	7			
4	ベーシックな，ベーシックでない	1	2				
5	男らしい，女らしい	1	2				
6	落ち着いた，落ち着かない	1	2	5	→	7	
7	カジュアルな，フォーマルな	1	2		→	5	
8	ユニークな，ユニークでない	1	2		→	7	8
9	美しい，美しくない	1	4				
10	ダイナミックな，ダイナミックでない	1	2				
11	親しみやすい，親しみにくい	1	2				
12	斬新な，ありふれた	1	2				
13	暖かそうな，涼しそうな	6	1		→	3	11
14	大人っぽい，子供っぽい	1	2		→	5	
15	オーソドックスな，オーソドックスでない	1	2				
16	渋い，けばけばしい	1	2				
17	実用的な，趣味的な	1	2				
18	モダンな，クラシカルな	1	2				
19	変化にとんだ，単調な	1	2				
20	ソフトな，ハードな	7	11	4			
21	派手な，地味な	1	2				
22	ロマンチックな，ロマンチックでない	1	2				

3.3 比較および検討

図5に，数量化理論Ⅰ類および階層化ファジィモデリン

グによるモデルの適合度を示す．ただし，適合度は数量化理論Ⅰ類の場合，重相関係数を，階層化ファジィモデリングについては出力値と推論値の相関係数を用いる．すべての形容詞について数量化理論Ⅰ類の方が高い適合度を得ている．その理由として，階層化ファジィモデリングにおけるパラメータのチューニングや評価規範の定義が非常に多様であり，その検討が十分にされてないためと思われる．しかし，階層化ファジィモデリングの場合でも0.81以上と良好な値が得られていることから，今後検討を加えることによって，適合度の改善は期待される．

さらに，モデルの汎化性を評価するため，評価用ハンカチを加えて一対比較による評価実験を行った．使用した形容詞は“斬新な—ありふれた”である．なお，被験者は女子大学生6人，対象となるハンカチは，モデル同定に用いた4枚に評価用として11枚を加えた計15枚である．

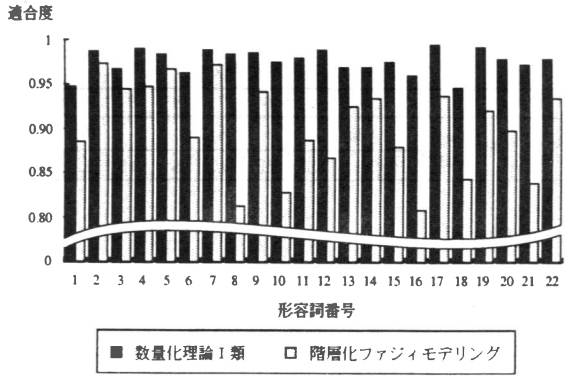


図5　モデルの適合度

各ハンカチに対する“斬新さ”を以下の手順で算出する．

① ハンカチxがハンカチ$y(\neq x)$に対してより“斬新”であれば，yに対するxの評価値を1とし，“斬新”でなければ0とする．

② xに対するyの評価値と，yに対するxの評価値が同じ場合，すなわち，同じ組合せで評価に矛盾が生じたときは各評価値を0.5とする．

③ すべてのyに対するxの評価値を合計した値を，ハンカチxに対する“斬新さ”の評価値とする．

ここでの評価値は“斬新さ”に関する相対的な順位を意味し，0から14までの値をとるが，モデルの予測値は1から5の値となるとは限らない．そこで，モデルの評価は，一対比較により得られる被験者の評価平均値とモデルの予測値との相関係数によって行う．

図6に，各ハンカチに対するモデルの予測値と被験者による評価平均値を表す．数量化理論Ⅰ類の場合，モデル同定の際用いた4枚のハンカチは正しく順序づけられているが，SD尺度の設定範囲を外れるにつれ，評価との相関は低くなり，正しい順序づけはされていない．これに対し，階層化ファジィモデリングを適用した場合，同定に用いた4枚のハンカチだけでなく，評価用ハンカチもほぼ正しく順序づけられている．予測値と被験者による評価平均値との相関係数は0.85であり，数量化理論Ⅰ類の0.76に対し，かなり高い値を得たといえる．

今回適用した階層化ファジィモデリング手法は，サンプル数が十分に得られない多入力非線形システムのモデリングに有効とされている．図5，図6より，本研究のようにサンプル数が少なく，多変数になりがちな感性評価モデルの同定においてもまた階層化ファジィモデリング手法は有効であるといえる．

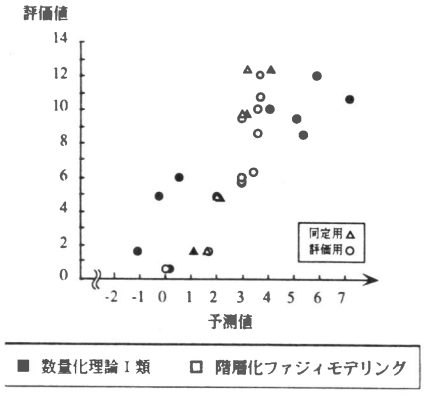


図6　モデルの予測値と評価平均値

4　おわりに

本稿では，感性工学において従来多用されていた数量化理論Ⅰ類の問題の解決手法として，FNNを用いた階層化ファジィモデリングの適用を試みた．

数量化理論Ⅰ類におけるデザインカテゴリーをファジィ数で表現することによって，連続値をとるアイテムが含まれる場合にも柔軟に対応することができた．また，入力を階層化することによって，デザインの特徴的な部分に大きく左右される人間の感性評価をうまく表現することができた．しかし，学習に伴うパラメータや評価規範によって得られるモデルが異なるため，パラメータのチューニングとともに，感性評価モデルの特性を反映した規範を定義する必要がある．また，今回，人間の感性評価をSD尺度上のある数値で表したが，これをファジィ数で表現することによってより人間に近い感性評価モデルを構築することができると考えられる．

参考文献

1) 長町三生：“感性工学”，海文堂（1989）
2) 小松由香，亀井且有：”感性工学にもとづくハンカチデザインの評価”，電気学会論文誌（掲載決定）
3) 中山正一，古橋武，内川嘉樹：“階層化ファジィモデリング手法の一提案”，日本ファジィ学会誌，Vol.5,No.5,pp.1155-1168 (1993)
4) 堀川慎一，古橋武，内川嘉樹：“ファジィニューラルネットワークの構成法と学習法”，日本ファジィ学会誌,Vol.4,No.5,pp.906-928 (1992)

［問い合わせ先］　〒525-77　滋賀県草津市野路東1-1-1
立命館大学理工学部情報学科　　亀井且有
Tel. (0775)61-2699　　Fax. (0775)61-2669
E-mail:kamei@spice.cs.ritsumei.ac.jp

THE3-2

イメージ表現付きファジィカラーネーミングシステム

Fuzzy color naming system with image expression

○菅野直敏　大貫雄一*　竹川宙史**

○Naotoshi Sugano　Yuuichi Ohnuki*　Hiroshi Takekawa**

玉川大学工学部

Faculty of Engineering　Tamagawa University

Abstract. Human eye can skillfully distinguish a large number of colors. People can also present color names based on subjective expression for a color easily. However it is difficult to present color names objectively. Therefore we considered a fuzzy expert system which the color can be expressed in adjective words. This fuzzy color naming system can translate from a color spectrum as the input to color names as the output by using the conversion of the three primary colors(R: red, G: green, B: blue) system into the hue(H: hue, L: lightness, S: saturation) system. Improved membership functions are applied for the hue angle, the lightness and the saturation. The color names are based on Japanese Industrial Standard. In this study, an image data base was appended to the fuzzy color naming system.

1．はじめに

多種多様な色彩を我々の目は巧みにとらえて判断することができる。また「これは何色か」と聞かれたとき自分の知っている範囲で簡単に表現することができる。しかし、色彩名を客観的に表現することは難しい。そこで、いろいろな色をＪＩＳ規格に基づいた色彩名を用いて、簡単に表現できるファジィ・カラーネーミングシステム [5)-10)]を構築してきた。本研究では、従来のシステムに加え、色彩から受けるイメージ表現もできるように改良した。

2．色彩とイメージ

色の性質によって客観的に感情が決まるものを固有感情といって、色を見る人には誰にでも同じように起こる感情と考えられている。このような色の固有感情として考えられる感情効果には、色の寒暖感、軽重感のほかに、硬軟感、強弱感、明快・陰気感、興奮・沈静感、派手・地味感といったものがある [1)]。これらはある程度共通した色彩とイメージの関係がある事を示している。

3．方法と結果

人間が色を見分ける能力は優れており、数千以上の色を見分けているといわれている。しかし、イメージというのはもう少しあいまいなものといえる。したがってアンケート調査でイメージの違いが明確に出てくるのは、１００色ぐらいである。ここで取り上げた色は、日本色彩研究所のカラーシステムにより分類された２３０種のカラ

* 現在、日立通信システム（株）

** １９９７年３月 電子工学科卒業

ーレンジの代表色を更にまとめた、イメージが異なる１００色である。ここでは、いくつかある表色系のうち、JIS標準色票などにも使われている修正マンセル表色系[1),2)]を用いている。この表色系において色は色相、明度、彩度の三つの要素を用いて表される。

三属性表示HVCにおいて、色相Hは色相環という円上で赤(R)、黄赤(YR)、黄(Y)、黄緑(GY)、緑(G)、青緑(BG)、青(B)、青紫(PB)、紫(P)、赤紫(RP)の順にこの10色を36°ごとに分割し、さらに各色は1～10（赤であれば1R, 2R, 3R, . . . , 10R）に分かれる。明度Vは1～10に、彩度Cは0～14に変換し、これを用いてJIS規格で定められている色を表現することができる。

これらの色彩に対する感情・感覚を、ＳＤ法(semantic differential method)でアンケート調査した、図1のようなイメージデータ[3)]より、個々の色に対するその度合いをデータベース化した。

４．まとめ

従来より構築して来たファジィ・カラーネーミングシステム[5)-10)]にイメージ表現[4),11)]が出来るように改良した。また、基本となる１００色のイメージデータからこれ以外の色のイメージが推論できるかどうか検討中である。

参考文献

1) 塚田 敢(1978)：色彩の美学. 紀伊国屋書店

2) 三浦寛三(1980)：色彩学概論－再訂版－. 創文社

3) 日本色彩研究所編(1993)：色彩ﾜﾝﾎﾟｲﾝﾄ 第８巻 色彩ｲﾒｰｼﾞと配色. 日本規格協会

4) 高橋、菅野(1993)：色彩感覚に関するｴｷｽﾊﾟｰﾄｼｽﾃﾑ. 第 9 回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集, pp. 377-380

5) 朝倉、高橋、菅野(1995)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑ. ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会 第５回ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ 講演論文集, pp. 120-121

6) 高橋、朝倉、菅野(1995)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑ. 第 11 回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集, pp. 595-598

7) 菅野、鈴木、高橋(1996)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑⅡ. ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会 第６回ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ 講演論文集, pp. 32-33

8) 朝倉、高橋、菅野(1996)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑ. 玉川大学工学部紀要 第 31 号 pp. 165-170

9) 鈴木、高橋、菅野(1997)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑⅡ. 玉川大学工学部紀要 第 32 号 pp. 97-104

10) 大貫、菅野(1997)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑⅢ. ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会 第７回ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ 講演論文集, pp. 48-49

11) 菅野、竹川、大貫(1997)：ﾌｧｼﾞｨ推論による色彩とｲﾒｰｼﾞの分析. ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会 第７回ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ 講演論文集, pp. 50-53

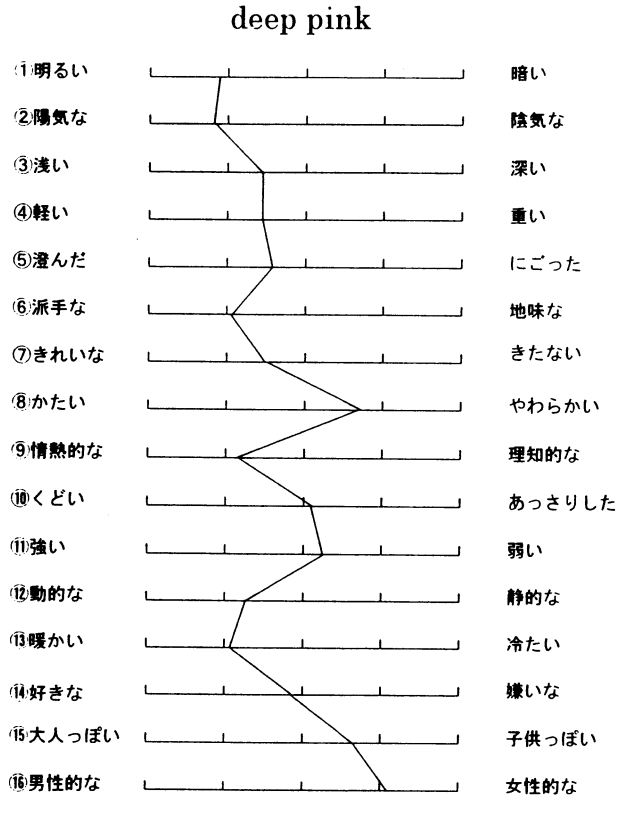


図１ 色名に対するイメージ
（文献３より転写）
JIS一般色名 あざやかな赤
該当JIS色相範囲：
1.0R(4.0PR-8.5R)
該当JIS明度/彩度範囲：
5.5(5.0-6.0)/12.0(9.0-12.0)

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THE3-3

巡回セールスマン問題を利用した色彩感覚の分析

An analysis of color sensations by using traveling salesman problems

○松浦 瑞樹　菅野 直敏

○Mizuki Matsuura　Naotoshi Sugano

玉川大学工学部

Faculty of Engineering　Tamagawa University

Abstract. In an analysis of color sensations, we presented several colors selected randomly, and examined the effect of color changes by using two series of colors changing *i)* irregularly and *ii)* regularly. The three primary colors (RGB) system is shown by a color cube which three axes of RGB range from 0 to 1. *i)* We selected colors in this cube, and prepared random series. On the other hand, *ii)* the minimum distance (or nearly one) of coordinates:$(r_1g_1b_1),(r_2g_2b_2),\ldots,(r_ng_nb_n)$ could be computed using Hopfield networks (as traveling salesman problems). Smooth series of the same colors were also prepared.

1．はじめに

色彩感覚の分析において数種類の色の提示を行い、その色彩変化の影響をみることにした。この変化方法として①色の急激な変化を持つものと②色の急激な変化をできるだけ少なくしたものについて行った。色の三原色であるＲＧＢをそれぞれの軸に持ち、０～１の範囲で変化する色立体中で、ランダムに数種類の色を選び、変化させる。ここでホップフィールドネットワークを利用して最短距離（またはこれに近い距離）を算出することによって色の急激な変化をできるだけ少なくした。

2．実験方法[1)、2)]

本研究ではＲＧＢの色立体内のランダムな色の変化を出来るだけ少なくしたものに並べ換えるために、１秒に１回の色を提示し、かつ緩やかな色の並びを実現するために巡回セールスマン問題（ＴＳＰ）を用いて解析した。具体的には、色立体中のそれぞれ直交したＲ軸、Ｇ軸、Ｂ軸をそれぞれ２５６に分割し、その内部でランダムに選ばれた数種類の色座標 $(r_1g_1b_1)$, $(r_2g_2b_2),\cdots,(r_ng_nb_n)$を巡回セールスマン問題の式にかけた。また巡回セールスマン問題のエネルギー関数の変化については、ホップフィールドの離散モデル、ホップフィールドの連続モデル、ボルツマンマシン以上の３通りの手法があるが、この最適化問題において巡回セールスマン問題の研究の結果から一番早く解がでる手法として、ホップフィールド離散モデルを用いた。その理由として、ホップフィールド連続モデルは、実際１回の実行におけるエネルギーの状態推移回数が離散モデルの約１０倍以上の時間がかかり、その中で最適な解が出ていないという結果から、あまり効率的ではないと思われる。また一般に一番理想的に近い解がでるボルツマンマシンによる焼きなまし法ではあくまでも近似的な解にはなるが、計算時間の長さに対して正確な解が出る保証がないことから、短時間でエネルギーが平衡しやすいホップフィールドの離散モデルを用いて行った。以上のシステムを用いて作成された結果を１０人の学生被験者に見てもらい、双方の変化の違いを考察した。

3．結果

これらの結果を表１に示す。同一色を用いて１回目にランダムな系列の色提示、２回目にスムーズな系列の色提示を行った。被験者には自由な感じを書いてもらったため、回答がばらつくので「自然」、「不自然」、「解らない」、「その他」に分類して見ると次の図１のようになった。これらのことからランダムな系列を用いると「不自然」と答える被験者が多く、スムーズな系列を用いると「自然」と答える被験者が「不自然」と答える被験者を上回った。

4．まとめ

色彩感覚の分析において数種類の色の提示を行い、その色彩変化の影響をみた。その結果、ランダムな系列とスムーズな系列を用いることにより明らかに違いがあることが分かった。また、提示時間に関する影響等を調べて行きたい。

参考文献

１）中野　馨：（１９９４）　Ｃでつくる続脳の情報システム、啓学出版

２）中野　馨：（１９９０）ニューロコンピューターの基礎 コロナ社

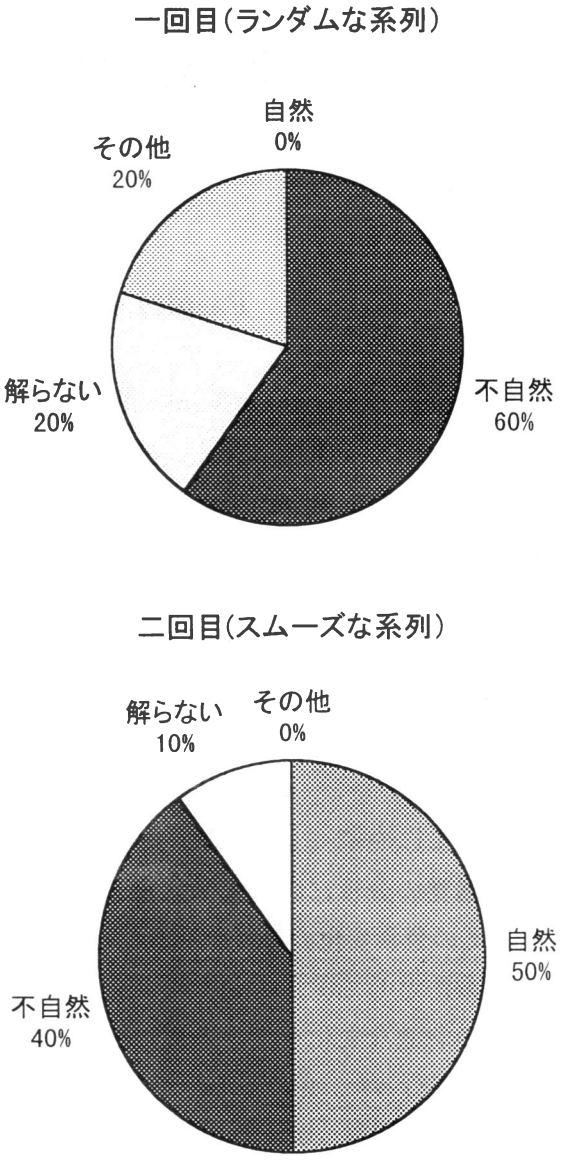


図１　ランダムな系列とスムーズな系列に対する色彩感覚の分析結果

表１　ランダムな系列とスムーズな系列に対する違い

被験者	一回目(ランダムな系列)	二回目(スムーズな系列)
1	ちかちかする	ちかちかする
2	ちかちかする	自然な感じである
3	赤色が強い	青色が強い
4	解らない	解らない
5	自然に流れていない	自然に流れている
6	原色ぽい	自然である、薄い
7	緑色は自然に流れるが赤色は流れない	自然である
8	好きである	忙しい
9	解らない	忙しい(ちらつく),色が強い
10	ばたばたする	ナチュラル

THE3-4

ファジィ理論を用いた広告色彩評価

Evaluation of Coloring in Advertisement with Fuzzy Theory

○鈴木　尚　　椎塚　久雄

Nao Suzuki　　Hisao Shiizuka

工学院大学　電子工学科

Dept.of Electronic Engineering,Kogakuin University

Abstract: This paper proposes evaluation of coloring in advertisement with fuzzy theory. We notice advertisement of computer game. And we value using RGB.

1.まえがき

消費者の多様化と個性化，新商品の洪水，ニューメディアの普及等々，消費者市場が昨今激しい変化の中にある．このような状況で消費者がより自分の好みにあった商品を選ぶためには，情報は不可欠なものである．最近は多種多様な情報が集めやすくなったが，生産者が直接消費者に訴えかけることができるものは広告である．しかし生産者は莫大な金額の広告費をかけているのにも関わらず，必ずしもその広告活動が成功するとは限らない．

そこで本研究では，広告デザイナーのセンスに頼っている広告制作を，コンピュータを使うことにより常に一定レベルの作品を作ることに役立たせるために，広告の中でも色彩に注目してシステムの作成を目指す．

2．広告

2－1広告の選択

印刷媒体広告としては雑誌広告，チラシ，中吊り，ポスターなどが挙げられる．表1に，それぞれの広告の特徴を示す．

表1で対象者とは，その広告が主に誰に読まれているかを表し，種類とは，その広告が見る種類のものか，それとも読む種類のものかを表している．

ここで，雑誌広告について具体的にどの様な広告が掲載されたかを見てみる．表2は 1996 年4月29日から1996年6月20日に発売されたコミック誌5種類，17 冊に関してどの様な広告が何件掲載されているのかを調べたものである．

表1　広告の特徴

広告媒体	主な広告	対象者	種類
雑誌	通信販売	購買者	読
チラシ	ゲーム	来店者	見・読
中吊り	雑誌	乗客	読
ポスター	不特定	不特定	見

表2　雑誌広告の掲載数

	A	B	C	D	E	合計
通信販売	2	10	11	5	6	34
飲料水	2	3	7	8	7	25
自動車	0	0	0	16	6	22
電化製品	4	1	1	3	7	16
金融	0	0	0	9	2	11
オートバイ	0	0	0	6	1	8
玩具	3	3	1	1	0	8
アルコール	0	0	0	4	3	7
化粧品	1	3	1	0	0	5
食品	1	1	0	2	0	4
煙草	0	0	0	2	2	4
電話	0	0	0	2	1	3

A，B，Cは少年誌，D，Eは青年誌である．それぞれその商品に関連した広告も含む．また，対象にしたのはカラーページのみであり，紙面の大きさは基本的にB5版，もしくはB4版である．

この2つの表から次のことが読みとれる．

表1より，広告の見せ方については，駅張りのポスターやチラシの表紙に代表されるように見てもらうことを目的にしているものと，電車の中吊り広告やチラシの中の様に読んでもらうことを目的にしているものがある．チラシに関しては一枚の紙面で主

に上の方は見てもらう部分で，下の方は必要な場合は見てもらう部分に当てている．

表2からは，広告はターゲットを考えているということが読み取れる．これは少年誌と，青年誌とを比べると自動車や金融など低年齢層には関係なさそうな商品に関しては掲載数が“0”になっていることから分かる．

このことから，今回の研究では特にコンピュータゲームのチラシに絞って研究を行った．コンピュータゲームのチラシを扱うことによって広告の特徴である読む部分と見る部分の関係を読みとることができ，雑誌広告より分かったターゲットという点においても条件を満たす．

2－2データ化

チラシに書かれている事柄を基に伝えている内容の分類を行った．

表3　広告の内容の分類

分類	数	内容
絵の種類	5	チラシの見せる部分がどの様な絵で表現されているか
ジャンル	69	ACTなどの一般的なジャンル分けとそれに付随する言葉
グラフィック	31	グラフィックに関する言葉とそれに付随する言葉
移植と続編	11	移植や続編に関する言葉
ストーリーとキャラ	3	ストーリーやキャラクターの紹介をしているかどうか
スタッフ	5	スタッフの紹介をしているかどうか
おまけ	3	どの様なおまけを付けているのか
その他	1	その他の要素

3．ヒストグラム解析

ヒストグラムとは画像の色調の分布をグラフで表したもである．ヒストグラム解析を行うことにより平均，標準偏差，中間値をR（赤），G（緑），B（青）それぞれについて得る．今回の研究では147枚のチラシに関してヒストグラム解析を行った．

4．評価方法

それぞれの分類においてヒストグラム解析値ごとに数直線を考える．つまり，1つの分類ごとに9つの数直線がある．この数直線上に評価したい広告の値をのせ，挟んでいる点と点の距離によって評価野ランクを決める．

A：距離3以内

B：ランクAとランクCの間

C：距離の平均±10%

D：ランクCとランクEの間

E：距離25以内

ここで，距離とは全ての点と点の間を指し，3や25といった数値はアンケートにより求めた値である．

ここで，評価したい値がランクAの時はよいが，それ以下の場合は，よりランクが大きい方へその値を変化させるようにする．但し，ランクが小さいものほど積極的に変化させるようにする．そして，評価する広告の全ての分類における評価を出し，ヒストグラム解析値のそれぞれについてランクと，変化の提案をする．

5．むすび

評価する基準がRGBの値なのでどの部分をどの様に変えればよいかということを提示できず，ただ全体的なバランスをみるだけのものになってしまった．この問題は，色単体での評価，色の組み合わせでの評価，色の位置での評価なども組み合わせる必要がある．ただし，コンピュータによる広告デザイン自動作成システムなどに活用すればこのまま使用可能であると考える．

【参考文献】

［1］産業能率マーケティング研究会：“マーケティングの実務知識”，経営実務出版（1983）

［2］柏木重秋：“新版広告概論”，ダイヤモンド社（1988）

[問い合わせ先]

〒163－91　新宿区西新宿1－24－2

工学院大学　電子工学科　椎塚　久雄

Email:shiizuka@sin.cc.kogakuin.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THE4-1

State Permutation-based Genetic Algorithms for Multi-stage Process Planning Problem

Gengui Zhou Mitsuo Gen

Department of Industrial and Systems Engineering
Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga 326, Japan
Email: {zhou gen}@genlab.ashitech.ac.jp

Abstract: Multi-stage Process Planning (MPP for short) problem is abundant among modern manufacturing systems. In this paper, a new Genetic Algorithms (GAs) approach is developed to deal with the MPP problem. The proposed GAs approach adopts a new state permutation encoding and combines with the neighborhood search technique in mutation operation to improve the evolutionary process to find the optimal solution of the MPP problem. The numerical analysis shows that the proposed GAs is both effective and efficient to the MPP problem.

Keywords: Process Planning, Multi-stage Decision Making, Genetic Algorithms.

1 Introduction

Multi-stage Process Planning (MPP) problem is abundant among modern manufacturing systems [3]. The problem, in general, can be described as manufacturing capabilities and requirements for transforming a raw stock of materials into a completed product through multi-stage process. The MPP problem lends itself, in a natural manner, to optimization techniques in order to find the best process planning amongst numerous alternatives given a certain criterion such as minimum cost, minimum time, maximum quality. The implicit enumeration of all these alternatives can find the optimal process planning, but with the increase of the problem scale, it has the difficulty, known as dimension explosion in enumeration as well as in network analysis or dynamic programming, to find the optimal process planning of the MPP problem.

Genetic Algorithms (GAs), as a new developed modern heuristic algorithm, has been widely and successfully applied in optimization of engineering design [4]. In this paper, a new GAs approach is proposed to deal with the MPP problem. In encoding the representation of the solutions, we develop a new encoding denoted as state permutation to represent the chosen state at each stage and form a process planning. This new encoding is only with the length of n - 1 for an n-stage MPP problem, and thus saves much memory and raises the computation efficiency. The merit of the new encoding is that any common genetic operations on this encoding will not generate illegal offspring so that it needs not any modification both for the initial population and for the offspring in the evolutionary process. Moreover, it is also easy for this new encoding to hybridize with some heuristic mutation operation such as the neighborhood search technique to efficiently evolve towards the optimal solution. The experiment on several test problems shows that the proposed method is both efficient and effective to the MPP problems.

2 MPP Problem Description

The MPP system usually consists of a series of machining operations, such as turning, drilling, grinding, finishing and so on, to transform a part into its final shape or product. The whole process can be divided into several stages. At each stage, there are a set of similar manufacturing operations. The problem is to find the optimal process planning among all possible alternatives given a certain criteria such as minimum cost, minimum time or maximum quality which are defined on the operations to be chosen. As an

example, Figure 1 shows a simple MPP problem by the means of network flow, the number on each arc may represent cost, time or distance *etc.*

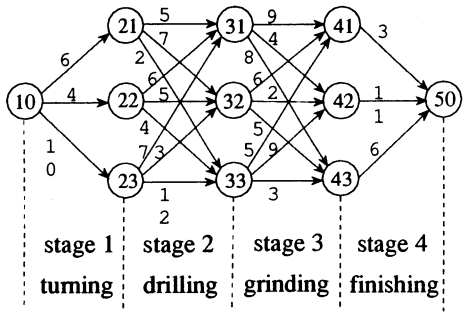


Figure 1: Flow network for a simple MPP problem

For an n-stage MPP problem, let s_k be some state at stage k, $D_k(s_k)$ be the set of possible states to be chosen at stage k, $k = 1, 2, \cdots, n$, and let x_k be the decision variable to determine which state to choose at stage k, obviously $x_k \in D_k(s_k)$, $k = 1, 2, \cdots, n$. Then the MPP problem can be formulated as follows:

$$\min_{\substack{x_k \in D_k(s_k) \\ k=1,2,\cdots,n}} V(x_1, x_2, \cdots, x_n) = \sum_{k=1}^{n} v_k(s_k, x_k) \quad (1)$$

where $v_k(s_k, x_k)$ represents the criterion to determine x_k under state s_k at stage k.

Obviously, with the increase of the problem scale, there are too much stages and states to be taken into consideration, it will greatly affect the efficiency in using Shortest Path method or dynamic programming to get the optimal solution. This is usually known as dimension explosion. In the following section we discuss our GAs approach for the MPP problem.

3 State Permutation

Considering the network flow of problem (1) displayed in Figure 1, it is intuitive to describe the process planning by indicating which node or state is chosen for a particular operation at each stage. If the node or state is chosen, then denoted as "1", if not, denoted as "0". In such way, the MPP solution can be encoded in a binary string format by concatenating all the set states of the stages. Actually, as to the MPP problems shown in Figure 1, the alternative states at each stage can be expressed by a series of integers to indicate the node or state. If a state for an operation is chosen at some stage for the process planning, then its corresponding integer for that node or state can be assigned whereas the integer is within the number of possible states at that stage. Therefore, the MPP solution can be concisely encoded in a state permutation format by concatenating all the set states of the stages as shown in Figure 2, where the first integer in

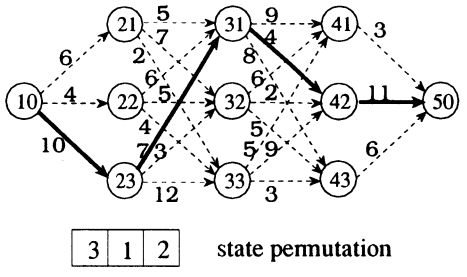


Figure 2: Process planning and its state permutation encoding

each node means the stage index in multi-stages and the second integer represents the state index in that stage. As there is always only one state to be chosen at the last stage, it needs not indicate in the permutation.

This state permutation encoding is one-to-one mapping for the MPP problem, so it is easy to decode and evaluate. Compared with the binary string encoding, this state permutation encoding has three valuable advantages:

(1) the encoding length is only n - 1 for an n-stage MPP problem;
(2) the encoding needs not any modification in genetic operations such as crossover or mutation;
(3) the encoding is easy to be hybridize with some heuristic genetic operations to improve the evolutionary process.

4 GAs Approach

4.1 Genetic Representation

The state permutation encoding is adopted as the genetic representation of the MPP problem in the proposed GAs approach. As to the initial population for an n-stage MPP problem, each individual is a permutation with n-1 integers whereas the each integer is generated randomly within the number of all possible states at the corresponding stage.

4.2 Genetic Operation

For the state permutation encoding, it is easy to hybridize the neighborhood search technique in mutation operation to produce an improved offspring. Operated on the MPP problem, this heuristic mutation operation provides great chance to evolve to the optimal solution. Figure 3 shows an example for this mutation operation with neighborhood search technique. Suppose that the mutated gene at stage 3 and the number of possible states to be chosen is 4.

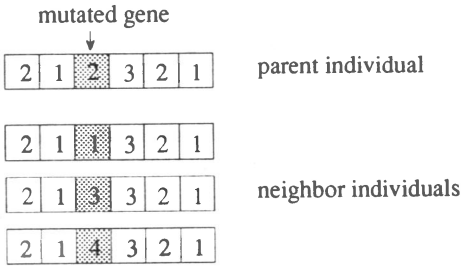


Figure 3: Mutation with neighborhood search

4.3 Evaluation

Evaluation is to associate a fitness value with each individual in population. The fitness value of each individual reflects how good it is. In the proposed GAs approach for the MPP problem, we directly calculate the objective value of the problem (1) and take the reciprocal of it as its fitness value.

4.4 Selection

Here, we adopt the $(\mu+\lambda)$ - selection strategy [2]. But in order to avoid the premature convergence of the evolutionary process, our selection strategy only selects μ different best individuals from μ parents and λ offspring. If there are no μ different individuals available, the vacant pool of population is filled with renewal individuals generated randomly.

5 Numerical Analysis

The first numerical example, presented by B. Awadh *et al.*, has been in detail studied in [1]. The problem comprises 7 stages, 24 nodes, 80 arcs and the total number of 1440 possible production process plannings. It is given out as shown in Figure 4 For this simpler example, by using the binary string and setting the population size as *pop_size*: 200, in the best case the optimal solution can be found at the 5th generation and on average the performance of the evolutionary process has a leveling off starting only after the 21th generation in 20 trials [1]. However, by using the state permutation encoding and the proposed GAs approach, the optimal solution can be averagely obtained at the 4th generation for a smaller population size as *pop_size*: 5 and the 3rd generation for a larger population size as *pop_size*: 50. Since the state permutation encoding is much simpler than the binary string encoding for this problem, it really takes no much more effort in the evolutionary process to evolve to the optimal solution. Figure 5 clearly illustrates the evolutionary process of the state permutation encoding under the action of the proposed GAs approach, which is plotted according to the average results in 20 trials.

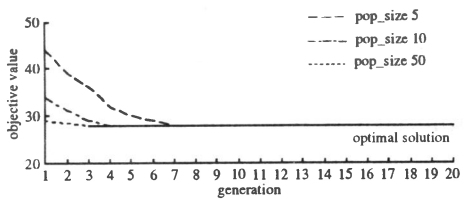


Figure 5: Illustration of the evolutionary process

In order to further demonstrate the effectiveness and efficiency of the proposed GAs approach on the MPP problem, we generate 10 different MPP problems which have the same scale as those in [1]. All results are given out in Table 1. In order to compare with two different GAs approaches on a same problem, there are several factors which have to be taken into consideration. Besides the different setting of parameters such as crossover rate, mutation rate, population size, total generation and total runs, different soft and computational means are also very important for the computational comparison. However, compared with the experiment results in [1], Table 1 still clearly shows that our GAs approach is both effective and efficient to the MPP problem.

6 Conclusion

This paper presents a new approach to the MPP problem by using the GAs technique. The proposed GAs approach adopts a new state permutation encoding to make the evolutionary process

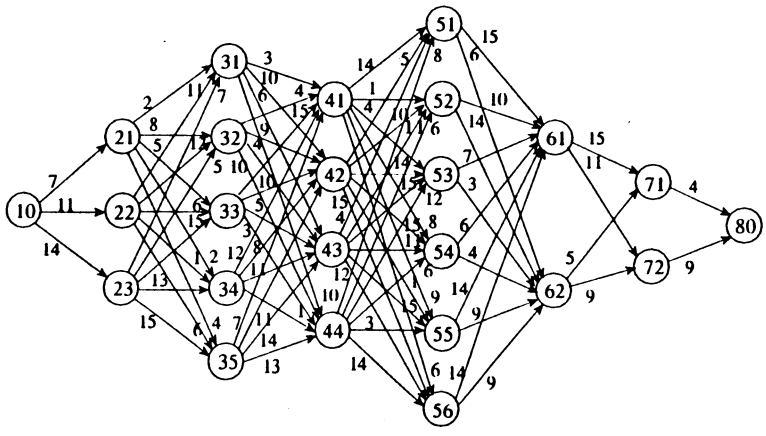


Figure 4: Illustration of the numerical example with 7 stages and 24 nodes

even more simpler in finding the optimal solution, and combines with the neighborhood search technique to have the great probability to evolve to the optimal solution. The numerical analysis shows that the state permutation encoding is more effective to the MPP problem than the binary string encoding. Compared with the traditional network analysis technique, the proposed GAs approach is both effective and efficient to deal with this kind of problem.

References

[1] Awadh,B., Sepehri, N. and Hawaleshka, O. A computer-aided process planning model based on genetic algorithms. *Computers Ops. Res.*, 1995, **22**, 841-856.

[2] Bäck, T. Selective pressure in evolutionary algorithms: a characterization of selection mechanisms. In Fogel, D. ed. *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation.* IEEE Press, Florida, 1994, 57-62.

[3] Chang, T.C. and Wysk, R.A. *An Introduction to Automated Process Planning Systems.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1985.

[4] Gen, M. and Cheng, R. *Genetic Algorithms and Engineering Design.* John Wiley & Sons, New York, 1996.

Table 1: Comparison among different approaches to MPP problems

No.	Number of stages	Number of nodes	CPU time OK^1 (sec.)	CPU time(sec.) BS^1 Min	BS^1 Ave	CPU time(sec.) SP^2 Min	SP^2 Ave	%
1	7	24	3.01		0.08	0.03	0.04	100
2	7	27	2.84		0.04	0.03	0.04	100
3	8	38	4.31		0.40	0.06	0.09	100
4	9	37	4.25	0.1	0.57	0.06	0.12	100
5	10	47	4.48	0.1	0.63	0.09	0.27	100
6	11	53	4.58	0.2	0.75	0.34	0.45	100
7	12	63	4.69	0.15	0.36	0.32	0.48	100
8	13	72	5.08	0.8	1.30	0.61	1.03	100
9	14	79	5.19	0.5	1.75	0.49	1.01	90
10	15	89	5.35	0.4	1.53	0.97	1.28	80

OK^1: Out-of-Kilter algorithm using SAS/OR program operated on SUN workstation [1];
BS^1: Binary String encoding by GAs operated on SUN workstation, pop_size: 200 [1];
SP^2: State Permutation encoding by GAs operated on EWS4800/360PX workstation, pop_size: 100;
Min: the minimal CPU time in all 20 runs; Ave: the average CPU time in all 20 runs;
%: the frequency to obtain the optimal solution in all 20 runs.

Single-Machine Scheduling Problem using Hybrid Genetic Algorithms

Dawei Zheng and Mitsuo Gen

Department of Industrial and Systems Engineering
Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga, 326 Japan
E-mail: zheng@genlab.ashitech.ac.jp

abstract

Machine scheduling problem is abundant among modern manufacturing system. The performance measure of early and tardy completion of jobs is very natural as one's aim is usually to minimize simultaneously both earliness and tardiness of all jobs. In this paper, we discuss such a nonregular single machine scheduling problem. As the problem is *NP-hard* and no effective algorithms exist, we proposed a genetic algorithms (GAs) approach to deal with it. A heuristic algorithm, denoted as TIMETABLER, is hybridized in the GAs approach to decode each chromosome. The results by the hybrid GAs are semiactive schedule, and shows the effectiveness of the proposed method.

Keywords : Single machine scheduling problem, Genetic algorithms.

1 Introduction

A standard assumption in the scheduling literature has been that performance measures are nondecreasing functions of job completion times (i.e., "regular" performance measures). The major scheduling monographs by Conway [6], *et al*, all limit the scope of their presentation to scheduling problems with such performance measures. There exists a rich assortment of regular measures, such that mean weighted flow time, makespan, mean weighted tardiness, etc. However, in many scheduling situations the assumption of regularity is not a major limitation [1], one has to deal with some nonregular measures of performance.

One such class of problems includes those in which it is important to minimize some measure of variation in flow time or waiting time among the jobs to be serviced. These types of problems have been studied by Merten [13], *et al.* Recently, more attention has been paid to the measures of early and tardy completion of jobs by Davis [7], Ferris [8], *et al.*

The performance measure of early and tardy completion of jobs is very natural as one's aim is usually to minimize simultaneously both earliness and tardiness of all jobs. However, many researches on this noregular machine scheduling problem are limited in which no idle times are allowed in an optimal schedule. In this paper we address a nonregular scheduling problem to minimize the measure of early and tardy completion of jobs which idle times are allowed in the optimal schedules. This problem has been proven *NP-hard* in the strong sense [11], [12], therefore no effective approach exists to deal with it. Genetic Algorithms (GAs) have emerged as one of most effective and robust optimization tools [14]. GAs can handle any kind of objectives and any kind of constraints, which makes GAs highly attractive algorithms for machine scheduling problems. Many researchers have reported their works on application of GAs to this problem [4], [9]. Here, we propose a GAs approach to deal with the nonregular single machine scheduling problem. In encoding the genetic representation, a random key representation is proposed. In order to improve the evolutionary process, we hybridized a heuristic algorithm, denoted as TIMETABLER [7] to decode each chromosome and produce a semiactive scheduling of the problem. The numerical analysis shows that the proposed GAs approach can always get the semiactive scheduling.

In Section 2 the nonregular single machine scheduling problem is introduced. Section 3 discusses the semiactive scheduling and the heuristic algorithm TIMETABLE. Section 4 gives out our proposed genetic algorithm approach. Numerical experiments are illustrated in Section 5 and conclusion follows in Section 6.

2 Nonregular single machine problem

We address a nonregular scheduling problem in which there is a single machine with n jobs available for processing time at time zero. Each job is identified by an integer from 1 through n, and each job i is described by these attributes:

$p(i)$: processing time, include any required setup time

$d(i)$: due date

$e(i)$: early penalty

$t(i)$: tardy penalty

A schedule S is defined as a vector of job completion times $[c(1), c(2), \cdots, c(n)]$, The objective is to find a schedule as follows:

$$\min \ Z(S) = \sum_{i=1}^{n} [e(i) \max\{d(i) - c(i), 0\} + t(i) \max\{c(i) - d(i), 0\}] \quad (1)$$

where the first term on the right hand side of function 1 represents earliness cost and the second term represents tardiness cost. In the notation of Rinnooy Kan, the problem may be described as $n/1//ET$, or may be called ET for short, where ET indicates that the performance measure accounts for earliness and tardiness.

Problem ET is important to study because there are many applications where penalties are incurred for both early and tardy job completion. As Kanet claimed, a typical constraint in industrial settings is the forbidding of early shipment to customers. When this is case, early job completion can cause the cash commitment to resources in a time frame earlier then needed, giving rise to early completion penalties. Tardiness penalties arise from a variety of sources – loss of customer goodwill, opportunity costs of lost sales, and direct cash penalties. The ET problem is consistent with the current focus in industry toward just-in-time production.

The ET problem is *NP-hard* in the strong sense, since it is a generalization of the weighted tardiness problem, which is also known to be *NP-hard* in the strong sense.

3 Semiactive Scheduling

The notion of semiactive schedules is defined by Giffler [10], and Baker [2].

Definition: A semiactive schedule is one in which no shift of a job will provide a lower cost schedule.

Given a job permutation, we can find a semiactive schedule by using a heuristic algorithm, denoted as TIMETABLE by Davis [7], *et al.* Procedure TIMETABLE allocates idle time to form an optimal schedule for a given job permutation. The procedure can be illustrated as follows:

Procedure: TIMETABLER:

t: the stage number

$S(t, P)$: a partial schedule of $(t-1)$ jobs, where P is a permutation of jobs. We treat P as an ordered set and let jP the permutation in which P is immediately preceded by job j.

P': an ordered set of unscheduled jobs; jobs that will follow those in P' are in P.

Step 1 Let $t = 1$ with $S(t, P)$ being null and P being empty.

Step 2 Select the last job j in P', and delete it from P'.

Step 3 Move to the next stage by

3.1 adding j to $S(t, P)$ to create $S(t+1, jP)$ such that increasing $c(j)$would not reduce cost of $S(t+1, jP)$, using the following step:

3.1.1 Initially job j is started at time 0, shifting jobs in $S(t, P)$ to the right if necessary

3.1.2 Shift job j to the right until the marginal cost of doing is not negative

3.2 let $t = t + 1$;

3.3 Setting $P = jP$

Step 4 If P' is not empty, go to Step 2. Otherwise, stop.

The simple examples in Figure 1 are instances of the ET problem with $e(1) > t(2) > 0$.

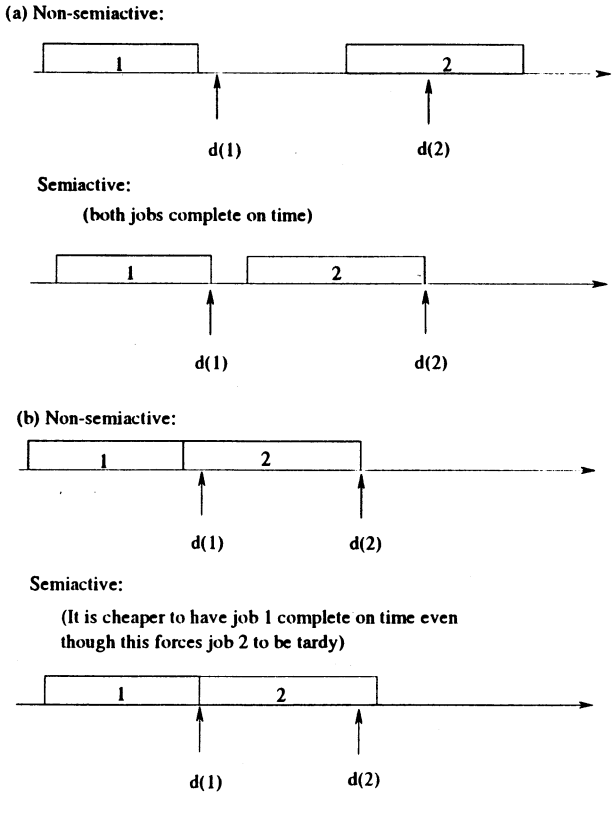


Figure 1: Examples of semiactive schedules, where $e(1) > t(2) > 0$

The semiactive schedules dominate the set of all schedules (in other words, that a semiactive schedule is optimum for a given job permutation).

4 Genetic Algorithm

In the last few years, GAs have been successfully applied to optimization problems in diverse fields. GAs differ from other search techniques. GAs rely on analogies to natural genetic and biological evolution processes, starting with an initial set of random solutions called *population* and using a process similar to biological evolution to improve upon them. Each individual in the population is a string of symbols, called a *chromosome*, representing a solution to the problem. During each iteration, called a *generation*, the chromosomes in the current population are *evaluated*, using some measure of *fitness*. Based on this fitness value, some chromosomes are *selected* from the population as *parents*. The fitter chromosomes have higher probability of being selected. A number of genetic operators are then applied to the parents to generate new chromosomes, called *offspring*, by selecting some of the parents and offspring, and rejecting others so as to keep the population size constant. The best overall solution becomes the candidate solution to the problem.

Random Key Representation: Random key representation is firstly given by Bean [3]. With this technique, genetic operations can produce feasible offspring without creating addition overhead for a wide variety of sequencing and optimization problems.

Random key representation encodes a chromosome with *random number*. Their values are used as sort *keys* to decode the solution. A chromosome is defined as $V = \boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{x} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]$, $0 < x_i < 1$, where n is the number of jobs. For example:

chromosome : [0.34 0.09 0.31 0.78 0.98 0.56 0.21]
permutation : [4 1 3 6 7 5 2]

Crossover: Crossover is implemented with linear crossover operator [14]. For each pair of parents (vectors V_1 and V_2), the crossover operation V_1 and V_2 will produce two children as:

$$V_1^{'} = c_1 * V_1 + c_2 * V_2$$
$$V_2^{'} = c_2 * V_1 + c_1 * V_2$$

where $c_1, c_2 \geq 0$ and $c_1 + c_2 = 1$.

Mutation: For a given parent V, if the element x_k of it is selected for mutation, the resulted offspring is $V^{'} = [x_1, \cdots, x_k^{'}, \cdots, x_n]$ where $x_k^{'}$ is randomly selected.

$$x_k^{'} = r * x_k$$

where $0 < r < 1$.

Evaluation and selection: During each generation, chromosomes are *evaluated* using some measure of fitness. In this paper, the fitness value is evaluated according to TIMETABLER method. Using TIMETABLER method, we can decode each chromosome and calculate its fitness value according to the function (1).

Then we use roulette wheel as the basic selection mechanism to reproduce next generation based on current enlarged population.

5 Numerical Experiment

Example 1:

The problem was solved by Chankong and Hsimes using a goal vector and weights for objectives [7]. Date was shown as table 1.

Table 1: Scheduling Problem for 7 jobs

Job No.	p	d	e	t
1	8	30	11	15
2	2	25	16	18
3	6	16	10	12
4	3	18	9	12
5	7	26	18	38
6	2	4	20	25
7	3	12	10	12

p: Processing time
d: Due date
e: Early penalty
t: Tardy penalty

Parameters for the proposed GA are selected as: number of maximum generations is $maxgen = 1000$, population size is $pop\_size = 50$, crossover rate is $p_c = 0.4$, and mutation rate is $p_m = 0.1$. The result was shown in Table 2.

Table 2: Optimization Solution for 7 jobs Problem

the sequence of job	objective value	completion time
1 2 5 4 3 7 6	197	33

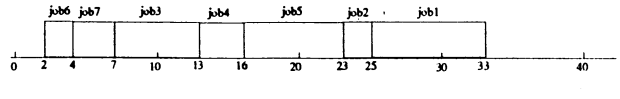


Figure 2: semiactive schedules of example 1

Figure 2 clearly illustrate the schedule of this problem. According to the Definition, it is not difficult to verify that the obtained schedule is a semiactive schedule.

Example 2:

In [2] 16 test problems were given out. The solutions were got by neighborhood search method under

Table 3: Obtained Solutions

Problem	Schedule	fitness
1	7 8 3 5 6 4 2 1	998
2	6 1 2 3 4 8 5 7	1135
3	2 3 8 4 5 6 1 7	554
4	4 5 1 6 2 3 8 7	1043
5	7 5 6 3 8 2 1 4	904
6	4 6 1 8 5 7 2 3	1020
7	5 6 7 2 4 1 8 3	952
8	3 4 1 8 2 5 6 7	1671
9	3 8 6 4 7 5 1 2	520
10	6 5 2 1 4 7 8 3	1797
11	2 3 4 7 5 6 1 8	436
12	4 6 7 2 8 1 3 5	1095
13	3 7 8 6 1 4 5 2	603
14	6 1 4 3 5 8 7 2	1388
15	8 1 4 5 7 6 3 2	415
16	8 4 7 1 6 3 2 5	1752

the assumption that all earliness and tardiness penalties are defined as 1 and no idle times are allowed.

Parameters for the proposed GA are selected as: number of maximum generations is $maxgen = 1000$, population size is $pop\_size = 50$, crossover rate is $p_c = 0.4$, and mutation rate is $p_m = 0.1$. By the proposed GAs approach, all semiactive schedules are obtained and illustrated in Table 3. Though all earliness and tardiness penalties are set the same as neighborhood search, the proposed GAs approach deals with the nonregular single machine problem in which the idle times are allowed. Therefore, it is difficult to compare between two methods. However, from the results in Table 3, it still clearly shows that the proposed GAs approach can find all semiactive schedules if the idle times are allowed in a optimal scheduling, which shows the effectiveness of the proposed method.

6 Conclusion

In this paper, a genetic algorithm is developed to solve the nonregular single machine scheduling problem which minimizes simultaneously both earliness and tardiness of all jobs and allows idle time in the optimal schedule. The random key representation is adopted as the genetic representation of the problem and a heuristic algorithm, denoted as TIMETABLER, is hybridized in the genetic algorithm to decode the genetic representation to procedure a semiactive scheduling. The numerical experiment shows that the hybrid genetic algorithm can always get semiactive scheduling. As the proposed method can deal with even more practical scheduling problems, it will be greatly useful to modern manufacturing systems.

References

[1] Bagchi, U., R.S. Sullivan and Y.L. Chang: Minimizing Mean Absolute Deviation of Completion Times About a Common Due Date, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.33, pp.227-240, 1986.

[2] Baker, K.B.: *Introduction to Sequencing and Scheduling.* Wiley, New York, 1974.

[3] Bean, J.: Genetic Algorithms and Random Keys for Sequencing and Optimization, *ORSA Journal on Computing*, Vol.6, pp.154-160, 1994.

[4] Chae, Y.L. and S.J. Kim: Parallel Genetic Algorithms for the Earliness-Tardiness Job Scheduling with general Penalty Weights, *Computers & Industrial Engineering*, Vol.28, pp.231-243, 1995.

[5] Chankong, V. and Y.Y. Haimes: *Multiobjective Decision Making Theory and Methodology.* New York:North-Holland, 1983.

[6] Conway, R., W. Maxwell, and L. Miller: *Theory of Scheduling.* Addison-Wesley, Reading, MA, 1967.

[7] Davis, J.S. and J.J. Kanet: Single-Machine Scheduling with Early and Tardy Completion Costs, *Naval Research Logistics*, Vol.40, pp.85-101, 1993.

[8] Ferris, M.C. and M. Vlach: Scheduling with Earliness and Tardiness Penalties, *Naval Research Logistics*, Vol.39, pp.229-245, 1994.

[9] Gen, M. and R. Cheng: *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, 1997.

[10] Giffler, B. and G.L. Thompson: Algorithms for Solving Production Scheduling Problems, *Operations Research*, Vol.8, pp.487-503, 1960.

[11] Lawler, L.E.: A Pseudopolynomial Algorithm for Sequence Jobs to Minimize Total Tardiness, *Annals of Discrete Mathematics*, Vol.1, pp.331-342, 1977.

[12] Lenstra, J.K., A.H.G. Rinnooy Kan and P. Brucker: Complexity of Machine Scheduling Problems, *Annals of Discrete Mathematics*, Vol.1, pp.343-362, 1977.

[13] Merten, A.G., and M.E. Muller: Variance Minimization in Single Machine Sequencing Problems, *Management Science*, Vol.18, pp.518-528, 1972.

[14] Michalewicz, Z.:*Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 2nd ed., Springer-Verlag, 1994.

[15] Sidney, J.B.: Single-Machine Scheduling with Earliness and Tardiness Penalties, *Management Science*, Vol.25, pp.62-69, 1977.

ファジィ処理時間を考慮したファジィ納期スケジューリング問題
Fuzzy Due-Date Scheduling Problem with Fuzzy Processing Time

伊藤 健　　石井 博昭
Takeshi Itoh　　Hiroaki Ishii

大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract

Most of scheduling problems treat the jobs' processing times and due-dates as certain values. In actual cases, however, they often include vagueness. Then, we propose a more flexible and general model, which takes uncertain processing times into account by using fuzzy numbers. In this model, computing the jobs' completion time based on the extended sum of fuzzy numbers. And, introducing the possibility measure to the problem formulation, we define a new idea of the lateness for a job with fuzzy due-date. Our optimization criterion is how the number of late jobs for their fuzzy due-dates should be decreased.

1 はじめに

これまでに提案されているスケジューリング問題のモデルの多くは、対象とする問題においてジョブの処理時間を確定的なものとして取り扱っている。しかし、実際に処理を行う以前に、ジョブの処理時間を的確に判断することは極めて困難なことである。つまり、処理時間を特定するために用いるデータ等には観測誤差が含まれている恐れがあるし、ジョブの処理過程に人間の作業が含まれる場合等は、すべての処理機会において一定の処理時間を保証することはできない。

また、納期に関してもある程度の融通を利かせることも考えられるので、納期をファジィ概念化し、ジョブの処理時間を不確定なものとして問題をとらえ、より現実の状況に近いモデルを考える必要があると思われる。

[1] では処理時間が確定的に与えられている複数のジョブを1つの機械を用いて実行する際、各々の納期に対して納期遅れとなるジョブの数を最小にすることを目的としたアルゴリズムが示されている。本研究では、このアルゴリズムをジョブの処理時間が不確定な場合にでも適用できるように、処理時間を L-R ファジィ数、納期遅れを可能性測度により定義し、アルゴリズムの拡張を行う。

2 定式化

各ジョブ J_i $(i = 1, \cdots, n)$ について、その納期をメンバシップ関数

$$\mu_{D_i}(x) = \begin{cases} 1 & (0 \leq x \leq d_i) \\ g(x) & (x \geq d_i) \end{cases}$$

をもつファジィ納期 D_i とする。ただし、$g(x)$ は $g(d_i) = 1$, $g : R \rightarrow [0, 1]$ なる狭義減少関数である。D_i は "ジョブ J_i をだいたい d_i までに完了したい。" というファジィ目標と見なすことができる。また、処理時間を次のようなメンバシップ関数によって制限される正の

L-Rファジィ数$T_i = (m_i, \alpha, \beta)_{LR}$とする。

$$\mu_{T_i}(x) = \begin{cases} L\left(\dfrac{m_i - x}{\alpha}\right) & (x \leq m_i) \\ R\left(\dfrac{x - m_i}{\beta}\right) & (x \geq m_i) \end{cases}$$

ただし、L, Rは

$$L(0) = R(0) = 1$$
$$L,\ R : [0,\ +\infty) \rightarrow [0,\ 1]$$

なる狭義減少関数とする。

本モデルでは処理時間をファジィなものとしているので、処理時間を基にジョブをソートするために、全順序となる何らかの順序関係を定義する必要がある。各ジョブの処理時間は正のL-Rファジィ数なので、そのメンバシップ関数は単峰型となる。したがって、処理時間のメンバシップ関数毎に以下のような面積S_iを考えることができ、それらを比較基準に用いる。

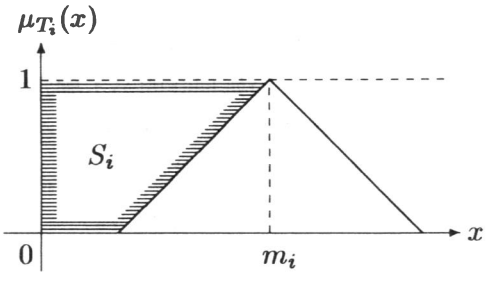


図1

処理時間がクリスプな場合ジョブのソートが、このルールの特別な形であることは明らかである。

さらに、ジョブJ_iの完了時間C_iであるが、先行して実行されるジョブの処理時間を拡張加算することにより定義する [2]。例えば、J_1, J_2, J_3の順に実行された場合、各々の完了時間C_1, C_2, C_3は

$$C_1 = (m_1, \alpha, \beta)_{LR}$$
$$C_2 = C_1 \oplus (m_2, \alpha, \beta)_{LR}$$
$$C_3 = C_2 \oplus (m_3, \alpha, \beta)_{LR}$$

である。ゆえに、完了時間もまた正のL-Rファジィ数となり、ファジィ納期が満足される可能性測度$\Pi_{C_i}(D_i)$を考えることができる。

$$\Pi_{C_i}(D_i) = \sup_x \min\{\mu_{C_i}(x),\ \mu_{D_i}(x)\}$$

ここで、$\Pi_{C_i}(D_i)$と正定数λ (≤ 1) を用いてJ_iのλ納期遅れを次のように定義する。

$$J_i \text{が}\lambda\text{納期遅れ} \Leftrightarrow \Pi_{C_i}(D_i) \leq \lambda$$

以上より、λ納期遅れのジョブ数を最小にするスケジュールを求めることで [1] の拡張を行う。

3 おわりに

本モデルでは、処理時間を基にしたジョブのソートに面積S_iを用いているが、処理時間のメンバシップ関数とx軸とで囲まれる部分の面積U_iを導入し、S_iの代わりに$S_i + U_i$を用いることで、より慎重な立場でのスケジューリングを考えることができる。

なお、本研究は文部省科学研究費一般 C 08680460 による補助の下に行われたものである。

参考文献

[1] J.M.Moore, "An n Job, One Machine Sequencing Algorithm for Minimizing the Number of Late Jobs", *Management Science* **15** (1968), 102-109.

[2] D.Dubois, H.Prade, *Fuzzy sets and systems*, Academic Press, New York (1980).

連絡先:
〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
応用物理学専攻数理情報工学講座
伊藤　健
TEL: 06-879-7870
FAX: 06-878-1385
e-mail: takeshi@ap.eng.osaka-u.ac.jp

Evolutionary Computation for Multiobjective Chance-constrained Solid Transportation Problem

Yin-Zhen LI, Mitsuo GEN and Kenichi IDA

Dept. of Industrial and Systems Engineering
Ashikaga Institute of Technology

Abstract

In real-world production and transportation systems, often sampling information is available as a mean of describing uncertainty, which can be utilized as chance-constraints. Transportation problem offers a mean of considering multiple conflicting objectives. The chance-constrained solid transportation problem as a stochastic model will be converted to the nonlinear deterministic one. The evolutionary computation that involves the genetic algorithm is employed for solving the multiobjective nonlinear solid transportation problem. The computer simulation will shows the effectiveness of the our implementation.

Key words: solid transportation problem, multiobjective optimization technique, chance-constraints, evolutionary computation

1. Introduction

The transportation problem(TP) is well-known as a basic network problem. Hitchcock is credited with the first formulation and discussion of a planar transportation model in 1941. An extension of the classical transportation problem to the solid transportation problem (STP) was stated by Schell in 1955.

Due to the real-world problem, chance-constrained programming was developed as a means of describing constraints in the form of probability levels of attainment, which named by Charnes and Cooper [1], who have pioneered the technique.

In some product-supply transportation systems, that the production and demands or transportation capacities cannot be determined exactly. Instead they behave like a random variable from some distribution. Under this a reasonable criterion is that each constraint must hold for most combinations of the parameter values. Also, some or all of the cost coefficients are not exactly known with certainty frequently occur in practice. Such stochastic linear models can be converted to deterministic models, but, such models will be nonlinear[2].

In more real-world cases transportation problem can be formulated as a multiobjective solid transportation problem(MSTP). In a multiple objective context, the concept of optimal solution gives place to one of nondominated solutions. This decision problems entail analyzing tradeoffs among the objectives in order to get a satisfactory compromise solution from the set of nondominated solutions.

In this paper, we present the multiobjective chance-constrained solid transportation problem by evolutionary computation. Firstly, the chance-constrained solid transportation problem that with coefficient of objectives under the uncertainty as a stochastic model will be converted to the nonlinear deterministic one. And then we employ the evolutionary computation to solve this multiobjective nonlinear solid transportation problem which from the original problem. The effectiveness and efficiency of the our implementation will be shown by the numerical experiments.

2. Multiobjective chance-constrained STP

Let us assume that the coefficients vector $\boldsymbol{c}$ of the objective into probability statements and constraints are random. Denote that $\eta_q, (q = 1, 2, \cdots)$, $\alpha_i, (i = 1, 2, \cdots, m)$, $\beta_j, (j = 1, 2, \cdots, n)$ and $\gamma_k, (k = 1, 2, \cdots, K)$ are probability parameters where the objectives, supplies, demands and capacity of the conveyances, which in the probability statements respectively. Then a conventional MSTP can be described as a multiobjective chance-constrained solid transportation problem (MCSTP) shown below.

$$\min \quad \{\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_Q\} \tag{1}$$

$$\text{s. t.} \quad P\left\{z_q = \boldsymbol{c}_q^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \leq \lambda_q\right\} \geq \eta_q, \quad \eta_q \in [0, 1], \quad q = 1, 2, \cdots, Q \tag{2}$$

$$P\left\{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk} \le a_i\right\} \ge \alpha_i,$$

$$\alpha_i \in [0,1], \quad i = 1,2,\cdots,m \quad (3)$$

$$P\left\{\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk} \ge b_j\right\} \ge \beta_j,$$

$$\beta_j \in [0,1], \quad j = 1,2,\cdots,n \quad (4)$$

$$P\left\{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} x_{ijk} \le e_k\right\} \ge \gamma_k,$$

$$\gamma_k \in [0,1], \quad k = 1,2,\cdots,K \quad (5)$$

$$x_{ijk} \ge 0, \quad i = 1,2,\cdots,m; \quad (6)$$
$$j = 1,2,\cdots,n; \ k = 1,2,\cdots,K$$

where a_i is the amount of homogeneous products for i-th origin which are transported to n destinations. b_j is the demand of homogeneous products for j-th destination. c_{ijk}^q is a coefficients of q-th objective function which are associated with transportation of a unit of the product from source i to destination j by means of the conveyance k. x_{ijk} is the unknown quantity to be transported from origin i to destination j by means of the conveyance k. And

$$\boldsymbol{c}_q = [c_{111}^q c_{211}^q \cdots c_{m11}^q \cdots c_{1n1}^q c_{2n1}^q \cdots c_{mn1}^q \cdots c_{11K}^q c_{c21K}^q \cdots c_{1nK}^q c_{2nK}^q \cdots c_{mnK}^q],$$

$$\boldsymbol{x} = [x_{111}x_{211}\cdots x_{m11}\cdots x_{1n1}x_{2n1}\cdots x_{mn1} \cdots x_{11K}x_{c21K}\cdots x_{1nK}x_{2nK}\cdots x_{mnK}]$$

Restrictions (2)-(5) are called *chance-constraints*.

The use of chance-constraints requires development of deterministic equipments. The most commonly encountered distribution of error has been the normal distribution either because of underlying data behavior being normal, or reliance upon the central limit theorem of sampling theory.

Assume that $a_i \sim N(\mu_{a_i}, \sigma_{a_i}^2)$, $b_j \sim N(\mu_{b_j}, \sigma_{b_j}^2)$, $e_k \sim N(\mu_{e_k}, \sigma_{e_k}^2)$, and cost coefficient $c_{ijk}^q \sim N(\mu_{c_{ijk}^q}, \sigma_{c_{ijk}^q}^2)$, where a_i, b_j, e_k and c_{ijk}^q are independent each other. Then, above MCSTP can be converted into the nonlinear deterministic one where the coefficients vector, demands, supplies and capacity of conveyances are represented as probabilities. The MCSTP can be written as follows:

$$\min \quad z_q = \mu_{\boldsymbol{C}_q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} + K_{\eta_q}(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}V_q\boldsymbol{x})^{1/2}, \quad q = 1,2,\cdots,Q \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk} \le E[a_i] + K_{\alpha_i}\sigma_{a_i}, \quad i = 1,2,\cdots,m \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk} \ge E[b_j] + K_{1-\beta_j}\sigma_{b_j}, \quad j = 1,2,\cdots,n \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} x_{ijk} \le E[e_k] + K_{\gamma_k}\sigma_{e_k}, \quad k = 1,2,\cdots,K \quad (10)$$

$$x_{ijk} \ge 0, \quad \forall \ i,j,k \quad (11)$$

where K_v is a known fixed number for evidently to achieve a deterministic equivalent from the expected value model with probability v, $E[v]$ refers to the expected value of v and σ_v is the standard deviation of v. And V_q is the mnK diagonal matrix of the standard deviation of the coefficients from q-th objective.

Denote the right-hand-side of constraints respectively as s_i, d_j and c_k in eqns.(8)–(10). The above problem implies that the total supply $\sum_{i=1}^{m} s_i$ and total demand $\sum_{j=1}^{n} d_j$ are must at least equal to another; that is,

$$\sum_{i=1}^{m} s_i = \sum_{j=1}^{n} d_j = \sum_{k=1}^{K} c_k$$

called balanced condition.

According to the STP that constraints have any one relation, we can create a dummy origin or destination or conveyance to hold the balanced condition which is both a necessary and sufficient condition for the existence of a feasible solution to the problems.

3. Evolutionary computation

Now, we discuss our evolutionary computation for the balanced nonlinear solid transportation problem which has m' origins, n' destinations and K' conveyance from original problem with a dummy destination or origin or conveyances.

3.1 Representation

The three dimensional structure $X = [x_{ijk}]$ is employed for representing a chromosome to this transportation problem.

3.2 Initialization

The initialization procedure was created for the nonlinear STP as follows:

procedure: initialization
begin
  $\pi \leftarrow \{1,2,\cdots,m' \times n' \times K'\}$;
  repeat
    selsect a random number v_l from set π;
    calculate corresponding subscript indices;
      $i \leftarrow \lfloor (v_l - 1) \bmod (m' \cdot n')/\ n' + 1 \rfloor$;
      $j \leftarrow (v_l - 1) \bmod n' + 1$;
      $k \leftarrow \lfloor (v_l - 1)/(m' \cdot n') \rfloor + 1$;
    assign available amount of unit to val;
      $val \leftarrow \min\{s_i, d_j, c_k\}$;
    if at least one of index is not the last available

m' or n' or K';
then generate a random real number from $[0, val]$;
update data;
$x_{ijk} \leftarrow val$;
$s_i \leftarrow s_i - x_{ijk}$;
$d_j \leftarrow d_j - x_{ijk}$;
$c_k \leftarrow c_k - x_{ijk}$;
until(π becomes empty)
make necessary additions to x_{ijk} for available amounts;
end

This procedure is used to generate the initial population which satisfies all constraints. This time each x_{ijk} is a real number.

3.3 Operators

Here the genetic operator—*mutation* is used only. The mutation is performed in the following three steps [6].

Step 1: Randomly select submatrix $W = [w_{ijk}]$ from the parent matrix.

Step 2: Reallocate commodity for the submatrix. We use the initialization procedure to assign new values to submatrix W such that all constrains a_i^w, b_j^w and e_k^w are satisfied.

Step 3: Replace appropriate elements of parent matrix X_s by a new elements from the reallocated submatrix W'. So the new offspring X_s' will be generated.

3.4 Evaluation and Selection

As the evaluation function for survival, the weighted sums method is used to construct the fitness function which that multiple objective functions $z_q(X_s)$, $q = 1, 2, \cdots, Q$ are combined into one overall objective function at hand.

In the selection procedure, we employed elitist selection to enhance fitness of individuals and use the registered Pareto optimal solution strategy in each generation attempt to get the set of Pareto solutions approximately (near-optimal solutions).

3.5 The best compromise solution

To provide the optimal solution for the decision maker, the method of Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (called TOPSIS [5]) was combined into our implementation for solving MCSTP, which is based upon the principle that the chosen alternative should have the shortest distance from reference point as the positive ideal solution and the farthest other point as the negative ideal solution. Note the full detail of the method we given in reference [6].

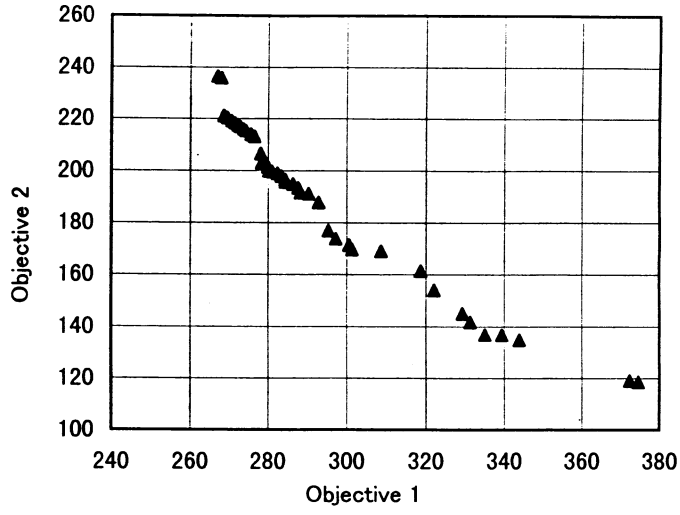


Fig. 1: Obtained Pareto optimal solutions

4. Numerical experiments

Consider the following example that bicriteria chance-constrained solid transportation problem was adapted from reference [3]. The normal distribution of supplies, demands, capacity of conveyances and coefficients which denoted as (μ, σ^2) are given Table 1 and Table 2.

Table 1: Data in example

i, j, k	1	2	3	4
a_i	(24, 1)	(8, 2)	(18, 2)	(10, 1)
b_j	(11, 2)	(19, 2)	(21, 1)	(9, 1)
e_k	(17, 1)	(31, 2)	(12, 29	—

For simplicity, we assume that supply constraints are required to hold with same probabilities $\alpha_i = 0.95$ $(i = 1, 2, 3, 4)$, and the demands of four destinations are required to hold with probabilities $\beta_j (j = 1, 2, 3, 4)$ are 0.95, 0.90, 0.90 and 0.95 respectively. The capacity of three conveyances to follow probabilities $\gamma_k (k = 1, 2, 3)$ 0.98,0.97,0.99. The coefficients are required probabilities $\eta_q (q = 1, 2)$ are given with 0.97.

For running our program, we fixed the parameters: maximum generation $max\_gen = 1000$, population size $pop\_size = 20$, and input the importance of the objectives $w_1 = 0.6$ and $w_2 = 0.4$. We simulated five cases that $p_m = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$, and for each case the program was ran 10 times. We obtained 42 Pareto optimal solutions that near the nondominated hyperplan with $p_m = 1.0$ which are illustrated in Figure 1.

As a result in the case: $pop\_size = 20$, $p_m = 1.0$, max_gen=1000, the best compromise solution (amount of transportation with dummy origin a_5 and conveyance

Table 2: Coefficient $c_{ijk}^q \sim N(\mu_{c_{ijk}^q}, \sigma^2_{c_{ijk}^q})$ of the two objectives

j	1			2			3			4		
k	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	(15, 2)	(18, 2)	(17, 2)	(12, 2)	(22, 1)	(13, 1)	(10, 1)	(4, 1)	(12, 1)	(8, 2)	(11, 2)	(13, 2)
2	(17, 2)	(20, 1)	(19, 3)	(21, 2)	(21, 2)	(22, 1)	(21, 2)	(19, 1)	(18, 2)	(30, 1)	(10, 2)	(23, 3)
3	(14, 3)	(11, 2)	(12, 1)	(25, 2)	(34, 3)	(33, 1)	(20, 1)	(16, 1)	(15, 1)	(21, 2)	(23, 1)	(22, 3)
4	(22, 2)	(18, 1)	(13, 1)	(24, 3)	(35, 3)	(32, 2)	(18, 2)	(21, 2)	(14, 1)	(13, 2)	(23, 2)	(20, 1)
1	(6, 1)	(7, 1)	(8, 1)	(10, 2)	(6, 1)	(5, 1)	(11, 2)	(3, 1)	(7, 1)	(10, 1)	(9, 2)	(6, 1)
2	(13, 1)	(8, 1)	(11, 2)	(12, 2)	(2, 1)	(9, 1)	(20, 2)	(15, 3)	(13, 2)	(17, 3)	(15, 3)	(13, 2)
3	(5, 1)	(6, 1)	(7, 1)	(11, 2)	(9, 2)	(7, 1)	(10, 1)	(5, 1)	(2, 1)	(15, 2)	(14, 2)	(18, 2)
4	(13, 1)	(6, 1)	(6, 1)	(17, 2)	(11, 1)	(18, 2)	(12, 1)	(16, 2)	(12, 1)	(18, 2)	(14, 1)	(7, 1)

Table 3: Amount of the transportation

b_1				b_2				b_3				b_4			
e_1	e_2	e_3	e_4	e_1	e_2	e_3	e_4	e_1	e_2	e_3	e_4	e_1	e_2	e_3	e_4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	21.54	0	0	0.81	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0.69	0	0	0	0	0	4.98	0	0
0	1.82	8.70	1.21	0	0	0	3.93	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	4.62	0	0	0	0	3.60	0	0	0.12
0	0	0	0	10.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

e_4) by the determination method was shown in Table 3. The corresponding objective function value (z_1, z_2) = (266.92, 236.47) and Euclidean distance $d = 0.7736$ which from the PIS=(268.46, 218.12) and NIS=(814.58, 363.45).

5. Conclusion

In this paper, we presented an implementation of the evolutionary computation to solve the multiobjective chance-constrained solid transportation problem. The unbalanced condition with a dummy destination or origin or conveyance was converted to the balanced one, and then the initialization procedure was created with real numbers for the chance-constrained solid transportation problem. And the registered Pareto optimal solutions technique was used, so the proposed algorithm conductive to find out the set of Pareto optimal solutions approximately in nondominated hyperplane of the criteria space.

References

[1] Charnes, A., W.W. Cooper and A. Henderson: "Deterministic Equivalents for Optimizing and Satisfying under Chance Constraints", *Operation Research*, Vol.11, No.1, 1963

[2] Sposito, V.A.: *Linear Programming with statistical*, Aprs, ISO Press, 1989

[3] Bit,A.K., M.P. Biswal and S.S.Alam: "Fuzzy Programming Approach to Multiobjective Solid Transportation Problem", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.57, pp.183-194, 1993

[4] Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data structure = Evolution Programs*, 2nd ed., Springer Verlag, 1994

[5] Lai, Y.- J. and C.- L. Hwang, *Fuzzy Multiple Objective Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, 1994

[6] Li,Y.Z., K.Ida and M.Gen: "Evolutionary Computation for Multicriteria Solid Transportation Problem with Fuzzy Numbers", *Inter. Conf. on Evolutionary Computation*, pp.596-601, Nagoya,1996

[7] Gen, M. and R. Cheng: *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York, 1997

Contact address:
Yin-Zhen LI
Dept. of Industrial and Systems Engineering
Ashikaga Institute of Technology
268 Ohmae-cho, Ashikaga, 326 Japan
Tel: 0284(62)0605 ext.290
Fax: 0284(64)1071
Email: yzli@genlab.ashitech.ac.jp

THF1-1

市民が求める公共建築物のファジィシステムによる耐震設計

Fuzzy Theory for Seismic Safety of Public Buildings Proposed by Citizens

中島賢二　田崎宗邦　河村　廣　谷　明勲
Kenji Nakashima Munekuni Tasaki Hiroshi Kawamura Akinori Tani

神戸大学工学部建設学科
Kobe University, Faculty of Engineering, Department of Architecture and Civil Engineering

Membership functions of expected seismic intensity and of tolerable damage of public R/C buildings can be given by means of questionnaire distributed to the Citizens of Kobe. Putting them into a simplified fuzzy system for seismic design, the necessary numbers tolerated by the citizens are obtained by the peak point of its membership function.

1. 序

1995年初頭の阪神･淡路大震災は多くの議論を惹き起こしているが、建築構造物の耐震設計については、従来の仕様規定型から性能規定型を目指すことが震災以前から始められている。どのような性能を目指すかについては、各専門家や市民がそれぞれの主観をもっているため社会的な合意を形成するのは困難である。ファジィ理論は不特定多数の意見分布の集約や、情報量や立場の相違を超えた人達の意思疎通を図るのに適している。本研究は、市民の設定した耐震安全性のレベルに基づいた公共建築物の耐震構造及びその設計法の在り方を提案するために、実在の公共建築物についてパルス応答解析により求めた入力、損傷､設計因子の関係と、また、市民を対象に行った設計方針についてのアンケートの結果を用いた具体的なケーススタディを、ファジィシステム上で行い、考察を加えようとするものである。

2. ファジィシステム

ファジィ理論[1]は人間の情報処理で重要な意味を持つ曖昧さを取り上げていることが特長で、ハードな物理量とソフトな言語によって表現される概念等をメンバシップ関数によって結合することができ、構造物の安定性や損傷の評価に広い応用性が見込まれる[2]。ファジィ集合は普通の集合と異なり境界が不明確な場合も集合として取り込み、種々の処理や展開をしようとするものである。ファジィ集合で与えられた入出力X,Yとそれらの関係性を表すファジィ関係で与えられた状態Rが、ファジィネットワークの基本構成要素である。X,R,Yをメンバシップ関数$\mu_X(x)$、$\mu_R(x,y)$、$\mu_Y(y)$で表現すると以下のようになる。X、Yは言語的概念で表されたファジィ集合のラベルで、x,yはハードな物理量による台集合である。

$$X=\int \mu_X(x)/x、\quad \mu_X(x):x\rightarrow [0,1]$$
$$R=\int \mu_R(x)/(x,y)、\mu_R(x,y):(x,y)\rightarrow [0,1] \quad (1)$$
$$Y=\int \mu_Y(y)/y、\quad \mu_Y(y):y\rightarrow [0,1]$$

X，YはRを介して以下のＭａｘ･Ｍｉｎ合成則で与えられるものとする。

$$Max(\mu_X(x)\wedge\mu_R(x,y))=\mu_Y(y) \quad (2)$$
$$Max(\mu_Y(y)\wedge\mu_R(x,y))=\mu_X(x) \quad (3)$$

簡略的に表すと以下の式になる。

$$X\circ R=Y \quad (4)$$
$$Y\circ R=X \quad (5)$$

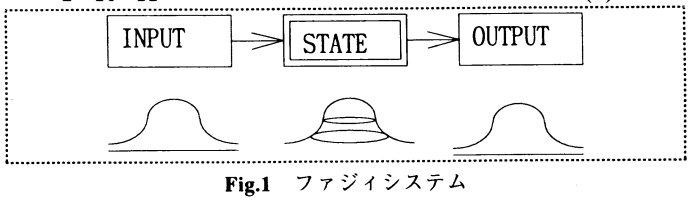


Fig.1 ファジィシステム

ファジィネットワークは入出力と関係による基本構成要素が複合されて構成され、入出力の区別なく無方向性の推論を可能としたものである。

本研究の耐震構造設計支援ファジィシステムは入出力の入力として地震動加速度a、損傷として応答変位d、また構造パラメータである設計因子の耐震壁枚数nを有する単純化されたもので、その流れが**Fig.2**に示されるように入力aと損傷dを与えられたときの設計因子ｎを応答評価式 ｄ＝f(a, n)の逆問題として求める[2]。

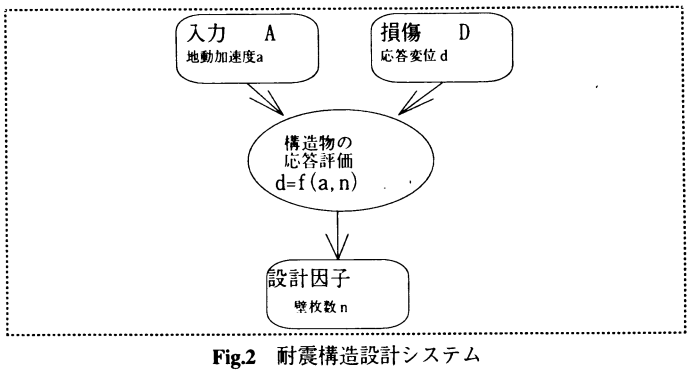


Fig.2 耐震構造設計システム

3. ケーススタディ

3－1. パルス応答解析

今回の解析で用いたパルス応答解析[3]は、想定される震度から地震動スペクトルを導き、それを入力波スペクトルとして、それと接するような系に与えられるパルスの速度（加速度）－変位関係を選出して最大応答変位を求めようとするものである。

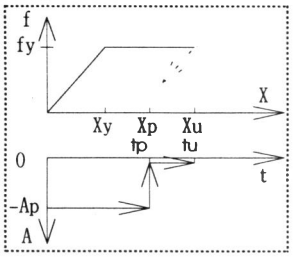


Fig.3 一方向復元力特性

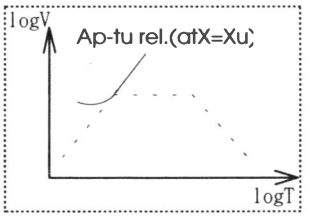


Fig.4 入力波スペクトル及びVp-Tp関係

速度パルス応答解析式[4)]

1)弾性範囲

$$tp=1/\omega \ \{\sin^{-1}(\omega^4 Xu^2/2Ap^2-1)+\pi/2\} \quad (6)$$

$$\omega=(fy/mXy)^{1/2}$$

$$0<tp\cdot\omega<\pi/2$$

2)塑性範囲

$$tp=1/\omega \ \{\sin^{-1}(\omega^2 Xy/Ap-1)+\pi/2\}$$

$$+1/(Ap-\omega^2 Xy)\cdot\left(\sqrt{2(Ap-\omega^2 Xy)Xp+\omega^2 Xy^2}-\sqrt{2(AP-\omega^2 Xy)Xy+\omega^2 Xy^2}\right)$$

$$Xp=\frac{\omega^2 Xy}{2Ap}(2Xu-Xy)$$

スペクトル構成式[5)]

1)震源域：$\Delta \leqq \Delta b$（Δb：震源半径）

$$T \geqq Tc \quad :Zm=1/4\cdot Tg/0.15\cdot 10^{0.5M-1.30} \quad (8)$$

$$Tg \leqq T \leqq Tc:Vm=\pi/2\cdot Tg/0.15\cdot \dot{d} \quad (9)$$

$$T \leqq Tg:Am=\pi^2\cdot 1/0.15\cdot \dot{d} \quad (10)$$

$$\log \Delta b=0.5M-2.1 \quad (11)$$

2)震源域外：それぞれを$(\Delta b/\Delta)^2$倍する

パルス的入力及び、構造物の一方向復元力特性を**Fig.3**に示すように仮定し、解析式及び、スペクトル構成式は(8)～(11)のようになる。単一矩形速度パルスを受ける場合、入力－応答の間はエネルギー保存則が成立、また入力波スペクトルは**Fig.4**の破線の如く表され構造物のVp-Tp関係式とスペクトルとが接するという条件を考慮すれば最大応答変位(Xp)を求めることが出来る。単一矩形加速度パルスの場合も同じように考え、α p-Tp関係を求めることが必要となる。応答は、速度パルス、加速度パルスのうち、大きい変位を取るものを最大応答とする。なお、本解析では、Tg、dを0.3sec、15kineと設定した。

３－２．入力震度

地震の型としては内陸性、M＝７．５を想定する。想定した震度については次式によって震度階を加速度に変換させて入力した[6)]。

$$\alpha p=10^{(I/2-0.35)} \quad (12)$$

ここでα pは加速度（gal）、Ｉは震度を表す。

３－３．対象構造物

対象構造物として神戸市において一般的なＲＣ公共建物（保育所、庁舎、会館、消防署、病院)を考え、実際の図面を基にしてモデル化を行った。そのうちの保育所のモデルを**Fig.5**に示す。耐震設計及び、応答に関してはＸ方向のみを考えるものとする。

耐震壁swは**Fig.6**に示されるようになり、ｈは階高、Ｌは耐震壁長さ、ｔは耐震壁厚さを表す。また、５つの公共建築物それぞれに対しての値は、Table1に示されるようになる。

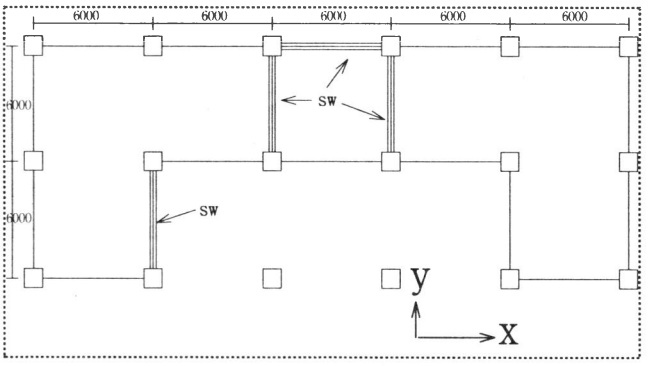


Fig.5 保育所

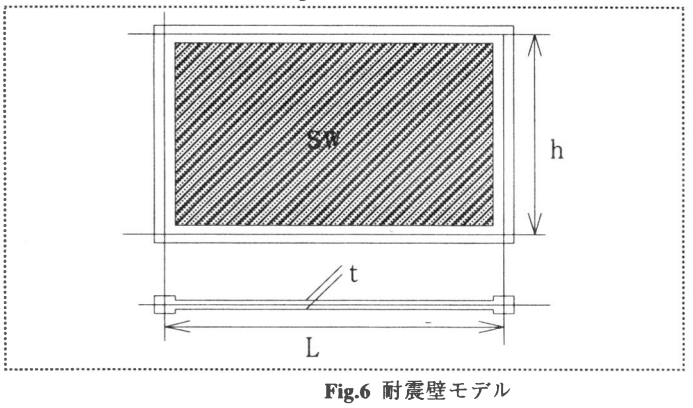


Fig.6 耐震壁モデル

Table1 耐震壁数値

	h (cm)	L (cm)	t (cm)
保育所	330	600	15
会館	320	720	15
庁舎	400	650	15
消防署	520	650	15
病院	410	500	15

それぞれの建物の耐震壁耐力、降伏変位は次式で求められ、それらをまとめた結果を、柱耐力も含めて**Table2**に示す。耐力要素を求める関係式[7)]は(13)、(14)のようになる。

$$qsw=2/3\cdot FctLcos\,\theta \sin\theta \quad (13)$$

$$Dy=2\cdot 10^{-3}L/\cos^2\theta \quad (14)$$

ここで、Fcはコンクリート強度(2.4tf/cm^2)、θ はtan θ =h/Lを満たすものである。

Table2 構造諸数値

	q c (tf)	q s w (tf)	D y (cm)	h (cm)
保育所	1112.59	709.41	1.563	330
会館	746.58	748.21	1.724	320
庁舎	2252.43	812.36	1.792	400
消防署	658.86	887.81	2.132	520
病院	3419.39	686.44	1.672	410

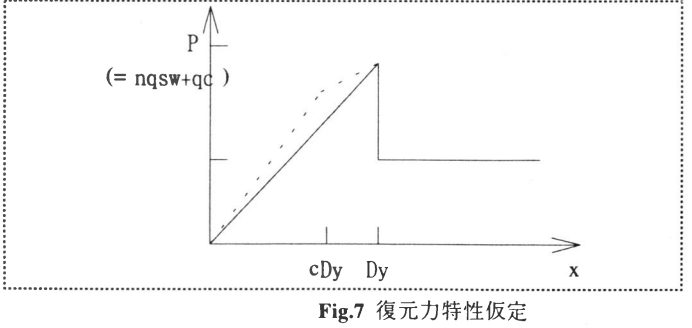


Fig.7 復元力特性仮定

建物は一階部分で壊れるものと仮定し、復元力特性を**Fig.7**のように仮定する。ここで降伏変位は、梁の回転を考慮して耐震壁要素に一致させるものとした。また最大耐力Ｐは柱耐力と耐震壁耐力の単純和とし次式で表される。

$$p = nq_{sw} + q_c \qquad (15)$$

ここで、ｎは耐震壁枚数、ｑｓｗは１枚あたりの耐震壁耐力、、ｑｃは全体の柱耐力合計である。

Table3に示される層間変位角と震害レベルの関係が求まり、その変位以内にとどめる応答を導くための耐力、つまり、耐震壁枚数を式(15)から算出する。

Table3震害レベル規格化

震害レベル	無傷	軽微	小破	中破	大破	倒壊
層間変位角	0<	<1/1000	<5/1000	<1/100	<2/100	2/100<

保育所の場合の解析結果を**Table4**に示す。この中で「～」は一定の損傷にとどめる最低の枚数から最大の枚数を表している。

Table4 解析結果

	5	5.25	5.5	5.75	6	6.2
無傷	0	0	0.5～	1.5～	2.5～	3～
軽微	0	0	0	0～1	0～2	0.5～2.5
小破	0	0	0	0	0	0
小-中	0	0	0	0	0	0
中破	0	0	0	0	0	0
中-大	0	0	0	0	0	0
大破	0	0	0	0	0	0
倒壊	0	0	0	0	0	0

	6.4	6.4	6.8	7	7.2
無傷	4～	6～	8～	10～	12～
軽微	0～0.5	0～1	0～2.5	1～4.5	1.5～7.5
小破	0	0	0	0.5～	
小-中	0	0	0	0	1
中破	0	0	0	0	0.5
中-大	0	0	0	0	0
大破	0	0	0	0	0
倒壊	0	0	0	0	0

３－４　ファジィ演算

パルス応答解析により求まった５つの公共建築物の地震動入力a、応答ｄ、耐震壁枚数nの関係に、市民からの設計方針の要望として得た最大の地震の震度の大きさと主体構造の損傷レベルの重複相対頻度からメンバシップ値を与えてファジィ演算を行い、耐震壁枚数の最適値を求める。

専門家が想定し、取り扱う地震動入力及び損傷に対応するように、公共建築物の設計方針として想定するべき最大の地震の大きさと、それに対して主体構造の損傷をどの程度に止めるべきかという質問に、大雑把な言語表現と若干の補足説明により示された選択肢を１つないし複数個選んで回答してもらうアンケートを神戸市内の条件の異なる５つの地域、計500世帯に行った[8)9)]。その回答より**Figs.8,9**に示すような重複相対頻度を得ている。

これよりアンケート選択肢間の震度のメンバシップ値$\mu_A(a)$はアンケートで得た曲線より、また震度5未満のアンケート選択肢外の震度のメンバシップ値は山の裾型の分布をするように**Table5**のように定め、主体構造の損傷についてはパルス応答解析時に用いた被害程度とアンケート選択肢を**Table6**のように対応させてメンバシップ値$\mu_D(d)$を定めた。

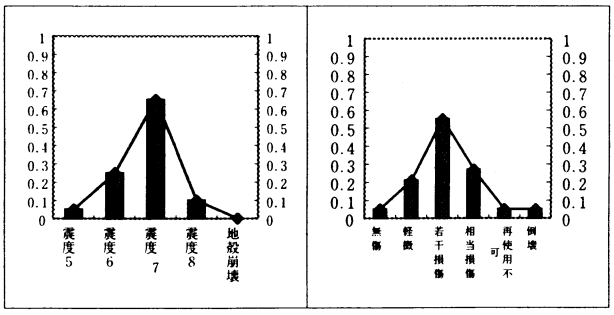


Fig.8　最大の地震の震度　**Fig.9** 主体構造の損傷

Table5 各震度のメンバシップ値$\mu_A(a)$

震度	3.00	4.00	4.50	5.00	5.25	5.50	5.75	6.00	6.20
μ	0.01	0.02	0.03	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.33
震度	6.40	6.60	6.80	7.00	7.20	7.40	7.60	7.80	8.00
μ	0.41	0.49	0.57	0.65	0.54	0.43	0.32	0.21	0.10

Table6　各震害レベルのメンバシップ値$\mu_D(d)$

震害レベル	無被害	軽微	小破	小-中
アンケート選択肢	無傷	軽微	若干損傷	
μ	0.05	0.21	0.55	0.41
震害レベル	中破	中-大	大破	倒壊
アンケート選択肢	相当損傷		再使用不可	倒壊
μ	0.27	0.16	0.05	0.05

Tables5、6のメンバシップ値をパルス応答解析により求まった関係$\mu_R(a,d,n)$に与えて以下の式でファジィ演算することができる。

$$Max(\mu_A(a) \wedge \mu_D(d) \wedge \mu_R(a,d,n)) = \mu_N(n) \qquad (16)$$

ここではａ、ｄ、nの関係は、パルス応答解析からクリスプで与えられているため$\mu_R(a,d,n)=1$となる。

各公共建築物の耐震壁枚数のメンバシップ関数$\mu_N(n)$は**Figs.10a**～**e**に示すようになる。$\mu_N(n)=1$が市民の要望を最大に満たし、$\mu_N(n)=0$がまったく満たさないことを意味する。

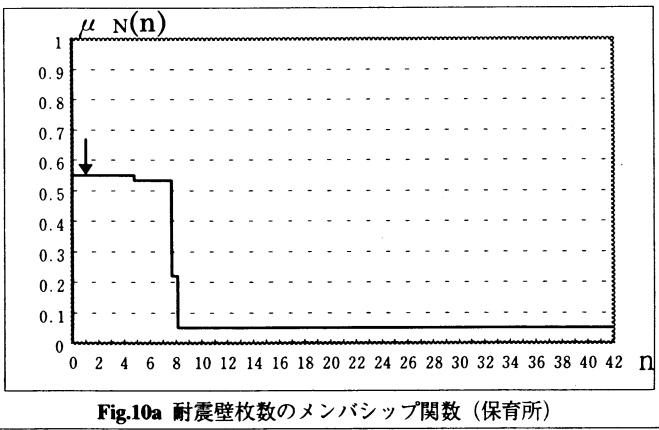


Fig.10a 耐震壁枚数のメンバシップ関数（保育所）

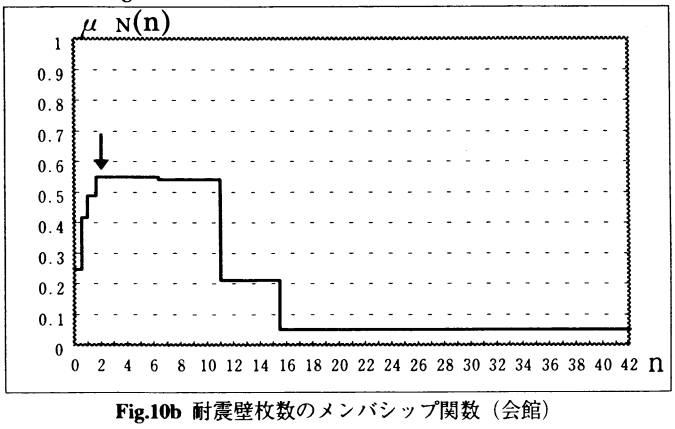


Fig.10b 耐震壁枚数のメンバシップ関数（会館）

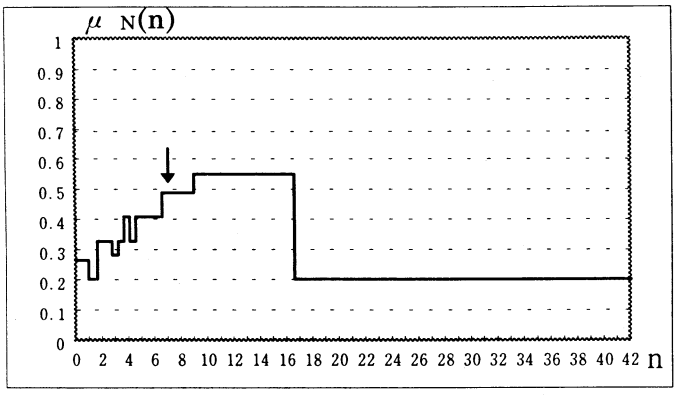


Fig.10c 耐震壁枚数のメンバシップ関数（庁舎）

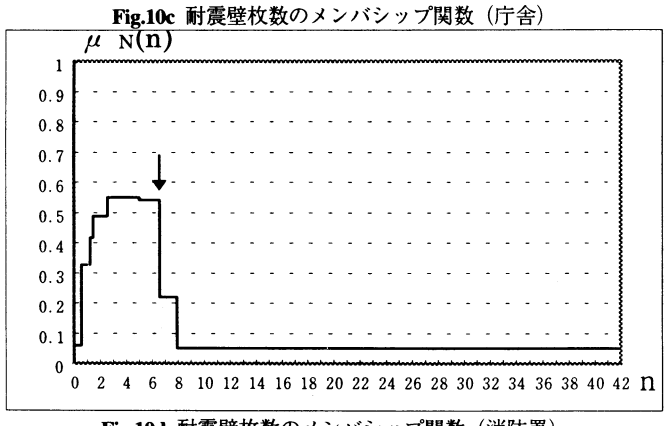


Fig.10d 耐震壁枚数のメンバシップ関数（消防署）

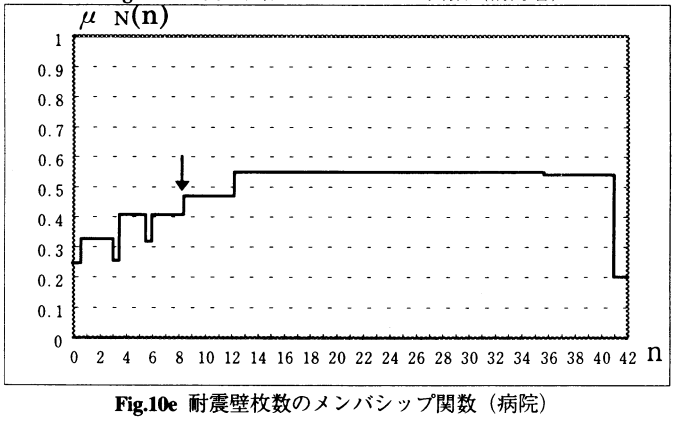


Fig.10e 耐震壁枚数のメンバシップ関数（病院）

市民の要望を最もよく満たす耐震壁の枚数は、保育所が0～4.5枚、会館が2～6.5枚、庁舎が9～16.5枚、消防署が2.5～5枚、病院が12～35.5枚となる。

4．考察

Figs.10a～e中、矢印は、実際のＲＣ耐震壁の存在枚数を示す。市民の要求する対震安全性を満足する耐震壁枚数を与えるメンバシップ関数と比較することにより、現実のＲＣ公共建築物では、若干、耐震壁枚数が不足していることが明らかになった。従来の耐震設計では、震度、加速度、応答変位、耐震壁枚数などをクリスプな確定量で与えるのが常である。しかし、本研究のようなファジィな表現こそ、現実を忠実に反映するものであると、著者らは考える。

5．結論

本研究は、構造計算を行う際に、不確実で主観的な要素となる部分についてファジィ理論を用いて定量化し、特に公共建築物を対象として社会的合意に基く耐震構造設計へのファジィシステムの活用を図ったものである。

一般市民の意見と構造技術者の専門的知識の両方を満足させる構造特性を求めたファジィシステムを用いることにより、市民の要望を満たす耐震安全性を有するＲＣ公共建築物が、必要とする耐震壁の枚数をメンバシップ関数で与えることが出来た。現在、より幅広く意見を集めるため、インターネットを用いたアンケートに着手しているところである。

謝辞

公共建築物に関する資料収集において御協力していただいた、神戸市住宅局営繕部の方々に感謝いたします。

参考文献

1)Zadeh, L, A:FUZZY SETS, Information And Control, 1965.8, pp.338-353.
2)河村 廣、ヤヲ、J.T.P.:条件付きファジィ集合に基づくファジィシステムの構造工学への応用に関する研究、構造工学論文集、Vol.36B,1990.3,pp.、51-56.
3)河村 廣：地震時構造物応答の極限解析、第27回構造工学シンポジウム、1981.2,pp.30-38.
4)山田稔、河村廣、谷明勲、藤谷秀雄：Bi-linear型復元力特性を有する１質点系の地震応答解析(パルス応答解析及び有限共振原理による極限応答解析)、日本建築学会近畿支部研究報告集、1983.6,pp.405-408
5)河村 廣：震源機構と震源境界条件を考慮した地震動最大振幅のスペクトル構成、第６回地震工学シンポジウム講演集、1982.12,pp.105-112.
6)宇津徳治：地震学、共立出版、1968,pp111-114
7)山田 稔：鉄筋コンクリート構造物の耐震安全性、1976.8,pp.99-114
8)中島賢二、河村廣、谷明勲：アンケートによる公共建築物の耐震安全性の意識調査、1996年度日本建築近畿支部研究報告集、1996.7, pp,65-68
9)中島賢二、河村廣、谷明勲：アンケートによる公共建築物の耐震安全性の意識調査、1996年度日本建築学会大会学術講演梗概集,1996.9,pp.117-118

問い合わせ先
中島賢二
TEL(078)803-1015
田崎宗邦
TEL(078)803-1015
e-mail: munekuni@iculuna,kobe-u.ac.jp
河村 廣
TEL(078)803-1010
e-mail: kawahiro@iculuna,kobe-u.ac.jp
谷 明勲
TEL(078)803-1015
e-mail: meikun@iculuna,kobe-u.ac.jp
〒657 神戸市灘区六甲台町1
神戸大学工学部建設学科河村研究室

THF1-2

ファジィシステムによる制振構造システムの最適設計に関する研究（ＧＡを用いた最適化）

Optimal design of active control system by fuzzy system (Optimal design using Genetic Algorithm)

西端　雅浩*1，　河村　廣*2，　谷　明勲*3

NISHIHATA Masahiro[*1]，*KAWAMURA Hiroshi*[*2]，*TANI Akinori*[*3]

*1 神戸大学大学院自然科学研究科　　*2 神戸大学工学部建設学科　　*3 神戸大学工学部建設学科

*1 Graduate School of Science and Technology, Kobe University

*2 Department of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kobe University

*3 Department of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kobe University

Optimal design of active control systems of building structures has the purpose of " attaining big control effects under small control energy ". In this paper, an optimal design method of active control system is proposed by using genetic algorithm (GA). As an active control method, AMD system is employed. As design factors, additional mass, additional spring constant, additional damping factor and control variable of AMD are employed. Digital simulation is carried out in case of three-degree-of-freedom-system. It is proved that GA is very effective, because obtained solutions are close to the optimum solutions given from all combinations of assumed given parameters.

1．序

アクティブ制振構造システムの最適設計とは、「より少ない制御エネルギーで、より大きな制御効果をあげる」ことを目標に制振構造の構築を行うことである。筆者らは、アクティブ制振構造の最適設計の過程をファジイシステムとしてモデル化し「制振装置の各要素の物理量（結果に影響を与える各種パラメータの数値）をさまざまに変化させて応答解析を行い、そのうち最も有効に制振を行うものを選び出す」という方法を提案している[1)]。本研究においてもその基本的方針は同じであるが、パラメータのすべての組みあわせに対して総当たり的に応答解析を行って最適解を求めていた従来の方法に対して、比較的少ない計算量で最適設計を行う方法を本論では提案する。

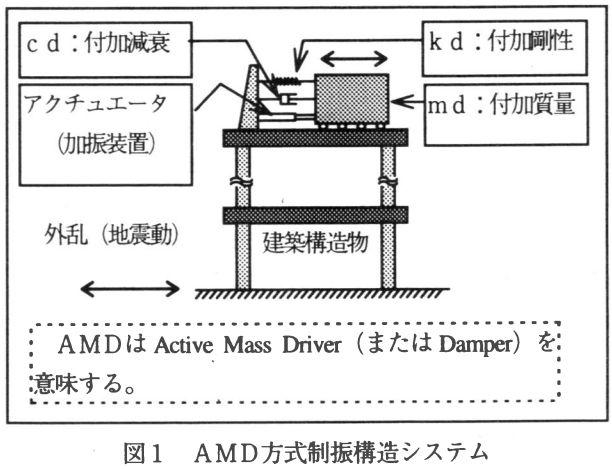


図１　AMD方式制振構造システム

本論ではアクティブ型制振構造の、AMD方式制振構造システム[2)]（図１参照）を取り上げている。AMD方式制振構造システムとは建築構造物に設置したおもりを加振装置によって駆動させおもりの慣性力を制御力として構造物に与える制御方式のことである。

本研究は、ＧＡ（遺伝的アルゴリズム）[3)]を用いた制振構造の最適設計システムを構築し煩雑な計算を要する最適設計の計算時間短縮化を図り、同時にＧＡの有用性を検証しようとするものである。

2．ＧＡ（Genetic Algorithm：遺伝的アルゴリズム）

ＧＡ（遺伝的アルゴリズム）[3)]とは人工生命理論のひとつであり、自然界で生物が親からの遺伝を重ねて進化していく仕組みを模した数理モデルである。ＧＡを利用するとある集合や組み合わせから条件に最も適合する最適解を比較的簡単に短時間で探すことができる。

ＧＡでは基本的に以下のことを仮定する。

・対象集団の構成要素を仮想的な生物（個体）とみなす。
・個体は形態や特徴に応じた染色体（データ列）をもつ。
・染色体と個体はある規則に従って互いに変換される。

またＧＡの手順を簡単にまとめると次のようになる。

①個体と染色体の変換ルールなどを設定する。
②初期集団を発生させる。
③集団から条件への適応度の高いものを選択、親とする。
④親の染色体に交差などの遺伝子操作を行い、子の染色体を生成する。（優秀な特徴を次の世代に遺伝させる）
⑤世代を重ね最終的に適応度の高い個体を求める。

3．最適設計システム

3－1　最適設計システムの概要

本研究で構築した最適設計システムは設定条件下で

1、構造物頂部の最大応答変位
2、アクチュエータ（加振機）の最大ストローク
3、最大制御力

が小さくなるように、制振装置における

①付加質量（重量）	②付加減衰
③付加剛性	④制御変数

のパラメータを総合的に最適化するものである。ここで、制御変数とは制御の程度を決める定数である。①から④のパラメータは１６個ずつ、つまり１６=65536組のパラメータ組の中から最適なものを選び出す。

３－２　最適設計の手順

図２に本論の最適設計システムの手順を示す

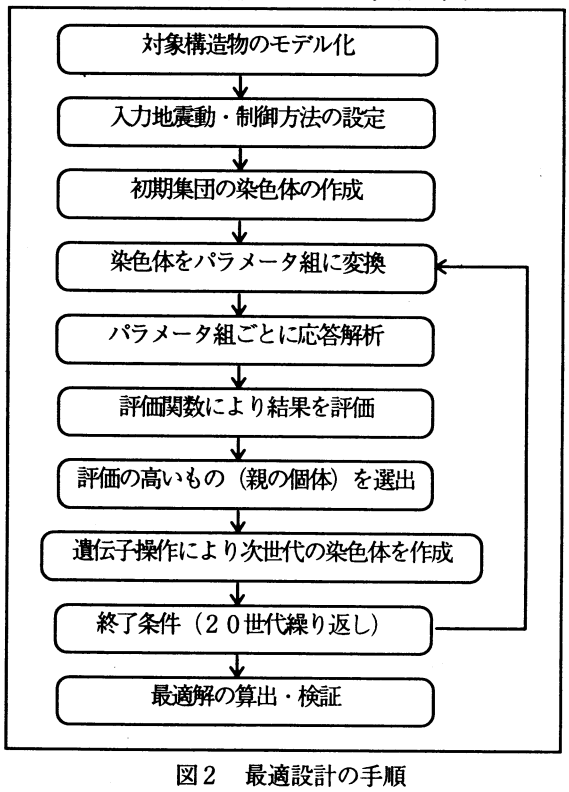


図２　最適設計の手順

本研究で提案する最適設計システムは、このようにパラメータ組を一つの個体とみなしＧＡ（遺伝的アルゴリズム）で最適解を求めようとするものである。

３－３　染色体からパラメータ組への変換

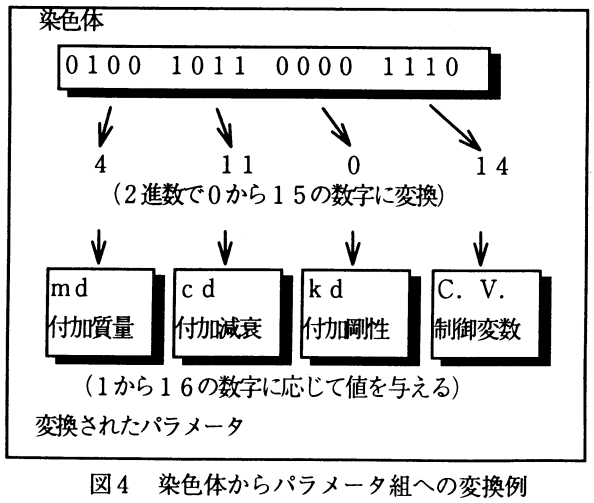


図４　染色体からパラメータ組への変換例

染色体は１６個の０または１から構成されるデータ列とする。染色体上のデータは、４個ごとに１種類のパラメータに対応し、全体で１組のパラメータ組（①付加質量（重量）、②付加減衰、③付加剛性、④制御変数）に変換されることになる。パラメータの値は、それぞれの４個ずつの０または１を二進数変換した０～１５の数字に応じて、あらかじめ決めておいた１６種類の値を与えることで決めることにする。なお、本研究では、２１個体を１世代分の集団としている。

３－４　応答解析について

染色体から変換したパラメータ組を用いて次の運動方程式（３－１）を解くことで応答解析を行う。

$$\begin{bmatrix} m_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ & & m_n \\ 0 & & & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \vdots \\ \ddot{y}_n \\ \ddot{y}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & & & 0 \\ -c_2 & \ddots & & -c_n & \\ & & -c_n & c_n+c_d+(c.v\times c_n) & -c_n \\ 0 & & & -c_d-(c.v\times c_n) & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \vdots \\ \dot{y}_n \\ \dot{y}_d \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & & 0 \\ -k_2 & \ddots & -k_n & \\ & -k_n & k_n+k_d & -k_d \\ 0 & & -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \\ y_d \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ & & m_n \\ 0 & & & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z} \\ \ddot{z} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix}$$

－（３－１）

ここで、$m_1 \sim m_n$：各層質量
$c_1 \sim c_n$：各層減衰定数
$k_1 \sim k_n$：各層剛性係数
$y_1 \sim y_n$：各層相対変位（基礎を基準）
m_d：付加質量　、c_d：付加減衰
k_d：付加剛性　、C.V.：制御変数
y_d：アクチュエータのストローク

この運動方程式は、ｎ層のせん断型多質点系モデルの運動方程式に、m_d（制御装置の付加質量）に関する運動方程式を加え、C.V.（Control Variable：制御変数）の値によって制御力が加わるように変形したものである。この運動方程式ではC.V.（制御変数）が大きくなればなるほど制御力が大きくなる。

この運動方程式を解くと、解として、$y_1 \sim y_n$（各層変位）およびy_d（アクチュエータ変位）が求められる。制振構造システムでは、「このy_dの値に応じてアクチュエータを動かし、制御力を作用させると、各層変位が$y_1 \sim y_n$の値に低減する」として、アクチュエータを動かし、制御を行う。ここで、応答解析には、線形加速度法を用いている。なお、C.V.は１回の応答解析中は一定であるとし、制御時間遅れも考慮しないことにする。

3－5　評価について

評価項目は、評価1：最上階の最大応答変位、評価2：最大アクチュエータ振幅、評価3：最大制御力、の三項目で、図4のような評価関数により応答値に応じてそれぞれに0から1までの評価値を与える。3項目はすべて値が小さいほど、よい結果であるため、高い評価値（1に近い数値）が与えられる。なお、これらの関数はファジィ帰属度関数であり、より最適な結果を、主観的評価を合わせて総合的に評価することが可能である。

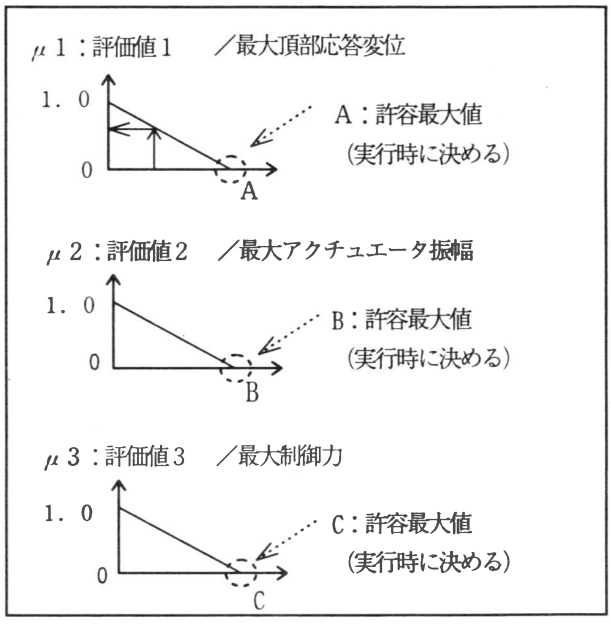


図4　3つの評価関数

以上の評価値から（3－2）式で総合評価値を計算する。

$$\mu = \frac{\mu 1 + \mu 2 + \mu 3}{3} \quad \cdots \quad (3-2)$$

μ：総合評価値
μ 1：最上階の最大応答変位に対する評価値
μ 2：最大アクチュエータ振幅に対する評価値
μ 3：最大制御力に対する評価値

3－6　次世代の染色体の作成について

次世代の染色体は主に交差と呼ばれる操作で作成される。交差とは図5のように親となる1組の染色体（データ列）をランダムに選んだある地点で入れ替えて新しい染色体を作る操作のことである。本研究では、1世代分21個体のうち優秀な上位4個体に突然変異の1個体（ランダムに作成したデータ列をもつ新たな染色体）を加えた5個体を総当たりで交差させて20個体を作り、それに最高評価値を持つ1個体を交差させる前の状態でそのまま加えて（エリート保存）次世代の21個体としている。この世代交代の操作を20世代分繰り返し最終世代の最高評価値を持つものを最適解とする。

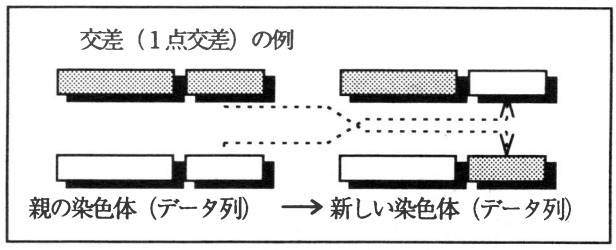


図5　染色体の交差例

4．実行例

4－1　設計対象構造物の構造特性

設計対象構造物は3層せん断質点系にモデル化したものを考えた。構造特性は表4－1に示すとおりである。

表4－1　設計対象構造物の構造特性

	重量 w（kgf）	減衰係数 c（kgf*s/cm）	剛性係数 k（kgf/cm）	減衰定数 h
1層	5000	1.9023	1000	0.03
2層	5000	1.9023	1000	0.03
3層	5000	1.9023	1000	0.03

（1次固有周期：1.008[sec]）

4－2　入力地震動

入力地震動は ElCentro(1940.5.18 観測，ＮＳ方向）の最初の２０秒間の加速度データの最大加速度（341.7［gal］）を 100［gal］に規準化したものを用いる。

4－3　パラメータ範囲の設定

最適設計に用いるパラメータの範囲は表5－4のとおりとする。この範囲を１５等分した境界点と両端を加えた１６個の中から最適パラメータを選び出す。

表4－4　パラメータの範囲

付加重量（ｍｄ）	100 ～ 500		[kgf]
付加減衰（ｃｄ）	0.001 ～ 0.5		[kgf*s/cm]
付加剛性（ｋｄ）	0.001 ～ 0.5		[kgf/cm]
制御変数（C.V.）	1 ～ 20		

4－4　評価関数

評価関数は3－5節で示したとおりとする。評価関数の設定に必要な各許容値は表4－5のとおりとした。各数値は筆者の主観により決定したが、許容最大頂部応答変位については非制御時の最大応答変位が約 6.8[cm] であることから決定した。

表4－5　設計条件に用いる各許容値

許容最大頂部応答変位	7	[cm]
許容最大アクチュエータ振幅	100	[cm]
許容最大制御力	1000	[kg]

5．結果

ＧＡを用いて計算した最適設計結果および応答グラフを以下に示す。計算に要した時間は約4分である。（使

用ｺﾝﾋﾟｭｰﾀ CPU:Pentium120MHz,OS:Windows95）。

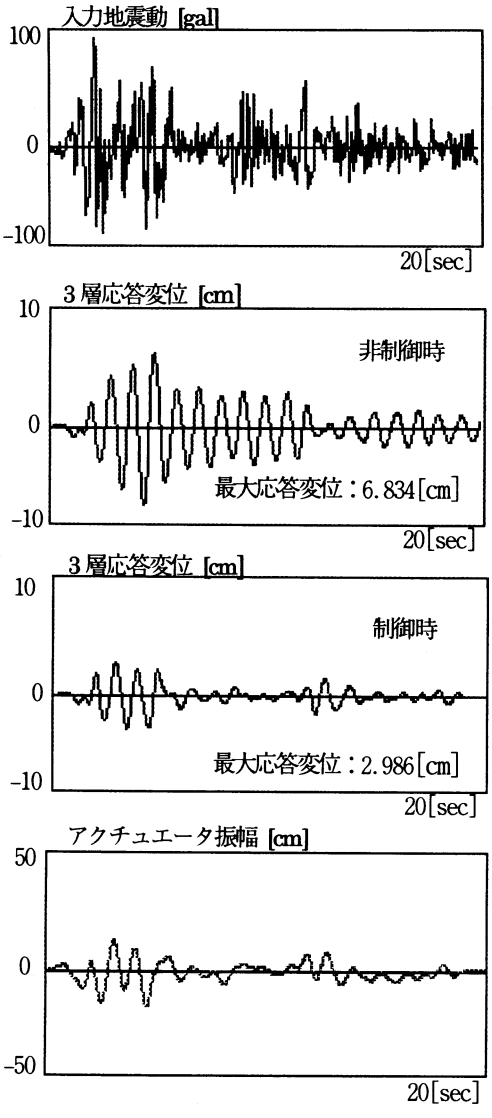


図6　ＧＡによる最適解を用いた応答グラフ

表５－１　ＧＡを用いた最適設計例、応答結果

付加重量（ｍｄ）	500.0 ⑮	[kgf]
付加減衰（ｃｄ）	0.400 ⑪	[kgf*s/cm]
付加剛性（ｋｄ）	0.267 ⑤	[kgf/cm]
制御変数（C.V.）	6.066 ④	
最大頂部変位	2.986	[cm]
最大アクチュエータ振幅	14.47	[cm]
最大制御力	265.1	[kgf]
総合評価値　：μ	0.721	

6．検証

ＧＡの有効性の検証のためすべてのパラメータ組に対して応答解析を行い最も評価の高いパラメータ組を算出し、比較した。計算に要した時間は約７時間である。（使用ｺﾝﾋﾟｭｰﾀ等同条件）。

表６－２　最高評価値を持つパラメータ組、応答結果

付加重量（ｍｄ）	500.0 ⑮	[kgf]
付加減衰（ｃｄ）	0.200 ⑪	[kgf*s/cm]
付加剛性（ｋｄ）	0.500 ⑤	[kgf/cm]
制御変数（C.V.）	6.066 ④	
最大頂部変位	2.974	[cm]
最大アクチュエータ振幅	13.34	[cm]
最大制御力	265.9	[kgf]
総合評価値　：μ	0.724	

7．考察および結

ＧＡを用いた最適設計結果と、検証で総当たり計算を行って求めた結果を比較すると、おおよそ同じ応答値、評価値を持つ解となり、ＧＡを用いた場合でも十分に最高評価値に近い評価値をもつパラメータ組を求めることができたと考えられる。計算時間についても１／１００以下の非常に短い時間に短縮できた。以上のことからＧＡを導入した有効性が実証された。

また、求められたパラメータ組を用いた応答解析結果では、頂部最大応答変位、アクチュエータの振幅、制御力とも十分に小さいものであり、最適な解が得られたと考えられる。ただし、これは本論文で設定した評価条件のもとでの「最適」な解であり、「最適」とはどのようなことかを多面的に考えると、評価方法等に更に検討を加える必要があると思われる。その他、複数の制振装置の最適設計、入力地震動の一般化問題、なども今後の課題としてあげられる。

8．参考文献

1）豊田　祥之、河村　廣、谷　明勲：「ＡＭＤ制振構造システムのファジィ最適設計（２質点構造物；規準化された正弦波およびパルス波入力を用いた場合）」、第９回日本地震工学シンポジウム論文集、1994.12、pp.1909-1914

2）小堀　鐸二：「制振構造、理論と実践」鹿島出版会、1993.9

3）北野　宏明：「遺伝的アルゴリズム」産業図書、1993.6

9．謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金基盤研究（Ｃ）（２）（課題番号０８６５０６７１）の補助を受けて行われました。関係各位に厚く御礼申し上げます。

問い合わせ先

〒６５７　神戸市灘区六甲台町１

神戸大学工学部建設学科建築系教室　谷　明勲

ＴＥＬ　０７８－８０３－１０１５

Email　tani@keiko.arch.kobe-u.ac.jp

THF1-3

上下動を受ける質点系構造物のﾌｧｼﾞｨ振動制御に関する研究
A Study on Fuzzy Vibration Control of a Structure Subjected to Vertical Motion

入江 寿弘＊　新宮 清志＊＊
＊日本大学理工学部 精密機械工学科　＊＊日本大学理工学部　海洋建築工学科

＊　Toshihiro IRIE　College of Science and Technology, Nihon University
＊＊　Kiyoshi SHINGU　College of Science and Technology, Nihon University

Authors have been studying about fuzzy vibration control of particles system aiming vibration control of shell structure. The resonance by an external force of a building is dangerous. Frequency components of waves differ by a kind of external forces. A method of this research changes a structure characteristic of a building. We control characteristics of a building according to the frequency of the external forces. We required springs that stiffness can be transformed. The shape memory alloy is an interesting device. A device may be able to use for the spring that stiffness can be transformed. We measure the characteristics that are useful for this research through the means, that was developed by the authors. This result will contribute to the realization of fuzzy vibration control of particles system.

はじめに

著者らは、シェル構造の振動制御を行う目的で質点系構造物のファジィ振動制御について研究[1)2)]を行っている．これは建物に加わる地震力などを直接打ち消すような、アクティブな制御方法ではなく、建物の構造特性そのものを可変することにより、固有振動数での共振などの危険性を回避する方法である．これまで、この振動制御のシミュレーションや模型による実験を行いその有効性は確かめられたものの、実用化するにはいくつかの問題点があった．その一つが構造物の可変剛性をどのように実現するかである．模型実験ではサーボモータを使った擬似的な剛性変化を作り出していたが、実際にはこのような方法を採ることはできない．そこでこれに変わる方法として形状記憶合金を用いた可変剛性制御を提案する．今回はシェルの振動制御を念頭にいれて、鉛直方向の振動制御に用いる事とし、可変剛性ファジィ制御を行うための基礎データを収集し、制御系設計のための解析を行った．

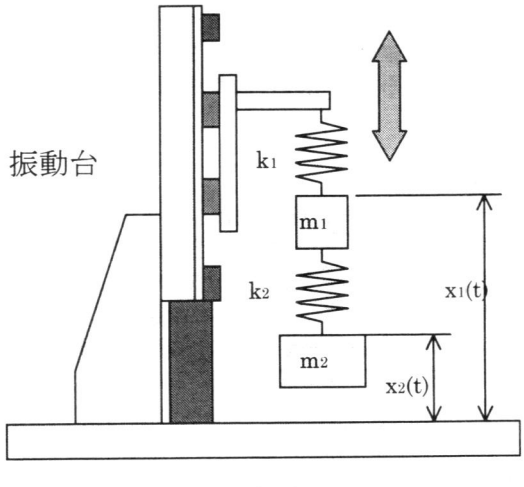


Fig.1 実験装置

実験装置

今回用いた実験装置をFig.1に示す．上下振動を与える振動台はサーボモータとボールネジによる変位入力型のものである．これを鉛直に固定し波形を入力する．構造物のモデルは質点系とし、２質点での実験を行った．Fig.1が実験装置の概観で、振動台の先にバネと質量が取り付けられている．二つのばねのうちk1が形状記憶合金のバネで両端に取り付けられた電極により通電してバネ自体の温度を変えることにより、バネ定数を変化させることができる．実験装置で用いたバネ、質量の物理定数をTable 1に示す．

Table 1 実験装置の物理定数

	バネ	質量
質点1	k1＝186～215［N/m］ チタン・ニッケル合金 線形 0.7mm 巻線外形 6.1mm 自由長 18mm	m1＝0.18［kg］
質点2	k2＝343［N/m］	m2＝0.28［kg］

数学モデル

装置の運動特性を求めるための数学モデルを式(1)～(3)に示す．

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}(t)=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1+k_2}{m_1} & -\frac{d_1+d_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{d_2}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{d_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{d_2}{m_2} \end{bmatrix}\mathbf{x}(t)+\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix}\mathbf{u}(t) \quad \cdots (1)$$

$$\mathbf{x}(t)=\begin{bmatrix} x_1(t) \\ \dot{x}_1(t) \\ x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$\mathbf{u}(t)=\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (3)$$

ただし、x_1(t)、x_2(t)は地面からの変位、質点１、２への入力をu_1(t)、u_2(t)とする．

また、鉛直方向にばねを配置すると実際には重力の影響を受けることとなるが、今回実験では力のバイアス成分と考え、数学モデルには入れていない．

制御系の構成

可変剛性ファジィ振動制御系の構成をFig.2に示す.

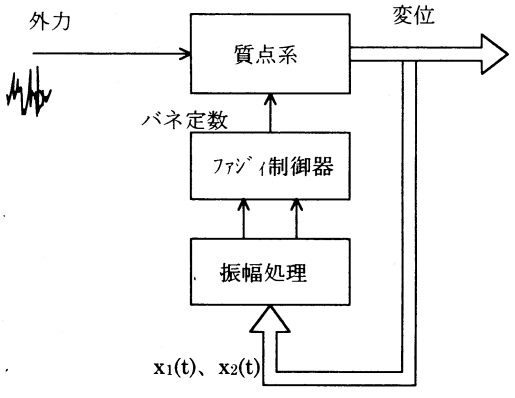


Fig.2 制御系の構成

この実験での外力は地震力や風力などを考えているが、シェル構造のように偏平で縦方向よりも横に広がった建物では水平力よりも鉛直方向の振動が大きくなるため実験装置でも鉛直に配置したバネ、マス系とした. 一般に外力の種類により卓越する周波数成分は異なる. たとえば地震力は比較的高い周波数成分であるのに対し、風などの外力は逆に低い周波数成分が卓越している. そこで実験を行う条件として、種類の違う外力が同時に加わらない事とした. 制御方法は、現在の揺れの状態を観測して、それぞれの質点の変位を一定時間ごとにサンプリングしてサンプリング時間の中での振幅の最大値を算出する. 次に、振幅の大きさに応じたバネ定数をﾌｧｼﾞｨ制御器により推論する.

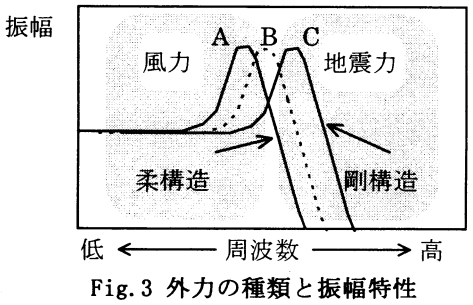


Fig.3 外力の種類と振幅特性

Fig.3に外力の種類と振幅特性の関係を示す.構造物にとって最適な設計としてはそれぞれの外力の影響を受けない周波数に固有振動数を設定する(B)のが望ましい. しかし必ずしもこれを満たすことができないこともある、その場合、地震力の影響が大きい場合は固有振動数を低く設計し(A)、逆に風の影響を受けやすい場合には固有振動数を高く設計する(C)方法である. しかし実際には(A)の場合は風力の影響が大きく、(C)の場合は地震力の影響が大きくなってしまう. そこで入力に応じて積極的に剛性を変化させて対処するのが本方式である. このような構造物を実現するには、鉄骨の間のブレースの張力を油圧やボールネジを用いて可変する方法などが考えられる. 今回用いる形状記憶合金は油圧やモータなどのように機械的駆動部分を一切持たないため、建築構造物などには適した材料と思われる. 形状記憶合金は高温（４００℃～５００℃）で熱処理することにより、その時の形状を記憶させる. 常温に於いて変形させても温度を上げる（４０℃～９０℃）ことにより記憶させた形状を取り戻すことができる. この性質を使ってコイル状に記憶させることにより、温度を変化させることにより、剛性を変える事のできるバネとして利用できるものと思われる. しかしこれを実際の建築物での振動制御に用いた例が無いため、実験を行い基礎データを収集する事とした.

実験結果

今回は前述の制御系へ形状記憶合金が適用できるかどうかを検証するために、上下動加振が出来る振動台を用い、試験片への振動実験を行った. 熱処理を施したコイルばねを使って、電流を通電加熱して質点２の変位 $x_2(t)$ の振幅を計測した結果をFig. ４に示す.

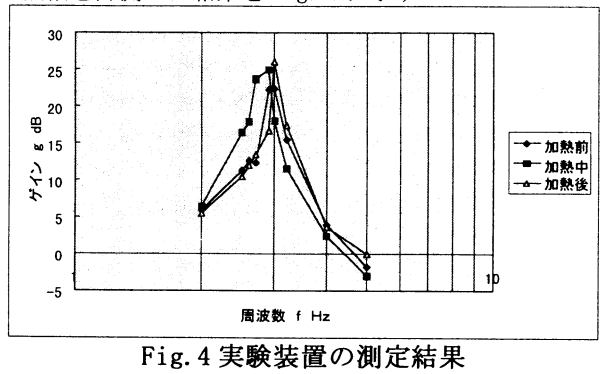


Fig.4 実験装置の測定結果

この結果より、形状記憶合金バネに通電加熱することにより質点系の周波数特性が変化している様子が計測できた. 実験では1.1Aを５０秒間通電しその前後での特性の比較を行った.

その結果、通電の途中で固有振動数が最も低くなり、その後高くなることがわかった.

これは形状記憶合金のばね定数が室温（２０℃）より若干高い点で最も低くなるためと思われる. 実際に制御を行う場合はこの点に考慮してルールを決めてやる必要がある.

まとめ

可変剛性ファジィ振動制御は建築構造物自体の特性を可変することにより振動の周波数成分に応じた最適な構造特性を実現させる試みである. しかしそれを実現するためのハードウェアーは完成されていない. 今回、実験を行った形状記憶合金は実験室レベルでは可変剛性バネとしての性質を確認できたため、これを用いれば、実際の建物に於いても可変剛性の振動制御を実現できるものと思われる.

参考文献

1) 新宮清志:裾梁付き免震回転体シェルのファジィ振動制御,第46回応用力学連合講演会講演予稿集,日本学術会議力学研究連絡委員会,pp.189-190,1997年1月

2) 新宮清志, 川村　仁：ファジィ推論による質点系構造物の振動制御, 日本建築学会, 第18回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp. 313-318, 1995年12月

連絡先：〒274　船橋市習志野台7-24-1
日本大学理工学部精密機械工学科　入江　寿弘
TEL：0474-69-5224　FAX：0474-67-9504
E-mail: tirie@eme.cst.nihon-u.ac.jp

THF1-4

制御用アクチュエータの周波数応答特性がFUZZY非線形履歴応答制御の制震効果に与える影響について

Influence of Frequency Response Characteristic of Actuator on Control Effect in Fuzzy Nonlinear Hysteretic Earthquake Response Control

山田 登志郎　　澤本 佳和
Toshiroh Yamada　　Yoshikazu Sawamoto

鹿島技術研究所
Kajima Technical Research Institute

Abstract- For this paper in order to investigate influence of frequency response characteristic of actuator on optimum values of control parameters and the control effect in fuzzy nonlinear hysteretic earthquake response control, parametric study is carried out using two analytical models with different natural period. As a result,it is confirmed that the natural circurar frequency of the actuator has influence on the optimum values of the control parameters and the control effect.

I　はじめに

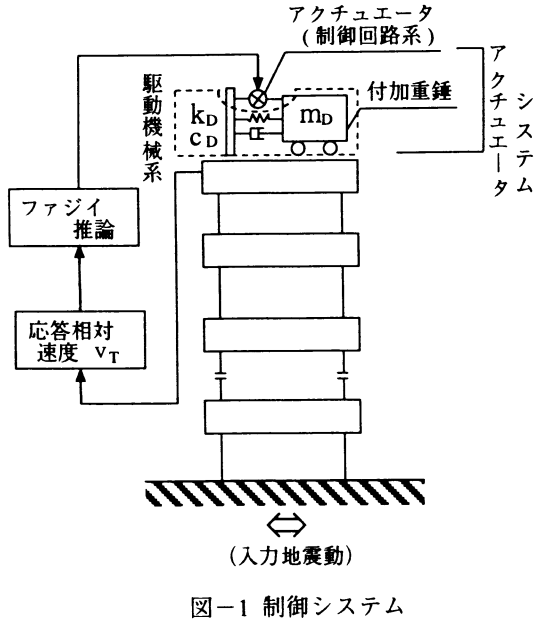
1995年1月に発生した兵庫県南部地震以来、構造物の安全性を確保する有力な手段の一つとしてのアクティブ制震に注目が集まるようになってきた。大地震を受ける建築構造物をアクティブな制御力方式で応答制御を行なう場合、構造物及び制震装置の規模の兼合いからみて、無制御時に非線形履歴挙動する構造物の履歴ループを減少するに止めた非線形履歴応答制御が現実的である。この非線形履歴応答制御を既存の制御理論[1]で行う場合、最適解が解析的に求められるという利点があるものの、相対的にみて制御アルゴリズムが複雑であり、入力地震動予測が必要となる場合や、対象とする系の特に同定が困難とされる非線形剛性や減衰特性を含めた構造・振動特性を厳密に知る必要がある等の解決すべき課題が幾つかある。

このような状況に対して、筆者らはこれまでに『非線形な系や動特性の変動する系に特に有効である[2]』等、実用的な面からみた場合のファジイ制御の数多くの利点に着目し、既存の手法の内で最も良いとされる制御力の大きさに制限のある逐次（瞬間）最適制御法[3]との比較を含め、解析／実験の両面から非線形履歴応答制御に対するファジイ制御の安定性・有効性を検証した[4]。次いで、実状に則した制御ディバイス（アクチュエータ）を組み込んだより現実的な制震システム（AMD）と構造系による連成モデル(制震系)と制震系の実挙動をほぼ忠実にシミュレート可能な解析ツールを用いて、固有周期が1.5秒程度までの構造物を対象として、アクチュエータのストローク長を制約条件に、制震効果に影響を与える制御パラメータの実用的最適値（適正値）を評価し、その適正値を用いれば大地震のみならず中小地震に対しても十分な制震効果が得られることを示した[5]。さらには、制御ルールを新に提案することにより、構造物の長周期化と共にアクチュエータの応答ストローク長が過大化傾向となる問題点を解決し[6]、中低層から高層に至るまでの構造物の地震応答制御にファジィ理論の適用が可能なことを示した。しかしながら、制御パラメータ（ファジィ制御における前件部ゲイン定数、付加重錘の減衰固有周期）や制御ルールの最適化のみならず、アクチュエータの周波数応答特性が制震効果に与える影響を調査することにより、本制御法の制御効率がさらに改善されることが予想される。そこで、本稿ではアクチュエータのストローク長を制約条件として、アクチュエータの周波数応答特性が制御パラメータ（付加重錘の減衰固有周期）の最適値や最適制震効果との関係について以下に検討した。

II　解析方法

II．1　制御システムと解析ツール

制御システムは文献[5]に示されたものと同様で、図－1に示したように制御ディバイスにアクチュエータを用いた最上階制御である。ファジィ制御における推論法もIf～then形式によるmin・max-重心法であり、制御ルールと帰属度関数も、表－1、図－2に示したものを用いる[5]。なお図－2に示したv_{lmt}、c_{lmt}はファジィ推論における前件部変数（最上階の相対速度v_T）と作用制御力(c)のゲイン定数である。また制御パラメータの最適値を評価する際に用い

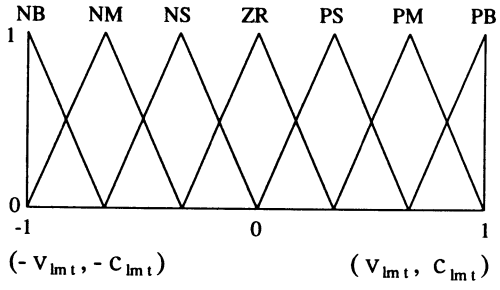


図－1 制御システム

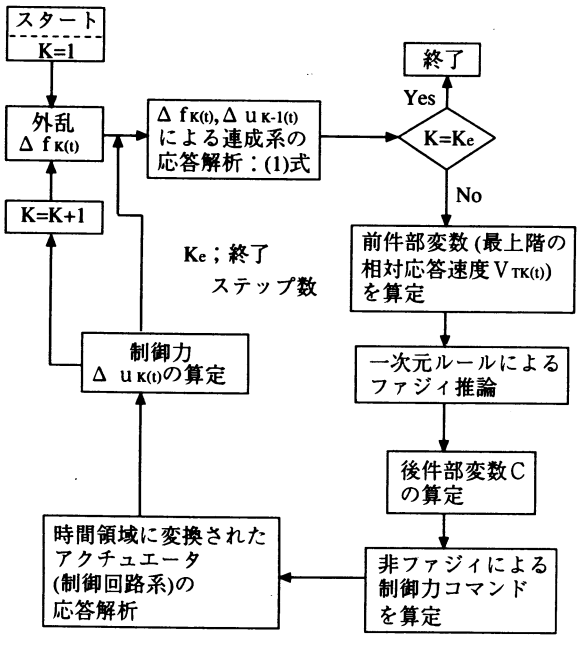
表－1　制御ルール

前件部 V_T	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
後件部　C	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB

NB = Negative Big　　NM = Negative Medium
NS = Negative Small　　ZR = Zero
PS = Positive Small　　PM = Positive Medium
PB = Positive Big

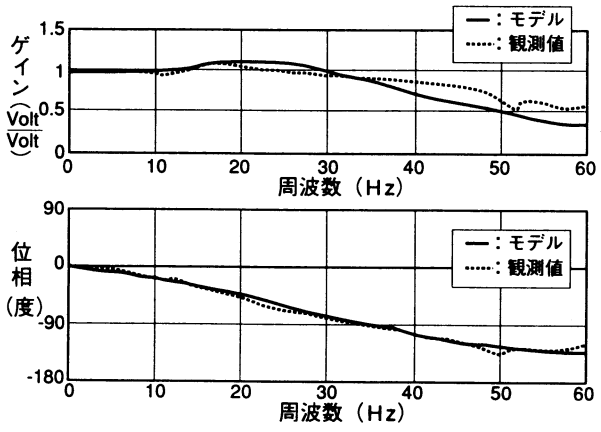


図－2 帰属度関数の形状



図－3　シミュレーション解析法のフローチャート

る解析ツールは構造物－制震装置の連成系のシミュレーション解析法[5]である。これはアクチュエータシステムが図－1に示した駆動機械系と制御回路系で構成され、前者については付加重錘の質量(m_D)及びそのばね定数(K_D)と減衰係数(c_D)からなる2次遅れ系でモデル化可能であるから、(1)式に示したような付加重錘を含めた構造物の連成系の非線形運動方程式（増分形式(Δ)表示）で定式化可能である。そしてこれに制御回路系（アクチュエータ）の周波数応答特性を時間領域に変換したものとファジィ推論による制御アルゴリズムを組込めば、構造物－制震装置－ファジィ制御の連成系の弾塑性時刻歴応答解析が可能となる。以上の解析法のフローチャートを図－3に示す。



図－4　アクチュエータシステムの伝達特性（ボード線図）

表－2　解析パラメータ

構造物	s - 37	s - 99
入力地震波 * (Max. Acc. : Gal)	エルセントロ(750) (タフト(700))	エルセントロ(680) (タフト(640))
T_R (sec)	0.1～3.2 (0.1 or 0.2刻み)	
h_D	0.00～0.99 (原則として、0.05刻み)	
ω_A (rad/sec)	140 , 180 , 220 , 250	
h_A	0.25, 0.55, 0.85	

＊；継続；時間30秒

$$M\Delta\ddot{x}(t)+C\Delta\dot{x}(t)+K(t)\Delta x(t)=\Delta z(t)+F\Delta f(t) \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

ここに

C　　：連成系の減衰マトリックス
K（t）：t時刻での連成系の剛性マトリックス
x（t）：t時刻での相対変位ベクトル
z（t）：t時刻での外乱ベクトル
F　　：制御力入力マトリックス
f（t）：t時刻での制御力ベクトル

II．2　解析パラメータ

まず、制御対象とする構造物の固有周期T_sは0.37秒（以下ではs-37と略記）、0.99秒(s-99)の2種類を選定した。そして、何れの構造物も第二分岐剛性比が0.125のバイリニア型の復元力特性と、一次のモード減衰定数が1％である剛性比例型減衰を持つ基礎固定のせん断型質点系モデルとした。制震効果に影響を及ぼす制御パラメータは、既報[5]の結果から前件部ゲイン定数比(G_V)、構造物の一次固有周期(T_S)に対する付加重錘の減衰固有周期T_Dの比(T_R)及び付加重錘の減衰定数(h_D)であるが、G_Vは構造物の一次固有周期が一定であればその最適値${}_{OPT}G_V$はほぼ一定と見做して良いことから[5]、T_Rとh_Dに限定した。アクチュエータの周波数特性は既報[5][6]で使用したもの（共振角周波数ω_A=220 rad/sec , 減衰定数h_A= 0.55(図－4))をベースとして、ω_Aとh_Aをパラメータとした。この他、入力地震波をパラメータとして加えた。以上の制御パラメータの詳細を表－2示す。この他、制御すべき損傷指標は累積塑性変形倍率(η)と最

大塑性変形倍率(ξ)を採用する。なお、制御力及び付加重錘重量は構造物全重量の3％に固定した。

以上、アクチュエータの周波数特性が、アクチュエータの許容限界ストローク長(S_{lmt})の制約条件下で、損傷指標の応答量を最小にする制御パラメータの最適値とその時の制震効果に与える影響を調査する。ここで、制震効果とは建物各層 (i=1,2,…) で生じる累積塑性変形倍率(η_i)及び最大塑性変形倍率(ξ_i)のうちの最大値($_{MAX}\eta_i$, $_{MAX}\xi_i$)の無制御時に対する制御時の比率とする。

III 解析結果

解析結果を図－5～8に示す。ここで、図－5はS_{lmt}の制約条件下で、ω_Aが最適制震効果 (C_E；制御パラメータの最適値を用いた時の制震効果) に与える影響を示し、図－6は同様にしてh_Aが最適制震効果に与える影響を示している。また、図－7、8はS_{lmt}の制約条件下で、ω_Aが制御パラメータの最適値 ($_{OPT}T_R$, $_{OPT}h_D$)に与える影響を示している。これより以下のことが言える。

a．ω_AがC_Eに与える影響を各損傷指標で比較すると、構造物の固有周期や入力地震波の違いによらず$_{MAX}\eta_i$より$_{MAX}\xi_i$の方がその与える影響は大きい。これは、制御すべき損傷指標が$_{MAX}\xi_i$であれば、アクチュエータのω_Aの値をそれなりに配慮した方が良いことを示唆している。

b．s-37においてω_Aを変化させた時のC_Eの性状は、制震効果も考慮したS_{lmt}の実用的範囲を10～50cm程度と考えると、入力地震波によらず$_{MAX}\eta_i$ではω_Aが220, 250の時が最も良く、ω_Aが140の時が最も悪い。同じく、s-37の場合で$_{MAX}\xi_i$ではω_Aが220時が最も良く、ω_Aが140の時が最も悪い。

c．同様に、s-99においてω_Aを変化させた時のC_Eの性状は、制震効果も考慮したS_{lmt}の実用的範囲を30～100cm程度と考えると、入力地震波によらず$_{MAX}\eta_i$ではω_Aが180～250の時が良く、ω_Aが140の時が最も悪い。同じく、s-99の場合で$_{MAX}\xi_i$ではω_Aが180時が最も良く、ω_Aが140の時が最も悪い。

d．b，c項の結果は、上記で定義S_{lmt}の範囲内において、それ程明確ではないが構造物の一次固有周期(T_S)に対応して、最良のC_Eの性状を与えるω_Aが存在するを示唆している(s-99；$\omega_A \fallingdotseq 180$，s-37；$\omega_A \fallingdotseq 220$)。

e．h_AがC_Eに与える影響は、入力地震波、損傷指標及びT_Sが変化してもほとんどない。

f．一方、ω_Aが制御パラメータの最適値に与える影響は入力地震波、損傷指標及びT_Sに関係なく$_{OPT}T_R$、$_{OPT}h_D$共大きい。この内$_{OPT}h_D$はω_Aが小さくなると、大略大きくなる傾向にある。

g．図示はしていないが、h_Aが制御パラメータの最適値に与える影響は、入力地震波、損傷指標及びT_Sに関係なくS_{lmt}の小さい範囲で僅かにある程度で、これはe項の結果と符号している。

IV おわりに

既報[4)~6)]で提案したファジィ非線形履歴応答制御法の制御効率の改善を目的として、アクチュエータのストローク長を制約条件として、アクチュエータの周波数応答特性が制御パラメータ（付加重錘の減衰固有周期）の最適値や最適制震効果との関係について検討した。その結果、アクチュエータの周波数応答特性の内、共振角周波数ω_Aが制御パラメータの最適値や最適制震効果に影響を与え、構造物の一次固有周期(T_S)に対応して、やや定性的ではあるが最適なω_Aが存在することを提示した。今後は、より多くの解析的検討を行い、T_Sと最適なω_Aとの関係を定量的に示す所存である。

参考文献

1) Yang , J. N. , et al ; New Optimum Control Algorithms for Structural Control, Journal of EM. Div.ASCE, Vol.113, No.9, pp1369 ～ 1386, Sept., 1987

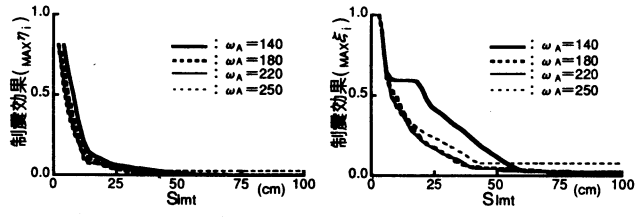
2)村上周太、前田幹夫；ファジィ制御の方法論（ミニ特集：ファジィ制御)、計測と制御、Vol.28, No.11,pp11 ～ 16, 1989年11月

3)野田　茂；制御力拘束を有する非線形構造物の地震応答のアクティブコントロール、アクティブ制震（振）シンポジュウム論文集、pp65 ～ 70、1992年3月

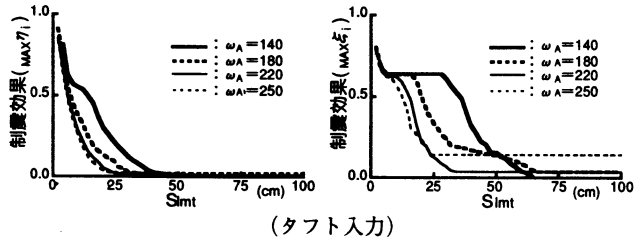
4)山田登志郎、鈴木宏一、他；ファジィ理論による建築構造物の非線形履歴応答制御、日本建築学会構造系論文集、1994年12月

5)山田登志郎、澤本佳和；アクチュエータのストローク長を制約条件としたファジィ弾塑性地震応答制御、第3回ファジィ建築土木応用シンポジウム、pp75～89、1996年3月

6)山田登志郎、澤本佳和；高層構造物のファジィ弾塑性応答制御における適正ルールと適正パラメータ、第4回ファジィ建築土木応用シンポジュウム pp ～ 1997年3月

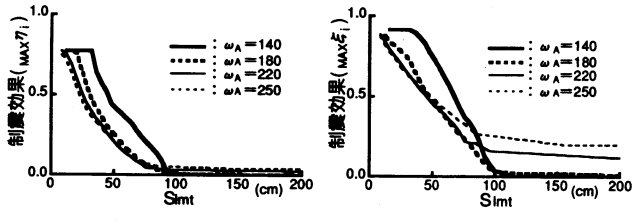


(エルセントロ入力)

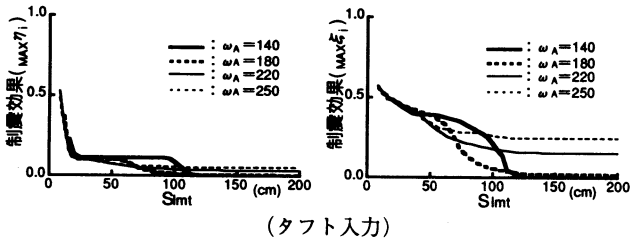


(タフト入力)

s－37



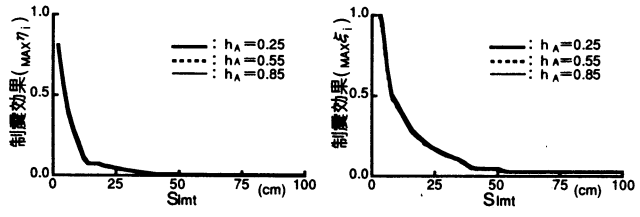
(エルセントロ入力)



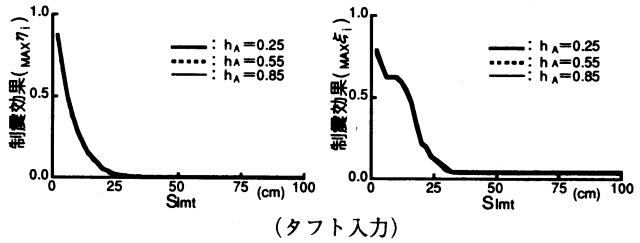
(タフト入力)

s－99

図－5　ω_A が C_E に与える影響

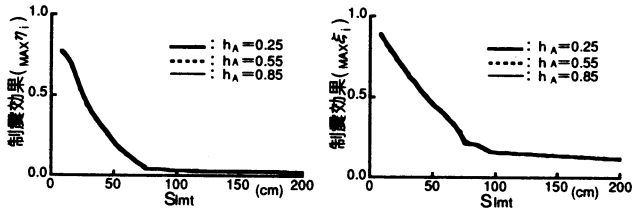


(エルセントロ入力)

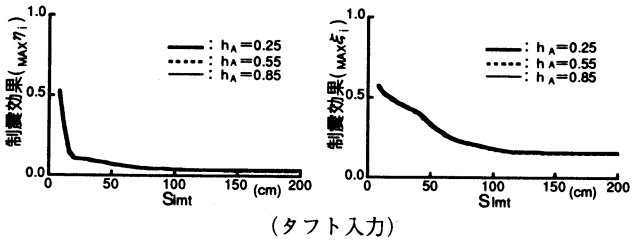


(タフト入力)

s－37



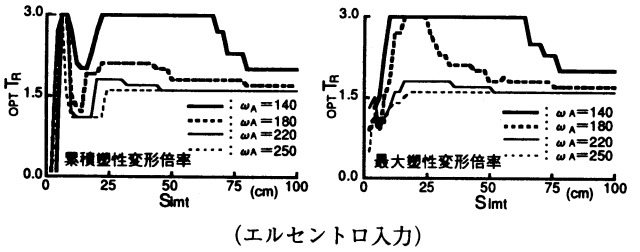
(エルセントロ入力)



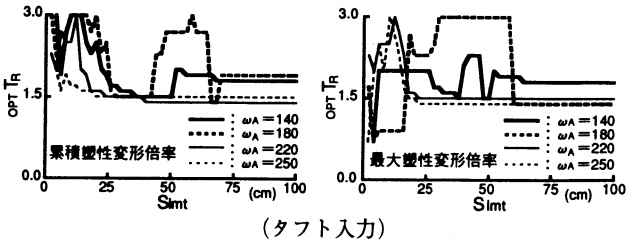
(タフト入力)

s－99

図－6　h_A が C_E に与える影響



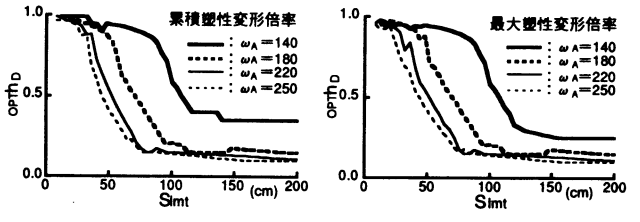
(エルセントロ入力)



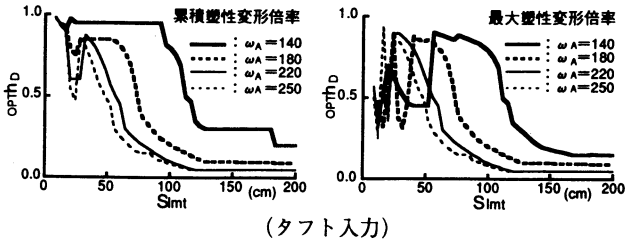
(タフト入力)

s－37

図－7　ω_A が ${}_{OPT}T_R$ に与える影響



(エルセントロ入力)



(タフト入力)

s－99

図－8　ω_A が ${}_{OPT}h_D$ に与える影響

THF2-1

ファジィ理論とＧＡによるボーリングデータ解釈の改良

Improvement of Interpreting Borehole Logs Using Fuzzy Theory and GA

大野　研・渡部　勉
Ken Ohno･Tsutomu Watabe

三重大学・愛知県
Mie University･Aichi Prefecture

Abstract: Geological profiles are the major results of the site investigations. Reliability of the profiles depends on engineers who perform the investigations. Consequently, we have developed a knowledge based system which assists the engineers in order to increase reliability of the profiles. The system suggested some reasonable geological profiles based on borehole logs. However, the system had several defects. We made some improvements.

1. まえがき

土質断面図は、ほとんど全ての構造物を造る場合に重要なデータであり、通常はボーリング記録から、専門家の手によって作成される。したがって、専門家の熟練度に、土質断面図の信頼性は依存する。そこで、専門家を支援するために、筆者らは以前から、ボーリング記録を自動的に解釈して、合理的な土質断面図を提案するシステムを開発してきている[1)]。しかし、従来のシステムでは岩盤を含んだボーリングデータを解釈することができなかったうえ、多層地盤を考えたときには、地層の連結がクロスしたり、提案できない地層の連結が存在するという欠点が発見された。そこで、今回はこれらの欠点を改良したシステムを開発した。そして、岩盤を含んだ多層地盤のボーリングデータを用いて、改良システムで提案した土質断面図と専門家が提案した土質断面図を比較した。

2. 方法

図１に示すフローチャートのように、土質断面図を提案した。土については、図に示す６種類のデータを利用して、土層ごとの類似度を計算したが、岩については岩種名、Ｎ値、層厚、色調の４種類のデータで判断した。この類似度の計算にＦｕｚｚｙ理論を利用している。土層ごとの類似度を基にＧＡを用いて、土層を連結した。というのは例えば、10層ずつを持つ２つのボーリング孔間の土層の連結パターンは、2^{100}通りにもなるからである。なお、今回は連結した層が交わるのを防ぐために、連結した土層がかさなった連結パターンの評価値を非常に低くした。

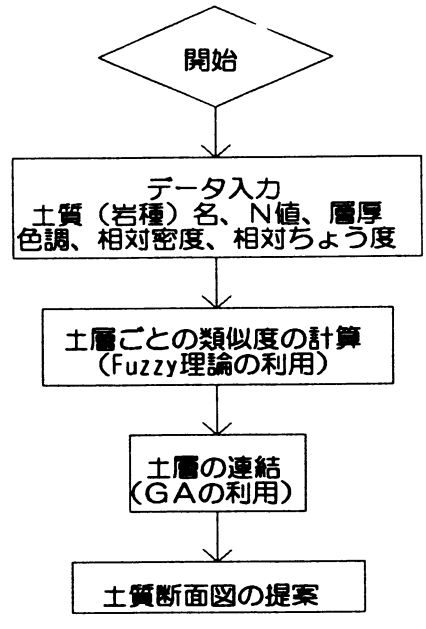


図１　土質断面図の提案までのフローチャート

表１　実際のボーリング記録

Borehole 1	土質名	N値	層厚(cm)	色調	相対密度	相対ちょう度
1	琉球石灰岩	50	120	白灰		
2	礫まじりシルト	11	260	黄褐		中
3	砂礫	30	420	褐灰	中	
4	細砂	26	200	黄褐灰	中	
5	シルト質砂礫	50	380	黄褐	極密	
6	シルト質砂	42	300	黄褐	密	
7	砂礫	31	200	黄褐	密	
8	礫まじり中粒砂	46	1100	黄褐	密	
9	中粒砂	46	290	黄褐	密	
10	粘土	37	60	黒灰		極硬
11	礫まじり粘土	23	150	灰		硬
12	シルト質砂	50	300	暗灰	極密	
13	砂まじり粘土	50	140	暗灰		極硬
14	強風化凝緑岩	50	860	緑灰		
Borehole 2	土質名	N値	層厚(cm)	色調	相対密度	相対ちょう度
1	琉球石灰岩	50	1090	白灰		
2	礫まじりシルト	14	280	黄褐		硬
3	砂礫	31	290	褐灰	密	
4	細砂	25	430	褐灰	中	
5	砂礫	50	80	灰	極密	
6	礫まじりシルト	34	230	褐灰		極硬
7	砂質シルト	32	360	褐灰		極硬
8	シルト質中粒砂	50	180	緑灰	極密	
9	砂礫	50	540	褐灰	極密	
10	中粒砂	46	670	褐灰	密	
11	シルトまじり中粒砂	37	130	褐灰	密	
12	粘土	33	135	暗緑灰		極硬
13	礫質粘土	50	135	暗緑灰		極硬
14	強風化凝緑岩	50	450	緑灰		
Borehole 3	土質名	N値	層厚(cm)	色調	相対密度	相対ちょう度
1	琉球石灰岩	50	1080	白灰		
2	砂礫	28	490	褐灰	中	
3	シルト質砂	28	500	褐	中	
4	礫まじりシルト	40	120	褐		極硬
5	砂まじりシルト	50	380	褐		極硬
6	礫	50	30	黒灰	極密	
7	中粒砂	50	1150	黒褐	極密	
8	砂質シルト	50	170	暗灰		極硬
9	強風化凝緑岩	50	350	緑灰		

表２　ボーリング孔２とボーリング孔３の類似度

2-3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	90.03	26.56	24.36	27.23	28.57	30.00	29.52	29.84	33.43
2	16.36	65.67	76.65	77.96	74.94	37.74	60.49	67.63	16.89
3	26.66	82.37	68.30	59.65	58.36	73.50	67.33	63.68	27.45
4	24.02	79.45	79.35	64.41	63.17	62.38	66.79	68.48	24.70
5	30.00	76.71	63.81	61.01	60.23	80.99	69.78	67.37	31.94
6	27.43	68.12	67.03	80.79	77.45	49.26	59.75	82.53	28.27
7	26.35	68.77	67.75	77.94	76.40	49.12	59.65	82.78	27.15
8	30.00	69.86	70.05	65.51	64.85	74.99	75.68	72.41	31.93
9	31.34	77.56	64.59	60.21	61.01	79.57	72.98	66.56	32.29
10	32.60	72.09	71.17	63.48	65.61	71.10	80.53	69.05	32.42
11	30.70	73.58	73.15	70.75	66.28	74.26	74.98	73.64	32.62
12	25.61	52.72	62.09	73.22	70.07	40.44	52.68	76.89	27.26
13	29.84	53.65	60.29	74.57	73.46	46.77	55.91	81.34	31.76
14	33.43	27.32	25.12	29.15	29.52	31.34	28.57	31.77	90.03

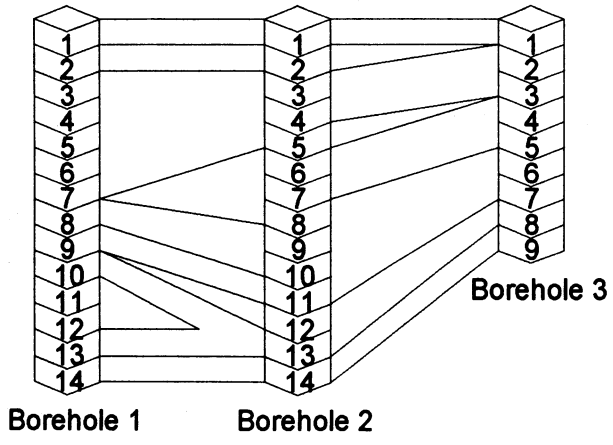


図２　我々のシステムによる土質断面図

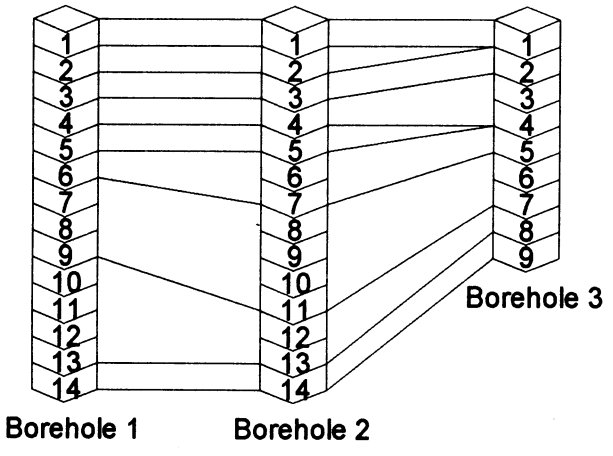


図３　専門家による土質断面図

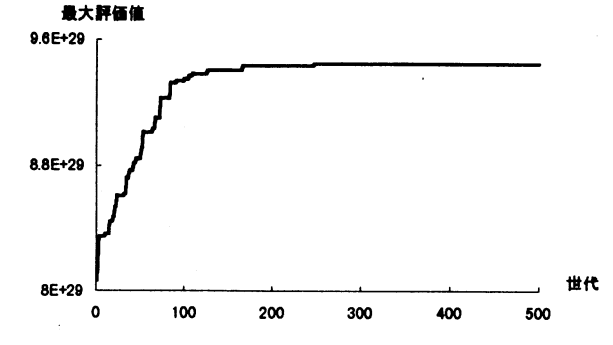


図４　各世代の最大評価値の変化の様子
（ボーリング孔１とボーリング孔２の間の連結）

3. 計算例

表１に実際の３つのボーリング孔のデータを示し、表２に、表１のデータを用いて計算したボーリング孔２とボーリング孔３の間の類似度マトリクスを示す。

そして、図２が我々のシステムが提案した土質断面図であり（図４にこの図２の土質断面図が得られるまでのＧＡにおける最大評価値の変化の様子を示す）、図３が専門家が提案した土質断面図である。この両者を比較することは困難であるが、両者の傾向が非常によく似ていることは明らかであり、図２の土質断面図は専門家の助けになると思われる。

＜参考文献＞

1)大野ほか：ボーリングデータの解釈、第３回ファジィ建築土木応用シンポジウム論文集、1996

THF2-2

重力探査とウェーブレット解析およびファジィ理論による三重県地域の活断層の可視化

Image Enhancement of Gravity Survey by Wavelet Analysis and Fuzzy Theory in Mie Pref. Area

大野 研 Ken Ohno　○原 敬徳 Takanori Hara　柴原 吉成 Yoshinari Sibahara

三重大学大学院生物資源学研究科
Graduate School of Bioresources , Mie University

Abstruct : One of the major of gravitational prospecting is to detect underground faults. However, the gravitational measurements have the disturbance underground structure produce. Some techniques are developed to reduce the noise. One of the more recently developed techniques is to utilize the wavelet transform. The wavelet analysis has found important applications in speech and image processing and is now a significant new tool in signal analysis generally. The purpose of this study is to detect faults by the wavelet analysis and fuzzy theory in Mie pref. area.

1 はじめに

１９９５年に発生した兵庫県南部地震以降、内陸直下型地震の原因である活断層の存在が注目されるようになった。

今日では日本全国の活断層地図も出版されているが、その多くのものは地形から判断された活断層であり必ずしも地質学的に活断層であると判明している訳ではない。また活断層に沿って溝を掘るトレンチ調査などは、広域的な調査には向かない。したがって、地形以外からの要素から活断層の位置を調べる方法に期待がよせられている。

よって本研究では、現在活断層を発見するのに有効で実績のある重力探査から三重県地域における地盤構造を可視化し、活断層地図と比較して既知の活断層を検証すると共に伏在断層を発見することを目的とする。その方法として、従来のフーリエ解析と対比しながら離散ウェーブレット解析を行った。さらにファジィ画像解析についても検討した。

このように活断層位置の信頼性を高めていくことで、今後の危険度評価つまり長期的な地震予知にも役立つと考えている。

2 活断層(伏在断層)について

さまざまな定義があるが、一般に過去の断層運動の繰り返しが、最も新しい地質時代の第四紀（約１７０万年前から現在までの期間）に形成された地形や地層の累積的な変動として記録されており、将来の活動すなわち地震を引き起こす可能性がある活動的な断層を活断層と呼んでいる。

近畿地方には活断層が多い。日本の活断層地図を見ると、中部地方と近畿地方北半分には、活断層が数多く分布している。しかし、関東地方をはじめ多くの都市域において活断層は沖積層のなかに埋もれていて、地表ではっきりとした地形を観察するのは難しい。このように活断層のうち、平野下に存在しているため新しい地層（沖積層）に厚く覆われ、地表には断層変位が直接現れないものを伏在断層という。兵庫県南部地震においても、建物の被害集中域は必ずしも地盤の悪い地域と一致するわけではなく、この地域の地下に地震を起こした伏在断層が存在していると考えられている。

よって、今後の課題としては伏在断層をきちんと評価していくことが必要となる。

3 重力探査データについて

今回使用した重力値データは、名古屋大学火山地震予知センターの志知らによって収集されたものであり[3]、補正密度 2.67g/cm^3、コンター間隔は 0.5mgal の西南日本全域におけるブーゲー異常傾向図から使用されたものである。

下図に示すように、図２にある三重県周辺域において１マスを約１kmで64×64のメッシュをプロットしたものが図１となる。

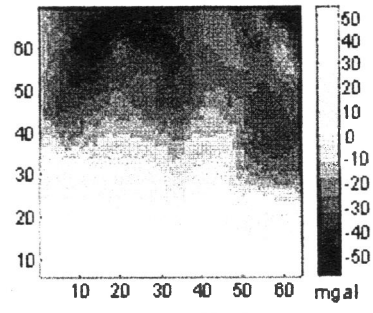


図１ 重力値データ

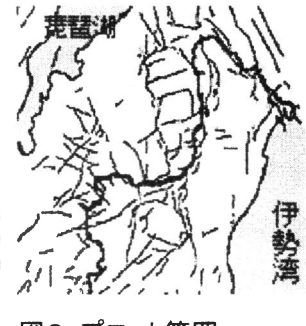


図２ プロット範囲

4 ファジィ画像解析

4－1 解析方法

ファジィ画像解析については以下の手順に従って行った。

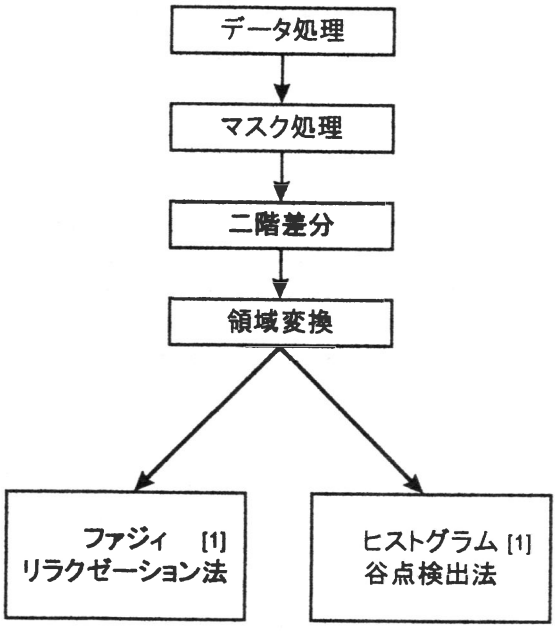


図1 処理フロー概要

(1)データ抽出

重力値地図に 64×64 マスのメッシュをプロットし、その地点での重力値を抽出した。

(2)マスク処理

抽出した重力値からノイズを消去するために 3×3 近傍のマスク処理を施した。

(3)二階差分

マスク処理を施した後に重力の勾配の急変値をピックアップするために二階差分を行った。

(4)領域変換

二階差分値を強度イメージ（min=0,max=1）に変換した。

(5)二階差分値の急変部分の強調

今回はファジィ解析の中でも融通性に富んだファジィ・リラクゼーション法とヒストグラム谷点検出法を用いた。

4－2 結果

ファジィ・リラクゼーション法解析の結果とヒストグラム谷点検出法の解析結果に活断層地図を重ね合わせた図をそれぞれ図３、図４に示す。

：重力急変地

—：活断層



図3 ファジィ・リラクゼーション法と活断層図との重ね合わせ

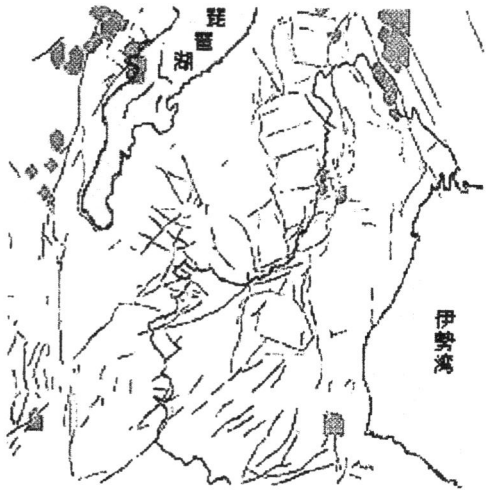


図4 ヒストグラム谷点検出法と活断層図の重ね合わせ

5 フーリエ解析およびウェーブレット解析

5-1 ウェーブレット解析

フーリエ変換は、すべて波形関数が三角関数のたし合わせによって表され、無限に続く振動を持つ関数を分解するもので、局所的現象の解析が困難であったが、ウェーブレット変換はすべての波形関数がウェーブレット関数のたし合わせによって表されるという考えのもとで変換される。すなわち空間的(時間的）に局在化された関数を用いることで、周波数だけでなく空間に対しても高い分解能力を持つという優れた特徴を持っているのである。よって、これまで解析が困難であった不連続波形や特異点を有する波形なども短時間で解析できる。

5-2 手法

ウェーブレット変換は、すべての波形関数がウェーブレット関数 $W((x-b)/a)$から成り立つと考えられた方法である[1]。

ウェーブレット関数 $W((x-b)/a)$の a,b を離散的にとり、$W((x-b)/a)$がそれぞれ直交するように選ばれている。a,b は $b/a=k, a=2^j$ の離散的にとられ、$W((x-b)/a)$は $W(2^jx-k)$で表される。

離散ウェーブレット変換は変換される信号を直交した軸に射影し、それぞれの軸の成分に分けるということと同じである。離散ウェーブレット変換によって算出される値は、その成分にどの程度影響を及ぼしているかのスペクトルのような意味がある。そこで直交の性質を利用した離散ウェーブレット変換は次のように定義されている。

$$a_{2^j+k} = 2^j \int_0^1 f(x)W(2^j x - k)dx \qquad (1)$$

$$a_0 = \int_0^1 f(x)\phi(x)dx \qquad (2)$$

また正変換によって算出された値を係数とし、逆変換は次のように定義される。

$$f(x) = a_0\phi(x) + a_1 w(x) + \begin{bmatrix} a_2 & a_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} w(2x) \\ w(2x-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_4 & a_5 & a_6 & a_7 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} w(4x) \\ w(4x-1) \\ w(4x-2) \\ w(4x-3) \end{bmatrix} + \cdots + a_{2^j+k}W(2^j x - k) + \cdots \qquad (3)$$

したがって逆変換の後、f(x)が再構成される。今回、1次元離散ウェーブレット変換を2次元に拡張して解析を行った。またこの解析には Daubechies のウェーブレット関数を使用した[1]。

以上の手法を用いて2次元離散フーリエ変換・ウェーブレット変換を行い、双方のパワースペクトル特性を調べ、ブーゲー異常値を解析した。

ここで、アイソスタシーにより短波長ブーゲー異常値はマントル以深に関係しない地殻の構造だけを示すものであり、地殻内に存在する活断層と密接な関係を持つといわれている。よって長波長成分から強度を順に抑え短波長成分を強調し、再構成する手法を用いた。

5-3 解析結果

フーリエおよびウェーブレットによる解析結果を以下に示す。

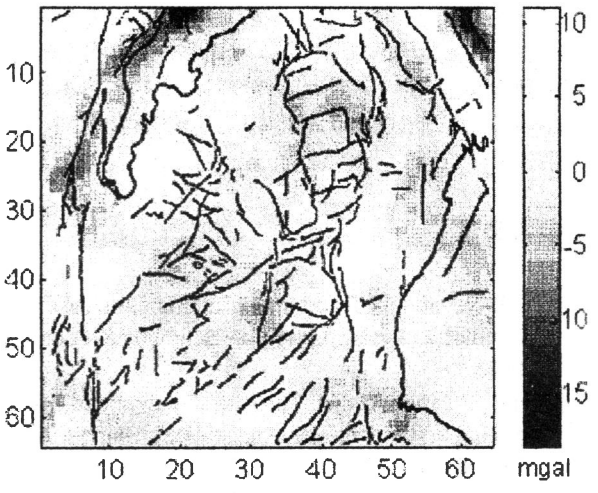


図5 フーリエ解析結果

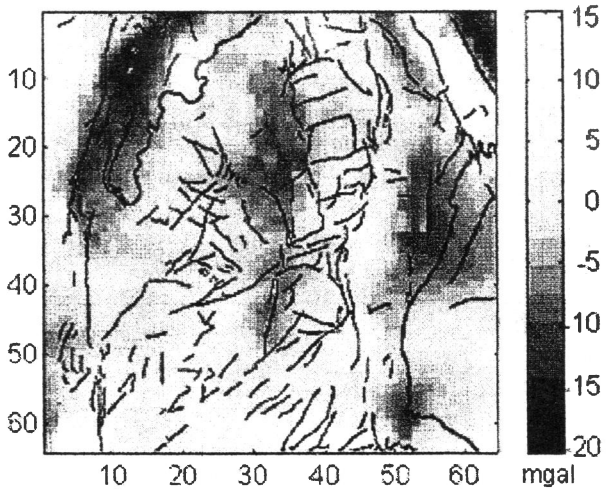


図6 ウェーブレット解析結果

6 考察

以上、重力急変地を強調する方法と重力値の短波長成分を強調する方法で、活断層位置の可視化を試みた。全体的に見ると、すべての解析結果は既存の活断層位置とほぼ一致している。

しかし、重力急変地を強調する方法ではファジィ・リラクゼーション法の方が、重力値の短波長成分を強調する方法ではウェーブレット解析の方が、より活断層位置が可視化されているようである。

図の右上に伏在断層が存在すると言われているが、いずれの手法でもその位置に断層が存在すると予測しており、これらの方法の有効性が確認できる。

ここで示したように、地形等から判断された活断

層位置と、重力値から判断された活断層位置とが一致すれば、それらの活断層の信頼性は向上し、重力値からは未知の伏在断層の存在の可能性を指摘することができる。したがって、詳細な重力データが得られたのならば精度の高い解析結果が得られ、発見困難な活断層の存在地点を明確にできる場合もあり、今後の建設物立地候補地の選定や地震予知などに非常に有効であると思われる。

参考文献

[1] D.E.Newland : "Random vibrations,spectral and wavelet analysis", Longman Scientific & Technical, 1993.

[2] H.B. Wilsonand L.H. Turcotte : " Advanced Mathe matics and Mechanics Applications Using MATLAB", CRC Press,1994

[3] Gravity Research Group in Southwest Japan,"A Bouguer gravity anomaly map in Central Japan, Rept .Geol.Surv.Japan,no.280,1994

[4] “科学朝日 地震科学最前線”、朝日新聞社、1995

[5] 日本ファジィ学会編：“ファジィ画像処理”、日刊工業新聞社、1993

[6] 高木幹雄 下田陽久：“画像解析ハンドブック”、東京大学出版、1992

[7] 池田安隆　島崎邦彦　山崎晴雄：“活断層とは何か”、東京大学出版会、1996

[8] “新編　日本の活断層地図”、東京大学出版会、1994

連絡先

〒５１４
津市上浜町１５１５
三重大学大学院生物資源学研究科
生物生産工学専攻　構造設計学研究室
原　敬徳

TEL : 059-231-9584
FAX : 059-231-9571
E-mail : s2harat@maric.bio.mie-u.ac.jp

THF2-3

ニューラルネットワークに基づく標準化された切り土のり面データベースと容易に得られる降雨要因による降雨継続中の崩壊発生予測システムについて

A SYSTEM FOR FORECASTING CUT-OFF SLOPE COLLAPSE USING STANDARD DATA BASE AND SIMPLE RAINFALL FACTORS BASED ON NEURAL NETWORK IN HEAVY RAIN

菊池英明[*1]，上田靖之[*2]，神谷誠[*3]，古川浩平[*1]
Hideaki KIKUCHI ,Yasuyuki UEDA ,Makoto KAMIYA ,Kohei FURUKAWA

[*1]山口大学工学部 社会建設工学科，[*2]宇部市，[*3]日本道路公団 中国支社
[*1]Dept. of Civil Engineering ,Yamaguchi University ,[*2]Ube City ,[*3]Chugoku Branch office ,Japan Highway Public Corporation

The collapse of cut-off slopes in heavy rain can be forecasted by slope evaluation factors as well as rainfall factors.
In this research, we have constructed a system that can forecast the collapse or non-collapse of cut-off slopes in actual heavy rain using standard data base of slopes together with simple rainfall factors based on neural network .
From the results ,the system using neural network is effective to recognize the pattern of the collapse or non-collapse during heavy rain.

1．はじめに

近年，高速道路網の整備に伴う高規格道路が数多く建設され，今後，管理を必要とする切り土のり面数は増加するものと考えられる．このような現状の中，各地で豪雨によるのり面崩壊が発生し，交通障害を引き起こすなどの災害が発生おり，防災管理を効率的かつ適切に行うことが重要となる．現在，日本道路公団中国支社管内では，高速道路の調査・設計，施工時の資料に基づいたのり面データベースが整備され，降雨データでは全国的な気象庁アメダスデータに加え路線沿いに雨量観測網が整備され，これらのデータの有効利用が望まれている．豪雨時の切り土のり面の崩壊は斜面要因と誘因として降雨の組み合わせにより発生することからパターン認識に優れているニューラルネットワークを用いて崩壊・未崩壊の判別システムの構築を行い，切り土のり面の崩壊可能性評価への適用性について検討を行う．

2．ニューラルネットワークによる崩壊・未崩壊の判別システムの概要

本研究で使用したネットワークモデルは，**図-1**に示す入力層，中間層，出力層の3層からなる階層型ネットワークである．入出力関数としてはシグモイド関数を用い，学習方法としてバックプロパゲーションを適用した．入力層には，全てのり面データベースの評価要因と，一時間雨量，累積雨量，降雨継続時間の降雨要因[1)]とを入力した．出力層は，「崩壊」，「未崩壊」に対応した2個のニューロンを設定した．このとき各ニューロンの出力値は逆相関の関係にあるため，崩壊に対応したニューロンの出力値を崩壊確信度(V)とし，V≧0.5であれば「崩壊」となりV<0.5であれば「未崩壊」とした．中間層のニューロン数は6個とし，収束条件は学習回数10,000の制約の下で平均2乗誤差:E<0.001とした．

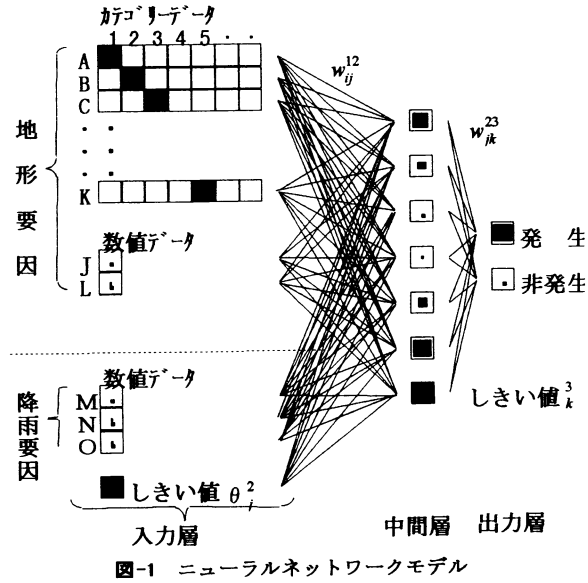


図-1 ニューラルネットワークモデル

ここで，未崩壊データは堆積岩における判別システムの構築結果から，崩壊を引き起こした斜面の周辺で，その崩壊降雨により未崩壊であった斜とその降雨を未崩壊データとした．また，降雨要因の採用時刻は降雨継続中の危険と考えられる時刻とし，崩壊降雨では崩壊時刻，未崩壊降雨では降雨継続中に一時間雨量，累積雨量が最大となる時刻を採用した．

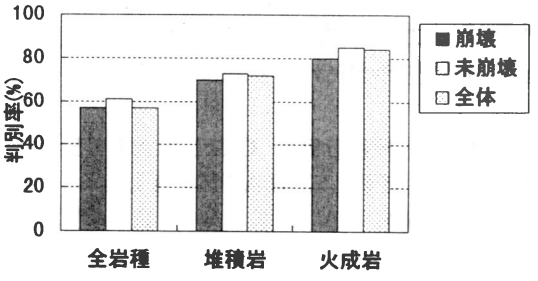


図-2　未学習データに対する判別結果

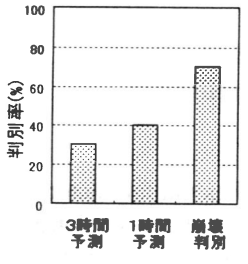


図-3　崩壊予測結果

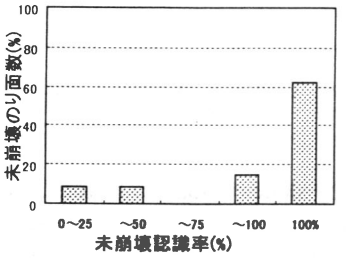


図-4 未崩壊認識率の分布

3．学習結果と崩壊・未崩壊の判別結果

全岩種，堆積岩，火成岩を対象とした学習の結果，全てのケースにおいて収束条件を満足し学習が行われ，全ての崩壊・未崩壊の教師データについて正解を与えた．

未学習データに対するテスト結果を**図-2** に示す．**図-2** に示すように堆積岩では約 70%，火成岩では 80%以上の非常に高い判別率で未学習データに対しても崩壊・未崩壊の判別を行っている．また，全岩種に比べ明らかに判別率が高く，岩種別でシステムを構築することが有効であることが分かる．

4．リアルタイム予測への適用と評価

リアルタイム判別への適用性の評価を行うため堆積岩のシステムを用い未学習データの一時間ごとの降雨に対して崩壊・未崩壊の判別を行った．**図-3** に崩壊斜面での崩壊予測状況を示す．**図-3** の崩壊判別は**図-2** に示したように崩壊時刻判別が約 70%できることを示しており，１時間前では約 40%，３時間前でも約 30%の斜面で崩壊発生を予測している．**図-4** に未崩壊斜面での未崩壊認識率に対するのり面数の分布を示す．未崩壊認識率とは一連の未崩壊降雨中の正解率を示しており，降雨継続中，終始未崩壊判別を行えば認識率は 100%となる．

図-4 から分かるように認識率が 25%以下ののり面も若干みられるが，60%以上ののり面で降雨継続中常に未崩壊と判別していることが分かる．

参考例として崩壊斜面のリアルタイム判別結果を**図-5** に示し，未崩壊斜面の判別結果を**図-6** に示す．**図-5** に示すように，崩壊斜面では時間雨量の変化に伴い崩壊確信度が変化し，途中誤判別することもなく崩壊時刻で確信度が１付近まで上昇している．未崩壊斜面では，**図-6** に示すように崩壊確信度は 0.5 を越えることがなく「未崩壊」と終始判別していることが分かる．

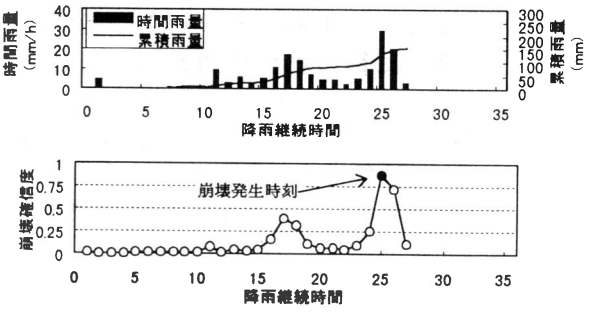


図-5　崩壊斜面における崩壊予測結果の代表例

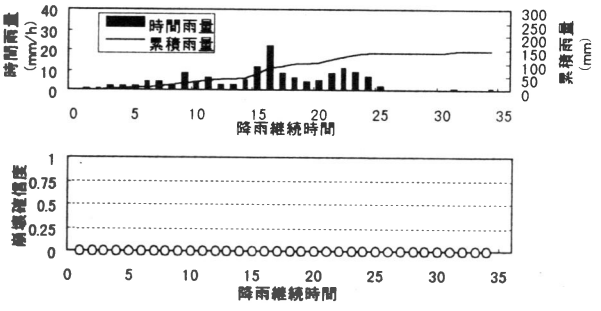


図-6 未崩壊斜面における崩壊予測結果の代表例

5．おわりに

ニューラルネットワークを用いることにより，標準化され容易に入手可能な斜面データとアメダス降雨データから，のり面の崩壊可能性評価システムの構築が可能である．その際，岩種別にシステムを構築することが有効である．

この判別システムを用いることで，ある降雨が切り土のり面の崩壊を引き起こすか否かを 70%以上の高い確率で判別することが可能である．また，リアルタイム判別では，雨の降り始めから高い確率で崩壊・未崩壊の判別が可能である．

参 考 文 献

1) 西邦正，古川浩平，中川浩二：「豪雨時における切土のり面の崩壊誘因評価と崩壊・未崩壊判別について」，土木学会論文集，第 457 号/Ⅲ-21，pp. 151-154，1992. 12.

[問い合わせ先]
〒755 山口県宇部市常盤台 2557
山口大学工学部社会建設工学科
菊池英明
TEL. 0836-35-9111 内 8316
FAX. 0836-35-9429
e-mail : hkikuchi@jim.civil.yamaguchi-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THF2-4

斜面の崩壊危険度診断システムへのラフ集合の適用

Application of Rough Sets to Diagnosis System for Slope-Failure Danger Levels

広兼　道幸*　　古田　均*　　三雲是宏**

Michiyuki HIROKANE　Hitoshi FURUTA　Yukihiro MIKUMO

*関西大学総合情報学部　　**株式会社ニュージェック

Fuculty of Informatics, Kansai University　Newjec Co., Ltd.

Abstract : In this paper, the possibility of applying the rough sets is discussed in acquisition of experienced knowledge from observation data. A minimum decision algorithm is developed to derive useful production riles from a set of observation data. The applicability and efficiency of the algorithm is demonstrated by using an example of slope-failure diagnosis. Using the real data, it is confirmed that the method developed is useful for the acquisition of expertise, which is very important and inevitable to build a practical expert system.

1. はじめに

斜面崩壊は様々な要因が複雑に作用して発生するもので，多くの要因の一部のみに着目した方法[1]，統計的な方法[2]，力学的な方法[3]など，危険度を診断するいくつかの方法が提案されている．しかし，地方自治体などで進めている防災計画は，これらの診断方法とは別に，その地域を熟知した専門家の経験的知識をもとに，危険度の診断が行われているのが現状である．

本論文では，専門家が道路沿いの斜面の崩壊危険度を診断した事例に対してラフ集合[4)5)6)]を適用して，極小決定アルゴリズムを生成した．生成した極小決定アルゴリズムに含まれる要因は，いずれも斜面の崩壊危険度を診断するために重要であると考えられる．そこで，複数の極小決定アルゴリズムに対して，斜面の崩壊危険度診断システムを構築する際の知識としての妥当性を評価して，ルールを誘導する方法を提案する．

2. 極小決定アルゴリズムの生成

本論文において使用した専門家の診断事例は，粘板岩を主体とする道路沿いの斜面の崩壊危険度を診断したもので，**表-1** に示す高速道路調査会の診断方法[7]に従っている．各判定要因に対して該当する項目の選択を行い，項目に対応する危険ランク（a, b, c, d）を数量化して，その合計得点より各斜面の総合的な危険度（A, B, C）を診断する点数制を採っている．

表-2 は，32 箇所の斜面に対して，各判定要因の項目番号と危険度をまとめたものである．この表は，それぞれの斜面に対して，条件属性である判定要因の項目番号と，決定属性である危険度との関係（決定規則）をまとめた表（決定表）である．

2.1 危険度の判定要因に対する従属性

最初に，個々の斜面の決定規則について検討して，すべての判定要因に対する項目番号が同じであるにもかかわらず，異なった危険度に診断されているものを抽出する．**表-2** においては，矛盾している決定規則は存在せず，危険度は判定要因に従属しているということができる．

また，**表-2** の決定表の中に同一の決定規則が含まれている場合，これらの決定規則については，いずれか 1 つの決定規則を評価すればよい．斜面番号 8 と 29 の決定規則については，それぞれ斜面番号 7 と 28 の決定規則と同じであり，この表から削除することができる．

2.2 判定要因の取り除き

次に，**表-2**（網掛け部を除く）から任意の判定要因を取り除き，すべての判定要因に対する項目番号が同じであるにもかかわらず，危険度が異なっているものを抽出する．

これらの検討結果より，判定要因の数が最小となる

表-1　崩壊危険度の判定要因

判定要因	項目	危険ランク
(1) 崩壊地の有無	① 大規模崩壊地がある	a
	② 崩壊地が多くある	b
	③ 崩壊地が少しある	c
	④ 崩壊地がない	d
(2) 崩壊前兆の有無	① 段落ち，亀裂，構造物の変位などの前兆がある	a
	② 上記の前兆がない	b
(3) 崖錐など不安定土塊の存在状況	① 厚く存在する	a
	② 薄く存在する	c
	③ 存在しない	d
(4) 風化，変質の激しい岩の有無	① 風化，変質の激しい岩があり，上部は集水地形	a
	② 風化，変質の激しい岩があるが，①以外の場合	c
	③ 風化，変質の激しい岩がない	d
(5) 破砕帯の有無	① 破砕帯がある	b
	② 破砕帯がない	d
(6) 斜面の勾配	① オーバーハング状	a
	② 35° 以上	b
	③ 25° ～35°	c
	④ 25° 以下	d
(7) ガリーの有無	① ある	b
	② ない	d
(8) 斜面上沢状窪みの有無	① 沢状窪みの出口が道路より上部に位置する	a
	② 沢状部の表土，風化土が周辺部より比較的厚い	b
	③ 沢状窪みはあるが，②以外の場合	c
	④ 沢状窪みがない	d
(9) 斜面上部地形	① 凹型（集水地形）	b
	② 平型	c
	③ 凸型	d
(10) 斜面の縦断形	① オーバーハング状	a
	② 斜面途中および上部に平坦部がある	b
	③ 明瞭な遷急点，遷緩点がある	c
	④ ①～③以外	d
(11) 湧水の状況	① 多量の湧水がある	b
	② 浸み出し程度の湧水がある	c
	③ 湧水がない	d
(12) 道路による斜面の切り取り状況	① 厚い不安定土塊を切り取っている	b
	② 風化，変質の激しい岩盤を切り取っている	c
	③ 比較的新鮮な岩盤を切り取っている	d

組み合わせは**表-3**に示すようになり，これらの組み合わせの中から，CASE-1をもとに極小決定アルゴリズムを抽出する方法について説明する．

表-3のCASE-1に示す(1)，(2)，(8)，(9)，(11)以外の判定要因を**表-2**（網掛け部を除く）から取り除き，さらに同一の決定規則を評価したところ，**表-4**に示すあらたな決定表を得ることができる．

2.3 判定要因に対する項目の取り除き

最後に，判定要因の取り消しによって得られた決定表（**表-4**）を使って，項目番号を1つ1つ取り除き，決定表に矛盾が含まれているか否かを検討する．

このように，項目番号を1つ1つを取り除き矛盾の有無を検討して，さらに同一の決定規則を評価したところ，**表-5**に示すあらたな決定表を得ることができる．このようにして得られた決定表は，判定要因や項目番号を1つでも取り除くと矛盾が生じ，これ以上，小さくすることができない決定表であり，極小決定アルゴリズムと呼ばれるものである．

3. 極小決定アルゴリズムの評価

図-1は，**表-3**に示す極小決定アルゴリズムに必要とされる各判定要因の出現頻度を，棒グラフで表したものである．**図-1**において，出現頻度の多い順に判定要因を挙げると，(1)崩壊地の有無，(11)湧水の状況，(8)斜面上沢状窪みの有無，(9)斜面上部地形の順となる．

判定要因(11)は湧水に関する評価項目となっている．集中豪雨の際に斜面崩壊が多発することを考えても，降雨や排水などによる水は斜面崩壊を引き起こす重要な誘因である．また，判定要因(8)，(9)については，いずれも斜面上部に集水地形が存在しているか否かを

表-2　専門家の診断事例

斜面番号	判定要因 (1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	危険度
1	②	①	①	②	②	②	②	④	②	②	③	①	A
2	④	②	①	②	②	②	②	④	②	②	②	①	B
3	③	②	②	③	②	②	②	④	③	④	③	②	C
4	④	②	①	②	①	③	②	②	②	③	③	③	B
5	③	②	①	①	②	②	②	④	①	③	③	①	A
6	③	①	①	①	②	②	②	④	③	②	①	①	A
7	④	②	②	②	②	②	②	④	②	④	③	③	C
8	④	②	②	②	②	②	②	④	②	④	③	③	C
9	③	①	①	②	②	④	②	③	①	④	③	③	B
10	③	①	①	③	②	④	②	③	①	④	③	③	B
11	④	②	①	③	②	④	②	④	②	③	③	③	C
12	④	②	①	③	②	④	②	③	①	③	③	③	B
13	④	②	①	③	②	②	②	④	②	③	①	①	B
14	③	②	②	③	②	②	①	④	①	④	②	③	B
15	④	②	①	③	②	④	①	④	②	④	③	③	C
16	④	②	①	③	②	②	②	④	③	④	①	①	B
17	④	①	①	③	②	④	②	③	①	③	②	③	B
18	③	②	①	③	②	②	①	④	②	③	③	①	B
19	④	②	①	③	②	②	②	④	②	③	③	①	C
20	④	②	①	③	②	③	②	③	①	③	③	③	B
21	③	①	①	③	②	②	②	④	②	③	③	③	B
22	④	②	②	③	②	②	②	④	③	③	③	③	C
23	④	②	②	③	②	③	①	④	①	③	③	③	C
24	④	①	①	②	②	④	②	③	①	④	③	①	B
25	④	②	②	①	①	②	②	④	①	④	①	①	A
26	④	②	②	②	②	②	①	③	①	④	①	①	B
27	④	①	②	③	②	②	②	④	③	④	③	③	C
28	②	①	①	①	①	②	②	④	②	④	③	①	A
29	②	①	①	①	①	②	②	④	②	④	③	①	A
30	②	①	①	①	②	②	①	④	③	③	③	②	A
31	③	①	①	②	②	②	①	④	①	③	②	①	A
32	④	②	②	②	②	②	②	④	③	③	③	②	C

表-3　判定要因の組み合わせ

ケース	判定要因				
CASE-1	(1)	(2)	(8)	(9)	(11)
CASE-2	(1)	(3)	(4)	(8)	(11)
CASE-3	(1)	(3)	(4)	(9)	(11)
CASE-4	(1)	(3)	(8)	(9)	(11)
CASE-5	(1)	(4)	(8)	(9)	(11)
CASE-6	(1)	(4)	(8)	(10)	(11)
CASE-7	(1)	(4)	(8)	(11)	(12)
CASE-8	(1)	(8)	(9)	(10)	(11)
CASE-9	(1)	(8)	(9)	(11)	(12)

表-4　判定要因を取り除いた決定表（CASE-1）

斜面番号	判定要因 (1)	(2)	(8)	(9)	(11)	危険度
1	②	①	④	②	③	A
2	④	②	④	②	②	B
3	③	②	④	③	③	C
4	④	②	②	②	③	B
5	③	②	④	①	③	A
6	③	①	④	③	①	A
7	④	②	④	②	③	C
9	③	①	③	①	③	B
12	④	②	③	①	③	B
13	④	②	④	②	①	B
14	③	②	④	①	②	B
16	④	②	④	③	①	B
17	④	①	③	①	②	B
18	③	②	④	②	③	B
21	③	①	④	②	③	B
22	④	②	④	③	③	C
23	④	②	④	①	③	C
24	④	①	③	①	③	B
25	④	②	④	①	①	A
26	④	②	③	①	①	B
27	④	①	④	③	③	C
30	②	①	④	③	③	A
31	③	①	④	①	②	A

評価する項目が含まれている．降雨や排水などによる水を斜面上部に集めてくるような地形も，斜面崩壊を引き起こす要因として，従来から着目されてきたものであり，斜面崩壊の危険度を診断する際の重要な要因の１つと考えられているものである．

4. ルールの誘導

最終的に得られた極小決定アルゴリズムは，ルールで容易に記述することができる．ここで，表-5 に示す

表-5　極小決定アルゴリズム（CASE-1）

斜面番号	判定要因 (1)	(2)	(8)	(9)	(11)	危険度
1	②					A
2				②	②	B
3		②		③	③	C
4			②			B
5	③		④	①	③	A
6		①			①	A
7	④		④		③	C
9			③			B
13				②	①	B
14		②			②	B
16		②		③	①	B
18	③			②		B
25			④	①	①	A
27	④			③	③	C
31		①	④		②	A

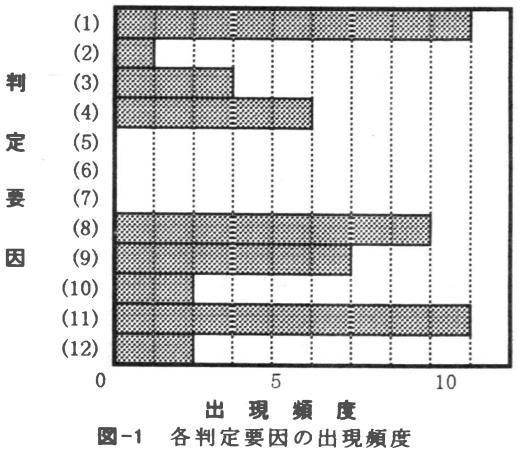


図-1　各判定要因の出現頻度

CASE-1 の場合，1 行の決定規則を 1 つのルールで記述すれば，15 のルールで記述することができる．

表-6 は，CASE-1 から CASE-9 の 9 通りの判定要因の組み合わせについて，極小決定アルゴリズムを生成して，各ケースに対するルール数および評価項目数をまとめたものである．ここで，ルール数は知識の修正などを考慮すると少なくなるよう記述すべきである．また，評価項目数も推論にかかる時間などを考慮すれば少なくなるよう記述すべきである．したがって，**表-6** の中で最もルール数と評価項目数が少なくなっている CASE-2 の極小決定アルゴリズムからルールを誘導し，ES を構築することによって，知識の修正の効率化，推論時間の短縮化を実現することができる．

5. あとがき

専門家が行った道路沿いの斜面の崩壊危険度を診断した事例に内在する経験的知識を極小決定アルゴリズムという決定表の型で抽出する方法を提案した．さらに，専門家の経験的知識として抽出された極小決定アルゴリズムから，ES を構築する際に必要となるルールを誘導する方法についても提案した．

専門家が斜面の崩壊危険度を診断した事例から，危険度の診断に主に影響を与えている判定要因を見つけ出すことができた．これらの要因は，従来から重要視されてきた水を評価するものであり，湧水や斜面上部の集水地形に関する要因であった．

表-6　ルール数と評価項目数

ケース	ルール数	評価項目数
CASE-1	15	35
CASE-2	12	26
CASE-3	16	37
CASE-4	15	32
CASE-5	15	32
CASE-6	15	35
CASE-7	15	35
CASE-8	18	42
CASE-9	17	39

参考文献

1) 例えば，鈴木雅一ほか：土砂害発生の危険雨量，新砂防，Vol. 110，pp. 1-7，1979.

2) 例えば，小橋澄治：斜面崩壊危険土分類の問題点，地すべり，Vol. 10，No. 3，pp. 8-14，1974.

3) 例えば，沖村孝・市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法，土木学会論文集，Vol. 358，pp. 69-75，1985.

4) Pawlak，Z.：Rough Sets－Theoretical Aspects of Reasoning about Data，Kluwer Acad. Pub.，1991.

5) Ziarko，P.：Rough Sets，Fuzzy Sets and Knowledge Discovery，Springer-Verlag，1994.

6) Pawlak，Z.：Rough Sets，International Journal of Computer and Information Science，Vol. 11，pp. 341-356，1982.

7) 高速道路調査会：地すべり及び斜面崩壊の防止対策の調査手法に関する研究，1977.

［問合わせ先］

〒569-11　高槻市霊仙寺町 2-1-1

関西大学総合情報学部

広兼　道幸

TEL/FAX：0726-90-2402

E-MAIL：hirokane@kutc.kansai-u.ac.jp

THF2-5

橋梁診断ニューロ・ファジィエキスパートシステムの開発と適用性

Development and Practical Application of Neuro-Fuzzy Expert System for Serviceability Assessment of Bridges

中村秀明* 山本秀夫** 河村 圭* 宮本文穂*

Hideaki NAKAMURA, Hideo YAMAMOTO, Kei KAWAMURA and Ayaho MIYAMOTO

*山口大学工学部 **山口県庁

Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ. Yamaguchi Prefect. Gov.

Abstract: The aim of this study is to develop the Bridge Rating Expert System with machine leaning employing the combination of neural network and bidirectional associative memories. By applying the system to an actual in-service bridge, it has been verified that employed machine leaning method using results of questionnaire surveys on bridge experts is effective for the system.

1．まえがき

道路交通網の中で重要な位置を占める橋梁は，近年の自動車交通量の増加や，車輌の大型化，さらには経年劣化などにより著しい損傷を受け，耐久性や耐荷力が低下したものが年々増加している．今後これらの橋梁の維持・管理，補修・補強が重要な問題となることが予想される．橋梁の維持管理の基本フローである「調査」→「診断」→「補修・補強」のうち「診断」には，確立された診断方法がなく，現場の経験豊富な専門技術者の判断に頼っているのが現状である．しかしながら調査結果を基に橋梁の診断を行える橋梁技術者の数は非常に少なく，今後，維持管理業務の増加や専門技術者の不足が懸念されている．そこで本研究室では，以前より，橋梁の維持管理に携わる専門技術者の知識・経験を導入し，橋梁の点検結果や橋梁台帳などのデータから既存橋梁の診断が可能な「橋梁診断エキスパートシステム（以下，本システム）」の開発を行ってきた[1]．本研究は，この橋梁診断エキスパートシステムに実橋梁の調査データを入力し，診断結果を検証することにより，本システムの適用性を検討した．

2．本システムの概要

2.1 知識表現

本システムでは，まずコンクリート橋の維持管理に携わる専門技術者の経験的な診断および評価に関する知識をファジィ集合を含むif-thenルールの形で表現する．本研究では，条件部の帰属度関数を橋梁診断の専門家に対するアンケートによってπ関数で表現し，それを診断プロセス（図-1参照）に従いDempsterの結合則で結合することによりsubgoalごとの帰属度関数を求めた．そして，帰属度関数の重心をとったものにスケーリングを行うことによりばらつきをもたせ，その結果からif-thenルールを抽出している．抽出されたルールは，それぞれ前件部命題，if-then関係，後件部命題の３つのパートに分解しており，前件部および後件部命題を非線形関数が同定可能な３層ニューラルネットワークを用いて表現し，if-thenの関係にニューラルネットワークの連想記

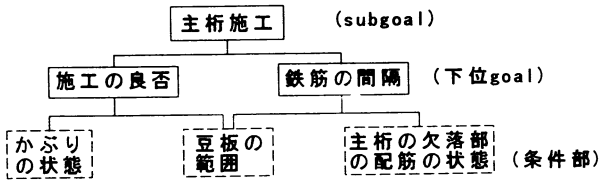


図-1 診断プロセスの例

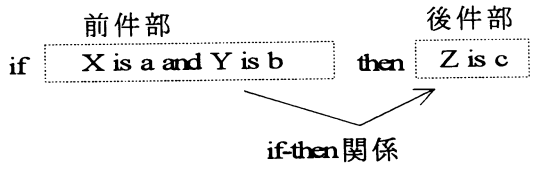


図-2 ファジィ集合を含むif-thenルール

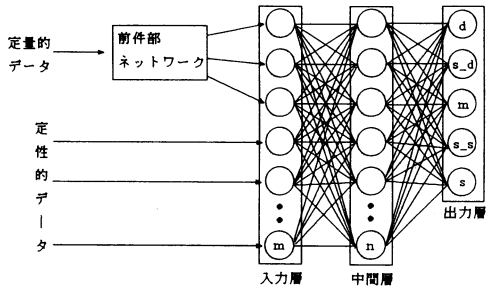


図-3 入力データの入力方法

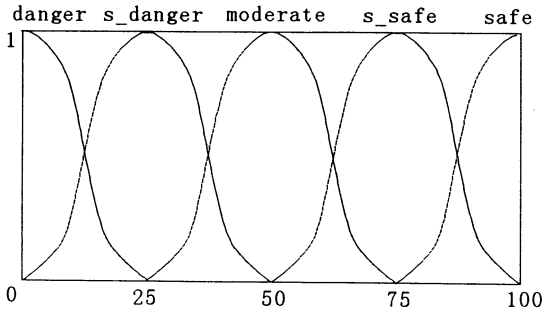


図-4 判定用帰属度関数

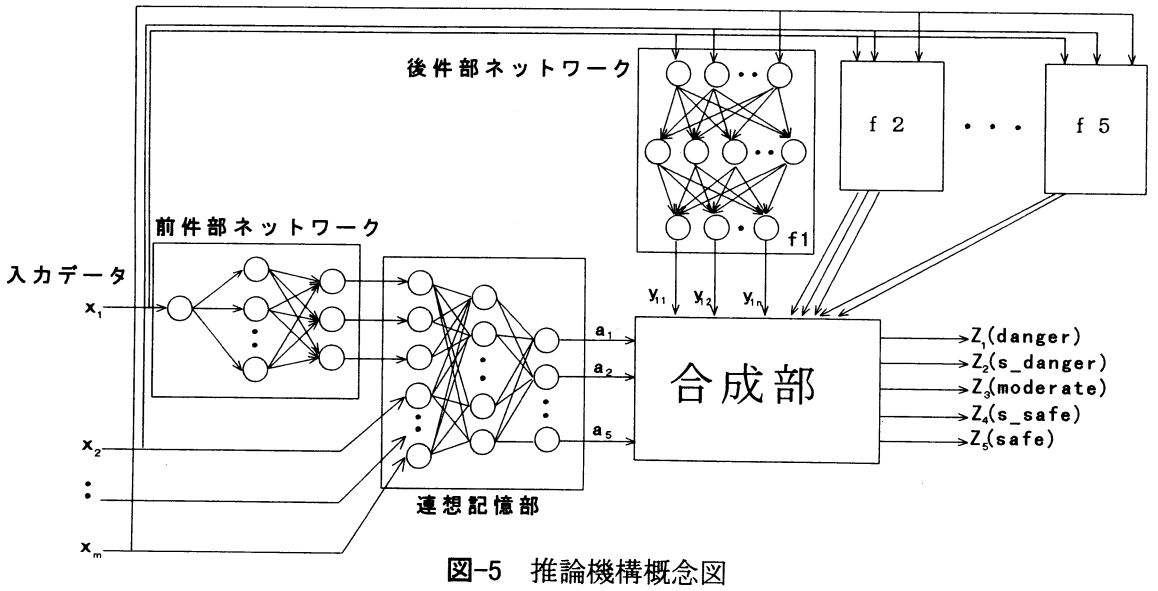


図-5 推論機構概念図

憶を適用してファジィ推論を可能としている．なお，連想記憶を行うネットワークとして，双方向連想記憶(BAM:Bidirectional Associative Memory)を用いている．

2.2 推論方法

本システムに診断対象橋梁の橋梁諸元，環境条件，交通量，各ひび割れの状態といった定量的および定性的なデータが入力される．入力項目のうち定量的なデータは，前件部ネットワークにおいて if-then ルール前件部の各命題の帰属度が出力される．また，定性的なデータはそのまま連想記憶部の入力層へと入力するようになっている（**図-3** 参照）．それらを基に，連想記憶部において if-then ルール後件部の各命題の重みが算出される．後件部ネットワークでは，後件部ファジィ命題の状態を danger, slightly danger, moderate, slightly safe, safe の５つの帰属度関数を０から 100 まで５点きざみ 21 分割したものが出力される．そして，合成部において後件部ネットワークで得られた帰属度関数と連想記憶部で得られた後件部への重みを掛け合わせて合成し，これを**図-4** に示す判定用帰属度関数と照合することにより５段階で評価が出力される（**図-5** 参照）．なお，本システムの前件部および後件部のニューラルネットワークは，バックプロパゲーション(BP)で学習を行い，ひび割れ幅の学習については 10mm まで学習を行った．

３． 実橋への適用

3.1 診断対象橋梁の概要

診断例として山口県内に架設されているＹ橋を取り上げ診断を行った．Ｙ橋は昭和 12 年に架設された橋齢 60 年の３主桁単径間ＲＣ単純Ｔ桁橋である．田園地区に架設され，交通量はほとんどなかった．損傷状態としては，高欄の一部が崩れて無くなっているなど，見た目にも損傷の大きさが確認できた．診断に使った入力データを**表-1**～**表-4** に示す．

表-1　「Y橋」の初期入力データ

橋梁名	Y橋	架設箇所	田園地区
橋長	11.0m		一般道路
幅員	4.10m		
主桁本数	3本	拡幅	されていない
主桁スパン長	10.5m	道路の勾配	小さい
床版スパン長	1.57m	信号の有無	無い
床版厚	30.cm	路面のひび割れ・陥没	ひび割れあり
橋齢	60年	路面の平坦性	ほとんど平坦
構造形式	単純橋	交通量	少ない
断面形状	T型断面	大型車交通量	0（台／日）
断面寸法	小さい	橋梁の振動	小さい
支承形式	単純支持	高欄	小さい
不等沈下の有無	ない	横桁の有無	無い
適用示方書	大正14年	排水管	無い
等級	2等橋	豆板の発生	無い

表-2　「Y橋」のひび割れに関する入力データ

ひび割れ種類 ＼ 入力データ	床版			主桁			
	ハンチ沿いひび割れ	支承付近ひび割れ	床版中央のひび割れ	曲げひび割れ	せん断ひび割れ	鉄筋の腐食ひび割れ	付着ひび割れ
ひび割れ状況	多い	多い	発生なし	少ない	発生なし	かなり発生	発生なし
最大ひび割れ幅	0.2mm	0.3mm	—	0.2mm	—	3.0mm	—
遊離石灰	かなり発生	かなり発生	—	少し発生	—	少し発生	—
ｺﾝｸﾘｰﾄの欠落	少し欠落	少し欠落	—	少し欠落	—	かなり欠落	—
鉄筋の腐食状況	少し錆	露出なし	—	少し錆	—	かなり錆	—
鉄筋の錆汁	—	発生なし	—	—	—	—	—

表-3　「Y橋」の床版の入力データ

入力データ	回　答
コンクリートのかぶり	小さい
コンクリート欠落部の配筋の状態	不明
床版ひび割れの方向性	ほぼ2方向

表-4　「Y橋」の主桁の入力データ

入力データ	回　答
コンクリートのかぶり	小さい
コンクリート欠落部の配筋の状態	普通の状態

3.2 診断結果の検証

表-1～表-4 の入力データをもとに得られた診断結果を**表-5**に示す．ここで，耐荷性とは，橋梁の耐荷力の低下に対する抵抗性を示す指標であり，耐久性とは橋梁の材料の経年劣化に対する抵抗性を示す指標である．耐用性とは，耐荷性，耐久性の両面から見た橋梁の総合的な状態を示す指標である．表中の平均健全度は5段階評価を非ファジィ化したものであり，帰属度関数の重心値を0～100点で表示したものである．また，5段階評価のピーク位置には網掛けを施した．

各Subgoalごとに診断結果の検証を行った．「床版材料劣化」では，平均健全度が33.5と低い値を示しているが，これは遊離石灰の析出が床版のいたるところで見られ，また床版中の鉄筋腐食も起こっており，排水機能も備わってないことから考えるとほぼ妥当な値であると言える．「ハンチ沿いひび割れ」および「支承付近のひび割れ」は，if-thenルールによるとともにひび割れ状況と遊離石灰の入力項目に大きく影響を受けるようになっている．実橋では，ハンチ沿いおよび支承付近ともにひび割れが多く，遊離石灰もかなり析出していたことから，ほぼ妥当な結果であると言える．実橋による目視点検で，最大ひび割れ幅が3mmと，特に損傷が目立った「鉄筋腐食ひび割れ」は，平均健全度が25.1と大変低い値を示しており，目視点検から推測されるような低い結果となった．上位subgoalである「床版の全体的損傷」では，

表-5　「Y橋」の診断結果

	判定項目	danger	Slightly Danger	moderate	slightly safe	Safe	平均健全度
床版	床版設計	0.009	0.370	0.167	0.319	0.135	55.0
	床版施工	0.105	0.249	0.402	0.168	0.077	46.3
	路面状態	0.018	0.116	0.465	0.326	0.076	58.7
	床版供用状態	0.002	0.124	0.743	0.127	0.004	50.1
	床版材料劣化	0.164	0.467	0.161	0.200	0.008	35.5
	ハンチ沿いひび割れ	0.083	0.339	0.365	0.167	0.046	43.1
	支承付近のひび割れ	0.082	0.382	0.347	0.154	0.034	41.2
	床版中央のひび割れ	0.005	0.022	0.020	0.237	0.716	94.1
	床版の全体的損傷	0.159	0.295	0.162	0.199	0.186	49.0
	床版耐荷性	0.022	0.216	0.296	0.289	0.177	59.6
	床版耐久性	0.009	0.426	0.211	0.329	0.025	48.4
	床版耐用性	0.030	0.309	0.267	0.342	0.052	51.9
主桁	主桁設計	0.016	0.055	0.159	0.643	0.127	70.9
	主桁施工	0.071	0.191	0.436	0.207	0.095	51.4
	主桁供用状態	0.000	0.121	0.757	0.121	0.000	50.0
	主桁材料劣化	0.045	0.102	0.259	0.582	0.013	60.4
	主桁曲げひび割れ	0.095	0.510	0.317	0.072	0.006	33.5
	主桁せん断ひび割れ	0.005	0.029	0.018	0.233	0.715	94.1
	鉄筋の腐食ひび割れ	0.117	0.733	0.121	0.008	0.021	25.1
	主桁付着ひび割れ	0.007	0.042	0.007	0.229	0.715	94.1
	主桁の全体的損傷	0.258	0.160	0.029	0.174	0.379	56.4
	主桁耐荷性	0.027	0.158	0.315	0.306	0.194	62.1
	主桁耐久性	0.020	0.581	0.245	0.129	0.025	39.0
	主桁耐用性	0.036	0.385	0.294	0.240	0.044	46.8

danger～safe に属する程度がどれも 0.15 以上となり，また「主桁の全体的損傷」では，danger と safe の２つを大きく支持するという「あいまいさの爆発」がおこった結果を示した．床版および主桁の「耐荷性」，「耐久性」ではそれぞれ実橋の目視点検から推測されたように「耐荷性」よりも「耐久性」に対して低い結果を示した．

以上のようにほとんどの subgoal とも実橋の目視点検から推測されるような点検結果が得られ，本システムの推論結果の妥当性が確認できた．しかし，上位 subgoal である「床版の全体的損傷」，「主桁の全体的損傷」では，あいまいな診断結果を示した．

4．まとめ

本研究では，定量的データと定性的データの両方を扱うことができる推論機構を有する「橋梁診断エキスパートシステム」を既存橋梁に適用することにより，診断結果の有効性を検証した．

本研究で得られた成果を以下にまとめる．

①本システムによる診断結果は，ほとんどの subgoal とも実橋の目視点検から推測されるような点検結果が得られ，推論結果の妥当性が確認できた．

②上位 subgoal の一部では，複数のカテゴリーを支持するといった「あいまいさの爆発」がおこっており，今後検討の余地がある．

参考文献

1) 宮本文穂，串田守可，森川英典，木下和哉：コンクリート橋診断ニューロ・ファジィエキスパートシステムの開発と信頼性の向上，土木学会論文集，no.510／VI-26, pp.91-101,1995.3

［問合わせ先］

〒755　山口県宇部市常盤台 2557
山口大学工学部知能情報ｼｽﾃﾑ工学科
中村 秀明
TEL: 0836-35-9111 Ext.8528
FAX: 0836-35-9951
E-mail: nakamura@ec.csse.yamaguchi-u.ac.jp

THF3-1

定数係数を持ったファジィ論理関数の基本的性質（１）
― 未知，矛盾，不明 ―

Foundamental Properties of Fuzzy Switching Functions with Constants (1)
- Unknown, Contradiction and Undecidedness -

荒木智行* 巽 久行* 向殿政男** 荒川道康*
Tomoyuki ARAKI* Hisayuki TATSUMI* Masao MUKAIDONO** Michiyasu ARAKAWA*
*神奈川工科大学 情報工学科
*Kanagawa Institute of Technology
**明治大学 情報科学科
**Meiji University

Abstract When analizing knowledge using logic formulas of fuzzy switching functions with constants, interpretation of pairs of complementary literals appearing in complementary phrases and clauses, and treatment of plural ambiguities such as unknown, contradiction and undecidedness have never been standardized clearly until now in the field of Kleenean functions although it have been formalized in the field of fuzzy interval functions. Fuzzy interval functions, however, are not always suitable for being applied to practical problems. It is why so much datum are required to determine logic formulas of them because a truth value consists of a pair of two numerical truth values (interval truth value). In this paper, a new canonical form of fuzzy switching functions with constants, which does not contain any complementary phrases and clauses, are presented at first. And then a simple representation of logic fomulas including plural ambiguities such as unknown, contradiction and undecidedness is proposed as an application of the proposed canonical form to knowledge analysis.

１．はじめに

近年，論理式により，あいまいな，または不確実な知識を表現する試みが盛んに研究されている．その中でも定数係数を持ったファジィ論理関数[3]による知識表現は有効な手段として研究されてきた[1]．定数係数を持ったファジィ論理関数は，本質的には基数が有限で奇数である多値クリーネ論理関数と代数的構造が等しく，関数の定義域が完全指定，不完全指定，どちらの場合でもその基本となる基数は3^nを越えない有限値であることが明らかにされている[4]．

また一方，あいまいな，または不確実な知識には，未知，矛盾，決定不能などの複数のあいまいさ，または不確実さが混在している．これらを定式的に扱う論理の枠組みとしてファジィ・インターバル論理が提案されている[5]．しかしながらファジィ・インターバル論理では，扱う真理値が二つの数値真理値を組にした区間真理値を用いており，言語真理値的なデータを扱う場合には有用であるが，通常の数値真理値的なデータをファジィ・インターバル論理の論理式として表現する場合には，非常に多くのデータを必要とし，必ずしも実用的な問題への適用が容易とは言えない．

本研究では，通常の数値真理値を扱う論理関数の論理式によって，未知，矛盾，決定不能などの複数のあいまいさ，または不確実さが混在する知識を論理式として表現，解析するための簡明な論理式表現の提案を定数係数を持ったファジィ論理関数を用いて行う．

本報告では，最初に定数係数を持ったファジィ論理関数の新しい標準形として相補的な文字の組み合わせを含まない積項，和項によって一意的に定まる新しい標準形を導き出す．次に，あいまいさ，または不確実さである未知，矛盾，不明を含んだ場合の知識の簡明な論理式表現について考察し，先に提案した新しい標準形を用いた知識の表現について提案を行う．

２．定数係数を持ったファジィ論理関数

２．１ 基本定義

［定義１］**論理式**とは，以下のように定義されたものである．（１）定数$c_1,c_2,\cdots,c_\ell$，変数x_iは論理式である．（２）F，Gが論理式のとき，~F，F·G，F∨Gも論理式である．（３）（１），（２）を有限回適用して得られるもののみが論理式である □

［定義２］$V=[0,1]$，$A\subset V^n$とする．このとき，論理式で表現される$f:V^n\to V$なる写像fをn変数の**完全指定された定数係数を持ったファジィ論理関数**という．また，$g:A\to V$なる写像gをn変数の**不完全指定された定数係数を持ったファジィ論理関数**という．論理結合子は，$x_1,x_2\in[0,1]$のとき，$\sim x_1=1-x_1$，$x_1\cdot x_2=\min(x_1,x_2)$，$x_1\vee x_2=\max(x_1,x_2)$と解釈するものとする． □

以降，定数係数を持ったファジィ論理関数のことを**Fuzzy/C論理関数**と略記する．また真理値の集合を表す記号として$V=[0,1]$，$V_3=\{0,0.5,1\}$，$V_2=\{0,1\}$を用いる．

［例１］２変数（n＝２）のとき，

$f=\sim x_1x_2\vee 0.8\sim x_1\vee 0.3\sim x_1\sim x_2\vee x_1x_2\sim x_2$ および

$g=(\sim x_1\vee x_2)(0.3\vee\sim x_1\vee\sim x_2)(0.8\vee x_1\vee x_2)$
$\cdot(x_1\vee\sim x_1\vee\sim x_2)$

はFuzzy/C論理関数である． □

［定義３］fをFuzzy/C論理関数とする．fを表現する論理式に現れる定数が$c_1,c_2,\cdots,c_\ell$であるとき，$R_0(f)=\{0,0.5,1\}\cup\{c_1,c_2,\cdots,c_\ell\}\cup\{1-c_1,1-c_2,\cdots,1-c_\ell\}$をfの**基底集合**という． □

明らかに$R_0(f)$は奇数個の元からなる．

Fuzzy/C論理関数の論理式は，２値論理関数同様，加法形式および乗法形式で表現できる．

［定義４］積（和）項は以下の３種類に分類される：
（**タイプP1**（**タイプC1**））定数（>0.5（<0.5））を含み，$x_i\cdot\sim x_i$（$x_i\vee\sim x_i$）なる変数の組を含まないもの．
（**タイプP2**（**タイプC2**））定数（≤ 0.5（≥ 0.5））を含み，$x_i\cdot\sim x_i$（$x_i\vee\sim x_i$）なる変数の組を含まないもの．
（**タイプP3**（**タイプC3**））定数（≤ 0.5（≥ 0.5））を含

み，少なくとも一つの変数に関して $x_i \cdot \sim x_i$（$x_i \vee \sim x_i$）なる変数の組を含むもの．

タイプP1とタイプP2の積項を**定数付き単積項**（タイプC1とタイプC2の和項を**定数付き単和項**）といい，タイプP3の積項を**定数付き相補項**（タイプC3の和項を**定数付き相補和項**）という．また，タイプP2とタイプP3の積項（タイプC2とタイプC3の和項）は $x_i \cdot \sim x_i \le 0.5 \le x_j \vee \sim x_j$ であることから，すべての変数を含む積項の和（和項の積）に展開でき，それぞれ**定数付き最小項，定数付き相補最小項**（**定数付き最大項，定数付き相補最大項**）という．□

［定義５］Fuzzy/C論理関数がタイプP1の定数付き単積項（タイプC1の定数付き単和項）と，タイプP2の定数付き最小項（タイプC2の定数付き最大項），タイプP3の定数付き相補最小項（タイプC3の定数付き相補最大項）の和（積）で表現されているとき，**主加法標準形**（**主乗法標準形**）であるという．□

［例２］例１の f は主加法標準形であり，g は f を主乗法標準形で表現したものである．□

［定義６］（**あいまいさに関する半順序関係** $\prec$）$a,b \in V$ に対して $a \prec b$ または $b \succ a$ であるとは $0 \le a \le b \le 0.5$ または $0.5 \le b \le a \le 1$ のときをいう．また V^n の元 $A=(a_1,\cdots,a_n)$ $B=(b_1,\cdots,b_n)$ に対して $A \prec B$ または $B \succ A$ を $\forall i(a_i \prec b_i)$ と定義する．□

２．２　基本的性質

［定理１］[3]（あいまいさに関する単調性）

f をFuzzy/C論理関数とすると $A,B \in V^n$ に関して，$A \prec B$ ならば $f(A) \prec f(B)$ である．

［定理２］[4]Fuzzy/C論理関数 f の基底集合を $R_0(f)$ とする．このとき f は $|R_0(f)|$ 値の多値クリーネ論理関数と同じ論理式で表現できる．

［定理３］[4] f，g をFuzzy/C論理関数とする．このとき，$\forall A \in V^n(f(A)=g(A))$ と $\forall B \in V_3^n(f(B)=g(B))$ は同値である．

［定理４］[4]任意のFuzzy/C論理関数の論理式は主加（乗）法標準形で一意に表現できる．

定理２，定理３によりFuzzy/C論理関数の関数値に関する性質は，定義域を V_3^n に制限して考察して良いことが示された．以下では，V_3^n の部分集合においてFuzzy/C論理関数がどのような値を取り得るかについて，主加（乗）法標準形をもとに考察する．

［定義７］タイプP1（C1），タイプP2（C2），タイプP3（C3）の積項（和項）と V_3^n の元の間に以下のような対応づけをする．

$(a_1,\cdots,a_n) \in V_3^n$ とタイプP1（C1），タイプP2（C2）の定数付き単積項 $\alpha = c \cdot x_1^{a_1} \cdots x_n^{a_n}$（定数付き単和項 $\beta = c \vee x_1^{a_1} \vee \cdots \vee x_n^{a_n}$）を次のように対応づける．

$$x_i^{a_i} = \begin{cases} x_i & (\sim x_i) \quad \text{for } a_i = 1 \\ 1 & (0) \quad \text{for } a_i = 0.5 \\ \sim x_i & (x_i) \quad \text{for } a_i = 0 \end{cases}$$

また $(a_1,\cdots,a_n) \in V_3^n - V_2^n$ とタイプP3（C3）の定数付き相補最小項 $\alpha = c \cdot x_1^{a_1} \cdots x_n^{a_n}$（定数付き相補最大項 $\beta = c \vee x_1^{a_1} \vee \cdots \vee x_n^{a_n}$）を次のように対応づける．

$$x_i^{a_i} = \begin{cases} x_i & (\sim x_i) \quad \text{for } a_i = 1 \\ x_i \cdot \sim x_i & (x_i \vee \sim x_i) \quad \text{for } a_i = 0.5 \\ \sim x_i & (x_i) \quad \text{for } a_i = 0 \end{cases}$$

Fuzzy/C論理関数 f の基底集合が $R_0(f)=\{c_0,\cdots,c_K,c_{K+1},1-c_K,\cdots,1-c_0\}$（ただし $c_0=0$，$c_{K+1}=0.5$，$0 \le c_i < 0.5 (i=0,1,\cdots,K)$，$c_i < c_{i+1}$）であるとし，f の主加法標準形を以下のように表す．

$$f=(\alpha_1^{c_0} \vee \cdots \vee \alpha_a^{c_0}) \vee \cdots \vee (\alpha_1^{c_K} \vee \cdots \vee \alpha_b^{c_K}) \vee (\alpha_1^{c_{K+1}} \vee \cdots \vee \alpha_d^{c_{K+1}}) \vee (\alpha_1^{1-c_K} \vee \cdots \vee \alpha_e^{1-c_K}) \vee \cdots \vee (\alpha_1^{1-c_0} \vee \cdots \vee \alpha_h^{1-c_0})$$

ここで，$\alpha_j^{1-c_i}$ $(i=0,1,\cdots,K)$ は定数 $1-c_i$ を含む定数付き単積項を表し，$\alpha_j^{c_i}$ $(i=0,1,\cdots,K+1)$ は定数 c_i を含む定数付き最小項，または定数付き相補最小項を表している．同様に f の主乗法標準形を以下のように表す．

$$f=(\beta_1^{c_0} \cdots\cdots \beta_r^{c_0}) \cdots\cdots (\beta_1^{c_K} \cdots\cdots \beta_s^{c_K}) \cdot (\beta_1^{c_{K+1}} \cdots\cdots \beta_t^{c_{K+1}}) \cdot (\beta_1^{1-c_K} \cdots\cdots \beta_u^{1-c_K}) \cdots\cdots (\beta_1^{1-c_0} \cdots\cdots \beta_v^{1-c_0})$$

ここで，$\beta_j^{c_i}$ $(i=0,1,\cdots,K)$ は定数 c_i を含む定数付き単和項を表し $\beta_j^{1-c_K}$，$\beta_j^{1-c_i}$ $(i=0,1,\cdots,K)$ はそれぞれ定数 $1-c_K$，$1-c_i$ を含む定数付き最大項または定数付き相補最大項を表している．$y \in R_0(f)$ とし，$f(A)=y$ となる V_3^n の部分集合を $f^{-1}(y)$ とする．また定義７にしたがって積項（和項）から V_3^n の元を対応させる関数を T とする．このとき次の定理５を得る．

［定理５］

（１）$f^{-1}(1) = \bigcup_j \{A \in V_3^n \mid A \prec T(\alpha_j^{1-c_0})\}$．

（２）$f^{-1}(0) = \bigcup_j \{A \in V_3^n \mid A \prec T(\beta_j^{c_0})\}$．

（３）$i=1,2,\cdots,K$ に対して

$$f^{-1}(c_i) = \left(\bigcup_j \{A \in V_3^n \mid A \succ T(\alpha_j^{c_i})\}\right) \cap \left(\bigcup_j \{A \in V_3^n \mid A \prec T(\beta_j^{c_i})\}\right).$$

（４）$i=1,2,\cdots,K$ に対して，

$$f^{-1}(1-c_i) = \left(\bigcup_j \{A \in V_3^n \mid A \prec T(\alpha_j^{1-c_i})\}\right) \cap \left(\bigcup_j \{A \in V_3^n \mid A \succ T(\beta_j^{1-c_i})\}\right).$$

（５）
$$f^{-1}(0.5) = \left(\bigcup_j \{A \in V_3^n \mid A \succ T(\alpha_j^{c_{K+1}})\}\right) \cup \left(\bigcup_j \{A \in V_3^n \mid A \succ T(\beta_j^{c_{K+1}})\}\right) \cup \left(\{A \in V_3^n \mid \forall B \in \bigcup_{i=0}^{K} f^{-1}(c_i), B \prec A\} \cap \{A \in V_3^n \mid \forall B \in \bigcup_{i=0}^{K} f^{-1}(1-c_i), B \prec A\}\right).$$

（証明略）

定理５により f の主加法標準形および主乗法標準形に現れる積項，和項に対応する V_3^n の元は，半順序集合 $<V_3^n, \prec>$ における部分集合 $f^{-1}(y)$ の極大元または極小元となることが示された．ここで得られた部分集合は明らか

に V_3^n を直和分割しいる．

$$f^{-1}(1)\cup f^{-1}(0)\cup f^{-1}(0.5)\cup\left(\bigcup_i f^{-1}(c_i)\right)\cup\left(\bigcup_i f^{-1}(1-c_i)\right)=V_3^n$$

［定理６］変数の数が有限個であるFuzzy/C論理関数において論理式に現れる定数は 3^n 個を越えない有限個である．

（証明）定数 c_i は実閉区間[0, 0.5]の任意の値であるから，無限個の値を取り得る．したがって，集合 $f^{-1}(c_i)$ および $f^{-1}(1-c_i)$ は無限に作れる．しかしながら，それらの和集合が有限個（3^n 個）の元からなる V_3^n に一致する．このことから，$f^{-1}(c_i)$ および $f^{-1}(1-c_i)$ は無限に存在するが，空集合でないものは有限個である．　（証明終）

定理６の結果は，完全指定されたFuzzy/C論理関数の場合である．不完全指定されたFuzzy/C論理関数の場合には，

$$f^{-1}(1)\cup f^{-1}(0)\cup f^{-1}(0.5)\cup\left(\bigcup_i f^{-1}(c_i)\right)\cup\left(\bigcup_i f^{-1}(1-c_i)\right)=A$$

であり，$A\subset V_3^n$ である．したがって定義域Aに含まれる元の数も 3^n より少く，Fuzzy/C論理関数の論理式によるあいまい，または不確実な知識の表現を考察する際には，定義域はVに含まれる無限個の実数を対象にしなくても最大 3^n 個の実数で良いことを示している．また知識の表現能力は，定理２，定理６から，基数が 3^n である多値クリーネ論理関数のとき表現能力が最大となることも示している．

以上のことからFuzzy/C論理関数の表現の問題は，真理値の濃度が 3^n であり，基数が 3^n である多値クリーネ論理関数の問題として考えれば十分であることが言える．

ここで多値クリーネ論理関数の数（表現能力）についても考察をする．多値クリーネ論理関数は，その基数が奇数の場合と偶数の場合に分けられて，その表現能力の考察がなされており，いずれの場合も，基数が大きくなると，その表現能力は増加することが知られている[6]．しかしながら定理６は，多値クリーネ論理関数にも当てはまる．以下では，多値クリーネ関数の基数をmとする（簡単のためmは奇数であるとする．偶数の場合も同様な議論ができる）．$m>3^n$ の場合には，論理式を構成する際，必ずしも必要でない定数が存在する．論理式に現れることのできる定数の数は，定理６より 3^n 個を越えることはないからである．この場合，論理式を構成するために十分な定数は 3^n 個であり，その選び方は ${}_{\lfloor m/2\rfloor}C_{\lfloor 3^n/2\rfloor}$ 通りである（$\lfloor x\rfloor$ はxを越えない最大の定数を表す）．これらの事実から，多値クリーネ論理関数の表現能力の限界について考察が可能となる（詳細略）．

３．定数付き単積項，定数付き単和項による標準形

本節では，定数付き単積項と定数付き単和項によって構成されるＦｕｚｚｙ／Ｃ論理関数の新しい標準形について述べる．

Ｆｕｚｚｙ／Ｃ論理関数ｆの基底集合を $R_0(f)=\{c_0,c_1,\cdots,c_K,c_{K+1},1-c_K,\cdots,1-c_0\}$（ただし $c_0=0$，$c_{K+1}=0.5$，$c_i<c_{i+1}$）とする．ｆの主加法標準形（主乗法標準形）を以下のように表す．

$f=F_{P1}\vee F_{P2}\vee F_{P3}$　　（$f=F_{C1}\cdot F_{C2}\cdot F_{C3}$）

ただし，F_{P1}，F_{P2}，F_{P3}（F_{C1}，F_{C2}，F_{C3}）はそれぞれタイプP1の定数付き単積項，タイプP2の定数付き最小項の和，タイプP3の定数付き相補最小項の和（タイプC1の定数付き単和項の積，タイプC2の定数付き最大項の和，タイプC3の定数付き相補最大項の積）を表す．また，定数 $1-c_i$ のみを含むタイプP1の定数付き単積項の和を $F_{P1}^{(1-c_i)}$（定数 c_i のみを含むタイプC1の定数付き単和項の積を $F_{C1}^{c_i}$）で表す．

［補題１］ $\exists i,\exists j(\,(\forall A\in f^{-1}(c_i),(\forall B\in f^{-1}(1-c_j))\,)$ に対して $A\Delta B=\phi$．ただし，$A\Delta B$ は，あいまいさに関する半順序関係 $\prec$ に関する下限を表す．　（証明略）

［定理７］ｆをFuzzy/C論理関数とする．このとき次の二つの式が成立する．

（１） $f=F_{P1}\vee 0.5\cdot F_{C1}$

（２） $f=F_{C1}\cdot(0.5\vee F_{P1})$

（証明）Fuzzy/C論理関数ｆにおいてｆの値が $c_{K+1}(=0.5)$ より小さくなる V_3^n の部分集合は $f^{-1}(c_0)$，$f^{-1}(c_1)$，…，$f^{-1}(c_K)$ である．定理５から，これらの部分集合はｆの主乗法標準形に現れるタイプC1の定数付き単和項に対応する V_3^n の元を極大元としており $f^{-1}(c_0)$，$f^{-1}(c_1)$，…，$f^{-1}(c_K)$ において関数値が c_0，c_1，…，c_K となる関数の一つに $F_{C1}=F_{C1}^{c_0}\cdot F_{C1}^{c_1}\cdots\cdot F_{C1}^{c_K}$ がある．同様にして $f^{-1}(1-c_0)$，$f^{-1}(1-c_1)$，…，$f^{-1}(1-c_K)$ において，関数値が $1-c_0$，$1-c_1$，…，$1-c_K$ となる関数の一つに $F_{P1}=F_{P1}^{(1-c_0)}\vee F_{P1}^{(1-c_1)}\vee\cdots\vee F_{P1}^{(1-c_K)}$ がある．補題１より $\forall A\in f^{-1}(c_0)\cup f^{-1}(c_1)\cup\cdots\cup f^{-1}(c_K)$，$\forall B\in f^{-1}(1-c_0)\cup f^{-1}(1-c_1)\cup\cdots\cup f^{-1}(1-c_K)$ に対して $A\Delta B=\phi$ であることから $F_{P1}(A)=(F_{P1}^{(1-c_0)}\vee F_{P1}^{(1-c_1)}\vee\cdots\vee F_{P1}^{(1-c_K)})(A)=0$ であり，$F_{C1}(B)=(F_{C1}^{c_0}\cdot F_{C1}^{c_1}\cdots\cdot F_{C1}^{c_K})(B)=1$ である．また $f^{-1}(c_{K+1})$ においてはｆの値は0.5でなくてはならない．以上のことから $f=F_{P1}\vee 0.5\cdot F_{C1}$ である．$f=F_{C1}\cdot(0.5\vee F_{P1})$ も同様に証明できる．　（証明終）

定理７で示される論理式の形式は一意に定まる表現であることから，主加法標準形，主乗法標準形と同様にFuzzy/C論理関数の標準形として採用することができる．

［例３］例１のｆは，例２の結果と併せて定理７から

$f=\sim x_1x_2\vee 0.8\sim x_1\vee 0.5\cdot(\sim x_1\vee x_2)(0.3\vee\sim x_1\vee\sim x_2)$

と表現できる．　□

定理７は多値クリーネ論理関数においても成立する．更に基数が偶数である多値クリーネ論理関数に関しては，次の系１が成立する．

［系１］ｆを基数が４値以上の偶数である多値クリーネ論理関数であるとする．またｔを真理値のうちで，0.5より大きい最小の真理値，または0.5より小さい最大の真理値とする．そのとき次の二つの式が成立する．

（１） $f=F_{P1}\vee t\cdot F_{C1}$

（２） $f=F_{C1}\cdot(t\vee F_{P1})$　　（証明略）

タイプP1の定数付き単積項は主項であり，タイプC1の定数付き単和項は主外項である．またこれら以外にタイプP1の主項，タイプC1の主外項は存在しない（詳細略）．このことから定理７は，タイプP1の主項の和（F_{P1}）とタイプC1の主外項の積（F_{C1}）によりFuzzy/C論理関数は一意に表現できることを示している．Fuzzy/C論理関数は $R_0(f)$ が決定されれば，その論理式表現は $|R_0(f)|$ 値の多値クリーネ論理関数として取り扱うことができること，およびそのときの $R_0(f)$ の濃度について２節で述べた．多値クリーネ関数においてＰ形と呼ばれる関数のクラスがある[2]．F_{P1} および F_{C1} は，おのおの独立した関数として見なすと，それは明らかにＰ形である．し

たがって系1の結果もあわせるとFuzzy/C論理関数および多値クリーネ論理関数は，二つのP型の論理関数の組み合わせにより一意的に表現できることがわかる．

4．あいまいさを考慮した簡明表現

4．1　あいまいさの構造

本項では，未知，矛盾，不明がどのような論理式に対応するか，またそれらはどのような関係の構造をしているかについて言語的な解釈から考察する．

未知（unknown）とは，ある命題Aについて，その命題の真偽を判定するためには**情報不足**である状態と考えられる．即ち，その命題の真理値を表す論理変数をx_Aとすると，x_Aまたは$\sim x_A$が成立するであろう状態である．これに対応する論理式表現は$x_A \vee \sim x_A$となる．

矛盾（contradiction）とは，ある命題Aについて，その命題の真偽を判定するためには**情報過多**である状態と考えられる．即ち，x_Aも$\sim x_A$もどちらも真であると判断できるであろう状態であり，対応する論理式表現は$x_A \cdot \sim x_A$と考えられる．

不明（undecidedness）とは，その命題の真偽を**判断する材料がなく，真とも偽とも言えない，真偽の中間の状態**であると考えられる．これに対応するのは真理値の集合V=[0,1]の中間の定数0.5が論理式として対応すると考えられる．

未知，矛盾，不明がどのような関係の構造をしているかを示すために定数として0，0.5，1を持つ1変数のFuzzy/C論理関数の束構造を図1に示す．

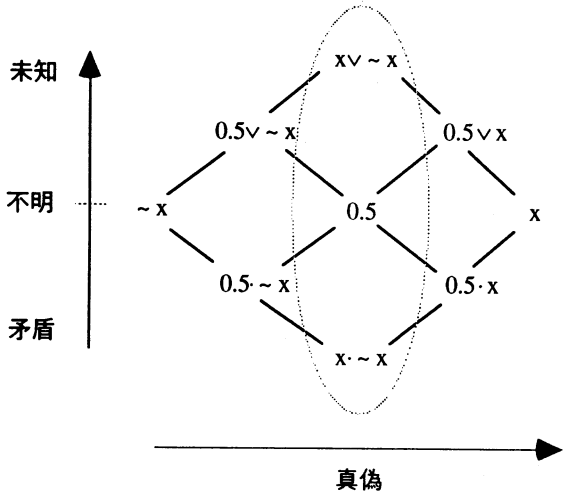


図1　1変数関数と未知，矛盾，不明

図1からもわかるように，未知，矛盾，不明に対応する論理式は，横軸の真偽の尺度に関して，いずれもちょうど中間に位置しているが，縦軸のあいまいさ，または不確実さの尺度に関しては，未知と矛盾は正反対に位置し，不明は，その中間にある．

4．2　新しい標準形のあいまいさにを考慮した簡明表現への適用

4．1項での考察により，未知，矛盾，不明を表現する論理式の特徴が明らかにされた．しかしながら，4．1項での考察は，論理式の言語的な解釈であり，これらが論理式表現，例えば，加法形式，乗法形式等の表現形式とどのような関連があるかは，現在のところ明らかにされていない．したがって，これらの言語的な特徴を論理式で表現された知識において解釈することは容易でない．本項では，以下のような前提に立って知識の論理式表現について考察する．

（1）積項または和項を知識表現の単位とする．
（2）未知，矛盾を表す論理式表現$x \vee \sim x$，$x \cdot \sim x$を積項，和項にできる限り含まない論理式で知識を表現する．
（3）表された論理式は，できるだけ簡明な表現とする．

これらの要請を満たす論理式表現として，2節の定理7（1）式または（2）式のFuzzy/C論理関数の新しい標準形を用いることが考えられる．これらは，任意のFuzzy/C論理関数に関して一意的に求められる標準形であり，F_{P1}，F_{C1}は$x \cdot \sim x$，$x \vee \sim x$のような変数の組を含まず，またF_{P1}，F_{C1}はともに，それぞれ独立したFuzzy/C論理関数として見なすとP形，即ち，情報損失が最も少ない論理式表現であるからである．またP形のFuzzy/C論理関数は，主項展開の表現と一致し（詳細略），各積（和）項に含まれる文字の数が少ない簡明な表現となっている．

5．　むすび

本報告では，Fuzzy/C論理関数の新しい標準形を提案し，その論理式表現が，複数のあいまいさ，または不確実さが含まれる状況での簡明なで，かつ，情報損失の最も少ない知識表現法の1つであることを明らかにした．

今後の課題としては，論理式の持つ言語的な解釈と，あいまいさの取り扱いについて，統一的に扱える理論的な枠組みを強化する必要がある．

参考文献

[1] Kikuchi, H., Takagi, N., Nakanishi, S. and Mukaidono, M., Uniquness of Partially Specified Multiple-valued Kleenean Function, Proc. 25th ISMVL, pp.242-247, 1995.
[2] 高木,向殿, 多値クリーネ論理関数の論理式表現, 信学論(D-I), J75-D-I, 2, pp. 69-75, 1992.
[3] 荒木, 巽, 向殿, 大前, 定数係数を持ったファジィ論理関数について,第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.437-476, 1993.
[4] 荒木, 荒川, 巽, 向殿, 山本, 定数係数を持ったファジィ論理関数に基づく知識表現の定義域の考察, 1997年電子情報通信学会総合大会, SD-3-6, 1997-3.
[5] 向殿, 菊池, ファジィ・インターバル論理の提案, 日本ファジィ学会誌, Vol. 2, No.2, pp. 97-110, 1990.
[6] 畑,湯原,宮脇,大和,多値クリーネ論理関数の数とそれに関する基本的性質,信学論(D-I), J75-D-I, 1 pp. 1-9, 1992.

神奈川工科大学　工学部　情報工学科
荒木智行
243-02 神奈川県厚木市下荻野１０３０
Tel: 0462-41-1211 (ext. 3569)　Fax: 0462-42-8490
E-mail: araki@ic.kanagawa-it.ac.jp

THF3-2

定数係数を持ったファジィ論理関数の基本的性質（２）
― 表現能力の限界について ―

Foundamental Properties of Fuzzy Switching Functions with Constants (2)

- On the Bound of capability for Representation -

巽　久行*　荒木智行*　向殿政男**
Hisayuki TATSUMI*　Tomoyuki ARAKI*　Masao MUKAIDONO**
*神奈川工科大学　情報工学科　**明治大学　情報科学科
*Kanagawa Institute of Technology　**Meiji University

Abstract This paper describes an estimation on the size of n-variable fuzzy switching functions with constants ("fuzzy/c" for short). The whole set of fuzzy/c switching functions is divided into equivalence classes called c_r – *equivalent*. Estimating each equivalence class can be reduced to enumerating disjunctive forms of a binary switching function, which can be solved by enumerating anti-chains of the partially ordered set composed of simple phrases. Based on the enumerating properties and an improved method for estimating anti-chains, we can get upper and lower bounds on the number of n-variable fuzzy/c switching functions.

１．はじめに

あいまいさを取り扱うのに適した論理関数として，定数係数を持ったファジィ論理関数（以下Fuzzy/C論理関数と呼ぶ）が提案されている[1]。ある論理関数の数の限界を求めることは，その関数の表現能力を知る上で重要な問題となる。本報告はFuzzy/C論理関数の基本的性質[2]，特に一意に表現できる標準形[3]をもとに，数の上界及び下界を考察した。限界式を導出する上で採用した方法は，最初にFuzzy/C論理関数全体の集合を，c_r - equivalentと呼ばれる同値類に分割する。次に各同値類に含まれるFuzzy/C論理関数の数を求める問題を，２値論理関数を表現する加法形式の数を求める問題[4]に帰着させる。この問題は，加法形式の積項がつくる半順序集合の，反鎖と呼ばれる部分集合を数え上げることで解決される[4]。最後に求められた加法形式の積項と，Fuzzy/C論理関数の基底集合と呼ばれる定数係数の集合[2, 3]との対応を求めて，生成可能な定数係数付き加法形式の数を推測することで，n変数Fuzzy/C論理関数の数の限界式を算出している。

２．基本的性質

変数 $x_i\ (1 \le i \le n)$ と定数 $c_k\ (1 \le k \le \ell)$，および論理演算 AND(•), OR(∨), NOT(~) との有限回の結合により構成される式を論理式という。

[定義１] 変数 x_i および定数 c_k が閉区間 [0,1] の値をとり，論理演算 •, ∨, ~ をそれぞれ，

$x_i \bullet x_j = \min(x_i, x_j)$, $x_i \vee x_j = \max(x_i, x_j)$, $\sim x_i = 1 - x_i$

と定義すると，論理式は定数係数を持ったn変数ファジィ論理関数（以下，論文中ではFuzzy/C論理関数と呼ぶ）と呼ばれる $[0,1]^n$ から [0,1] への関数を表現する。

特に，定数 c_k が $\{0,1\}$ のみからなるときが通常よく知られるn変数ファジィ論理関数に，変数 x_i および定数 c_k が $\{0,1/(m-1),2/(m-1),\cdots,(m-2)/(m-1),1\}$ の値をとるときをm値のn変数多値クリーネ論理関数と呼ぶ。 □

以降，n変数Fuzzy/C論理関数の集合を **FC**，n変数ファジィ論理関数の集合を **F**，m値のn変数多値クリーネ論理関数の集合を $\mathbf{K}_m$ と記すことにする。当然ながら，$\mathbf{F} \subset \mathbf{FC}$，$\mathbf{K}_m \subset \mathbf{FC}$である。

集合 $\{0,1/2,1\}$ およびこの集合のn個の直積 $\{0,1/2,1\}^n$ （以下これを Vと記す）の間に，次のような半順序関係 $\prec$ を定義する。

[定義２] a, b を $\{0,1/2,1\}$ の元とするとき，

$a \prec b \Leftrightarrow a \le b \le 1/2$ または $1/2 \le b \le a$。

$\mathbf{a} = (a_1, \cdots, a_n)$, $\mathbf{b} = (b_1, \cdots, b_n)$ をVの元とするとき，

$\mathbf{a} \prec \mathbf{b} \Leftrightarrow \forall i\ ;\ a_i \prec b_i$。 □

Fuzzy/C論理関数 $F(\in \mathbf{FC})$ は，この半順序関係 $\prec$ に関して単調性を満たす論理関数であり，次の定理が成り立つ。

[定理１][2] $\mathbf{a} \prec \mathbf{b} \Rightarrow F(\mathbf{a}) \prec F(\mathbf{b})$ (証明略)□

変数 x_i またはその否定 $\sim x_i$ を文字といい，幾つかの重複しない文字を AND(OR)で結合したものを積項（和項）という。特に，定数 c_k と積項（和項）とを AND(OR)で結合したものを定数付き積項（定数付き和項）という。積項（和項）のうち，ある変数について肯定 x_i，否定 $\sim x_i$ とが同時に存在しないような幾つかの文字の AND(OR)を単積項（単和項）という。特に，定数 c_k と単積項（単和項）とを AND(OR)で結合したものを定数付き単積項（定数付き単和項）という。便宜上，変数が１つも存在しないものも，１つの単積項（これを１と記す），１つの単和項（これを０と記す）とする。ここで，Vと単積項（単和項）との間に，次のような対応を定義する。

[定義３] $\mathbf{a} = (a_1, \cdots, a_n)$ をVの元とする。このとき，$\mathbf{a}$ と単積項 $\alpha = x_1^{a_1} \bullet \cdots \bullet x_n^{a_n}$ （単和項 $\beta = x_1^{a_1} \vee \cdots \vee x_n^{a_n}$ ）とは，次のとき互いに対応しているという。

$$a_i = \begin{cases} 1 \\ 1/2 \\ 0 \end{cases} \Leftrightarrow x_i^{a_i} = \begin{cases} x_i\ (\sim x_i) \\ 1 \\ \sim x_i\ (x_i) \end{cases}$$

また，$\mathbf{a}$ と定数付き単積項 $\alpha = c_k \bullet x_1^{a_1} \bullet \cdots \bullet x_n^{a_n}$ （定数付き単和項 $\beta = c_k \vee x_1^{a_1} \vee \cdots \vee x_n^{a_n}$ ）との対応も，定数以外については上記の通りで，定数 c_k を明示したいときには対応するVの元を $\mathbf{a}^{(c_k)}$ と記し，これを $\mathrm{V}^{(c_k)}$ の元と呼ぶことにする。特に定数１の場合，$\mathbf{a}^{(1)}$ および $\mathrm{V}^{(1)}$ はそれぞれ，$\mathbf{a}$ およびVに等しい。 □

なお，積項同志の包含関係 $\subset$ については，$\gamma_i, \gamma_j (i \ne j)$ を２つの積項（和項）とするとき，

$\gamma_i \subset \gamma_j \Leftrightarrow$ γ_j の文字はすべて γ_i に現れる
（γ_i の文字はすべて γ_j に現れる）

で積項（和項）同志の包含関係 $\subset$ が定義される。更に，$c_i, c_j (i \neq j)$ を定数とした2つの定数付き積項（和項）を $\delta_i (= c_i \cdot \gamma_i), \delta_j (= c_j \cdot \gamma_j)$ （$\delta_i (= c_i \vee \gamma_i), \delta_j (= c_j \vee \gamma_j)$）（但し $i \neq j$）とするとき，

$$\delta_i \subset \delta_j \quad \Leftrightarrow \quad c_i \leq c_j \quad \text{かつ} \quad \gamma_i \subset \gamma_j$$

で定数付き積項（和項）同志の包含関係 $\subset$ が定義される。

[定義 4] Fuzzy/C論理関数 $F(\in \mathbf{FC})$ を表現している論理式に現れる定数が c_k $(1 \leq k \leq \ell)$ であるとき，

$R_0(F) = \{0, 1/2, 1\} \cup \{c_1, c_2, \cdots, c_\ell\} \cup \{1-c_1, 1-c_2, \cdots, 1-c_\ell\}$

なる集合 $R_0(F)$ を，F の基底集合と呼ぶ。 □

以下便宜上，基底集合を

$R_0(F) = \{c_0, c_1, c_2, \cdots, c_\ell, c_{\ell+1}, \bar{c}_\ell, \cdots, \bar{c}_2, \bar{c}_1, \bar{c}_0\}$ （但し，$c_0 = 0$, $c_{\ell+1} = 1/2$, $0 \leq c_i < 1/2$ $(i = 0, 1, \cdots, \ell)$, $c_i < c_{i+1}$ とし，$1 - c_i$ $(i = 0, 1, \cdots, \ell)$ を $\bar{c}_i$ とおく。これより $\bar{c}_0 = 1$, $1 \geq \bar{c}_i > 1/2$ $(i = 0, 1, \cdots, \ell)$, $\bar{c}_i > \bar{c}_{i+1}$。）とする。基底集合の元 $c_r (\in R_0(F))$ が，$c_r > 1/2$ となる部分集合は $\{\bar{c}_\ell, \cdots, \bar{c}_1, \bar{c}_0\}$（これを基底上半集合と呼ぶ）であり，$c_r < 1/2$ となる部分集合は $\{c_0, c_1, \cdots, c_\ell\}$（これを基底下半集合と呼ぶ）であり，どちらも $(|R_0(F)| - 1)/2$ 個（これを p とする）である。

定義4より，基底集合は明らかに奇数個の元からなる。ここで，基底集合に関して次の定理が成り立つ。

[定理 2][2] 任意の n 変数Fuzzy/C論理関数 $F(\in \mathbf{FC})$ の基底集合を $R_0(F)$ とすると，F は $|R_0(F)|$ 値の n 変数多値クリーネ論理関数と同じ論理式で表現できる。 (証明略)□

定理2より，$|R_0(F)|$ 値の n 変数多値クリーネ論理関数の集合の数 $|\mathbf{K}_{|R_0(F)|}|$ は，n 変数Fuzzy/C論理関数の集合の数 $|\mathbf{FC}|$ に等しい。

また，関数の定義域に関して次の定理が成り立つ。

[定理 3][2] 任意の n 変数Fuzzy/C論理関数を $F, G(\in \mathbf{FC})$ とする。このとき $\forall \mathbf{a} (\in [0,1]^n)$ なる元に対する $F(\mathbf{a}) = G(\mathbf{a})$ と，$\forall \mathbf{b} (\in \{0, 1/2, 1\}^n)$ なる元に対する $F(\mathbf{b}) = G(\mathbf{b})$ とは，互いに同値である。 (証明略)□

定理3より，任意の n 変数Fuzzy/C論理関数は有限個の入力 $\{0, 1/2, 1\}^n$ で決定されてしまうので，その論理式に現れる定数は有限個である。これに関しては，著者らにより次の定理が証明された。

[定理 4][2] 任意の n 変数Fuzzy/C論理関数 $F(\in \mathbf{FC})$ において，その論理式に現れる定数係数集合は基底集合 $R_0(F)$ に等しく，その濃度(個数)は 3^n 個を越えない。(証明略)□

以降，Fuzzy/C論理関数の定義域は V $(= \{0, 1/2, 1\}^n)$，また論理関数に現れる定数係数集合は $R_0(F)$（ここで，$|R_0(F)| \leq 3^n$）として考察する。

任意の n 変数Fuzzy/C論理関数 $F(\in \mathbf{FC})$ に対して，基底集合 $R_0(F)$ の元 c_r に写像される定義域 V の元の集合を $F^{-1}(c_r)$ $\left(\subset \mathrm{V}^{(c_r)}\right)$ で表し，これを $c_r - set$ と呼ぶことにする。特に，$F^{-1}(1/2)$ を $1/2 - set$ と呼ぶ。当然ながら，$\bigcup_{c_r} F^{-1}(c_r) = \mathrm{V}$ である。

定理1より，F は半順序関係 $\prec$ に関して単調性を満たしているから，$\mathbf{a}$ を V の元とすると，

(1) $\mathbf{a} \in F^{-1}(c_r)$（但し，$c_r \neq 1/2$）ならば，$\mathbf{a}' \prec \mathbf{a}$ なるすべての元 $\mathbf{a}'$ に対して，$\mathbf{a}' \in F^{-1}(c_r)$

(2) $\mathbf{a} \in F^{-1}(1/2)$ ならば，$\mathbf{a} \prec \mathbf{a}'$ なるすべての元 $\mathbf{a}'$ に対して，$\mathbf{a}' \in F^{-1}(1/2)$

が成り立つ。即ち，$c_r - set$ は，半順序関係 $\prec$ に関して半順序集合を成しており，$c_r - set$（但し，$c_r \neq 1/2$）はその極大元により，$1/2 - set$ はその極小元により一意的に定まる。ここで，n 変数Fuzzy/C論理関数の標準形として，次の定理が成り立つ。

[定理 5][3] 任意の n 変数Fuzzy/C論理関数 $F(\in \mathbf{FC})$ は，

$$F = F_{P1} \vee (1/2) \cdot F_{C1}$$

なる論理式で（項の順番を無視して）一意に表現できる。ここで，F_{P1} は $c_r > 1/2$（即ち基底上半集合）となる各 $c_r - set$ のすべての極大元に対応する定数付き単積項の和，F_{C1} は $c_r < 1/2$（即ち基底下半集合）となる各 $c_r - set$ のすべての極大元に対応する定数付き単和項の積である。但し，F の $c_r > 1/2$ なる $c_r - set$ が1つも存在しない場合は $F_{P1} = 0$，F の $c_r < 1/2$ なる $c_r - set$ が1つも存在しない場合は $F_{C1} = 1$ とする。 (証明略)□

定理5で述べたものとは異なる標準形として，次の定理が成り立つ。

[定理 6][2] 任意の n 変数Fuzzy/C論理関数 $F(\in \mathbf{FC})$ は，主加法標準形 $F = \gamma_1 \vee \cdots \vee \gamma_s$（但し，$\gamma_i \not\subset \gamma_j$ $(i \neq j)$）により，積項の順番を無視して一意に表現できる。ここで各積項 γ_i は，定数 c_k が $c_k > 1/2$ なる定数付き単積項，定数 c_k が $c_k \leq 1/2$ なる定数付き最小項，定数 c_k が $c_k \leq 1/2$ なる定数付き相補最小項の，3種類の中のいずれかである。 (証明略)□

3．数え上げに関する諸性質

前章で述べたように，任意のFuzzy/C論理関数は主加法標準形で一意に表現できる。n 変数の場合，定数 c_k が $c_k > 1/2$ なる定数付き単積項，定数 c_k が $c_k \leq 1/2$ なる定数付き最小項，定数 c_k が $c_k \leq 1/2$ なる定数付き相補最小項の数の和は，多くとも

$3^n \cdot \left(3^n + 2^n + (3^n - 2^n)\right) = 2 \cdot 3^{2n}$ 個である。よって，n 変数Fuzzy/C論理関数の数は，多くとも $2^{2 \cdot 3^{2n}}$ 個であるが，実際には項同志の包含関係に基づく省略算が行えるので，この数よりもかなり少ない。

任意の n 変数Fuzzy/C論理関数 $F(\in \mathbf{FC})$ において，F の入力を B^n の元（但し $\mathrm{B} = \{0, 1\}$）に限ったとき，その $c_r - set$（但し $c_r \in R_0(F)$）は B^n の部分集合となり，F に対して一意的に定まる。但し，同じ B^n の $c_r - set$ を持つ n 変数Fuzzy/C論理関数は，一般に数多く存在する。

[定義 5] 2値論理関数 f が単積項 α_i の和

$$f = \bigvee_i \alpha_i \quad \text{（但し，} \alpha_i \not\subset \alpha_j,\ i \neq j\text{）}$$

で表現されているとき，f は加法形式で表現されているという。f を表現する加法形式において，単積項が定数付き単積項 $c_i \cdot \alpha_i$（但し $c_i > 1/2$）の和

$$F = \bigvee_i c_i \cdot \alpha_i \quad \text{（但し，} c_i \cdot \alpha_i \not\subset c_j \cdot \alpha_j,\ i \neq j\text{）}$$

で表現されているとき，論理関数 F は定数付き加法形式で表現されているという。定理5の F_{P1} は，ある論理関数 F を表現する定数付き加法形式の1つである。

同様に，2値論理関数 f が単和項 β_i の積

$$f = \bullet_i \beta_i \quad \text{（但し，} \beta_i \not\subset \beta_j,\ i \neq j\text{）}$$

で表現されているとき，f は乗法形式で表現されているという。f を表現する乗法形式において，単和項が定数

付き単和項 $c_i \vee \beta_i$（但し $c_i < 1/2$）の積

$$F = \bullet_i (c_i \vee \beta_i) \quad （但し，\ c_i \vee \beta_i \not\propto c_j \vee \beta_j,\ i \neq j）$$

で表現されているとき，論理関数 F は定数付き乗法形式で表現されているという。定理5の F_{C1} は，ある論理関数 F を表現する定数付き乗法形式の1つである。 □

ここで F の B^n 上の $c_r - set$ に関して，次の定理が成り立つ。

[定理7] n 変数Fuzzy/C論理関数 F が，定理5の標準形 $F = F_{P1} \vee (1/2) \cdot F_{C1}$ で与えられているとき，F_{P1} は B^n 上では F の $c_r > 1/2$ なる $c_r - set$ で c_r，他では0を取るような定数付き加法形式，F_{C1} は B^n 上では F の $c_r < 1/2$ なる $c_r - set$ で c_r，他では1を取るような定数付き乗法形式である。 (証明略)□

この定理の逆も成立する。

[定理8] n 変数Fuzzy/C論理関数 F の，B^n 上の $c_r - set$ を考える。B^n 上において，$c_r > 1/2$ なる $c_r - set$ で c_r，他では0を取るある定数付き加法形式を F'_{P1}，同じく B^n 上において，$c_r < 1/2$ なる $c_r - set$ で c_r，他では1を取るある定数付き乗法形式を F'_{C1} とすると，

$$F' = F'_{P1} \vee (1/2) \cdot F'_{C1}$$

は，F と同じ B^n 上の $c_r - set$ を持つ n 変数Fuzzy/C論理関数である。 (証明略)□

以下便宜上，n 変数 a 値入力 b 値出力論理関数を，n 変数 (a, b) 論理関数と記す。

[定義6] n 変数Fuzzy/C論理関数 F の，B^n 上の $c_r - set$（但し $c_r \in R_0(F)$）と同じ値を取る n 変数 $(2, |R_0(F)|)$ 論理関数を F_{c_r}（ここで $F_{c_r} : 2^n \to |R_0(F)|$）とする。このとき，$n$ 変数Fuzzy/C論理関数 F と n 変数 $(2, |R_0(F)|)$ 論理関数 F_{c_r} とは，互いに c_r - equivalent であるという。□

一般に，F_{c_r} に c_r - equivalent な n 変数Fuzzy/C論理関数は有限であるが数多く存在する。n 変数 $(2, |R_0(F)|)$ 論理関数 F_{c_r} において，B^n 上の $c_r > 1/2$ なる $c_r - set$ で c_r，他では0を取る n 変数 $(2, p+1)$ 論理関数を F_p，同様に B^n 上の $c_r < 1/2$ なる $c_r - set$ で c_r，他では1を取る n 変数 $(2, p+1)$ 論理関数を F_c とする。ここで F_p のすべての定数付き加法形式の集合を $DF_{(c_r)}(F_p)$ と記し，その数を $|DF_{(c_r)}(F_p)|$ とする。また F_c のすべての定数付き乗法形式の集合を $CF_{(c_r)}(F_c)$ と記し，その数を $|CF_{(c_r)}(F_c)|$ とする。n 変数 $(2, |R_0(F)|)$ 論理関数 F_{c_r} に c_r - equivalent な n 変数Fuzzy/C論理関数の集合を c_r - eq(F_{c_r})，その数を $|c_r - \text{eq}(F_{c_r})|$ とすると，次の定理が成り立つ。

[定理9] ある B^n 上の $c_r - set$（但し $c_r \in R_0(F)$）を持つ n 変数Fuzzy/C論理関数の数は，F_p を表現する異なった定数付き加法形式の数と，F_c を表現する異なった定数付き乗法形式の数との積で与えられる。即ち，

$$|c_r - \text{eq}(F_{c_r})| = |DF_{(c_r)}(F_p)| \times |CF_{(c_r)}(F_c)|$$

となる。 (証明略)□

F_c を表現する1つの定数付き乗法形式 $F_c = \bullet_i (c_i \vee \beta_i)$（但し $c_i < 1/2$）に対して，$\sim F_c = \vee_i \sim (c_i \vee \beta_i)$ が対応し，各 $\sim (c_i \vee \beta_i)$ はド・モルガンの法則より $\bar{c}_i \cdot \sim \beta_i$ となり，定数 $\bar{c}_i (> 1/2)$ 付きの単積項となる。よって，F_c の異なった定数付き乗法形式の数と，$\sim F_c$ の異なった定数付き加法形式の数とは等しい。ここで $\sim F_c$ とは，B^n 上の $c_r < 1/2$ なる $c_r - set$ で $\bar{c}_i (> 1/2)$，他では0を取る n 変数 $(2, p+1)$ 論理関数である。よって，定理9は次のように書き直せる。

[定理10] ある B^n 上の $c_r - set$（但し $c_r \in R_0(F)$）を持つ n 変数Fuzzy/C論理関数の数は，F_p を表現する異なった定数付き加法形式の数と，$\sim F_c$ を表現する異なった定数付き加法形式の数との積で与えられる。即ち，

$$|c_r - \text{eq}(F_{c_r})| = |DF_{(c_r)}(F_p)| \times |DF_{(c_r)}(\sim F_c)|$$

となる。 (証明略)□

以上より n 変数Fuzzy/C論理関数の集合 **FC** の数を求めるには，B^n 上の $c_r - set$ のうち，$c_r > 1/2$，$c_r = 1/2$，$c_r < 1/2$ のすべての組み合わせ（その数は 3^{2^n} 個）に対して，定理10で述べた積の総和を求めればよい。

4．数の上界および下界

4.1 上界

B^n 上の $c_r - set$ において，$c_r > 1/2$ となる基底集合 $R_0(F)$ の基底上半集合 $\{\bar{c}_\ell, \cdots, \bar{c}_1, \bar{c}_0 (= 1)\}$ を考える。いま，各 $\bar{c}_i (i = 0, 1, \cdots, \ell)$ について，$\bar{c}_i \leq c_r$ なる $c_r - set$ で1，他では0となる2値論理関数を $f_{\bar{c}_i}$ と記すことにする。これより，$f_{\bar{c}_0} \subset f_{\bar{c}_1} \subset \cdots \subset f_{\bar{c}_\ell}$ となる。

同様に B^n 上の $c_r - set$ において，$c_r < 1/2$ となる基底集合 $R_0(F)$ の基底下半集合 $\{c_0 (= 0), c_1, \cdots, c_\ell\}$ を考える。いま，各 $c_i (i = 0, 1, \cdots, \ell)$ について，$c_i \geq c_r$ なる $c_r - set$ で0，他では1となる2値論理関数を f_{c_i} と記すことにする。これより，$f_{c_0} \supset f_{c_1} \supset \cdots \supset f_{c_\ell}$ となる。

任意の2値論理関数 f のすべての加法形式の集合を $DF(f)$，その数を $|DF(f)|$ と記すと，定理10内の $|DF_{(c_r)}(F_p)|$ および $|DF_{(c_r)}(\sim F_c)|$ に関して，次の不等式が成立する。

$$|DF_{(c_r)}(F_p)| = \prod_{i=0}^{\ell} |DF(f_{\bar{c}_i})|$$

$$|DF_{(c_r)}(\sim F_c)| = \prod_{i=0}^{\ell} |DF(\sim f_{c_i})|$$

よって

$$|c_r - \text{eq}(F_{c_r})| < \prod_{i=0}^{\ell} \left\{ |DF(f_{\bar{c}_i})| \times |DF(\sim f_{c_i})| \right\} < \prod_{i=0}^{\ell} |DF(1)| < (|DF(1)|)^{(3^n - 1)/2}$$

となる（但し式中，2つの2値論理関数 $f_{\bar{c}_i}$ と $\sim f_{c_i}$ との和は2値定数論理関数1より小さく，また基底集合の濃度の上界として 3^n を用いている）。

以上より c_r - equivalent なFuzzy/C論理関数の数の上界は，2値定数論理関数1を表現する加法形式の数を求める問題に帰着された。

定義2より，集合 $V (= \{0, 1/2, 1\}^n)$ は半順序関係 $\prec$ に関して半順序集合をなす。集合 V のうち，0または1の個数が k 個のものからなる集合をランク k の集合と呼び，V_k と記す。ここで，集合 V_k の元の数 $|V_k|$ は $|V_k| = 2^k \binom{n}{k}$ であり，極大元（即ち最大元）は V_0 の元，極小元は V_n の元となる。

[定義7] 集合Vの部分集合$S=\{e_1,\cdots,e_s\}$が全順序集合であるとき，即ち$e_1\prec\cdots\prec e_s$が成り立つとき，集合Sは鎖(chain)であるといい，$|S|$を鎖の長さと呼ぶ。また集合Sにおいてどの2つの元も比較不可能なとき，即ち$e_i \nprec e_j$ $(i\neq j)$が成り立つとき，集合Sは反鎖(anti-chain)であるといい，$|S|$を反鎖の大きさと呼ぶ。 □

2値定数論理関数1を表現する加法形式の集合DF(1)の数は，半順序集合Vの反鎖の数に等しいことが簡単に示される[4]。また半順序集合Vの最大の反鎖の大きさは$2^r\binom{n}{r}$（但しランク$r=\lceil 2n/3\rceil$であり，以降簡単のために$r=2n/3$とする）であるので，ディルウォースの定理よりVは$2^r\binom{n}{r}$個の鎖に分解できる。このとき各鎖の長さが高々$n/\sqrt{3}$であれば，各鎖の中から元を高々1個選ぶことにより，集合Vの全ての反鎖を生成することができる[4]。よって，集合DF(1)の数|DF(1)|に関して

$$|\mathrm{DF}(1)|<\left(\frac{n}{\sqrt{3}}\right)^{2^r\binom{n}{r}}$$

が成立する。これよりn変数Fuzzy/C論理関数の集合の数$|\mathbf{FC}|$は，

$$|\mathbf{FC}|=\sum_{c_r}|c_r\text{-}\mathrm{eq}(F_{c_r})|<\sum_{c_r}(|\mathrm{DF}(1)|)^{(3^n-1)/2}$$

となるので，数の上界として

$$|\mathbf{FC}|<3^{2^n}\cdot\left(\left(\frac{n}{\sqrt{3}}\right)^{2^r\binom{n}{r}}\right)^{(3^n-1)/2}$$

を得る。この式をスターリングの近似公式で展開すると，

$|\mathbf{FC}|<2^{\alpha}$，但し

$$\alpha=3^{2n}\left(\left(\frac{2}{9}\right)^n log_2 3+\frac{3}{4\sqrt{\pi n}}\left(1+\frac{c}{n}\right)log_2\frac{n}{\sqrt{3}}\right)$$

となる（ここで式中のcは適当な定数で押さえられる）。

4.2 下界

半順序集合Vの1つの元$\mathbf{a}_i$は1つの単積項α_iに対応し，Vの1つの反鎖$\{\mathbf{a}_1,\cdots,\mathbf{a}_s\}$は1つの加法形式$\alpha_1\vee\cdots\vee\alpha_s$に対応する。いま，基底集合の元$c_r$が$c_r>1/2$となる基底上半集合$\{\bar{c}_\ell,\cdots,\bar{c}_1,\bar{c}_0(=1)\}$（その大きさを$p$とすると，$p\leq(3^n-1)/2$）を考える。Vの反鎖の任意の2つの元$\mathbf{a}_i,\mathbf{a}_j(i\neq j)$は常に$\mathbf{a}_i\nprec\mathbf{a}_j$であるから，任意の2つの定数$\bar{c}_i,\bar{c}_j(i\neq j)$に対して$\mathbf{a}_i^{(\bar{c}_i)}\nprec\mathbf{a}_j^{(\bar{c}_j)}$となり，対応する定数付き単積項は$\bar{c}_i\cdot\alpha_i\not\subset\bar{c}_j\cdot\alpha_j$となる。よって，Vの反鎖から作られた1つの定数付き反鎖$\{\mathbf{a}_1^{(\bar{c}_1)},\cdots,\mathbf{a}_s^{(\bar{c}_s)}\}$は1つの定数付き加法形式$\bar{c}_1\cdot\alpha_1\vee\cdots\vee\bar{c}_s\cdot\alpha_s$に対応する。

半順序集合Vの2つの隣接するランクkの集合V_kとランク$k-1$の集合V_{k-1}において，V_kの各元はV_{k-1}のk個の元に包含されている。よってV_kのs個の元は，多くともks個のV_{k-1}の元に包含される。これよりV_{k-1}の残りの$|\mathrm{V}_{k-1}|-ks$個の元は，2つの隣接した集合の中では互いに包含関係にないので，これから作られる部分集合はすべてVの反鎖となる。これよりVの反鎖から求められる可能な定数付き反鎖の数を求めると，V_kのs個の各元に対してp通りの定数を選ぶことができ，更に，V_{k-1}の残りの$|\mathrm{V}_{k-1}|-ks$個の各元に対して選ばない場合も含めて$p+1$通りの中から部分集合（即ち，定数付き反鎖）を作ることができるので，

$$\sum_{s=0}^{|\mathrm{V}_k|}\binom{|\mathrm{V}_k|}{s}p^s\cdot(p+1)^{|\mathrm{V}_{k-1}|-ks}$$

を得る。これはn変数Fuzzy/C論理関数の数$|\mathbf{FC}|$の下界となり，$p=1$の場合はn変数ファジィ論理関数の数$|\mathbf{F}|$の下界を与える[4]。上式を不等号を考慮して変形すると，

$$|\mathbf{FC}|>p^{|\mathrm{V}_{k-1}|}\cdot\sum_{s=0}^{|\mathrm{V}_k|}\binom{|\mathrm{V}_k|}{s}p^{-(k-1)s}=p^{|\mathrm{V}_{k-1}|}\cdot e_{k-1}^{\frac{|\mathrm{V}_k|}{p^{k-1}}}$$

となる。但し，変形に際しては2項定理を用いており，$e_{k-1}=\left(1+p^{-(k-1)}\right)^{p^{k-1}}$とおいた。いまランク$k$として，$k-1$を$r(=2n/3)$にとり，$n\to\infty$になるほど，$e_{k-1}\to e$（$e$は自然対数の底）および$|\mathrm{V}_{r+1}|\approx|\mathrm{V}_r|\left(=2^r\binom{n}{r}\right)$と近似できるので，

$$|\mathbf{FC}|>p^{|\mathrm{V}_r|}\cdot e^{\frac{|\mathrm{V}_r|}{p^r}}>p^{|\mathrm{V}_r|}$$

を得る。この式をスターリングの近似公式で展開すると，

$$|\mathbf{FC}|>2^{\beta},\ \text{但し}\ \beta=3^n\left\{\frac{3}{2\sqrt{\pi n}}\left(1+\frac{c}{n}\right)log_2 p\right\}$$

となる（ここで$p\leq(3^n-1)/2$であり，式中のcは適当な定数で押さえられる）。

5. むすび

本報告では，n変数Fuzzy/C論理関数の数の上界および下界を求めた。導出のもとになる方法は現在のところ，本手法が最も良いものであると自負しているが，限界式のオーダーには大いに改善の余地がある。定理2より，基底集合$R_0(F)$さえ決定できれば，奇数値$2m+1$のn変数多値クリーネ論理関数の集合$\mathbf{K}_{2m+1}$の数の上界も算出することができる。偶数値$2m$のn変数多値クリーネ論理関数の集合$\mathbf{K}_{2m}$は，奇数値の集合$\mathbf{K}_{2m+1}$から決定できるので，数の上界は奇数値に意味を持つ。しかしながら，値数よりも変数に対して集合$\mathbf{K}$の濃度変化が大きく，求められる上界は変数に関してかなり悪い。

参考文献

[1] 荒木, 巽, 向殿, 大前: 定数係数を持ったファジィ論理関数について,第9回ファジィシステムシンポジウム, TD1-1, pp.473-476, 1993.

[2] 荒木, 荒川, 巽, 向殿, 山本: 定数係数を持ったファジィ論理関数に基づく知識表現の定義域の考察,1997年信学会総大, SD-3-6, pp.334-335, 1997.3.

[3] 荒木, 巽, 向殿, 荒川: 定数係数を持ったファジィ論理関数の基本的性質(1) －未知, 矛盾, 不明－, 第13回ファジィシステムシンポジウム, 1997.6. 発表予定.

[4] H. Tatsumi, T. Araki, M. Mukaidono and M. Kizawa: Bounds on the number of fuzzy switching functions, AFSS'93, Proc. of First Asian Fuzzy Systems Symposium, pp.158-165, 1993.

神奈川工科大学 工学部 情報工学科 巽 久行
２４３－０２ 神奈川県 厚木市 下荻野 １０３０
E-mail: tatsumi@ic.kanagawa-it.ac.jp Tel: 0462-41-1211

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THF3-3

ファジィ値の代数的，位相的性質について
Some Algebraic and Topological Properties of Fuzzy Values

川瀬　真
Shin KAWASE
帝京平成大学
Teikyo Heisei University

柳原二郎
Niro YANAGIHARA
千葉大学
Chiba University

陳啓浩
Qihao CHEN
北京郵電大学
Beijing University of Posts and Telecommunications

Abstract

This paper describes some algebraic and topological properties of fuzzy values. A necessary and sufficient condition that a subset of fuzzy values is a Kleene algebra is given. Furthermore, some topological properties of the set of binaritic fuzzy values, which satisfies the axioms of Kleene algebra, are shown.

1　まえがき

この論文ではファジィ値の集合の代数的，位相的性質について考察する．区間値の全体の集合がドモルガン代数となること，および，その部分集合がクリーネ代数となるための必要十分条件は得られている [1]．一方，ファジィ値の全体の集合がドモルガン代数となることは知られているが，その部分集合がクリーネ代数となるための必要十分条件は得られていない．

ここでは，まず，ファジィ値の集合がクリーネ代数となるための必要十分条件を示す．つぎに，binaritic なファジィ値の集合の位相的性質を述べる．

2　ファジィ値とその基本的性質

閉区間 $[0,1]$ のファジィ集合の全体を $\mathcal{F}[0,1]$ で表す．$A \in \mathcal{F}[0,1]$ とすると，A は $[0,1]$ から $[0,1]$ への写像である．

以下では $[0,1]$ のファジィ部分集合のメンバーシップ関数 μ を，ファジィ集合と同じ記号で表す．例えば $\mu_A(x) = A(x), x \in [0,1]$, と書く．

$\alpha \in [0,1]$ に対して

$$A_\alpha = \{x \in [0,1] \mid A(x) \geq \alpha\} \quad \text{if} \quad 0 < \alpha \leq 1,$$
$$A_0 = \text{the closure of } \{x \in [0,1] \mid A(x) > 0\}$$

とおく．A_α をファジィ集合 A の *α-cut* と呼ぶ．

任意の α $(0 \leq \alpha \leq 1)$ に対し A_α が閉区間のとき，$A \in \mathcal{F}[0,1]$ はファジィ値と呼ばれる．ファジィ値の全体を $\mathcal{M}[0,1]$ で表す．ファジィ値に対して次が成り立つ [3].

(1) A をファジィ値とし $A_\alpha = [a^-(\alpha), a^+(\alpha)]$ とおく．A は次の条件 $(1_1) - (1_3)$ 満たす:

- (1_1) $\alpha_1 \leq \alpha_2$ ならば $A_{\alpha_2} \subseteq A_{\alpha_1}$.
- (1_2) $a^-(\alpha)$ および $a^+(\alpha)$ は左連続.
- (1_3) $\alpha = 0$ において $a^-(\alpha)$ および $a^+(\alpha)$ は右連続.

(2) $U(\alpha) = [u^-(\alpha), u^+(\alpha)], \alpha \in [0,1]$, を閉区間の族とする．$U(\alpha)$ が次の条件 $(2_1) - (2_3)$ を満たすならば，$A_\alpha = U(\alpha)$ であるようなファジィ値 A が一意的に決まる．

- (2_1) $\alpha_1 \leq \alpha_2$ ならば $U(\alpha_2) \subseteq U(\alpha_1)$.
- (2_2) $u^-(\alpha)$ および $u^+(\alpha)$ は左連続.
- (2_3) $\alpha = 0$ において，$u^-(\alpha)$ および $u^+(\alpha)$ は右連続.

$A, B \in \mathcal{M}[0,1]$ に対して，$D(A,B)$ を次で定義する:

$$D(A,B) = \sup_{\alpha \in [0,1]} d_H(A_\alpha, B_\alpha).$$

ここで $d_H(E,F)$ は集合 E, F 間の Hausdorff 距離である．このとき D は $\mathcal{M}[0,1]$ における距離であり，$A_\alpha=[a^-(\alpha),a^+(\alpha)], B_\alpha=[b^-(\alpha),b^+(\alpha)]$ とおくと，

$$D(A,B)=\sup_{\alpha\in[0,1]}\max\{|a^-(\alpha)-b^-(\alpha)|,|a^+(\alpha)-b^+(\alpha)|\}$$

が成り立つ [3].

距離空間 $(\mathcal{M}[0,1],D)$ は完備な距離空間であることが知られている [3].

3 ドモルガン代数とクリーネ代数

束 $L=(L,\vee,\wedge,0,1)$ は，最小元 0，最大元 1 をもつ分配束とする．

さらに単項演算 $\neg$ が定義されていて $a,b\in L$ に対して

(1) $\neg(\neg a)=a$,

(2) $\neg(a\vee b)=\neg a\wedge\neg b$, $\neg(a\wedge b)=\neg a\vee\neg b$ （ドモルガン律）

を満たすときドモルガン代数という．$c\in L$ が

$$c=\neg c$$

をみたすとき，c を L の中心という．

ドモルガン代数が次を満たすときクリーネ代数という．

(3) $a\wedge\neg a\le b\vee\neg b\ \ \forall a,b\in L.$ （クリーネ律）

クリーネ代数が次を満たすときブール代数である．

(4) $a\vee\neg a=1$, $a\wedge\neg a=0.$ （相補律）

完備ドモルガン代数に対して次が成り立つ．

(5) $a\vee(\bigwedge_{i\in I}b_i)=\bigwedge_{i\in I}(a\vee b_i)$, $a\wedge(\bigvee_{i\in I}b_i)=\bigvee_{i\in I}(a\wedge b_i)$. （拡張された分配律）

(6) $\neg(\bigvee_{i\in I}a_i)=\bigwedge_{i\in I}\neg a_i$, $\neg(\bigwedge_{i\in I}a_i)=\bigvee_{i\in I}\neg a_i$. （拡張されたドモルガン律）

区間値の全体 $\mathcal{I}[0,1]$ およびファジィ値の全体 $\mathcal{M}[0,1]$ には，拡張原理により演算 $\vee,\wedge,\neg$ が定義できる．このとき $\mathcal{I}[0,1]$ および $\mathcal{M}[0,1]$ は完備ドモルガン代数となる [1].

補題 1 L をドモルガン代数とする．$a,b\in L$ に対して，L_a,K_a^-,K_a^+ を

$$L_a=\{x\in L\mid x\wedge\neg x\le a\},$$

$$K_a^-=\{x\in L|x\le a\},K_a^+=\{x\in L|x\ge a\}$$

で定義する．

(1) L_a はドモルガン代数である．

(2) $a\le\neg a$ ならば L_a はクリーネ代数である．

(3) $c\in L$ が中心ならば L_c^- および $K_c^-\cup K_c^+$ はクリーネ代数である．

この補題から，完備ドモルガン代数がクリーネ代数となるための必要十分条件が得られる．

定理 1 L を完備ドモルガン代数とする．

$$L\text{ はクリーネ代数である}$$
$$\iff a\le\neg a\text{ なる }a\in L\text{ が存在して }L=L_a.$$

証明 ($\Rightarrow$) L は完備クリーネ代数であるから，

$$\bigvee_{x\in L}(x\wedge\neg x)\le\bigwedge_{x\in L}(x\vee\neg x).$$

$\bigvee_{x\in L}(x\wedge\neg x)=a$ とおくと，拡張されたドモルガン律により $a\le\neg a$. さらに $x\in L\Longrightarrow x\wedge\neg x\le a$ であるから $L\subset L_a$. ($\Leftarrow$) は補題 1 による．

次に，ドモルガン代数 L が次の性質 (*) を持つとする．

(*) $x\le\neg x\Longrightarrow$
$$x\le c\le\neg x\text{ なる 中心 }c\in L\text{ が存在する．}$$

このとき，定理 1 より次を得る．

定理 2 L を，性質 (*) をもつ完備ドモルガン代数とする．

$$L\text{ の部分ドモルガン代数 }L'\text{がクリーネ代数}$$
$$\iff\text{中心 }c\in L\text{ が存在して }L'\subset L_c.$$

証明 定理 1 の $a\le\neg a$ なる $a\in L$ に対して $a\le c\le\neg a$ なる 中心 $c\in L$ をとればよい．

さらに，$\forall x\in L$ に対して x と $\neg x$ が比較可能ならば，次を得る．

定理 3 L を，性質 (*) をもつ完備ドモルガン代数であり，さらに，$\forall x\in L$ に対して $x,\neg x$ が比較可能とする．

$$L\text{ の部分ドモルガン代数 }L'\text{がクリーネ代数}$$
$$\iff\text{中心 }c\in L\text{ が存在して }L'\subset K_c^-\cup K_c^+.$$

4 ファジィ値の集合がクリーネ代数となるため必要十分条件

区間真理値の全体 $\mathcal{I}[0,1]$ は性質 (*) をもつ完備ドモルガン代数である．実際，$x=[x^-,x^+]\in\mathcal{I}[0,1]$ に対して $c=[x^-,1-x^-]$ とおくと，$x\le c\le\neg x$ となる．さらに，$\forall x\in L$ に対して x と $\neg x$ が比較可能 [1] であるから，定理3から，文献 [1] の定理が得られる．

定理 4 L' を，$\mathcal{I}[0,1]$ の部分ドモルガン代数とする．

$$L' \text{ はクリーネ代数である}$$
$$\iff \text{中心 } c\in\mathcal{I}[0,1] \text{ が存在して } L'\subset K_c^-\cup K_c^+.$$

ここで $K_c^-=\{x\in\mathcal{I}[0,1]|x\le c\}, K_c^+=\{x\in\mathcal{I}[0,1]|x\ge c\}$.

ファジィ値の全体 $\mathcal{M}[0,1]$ は性質 (*) をもつ完備ドモルガン代数であることを示そう．実際，$A\in\mathcal{M}[0,1]$ に対して $A\le\neg A$ とする．$A_\alpha=[a^-(\alpha),a^+(\alpha)]$ とおく．$C_\alpha=[a^-(\alpha),1-a^-(\alpha)]$ とおくと，$A_\alpha\le C_\alpha\le\neg A_\alpha$ となる．さらに，C_α は条件 $(2_1)-(2_3)$ を満たすから，$C\in\mathcal{M}[0,1]$ が存在して $A\le C\le\neg A$ となる．従って定理2より，ファジィ値の集合がクリーネ代数となるため必要十分条件が得られる．

定理 5 L' を，$\mathcal{M}[0,1]$ の部分ドモルガン代数とする．

$$L' \text{ はクリーネ代数である}$$
$$\iff \text{中心 } c\in\mathcal{M}[0,1] \text{ が存在して } L'\subset L_c.$$

ここで $L_c=\{A\in\mathcal{M}[0,1]|A\wedge\neg A\le c\}$.

例 1 ファジィ値 $A\in\mathcal{M}[0,1]$ が，$A(0)=1$ または $A(1)=1$ となるとき binaritic なファジィ値という [1]．binaritic なファジィ値の全体を $\mathcal{M}_B[0,1]$ で表す．$\mathcal{M}_B[0,1]$ はクリーネ代数である [1]．実際，

$$C(x)=1, 0\le x\le 1,$$

とおくと，C は中心であって，$A\in\mathcal{M}[0,1]$ に対して

$$A\ge C \text{または} A\le C$$

が成り立つから，定理4が適用できる．

5 binaritic なファジィ値の集合の位相的性質

binaritic なファジィ値は，間接法と呼ばれるファジィ推論において現れる．この binaritic なファジィ値の集合の位相的性質について考察しよう．

以下では $\mathbf{R}$ のファジィ部分集合を表わすのに A,B などを用いる．また，ファジィ値を表わすのに σ,τ などを用いる。

間接法では，次のファジィ推論：

$$\begin{array}{ll} \text{規則} & \text{if } x \text{ is } A, \text{ then } y \text{ is } B \\ \text{前提} & x \text{ is } A' \\ \hline \text{結論} & y \text{ is } B'. \end{array} \qquad (1)$$

の結論 B' を以下の手順 (i)-(iii) で求める．

(i) A' が与えられたときの A のファジィ真理値 τ_A を次式で求める：

$$\tau_A(a)=\bigvee_{\{x|A(x)=a\}} A'(x),\ a\in[0,1]. \qquad (2)$$

(ii) τ_A と含意関数 $I(\cdot,\cdot)$ から，B のファジィ真理値 σ_B を次式で求める：

$$\sigma_B(b)=\bigvee_{a\in[0,1]} T(\tau_A(a),I(a,b)),\ b\in[0,1]. \qquad (3)$$

(iii) 結論 B' を次式で求める：

$$B'(y)=\sigma_B(B(y)),\ y\in\mathbf{R}. \qquad (4)$$

(3) において，$T(\cdot,\cdot)$ は T-norm，すなわち，次の条件を満たす $[0,1]$ の上の二項演算である：

(T-1) $T(a,b)=T(b,a)$（可換性）．

(T-2) $T(a,T(b,c))=T((a,b),c)$（結合性）．

(T-3) $a_1\ge a_2, b_1\ge b_2$ に対して $T(a_1,b_1)\ge T(a_2,b_2)$（単調性）．

(T-4) $T(a,1)=a$（境界条件）．

$I(\cdot,\cdot)$ は含意関数，すなわち次の条件を満たす関数 $I:[0,1]^2\to[0,1]$ である（必ずしもすべての条件を満たす必要はない）．

(I-1) $a_1\le a_2\Rightarrow I(a_1,b)\ge I(a_2,b)$,
$b_1\le b_2\Rightarrow I(a,b_1)\le I(a,b_2)$,

(I-2) $I(1,b)=b$,

(I-3) $a\le b\Rightarrow I(a,b)=1$,

(I-4) $I(a,b)$ is continuous with respect to (a,b),

(I-5) $I(a,b)=I(1-b,1-a)$,

(I-6) $I(a,I(b,c))=I(b,I(a,c))$.

さて，間接法における推論 $\tau_A\mapsto\sigma_B$ は，ファジィ値 τ に対して，ファジィ値 $F\tau$ を対応させる写像 $F:\tau\mapsto F\tau$:

$$(F\tau)(b)=\bigvee_{a\in[0,1]} T(\tau(a),\ I(a,b)),\quad b\in[0,1] \qquad (5)$$

と考えることができる．このとき F の定義域および値域は $\mathcal{M}_B[0,1]$ であるとしてよい．実際，

$$\tilde{\tau}_A(a) = \bigvee_{\{x;A(x)\leq a\}} A'(x),\ a \in [0,1]. \qquad (6)$$

とおくと，$\tilde{\tau}_A \in \mathcal{M}_B[0,1]$ であって，$F\tilde{\tau}_A = F\tau_A$ となる．さらに，$F\tau_A \in \mathcal{M}_B[0,1]$ である．このことを証明しよう．

補題 2 (1) において，A, A' は正規かつ連続とする．また，含意関数は (I-1), (I-3) を満たすとする．

(i) $\tilde{\tau}_A$ は単調増加関数で $\tilde{\tau}_A(1) = 1$. さらに

$$\bigvee_{a\in[0,1]} T(\tilde{\tau}_A(a),\ I(a,b)) = \bigvee_{a\in[0,1]} T(\tau_A(a),\ I(a,b)).$$

(ii) $F\tau_A$ は単調増加関数で，$(F\tau_A)(1) = 1$.

証明 (i) $\tilde{\tau}_A$ は単調増加関数で，$\tilde{\tau}_A(1) = 1$ となることは明らか．$F\tilde{\tau}_A = F\tau_A$ となることを示そう．$\tau_A(a) \leq \tilde{\tau}_A(a)$ であるから，

$$\bigvee_{a\in[0,1]} T(\tau_A(a),\ I(a,b)) \leq \bigvee_{a\in[0,1]} T(\tilde{\tau}_A(a),\ I(a,b)).$$

次に，$a \in [0,1]$ に対して $\tilde{\tau}_A(a) = \tau_A(a_0)$ なる $a_0 \in [0,a]$ がとれるから

$$\begin{aligned} T(\tilde{\tau}_A(a),\ I(a,b)) &= T(\tau_A(a_0), I(a,b)) \\ &\leq T(\tau_A(a_0), I(a_0,b)) \\ &\leq \bigvee_{a\in[0,1]} T(\tau_A(a), I(a,b)). \end{aligned}$$

(ii) τ_A は正規であるから，$a_0 \in [0,1]$ が存在して $\tau_A(a_0) = 1$. 従って

$$\begin{aligned} (F\tau_A)(1) &= \bigvee_{a\in[0,1]} T(\tau_A(a), I(a,1)) \\ &\geq T(\tau_A(a_0), I(a_0,1)) \\ &= T(1, I(a_0,1)) \\ &= I(a_0,1) = 1. \end{aligned}$$

つぎに，(I-1) と (T-2) により，$b_1 \leq b_2$ならば

$$T(\tau_A(a), I(a,b_1)) \leq T(\tau_A(a), I(a,b_2)).$$

ゆえに

$$\bigvee_{a\in[0,1]} T(\tau_A(a), I(a,b_1)) \leq \bigvee_{a\in[0,1]} T(\tau_A(a), I(a,b_2))$$

となり，$F\tau_A$ は単調増加関数である．

binaritic なファジィ値全体の集合の完備性を示す．

定理 6 距離空間 $(\mathcal{M}_B[0,1],\ D)$ は完備である．

証明 $\mathcal{M}_B[0,1]$ は $\mathcal{M}[0,1]$ で閉じていることを示す．$A_n \in \mathcal{M}_B[0,1]$, $A \in \mathcal{M}[0,1]$, $A_n \to A$ in $\mathcal{M}[0,1]$ とする．このとき $A(0) = 1$ または $A(1) = 1$ が成り立つ．なぜなら，そうでないと仮定しよう．$(A_n)_\alpha = [a_n^-(\alpha), a_n^+(\alpha)], A_\alpha = [a^-(\alpha), a^+(\alpha)]$ とおくと，ある $\alpha_0 \in [0,1]$ に対して $a^-(\alpha_0) > 0$ かつ $a^+(\alpha_0) < 1$ となる．従って

$$\begin{aligned} &D(A_n, A) \\ &\quad = \sup_{\alpha\in[0,1]} d_H((A_n)_\alpha, A_\alpha) \geq d_H((A_n)_{\alpha_0}, A_{\alpha_0}) \\ &\quad = \max\{|a_n^-(\alpha_0) - a^-(\alpha_0)|, |a_n^+(\alpha_0) - a^+(\alpha_0)|\} \end{aligned}$$

であるから，

$$\begin{aligned} a_n^-(\alpha_0) > 0 &\Rightarrow D(A_n, A) \geq a_{\alpha_0}^- > 0 \\ a_n^+(\alpha_0) < 1 &\Rightarrow D(A_n, A) \geq 1 - a_{\alpha_0}^+ > 0 \end{aligned}$$

となり $A_n \to A$ に矛盾する．

さて，$\mathcal{M}[0,1]$ は完備であり，$\mathcal{M}_B[0,1]$ は $\mathcal{M}[0,1]$ の閉集合であるから，$\mathcal{M}_B[0,1]$ も完備となる．

$\mathcal{M}_B[0,1]$ の完備性が言えたから，写像 $F : \mathcal{M}_B[0,1] \mapsto \mathcal{M}_B[0,1]$ が縮小写像ならば不動点定理が適用できる．

参考文献

[1] M.Mukaidono, Kleene Algebras in Fuzzy Values, Proc. the Fourth International Workshop on Rough Sets, Fuzzy Sets, and Machine Discovery, vol. November 6–8, The University of Tokyo (1996), pp. 37–43.

[2] 伊藤，飯塚，向殿："ファジィ論理における区間真理値の代数"，多値論理研究ノート，Vol. 18, No. 1 (1995-7).

[3] Kawase and Q.Chen, Some Topological Properties of Fuzzy Values, to appear.

連絡先

〒 290-01　市原市潤井戸字大谷 2289-23

帝京平成大学情報学部情報システム学科

川瀬真

TEL. 0436-74-6086

FAX. 0436-74-3659

ON FUZZY RADICALS, PRIME FUZZY QUASI-IDEALS AND PRIMARY FUZZY QUASI-IDEALS IN A COMMUTATIVE BCK-ALGEBRA

TAKESHI SAKURAGI

ABSTRACT

In this paper, it is shown that every ideal of a BCK-algebra X is a left quasi-ideal. We define a prime fuzzy quasi-ideal and a primary fuzzy quasi-dieal in X. We give the relations between the primary fuzzy quasi-ideals and the radicals and also the relations between the prime fuzzy quasi-ideals and radicals.

1. Introduction and preliminaries.

Recall that a **BCI-algebra** is a non empty set X with operation $*$ and a constant 0 satisfying the axioms : For all $x,y,z \in X$, (1) $((x*y)*(x*z))*(z*y) = 0$, (2) $(x*(x*y))*y = 0$, (3) $x*x = 0$, (4) $x*y = 0$ and $y*x = 0$ imply that $x = y$, (5) $x*0 = 0$ implies $x = 0$.

In a BCI-algebra X, we can define a partial order $\leqq$ by $x \leqq y$ if and only if $x*y = 0$. If $0 \leqq x$ for all x in X, then X is called a **BCK-algebra**.

We denote $x*(x*y)$ by $y \cap x$, then observe that $x \cap y \neq y \cap x$ in general, but if it is true, that is, $x \cap y = y \cap x$ for all x and y in a BCK-algebra X, then X is called **commutative**. In the commutative case, it is easily seen that $x \cap y$ is the greatest lower bound of x and y ([6]).

2. Fundamental definitions and lemmas.

Let X be a BCK-algebra. A mapping μ from X to the interval $[0,1]$ is called a **fuzzy subset** of X.

A fuzzy subset μ of X is called a **fuzzy subalgebra** if for all $x,y \in X$, we have that $\mu(x*y) \geqq \min(\mu(x), \mu(y))$.

A non empty subset I of a BCK-algebra X is called an **ideal** if it satisfies the conditions : (1) $0 \in I$, (2) if $x \in I$ and $y*x \in I$ then $y \in I$ for all $x,y \in X$. $\{0\}$ and X are the simplest ideal of X. Moreover a fuzzy subset μ of X is said to be a **fuzzy ideal** if satisfies the conditions : (1) $\mu(0) \geqq \mu(x)$ for all $x \in X$, (2) $\mu(x) \geqq \min\{\mu(x*y), \mu(y)\}$ for all $x,y \in X$.

For the following Definitions, Lemmas and Remarks we quote [15].

Definition 2.1. A non empty subset Q of X satisfies the following conditions is called **quasi-left (resp. quasi-right) ideal** of X : (1) $0 \in Q$, (2) if $x \in Q$ and $y \in X$, then $y \cap x \in Q$ (*resp.* $x \cap y \in Q$). Moreover, Q is called **quasi-ideal** of X, if Q satisfies the left and right conditions.

Definition 2.2. A fuzzy subset J of X satisfies the following conditions is called **fuzzy quasi-left (resp. quasi-right) ideal** in X: (1) $J(0) \geqq J(x)$ for all $x \in X$, (2) $J(x \cap y) \geqq J(y)$ (*resp.* $J(y \cap x) \geqq J(y)$) for all $x,y \in X$. Moreover, J is called a **fuzzy quasi-ideal** in X, if J satisfies the **fuzzy quasi-left** and quasi-right conditions.

Lemma 2.1.[13] *A fussy subset μ of BCK-algebra X is a fuzzy idea l of X if and only if for every $\lambda \in [0,1]$, $\mu_\lambda = \{x | x \in X, \mu(x) \geq \lambda\}$ is an ideal of X, when $\mu_\lambda \neq \phi$.*

Lemma 2.2. *Let X be a BCK-algebra and J be a fuzzy subset of X. Then J is a fuzzy quasi-left (resp. quasi-right) ideal in X if and only if for every $\lambda \in \{J(x) | x \in X\}$, $J_\lambda = \{x | x \in X, J(x) \geqq \lambda\}$ is a quasi-left (resp. quasi-right) ideal in X.*

Lemma 2.3. *If μ is a fuzzy ideal of a BCK-algebra X and $x \leqq y$, where $x,y \in X$, then $\mu(x) \geqq \mu(y)$ holds.*

Proposition 2.1. *Let X be a BCK-algebra. If fuzzy subset A of X is a fuzzy ideal of X, then A is a fuzzy quasi-ideal in X.*

Proposition 2.2. *If I is a ideal of BCK-algebra X (commutative BCK-algebra), then I is a left quasi-ideal of X (a quasi-ideal of X).*

Let A,B be fuzzy quasi-ideals in a BCK-algebra X, then we define the **product** $\circ$ of A,B as following : For all $x \in X$, $A \circ B(x) = \sup_{x=y*z} (A(y) \wedge B(z))$ where $y,z \in X$, $\wedge$ means minimum and $A \cap B(y)$ means the membership value of $y \in Y$.

Lemma 2.4. *The relation $A \circ B = B \circ A \subseteq A \cap B$, in particular $A \circ A \subseteq A$ holds for fuzzy quasi-ideals A,B in a commutative BCK-algebra X.*

Lemma 2.5. *Let A,B be fuzzy quasi-ideals in a commutative BCK-algebra X. Then $A \circ B$ is a fuzzy quasi-ideal in X, and moreover, for each $n \in Z^+$, A^n is a fuzzy quasi-ideal in X.*

Lemma 2.6. *Let A,B,C be fuzzy quasi-ideals in a commutative BCK-algebra X. Then, the relation $(A \circ B) \circ C = A \circ (B \circ C)$ holds. Moreover, $A \cap B = \{a \cap b | a \in A, b \in B\}$ is also a quasi-ideal of X.*

Definition 2.3. For a fuzzy quasi-ideal A in a commutative BCK-algebra X, let $X_A = \{B | B$ is a fuzzy quasi ideal in X such that there exists $n \in Z^+, B^n \subseteq A\}$. Denote $\bigcup_{B \in X_A} B$ by $\sqrt{A}$ and it is called the **radical of** A where $\bigcup_{B \in X_A} B$ means $(\bigcup_{B \in X_A} B)(x) = \sup_{B \in X_A} (B(x))$ for all $x \in X$.

Lemma 2.7. *For fuzzy quasi-ideals A,B in a commutative BCK-algebra X, the following (1), (2) and (3) are hold :*

(1) $\sqrt{A \circ B} = \sqrt{A \cap B} = \sqrt{A} \cap \sqrt{B}$,

(2) If $k \in Z^+$ exists such that $A^k \subseteq B$, then $\sqrt{A} \subseteq \sqrt{B}$,

(3) $\sqrt{\sqrt{A}} = \sqrt{A}$.

A mapping f from a BCK-algebra $X = (X, *, 0)$ into a BCK-algebra $Y = (Y, *', 0')$ is called a **homomorphism** if $f(x*y) = f(x) *' f(y)$ for all $x,y \in X$.

Definition 2.4.[11] Let f be any mapping from a set X to a set Y, and let μ be a fuzzy subset of X. Then,

Key words and phrases. Quasi-ideal, fuzzy quasi-ideal, radical of fuzzy quasi-ideal, prime quasi-ideal, fuzzy prime quasi-ideal, prime fuzzy quasi-ideal, primary fuzzy quasi-ideal.

the image $f(\mu)$ of μ under f is the fuzzy subset defined as follows :

$$f(\mu)(y) = \begin{cases} \sup_{x \in f^{-1}(y)} \mu(x) & \text{if } f^{-1}(y) \neq \phi, \\ 0 & \text{if } f^{-1}(y) = \phi. \end{cases}$$

Lemma 2.8.[10] *Let f be a homomorphism from a BCK-algebra X onto a BCK-algebra Y, and let μ be a fuzzy ideal of X. Then the homomorphic image $f(\mu)$ of μ under f is a fuzzy ideal of Y.*

Definition 2.5. Let A be a quasi ideal in commutative BCK-algebra X. Then A is called prime quasi-ideal if and only if $x \cap y \in A$ implies $x \in A$ or $y \in A$ for all $x, y \in X$, where $x \cap y$ denotes an infinimum of the set $\{x, y\}$.

Definition 2.6. Let X be a BCK-algebra and P a non-constant fuzzy left (right) quasi-ideal. Moreover if P satisfies following condition, then P is called fuzzy prime left (right) quasi-ideals of X :
For $y \in X, P(x \cap y) = \max\{P(x), P(y)\}$ for all $x \in X$
(For $y \in X, P(y \cap x) = \max\{P(x), P(y)\}$ for all $x \in X$).

Proposition 2.3. *Let X be a commutative BCK-algebra, A be a fuzzy quasi-ideal in X, and $A_x = \{x \in X | A(x) = A(0)\}$. Then the following two statement are equivalent (1) A is a fuzzy prime quasi-ideal in X. (2) A_x is a prime quasi-ideal X (base set of A).*

Definition 2.7. A fuzzy quasi-ideal P of commutative BCK-algebra X is called prime fuzzy quasi-ideal in X if and only if, it satisfies the following conditions:

(i) P is non constant,

(ii) If A and B are fuzzy quasi-ideals in X with $A \circ B \subseteq P$, then either $A \subseteq P$ or $B \subseteq P$.

Definition 2.8. Let X be a commutative BCK-algebra, then fuzzy quasi-ideal Q in X is called primary fuzzy quasi-ideal, if the conditions $B \circ C \subseteq Q$ and $B \not\subseteq Q$ imply $C^n \subseteq Q$ for $n \in Z^+$, where B, C are two fuzzy quasi-ideals in X.

Proposition 2.4. *Every bounded commutative BCK-algebra X has the prime fuzzy quasi-ideal and primary fuzzy quasi-ideal in X.*

3. Relation's theorems for radicals, prime fuzzy quasi-ideals and primary fuzzy quasi-ideals in a commutative BCK-algebra.

Proposition 3.1. *Let X be a commutative BCK-algebra and A be a primary fuzzy quasi-ideal in X. Then*

(1) $\sqrt{A}$ is a prime fuzzy quasi-ideal in X,

(2) $\sqrt{A}$ is the smallest prime fuzzy quasi-ideal containing A.

Theorem 3.1. *Let X be a commutative BCK-algebra and A_1, A_2 be the primary fuzzy quasi-ideals in X such that $\sqrt{A_1} = \sqrt{A_2}$. Then $A_1 \cap A_2$ is also a fuzzy primary quasi-ideal in X.*

Theorem 3.2. *Let X be a commutative BCK-algebra and A, B be the two fuzzy quasi-ideals in X such that,*

(a) $B \subseteq A \subseteq \sqrt{B}$,

(b) If $I \circ J \subseteq B$ with $I \not\subseteq B$, then $J \subseteq B$, where I, J are two fuzzy quasi-ideals in X.

Under these conditions, B is a primary fuzzy quasi-ideals with $A = \sqrt{B}$.

Theorem 3.3. *Let X be a commutative BCK-algebra and A be a fuzzy quasi-ideal in X. Then A and $\sqrt{A}$ are contained in the same prime fuzzy quasi-ideal in X.*

REFERENCES

1. K. C. Gupta and M. K. Kantaroo : The nil radical of fuzzy ideal, Fuzzy Sets and Systems 59 (1993), 87 - 93, North-Holland.
2. M. Harada : Introduction to Ring theory, Kyoritsu (1971), 31 - 34. (In Japanese)
3. C. S. Hoo : Filters and ideals in BCI-algebras, Math. Japonica 36, No.5 (1991), 987 - 997.
4. K. Iseki : An algebra related with a propositional calculus, Proc. Japan Acad. 42 (1976), 26 - 29.
5. K. Iseki and S. Tanaka : Ideal theory of BCK-algebras, Math. Japonica 21 (1976), 351 - 366.
6. K. Iseki and S. Tanaka : An introduction to the theory of BCK-algebras, Math. Japonica 23, No.1 (1978), 1 - 26.
7. K. Iseki : BCK-algebras with condision(s), Math. Japonica 24, No.1 (1979), 107 - 119.
8. K. Iseki : On BCI-algebras, Mathematics Seminar Notes vol.8. (1980), 125 - 130.
9. K. Iseki : On finite BCK-algebra, Math. Japonica. 25, No.2 (1980), 225 - 229.
10. Y. B. Jun and E. H. Roh : Fuzzy commutative ideals of BCK-algebras, Fuzzy Sets and Systems 64 (1994) 401 - 405, North-Holland.
11. Y. B. Jun : A note of fuzzy ideals in BCK-algebra, Math. Japonica 42, No.2 (1995), 333 - 335.
12. H. V. Kumbhojkar. M. S. Bapat : Correspondence theorem for fuzzy ideals, Fuzzy Sets and Systems 41 (1991), 215 - 218, North-Holland.
13. X. Ougen : Fuzzy BCK-algebra, Math. Japonica 36, No.5 (1991), 935 - 942.
14. M. Palasinski : On a space prime ideal of a BCK-algebras, Mathematics Sminar notes vol. 10. (1982).
15. T. Sakuragi : On fuzzy quasi-ideals and their radicals in a commutative BCK-algebra, (submitted).
16. F. I. Sidky and S. A. Khatab : Nil radical of fuzzy ideal, Fuzzy Sets and Systems 47 (1992), 117 - 120, North - Holland.
17. Z. Yue : Prime L-fuzzy ideals and primary L-fuzzy ideals, Fuzzy Sets and Systems 27 (1988), 345-350, North-Holland.

SHISHIGAUCHI - CHŌ 12 - 31. NISHINOMIYA. HYŌGO 662. JAPAN
Tel. 0798 - 73 - 0817

THF4-1

ファジィ論理関数とルカシェヴィッツの含意に基づく標準形式について

On Normal Form Based on Fuzzy Logic Functions and Implication of Lukasiewicz

黒崎 美和子 Miwako Kurosaki
高木 昇 Nboru Takagi
中島 恭一 Kyoichi Nakashima

富山県立大学
Toyama Prefectural University

Abstract :In this paper, we will propose a normal form, which is suitable for data representation, based on fuzzy logic functions and Lukasiewicz implication. Recently, many studies have dealt with data representation based on fuzzy logic functions. This way enables us to understand easily the relationship between inputs and outputs of a given data because logic formulas of fuzzy logic functions are more similar to our natural language than the other numerical expressions in the representation of input-output data. The obtained logic formulas of fuzzy logic functions are usually sum-of-products forms (i.e., disjunctive forms). On the other hand, many practical applications (e.g., fuzzy reasoning etc.) are employed if-then rules in order to describe a given data or knowledge. Thus, we will introduce Lukasiewicz implication into fuzzy logic functions because it is more powerful than the other implications in realizing functions. Then, we will propose a normal form which is never represented by a nest of Lukasiewicz logic functions, and so this form is more suitable for data representation than fuzzy logic functions.

1.はじめに

近年，与えられた入出力データを論理式によって記述することを目的とした研究が盛んに行われている [1]．与えられたデータを論理式によって記述することにより，我々はそのデータ全体のおおよその傾向を把握することができると考えられる．従来の方法では，このようなデータの論理式表現の際に，積和形式を用いるのが一般的であった．しかし，ファジィ推論などにおいて人間の知識をデータとして与える場合は，我々の言語に近い表現である if-then 形式によって表されている場合が多い．このような表現方法を用いることにより，データに内在する論理関係をより明確にし，また，さらに応用の可能性を広げることもできると考えられる．

if-then 形式のルールは，通常含意関数により実現される．含意演算は，2値論理に関しては一意に定義されているが，多値論理への拡張はいくつかの方法が提案されており一意的でない．本文では，if-then 形式によるデータの論理式表現を得るために，ルカシェヴィッツによって定義された含意の演算に着目した．これは，いくつかの含意の中でルカシェヴィッツの含意が実現できる関数の範囲が広いこと，及び種々の性質が明かにされていることによる [3][4]．ルカシェヴィッツの含意を従来のファジィ論理関数の min, max, 1- の各演算に加えて，これらの演算に基づく標準形式を提案する．

2.諸定義

2.1 ファジィ論理関数

ファジィ論理関数に関する定義を行う．閉区間 $[0,1]$ を記号 V を用いて表すことにする．ファジィ論理関数において定義されている2項演算 $\vee, \wedge(\cdot)$ 及び単項演算 $\sim$ を，論理和 $x \vee y = \max(x,y)$，論理積 $x \wedge y = \min(x,y)$，否定 $\sim x = 1-x$ と定義する．但し $x,y \in V$ である．次にファジィ論理関数を定義する．

定義 1 n 変数ファジィ論理関数 $F : V^n \to V$ は，以下のように帰納的に定義される．

1. 定数 $0,1$ 及び変数 $x_i (i = 1,2,\ldots,n)$ はファジィ論理関数である．
2. G,H が論理式であれば，$(G \vee H),(G \wedge H)$ 及び $(\sim G)$ はファジィ論理関数である．
3. 上の 1.2.の有限回の繰り返しによって得られるもののみがファジィ論理関数である．

なお，演算の結合は，$\sim$，$\wedge(\cdot)$，$\vee$の順に強いものとする．

また，ファジィ論理関数には，次のような性質があることが明かにされている [2]．但し，論理値の集合 V_3 を，$V_3 = \{0,1/2,1\}$ とする．

性質 1 ファジィ論理関数 F_1 と F_2 が，V_3^n のすべての元 a について $F_1(a) = F_2(a)$ ならば，F_1 と F_2 は等しい．

2.2 ルカシェヴィッツ論理関数

ルカシェヴィッツ論理関数に関する定義を行う．p 値の論理値の集合 $\{0,1/(p-1),\ldots,(p-2)/(p-1),1\}$ を記号 V_p を用いて表すことにする．ルカシェヴィッツ論理関数において定義される演算は，以下の通りである．

定義 2 $x,y \in V_p$ について，含意及び否定の演算をそれぞれ以下のように定義する．

含意： $x \to y = \min(1-x+y,1)$
否定： $\sim x = 1-x$

次に，上の定義 2を用いてルカシェヴィッツ論理関数を定義する．

定義 3 n 変数ルカシェヴィッツ論理関数 $L : V_p^n \to V_p$ をは，以下のように帰納的に定義される．

1. 定数 $0,1$ 及び変数 $x_i (i = 1,2,\ldots,n)$ はルカシェヴィッツ論理関数である．
2. G,H がルカシェヴィッツ論理関数であれば，$(G \to H)$, 及び $(\sim G)$ はルカシェヴィッツ論理関数である．
3. 上の 1.2.の有限回の繰り返しによって得られるもののみがルカシェヴィッツ論理関数である．

ファジィ論理関数の論理演算はすべてルカシェヴィッツの含意 $(\to)$ と否定 $(\sim)$ を用いて表せる [3]．

2.3 ルールと標準形式

ここで，ファジィ論理関数とルカシェヴィッツ論理関数の定義域をそろえる意味で，本研究で用いるファジィ論理関数の定義域を V から V_p とする．また以下では，入力ベクトル $(x_1,\ldots,x_n)$ を X で表すことにする．

次に，論理式における一つの単位として，ルールを定義する．

定義 4 $F_1(X)$ 及び $F_2(X)$ をそれぞれファジィ論理関数とするとき，ルール $R(X)$ は次の式で表される．

$$R(X) = F_1(X) \to F_2(X)$$

任意のファジィ論理関数 Fはルールである．なぜならば，$F = 1 \to F$ で表せるからである．

ルカシェヴィッツ論理関数全体を考えると，$A \to B \to C$などのように含意が入れ子状に用いられる場合も考えらる．このような場合は逆に我々の言語から遠ざかってしまうと考えられるが，ルールの導入によってこれを防ぐことができる．

さらにここで，ルールを用いた標準形式 RBLLF(Rule Based Lukasiewicz Logic Function) を次のように提案する．

定義 5 *RBLLF* $L : V_p^n \to V_p$は以下のように帰納的に定義される．

1. ルールは *RBLLF* である．
2. G,Hが *RBLLF* であれば $(G \vee H),(G \cdot H)$ 及び $(\sim G)$ は *RBLLF* である．
3. 上の 1.2. の有限回の繰り返しによって得られるもののみが *RBLLF* である．

3.ルールを用いた標準形式

3.1 ルールを用いた標準形式の背景

ここでは RBLLF と積和形式による論理式表現を例を用いて比較しながら，RBLLF の背景について述べる．

我々は日常生活においてある選択を行う際，さまざまな条件から好みの度合を考えて決定している．たとえば洋服を購入するような時にでも，デザインの好み，布地の好み，縫製の具合，価格などの条件に対して全体としての好みの度合を決定している．ある人が何着かの洋服の中から 1 着を選んで購入する場合を考えてみる．デザイン，サイズ，色と布地，価格の 4 つの条件に対する満足度を，0 (不満)，5 (普通)，10 (満足) として 11 段階で評価し，全体としての好みの度合を同様に 11 段階で評価したものが表 1 であったとする．

表 1 例

条件＼洋服	A	B	C	D	E
デザイン (x_1)	10	4	2	2	4
色・布地 (x_2)	4	8	2	7	1
サイズ (x_3)	10	0	1	4	8
価格 (x_4)	8	6	0	9	7
全体としての好み $(f(X))$	10	4	1	3	7

ここで，従来研究されてきた積和形式を用いた論理式表現 [1] 及び本文で提案する RBLLF によって表 1 の入出力関係を表すと，式 (1) 及び式 (2) が得られる．但し，データの集合を $\Omega = \{A, B, C, D, E\}$ としたとき $\Sigma_{a\in\Omega}|f(a) - F(a)| = 0$，$\Sigma_{a\in\Omega}|f(a) - \mathrm{L}(a)| = 0$ である．

$$F(X) = (x_1 \cdot x_3) \vee (\sim x_2 \cdot x_4) \vee (x_1 \cdot \sim x_3 \cdot x_4 \cdot \sim x_4) \vee (x_2 \cdot x_4 \cdot \sim x_4) \quad (1)$$

この論理式は，例えば「デザインとサイズに満足している」か「色・布地に満足していなくても価格に満足している」ときに全体として満足しているというように解釈することができる．この入出力データは，RBLLF では次の論理式と入出力関係が一致している．

$$\mathrm{L}(X) = (x_4 \to x_1 \cdot x_3) \wedge (\sim x_2 \to x_1 \cdot x_3 \cdot x_4) \quad (2)$$

これは，「価格に満足しているならばデザインとサイズに満足してい」て「価格に不満であれば他の条件すべてに満足している」ときに全体として満足しているというルール形式の解釈が可能だと考えられる．

このように従来の積和形式による論理式表現であるファジィ論理関数に，ルカシェヴィッツの含意を加えることで，我々の言語により近いと思われる論理式表現を得ることが可能となる．

3.2 数学的性質

以下では，1 変数におけるルールの数学的性質について考察する．1 変数ファジィ論理関数の総数は 6 である [2]．これらをルールの前件部と後件部に総当たり的に適用することにより，1 変数のルールをすべて得ることができる．前述のとおり，すべてのファジィ論理関数はルールとして表すことが可能であり，さらにその他に 3 通りのルールが存在する．これらルールと各々の否定をすべて合わせると 12 通りになり (式 (3)〜式 (5))，そのすべてを同一座標平面上に示したものが図 1 である．

$$\mathrm{L}_1(x) = 1 \to 0 \quad (3)$$
$$\mathrm{L}_2(x) = 1 \to 1 \quad (4)$$
$$\mathrm{L}_3(x) = 1 \to x \quad (5)$$
$$\mathrm{L}_4(x) = 1 \to \sim x \quad (6)$$
$$\mathrm{L}_5(x) = 1 \to (x \cdot \sim x) \quad (7)$$
$$\mathrm{L}_6(x) = 1 \to (x \vee \sim x) \quad (8)$$
$$\mathrm{L}_7(x) = \sim x \to x \quad (9)$$
$$\mathrm{L}_8(x) = x \to \sim x \quad (10)$$
$$\mathrm{L}_9(x) = (x \vee \sim x) \to (x \cdot \sim x) \quad (11)$$
$$\mathrm{L}_10(x) = \sim (\sim x \to x) \quad (12)$$
$$\mathrm{L}_11(x) = \sim (x \to \sim x) \quad (13)$$
$$\mathrm{L}_12(x) = \sim ((x \vee \sim x) \to (x \cdot \sim x)) \quad (14)$$

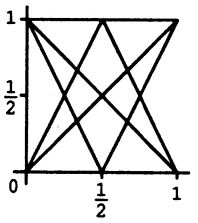


図 1 1 変数のルール及びルールの否定

RBLLF はルールとその否定に対して min, max , 1- の演算を施したものであると言い換えることができるので，RBLLF によって表される任意の論理関数は，図 1 の線上をたどることで得られる．このような論理関数には，次のような性質がある．

性質 2 論理値の集合 V_7 を $V_7 = \{0, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 1\}$ とする．このとき *RBLLF* L_1 と L_2 が，V_7 のすべての元 a について $L_1(a) = L_2(a)$ ならば，L_1 と L_2 は等しい．

4.おわりに

本文では，論理演算においてファジィ論理関数とルカシェヴィッツの含意を用いてルールという単位を定義した上で，これに基づく標準形式を提案した．このような標準形式は，多量のデータを論理式によって表現する際に有効であると考えられる．また，このような標準形式を持つ論理関数は 1 変数の場合 $\{0, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 1\}$ の 7 値の入力に対する出力を与えることで一意に定まることがわかった．

今後の課題としては，このような標準形式で表される論理関数の n 変数における表現範囲を明らかにすること，与えられた真理値表から標準形式を得ることなどが考えられる．

参考文献

[1] 菊池 浩明, 向殿 政男 : "ファジー論理関数の当てはめ問題－論理式による知識獲得－", 信学論 D-I, J77-D-I, No.9,pp.595-604(1994-09)

[2] 向殿 政男 : "ファジィ論理における 2，3 の性質について", 電子通信学会論文誌, Vol.58-D No.3 pp:150-157(1975-03)

[3] N. Takagi, K. Nakashima and M. Mukaidono: "A Necessary and Sufficient Condition for Lukasiewicz Logic Functions," *Proc. IEEE 26th Int'l Symp. on Multiple-Valued Logic*, pp. 37-42, 1996.

[4] R. McNaughton: "A Theorem about Infinite-Valued Sentential Logic," *The Journal of Symbolic Logic*, vol. 16, pp. 1-13 1951.

連絡先 〒 939-03 富山県射水郡小杉町黒河 5180
富山県立大学工学部制御システム工学講座 黒崎 美和子
TEL(0766)56-7500 内線 463　FAX(0766)56-8022
e-mail kurosaki@mozart.pu-toyama.ac.jp

遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ論理関数に基づくデータ表現

Data Representation Based on Fuzzy Logic Functions Using Genetic Algorithm

轡田 崇　　高木 昇　　中島 恭一

Takashi Kutsuwada　Noboru Takagi　Kyoichi Nakashima

富山県大学工学部電子情報工学科

Dept. of Elec. & Informatics, Toyama Prefectural University

Abstract: In this paper, we propose one way of representing given data by means of fuzzy logic functions. A fuzzy logic function is defined as a mapping from $[0,1]^n$ into $[0,1]$ expressed in terms of a logic formula which consists of n variables, the constants 0 and 1, and the three logical connectives min, max, and $(1-)$. Data representation by means of logic formulas of fuzzy logic functions enables us to understand the relationship between input and output because logic formulas are more similar in the representation to our natural language than numerical formulas. The algorithm which can find a fuzzy logic function with minimum error for data has already been proposed. However, as the time complexity of this algorithm exponentially increases with the numbers of variables and data, it does not allow us to deal with enough number of data. Therefore, in this paper, we will propose one method which adopts a genetic algorithm. In this way, we can find a fuzzy logic function which contains less, but not minimum error between the obtained fuzzy logic function and data.

1　はじめに

最近ファジィ論理関数により入出力データを近似的に記述しようとする研究が行われている [5]. ファジィ論理関数とは論理式により記述される $[0,1]^n$ から $[0,1]$ の写像のことである. 従って, ファジィ論理関数によるシステムのモデル化は, 自然言語に近い論理式により抽象的に記述されているため, システムの振る舞いを大雑把に把握することが容易であると考えられる. 反面, ファジィ論理関数は変数 n に対して高々有限個しか存在していない [1, 2, 3, 4]. 従って, ある不完全記述な関数 $f : A \to [0,1]$(但し, $A \subseteq [0,1]^n$ で有限) が与えられたとき,

当てはめ問題: $\sum_{a \in A} D(f(a) - F(a))$ が最小となるファジィ論理関数 F を求める. 但し, $D(f(a) - F(a))$ は $f(a)$ と $F(a)$ の距離 (誤差) を表している.

なる問題を考えることが出来る [5].

ファジィ論理関数の当てはめ問題を解くアルゴリズムは文献 [5] で既に与えられている. しかしながら, このアルゴリズムの計算量は変数に対して指数オーダで増加するためあまり現実的でない. そこで, 本文では遺伝的アルゴリズムを用いてファジィ論理関数の当てはめ問題を解くことを試みる. 本文で提案する手法では, 得られた解が最適であるか否かを判定することは一般的には不可能である. 従って, まず, 本手法が有効に機能する範囲 (変数およびデータ数) を計算機実験により求める. 次に, 本手法の有効範囲内の実データを用いた実験結果を示す.

2　諸定義

真理値の集合を 0 から 1 の閉区間 $[0,1]$ で与え, これを記号 V で表す. このとき, 論理演算 AND($\wedge$), OR($\vee$) および NOT($\sim$) を以下のように集合 V 上で定義する.

$$a \wedge b = \min(a,b), \quad a \vee b = \max(a,b), \quad \sim a = 1 - a,$$

但し, $a, b \in V$. このとき, 論理式は以下で定義される.

定義 1 論理式とは, 以下のようにして帰納的に定義される.

(1) 変数 $x_1, \ldots, x_n$ および定数 0 と 1 は論理式である.

(2) G, H が論理式ならば $(G \wedge H)$, $(G \vee H)$ および $(\sim G)$ も論理式である.

(3) *(1)* および *(2)* の有限回の操作によって得られるもののみが論理式である.

次に, n 変数のファジィ論理関数の定義を与える.

定義 2 n 変数のファジィ論理関数 f とは, 論理式によって表現される写像 $f : V^n \to V$ のことである.

以下, 一般の n 変数について議論するので, n 変数ファジィ論理関数を単にファジィ論理関数と呼ことにする. また, 簡単のために論理式とそれが表現するファジィ論理関数とを同一視することにする. 尚, 論理式を記述するときに, AND($\wedge$) はしばしば省略されることがある.

3　遺伝的アルゴリズムによる問題の定式化

本節では, ファジィ論理関数の当てはめ問題を遺伝的アルゴリズムを用いて求める手法について述べる.

まず, はじめにファジィ論理関数を染色体としてコード化する方法を示す. 任意のファジィ論理関数は加法形式 (積和形式) に展開可能である [2, 3]. 従って, 本文ではファジィ論理関数の加法形式に着目して, 各ファジィ論理関数を染色体としてコード化する方法を用いる.

ファジィ論理関数では, ある変数の肯定 x およびその否定 $\sim x$ が同時に同一の積項に存在する場合がある. 従って, 一般の n 変数の場合, 各積項 α は $2n$ ビットの 2 進数 c によって以下に示すように一意的に特徴付けることが出来る.

$$c = \pi_1 \pi_2 \ldots \pi_{2n-1} \pi_{2n}$$

但し, $i = 1, 2, \ldots, n$ に対して,

$$\pi_i = \begin{cases} 1 & \alpha \text{に } x_i \text{が存在するとき} \\ 0 & \alpha \text{に } x_i \text{が存在しないとき} \end{cases}$$

$$\pi_{n+i} = \begin{cases} 1 & \alpha\text{に}\sim x_i\text{が存在するとき} \\ 0 & \alpha\text{に}\sim x_i\text{が存在しないとき} \end{cases}$$

本文では, 便宜上 $2n$ ビットの各 2 進数を積項染色体と呼ぶことにする. 従って, 積項染色体の複数個の集まりはあるファジィ論理関数の一つの加法形式に対応している. 故に, 積項染色体または積項染色体の複数個の集まりはあるファジィ論理関数に対応していると言えるので, この積項染色体の集まりを単に染色体と呼ぶことにする. つまり, 積項染色体が m 個存在している染色体とは, あるファジィ論理関数のある加法形式に一対一に対応している $2nm$ ビットの 2 進数表示のことである

例 1 以下に示される 3 変数ファジィ論理関数 fの加法形式 $f = x_1x_2x_3 \vee x_1 \sim x_1 \vee \sim x_2x_3 \sim x_3$と 3 つの 6 ビット 2 進数 $111000 - 100100 - 001011$ は一対一に対応している.

次に, 交叉の方法について述べる. 交叉は最も単純な一点交叉を用いる. まず, 集団の中からランダムに二つの親となる個体 A および Bを選択する. m_A および m_Bをそれぞれ親 A および親 Bの積項染色体数とすれば, 個体 A の染色体のビット長は $2nm_A$, 個体 Bのビット長は $2nm_B$となる. 一点交叉における交叉点は, これら $2nm_A$と $2nm_B$の小さい方の値を上限とする乱数によって決定される. 交叉後に新しく生成された二つの子の染色体のビット長はそれぞれ $2nm_A$および $2nm_B$となり, 親の染色体のビット長と一致する. 従って, 得られた子の染色体もあるファジィ論理関数の一つ加法形式に対応していることが保証される.

次に, 突然変異について述べる. まず, 集団 (個体群) 全体の数%にあたる個体群を評価値の高い順に選択し, これらの染色体はその遺伝子型のまま次世代に継承させる. 次に, 集団 (個体群) 全体の 10〜20 %にあたる個体群を評価値の低い順に選択し, これらの染色体は次世代には継承せず, 全く新しい個体を, 削除した個体数に等しい数だけランダムに発生させ, これらを次世代に継承させる. 最後に, 残りの個体群の中からランダムに個体を選択し, 更に選択された個体を表現する染色体のなかからランダムに積項染色体を選択する. 選択された積項染色体の各遺伝子を対立遺伝子に置き換える. 以上が本手法で用いた突然変異である.

最後に適応度の評価の方法について述べる. 本文では, 与えられた入出力データに対して誤差が最小となるファジィ論理関数を求めることを目的としている. 従って, 与えられた入出力データとの平均二乗誤差を評価関数として用いる. つまり, 与えられた入出力データを $F : A \to V(A$ は V^nの有限部分集合) とすると, あるファジィ論理関数 fの評価値 E_fは

$$E_f = \sum_{a \in A} (F(a) - f(a))^2$$

で与えられる. 従って, E_fの値の小さいファジィ論理関数 f ほど評価の高いファジィ論理関数である.

4 実験結果

まず, 誤差 0 のファジィ論理関数が存在するデータを本手法に適応して, この結果から本手法についての妥当性を述べる. 次に, 気象データに対して本手法を適用したので, その結果を示す.

4.1 本手法の妥当性

66 種類の誤差 0 となるファジィ論理関数が存在する入出力データを作成した. 作成した 66 種類のデータを本手法に適用した結果を表 4.1に示す. 但し, 終了条件は誤差 0 のファジィ論理関数が得られるか, または一万回の世代交代を終了したかのいずれかである. 表 4.1の各値は, 最適解 (つまり誤差 0 のファジィ論理関数) が得られるまでの世代数の平均値 (それぞれ二回試行を行っているので, その平均値のこと) を示している. 但し, 括弧付きの数値で示されている場合には, 二回の試行とも一万回で収束しなかったことを表している. このとき, 括弧内の数値は, 終了時点での評価値の最も高いファジィ論理関数の誤差の平均値を表している.

表 4.1より, 本手法は 6 変数以下でデータ数が 500 程度ならばほとんどの試行に対して最適解を導出できるということが言える.

表 1 誤差 0 のファジィ論理関数が存在するデータに対する結果 (A はデータ数, Bは変数)

$A \backslash B$	2	3	4	5	6	7
10	0	7	3.5	18.5	17	21
50	0	6.5	97	406.5	805.5	3732.5
100	0	7.5	78	3547(0.3)	275	2335.5
150	0	16.5	17.5	517.5	4289.5	2618
200	0	16.5	337.5	262	3266	(1.6)
250	0	3.5	1281.5	1875	2486	(0.65)
300	2.5	1	17.5	56	6681	2694.5
350	0	6	11	699	2798.5	(1.75)
400	0.5	11	351.5	27.5	3648.5	(2.75)
450	0.5	3	236	707	(1.55)	4898.5
500	0	17	9	664	3306.5	(2.0)

4.2 気象データに対する実験結果

ここでは, 富山地方の気象データに対して本手法を適用し, どのような結果が得られたかを示す. 3 入力 (一日毎の平均気圧, 平均気温, 平均湿度) で出力は降水量である. ここで, データ (60ヶ月分) の各値を 0 から 1 の実数値に正規化を施し, 正規化されたデータに対して本手法を適用する. 導出された 60 個の論理式のうち, 出現頻度の高い順に上位五つを表 4.2に示す.

表 2 実験結果 (x_1: 平均気圧, x_2: 平均気温, x_3: 平均湿度)

順位	論理式	出現回数
1	$\sim x_1 \sim x_2x_3$	17ヶ月
2	$\sim x_1x_2 \sim x_2x_3$	11ヶ月
3	$x_1 \sim x_1 \sim x_2x_3$	8ヶ月
4	$\sim x_1x_3$	7ヶ月
5	$\sim x_1x_2x_3$	5ヶ月

参考文献

[1] R. C. T. Lee and C. L. Chang, "Some properties of fuzzy logic," *Information and Control*, 1971, vol. 19, pp. 417-431.

[2] 向殿政男, "ファジィ論理の二, 三の性質について," *IECE Trans.*, 1975, vol. 58, pp. 150-175.

[3] 向殿政男, "ファジィ論理関数の代数構造とその最簡形式および既約形式," *IECE Trans.*, 1975, vol. 58, pp. 748-755.

[4] A. Kandel and J. M. Francioni, "On the properties and applications of fuzzy-valued switching function," *IEEE Trans. on Compute.*, 1980, vol. 29, no. 11, pp. 986-994.

[5] 菊池浩明, 向殿政男, "ファジー論理関数の当てはめ問題," *Trans. on IEICE*, 1994, vol. J77-D-I, no. 9, pp. 595-604.

[問い合わせ先]
〒 939-03 富山県射水郡小杉町黒河 5180
富山県立大学工学部電子情報工学科　高木 昇
Tel: (0766)56-7500 内線 461
fax: (0766)56-8022
e-mail: takagi@pu-toyama.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THF4-3

ファジィ論理関数に基づくデータ表現法における最適解の探索について

On Search for Optimal Solutions in Data Representation Based on Fuzzy Logic Functions

轡田 崇 Takashi Kutsuwada　高木 昇 Noboru Takagi　中島 恭一 Kyoichi Nakashima

富山県立大学工学部電子情報工学科
Dept. of Elec. & Informatic, Toyama Prefectural University

Abstract :In this paper, we propose one way of representing given data by means of fuzzy logic functions. A fuzzy logic function is defined as a mapping from $[0,1]^n$ into $[0,1]$ expressed in terms of a logic formula which consists of n variables, the constants 0 and 1, and the three logical connectives min, max, and $(1-)$. Data representation by means of logic formulas of fuzzy logic functions enables us to understand the relationship between input and output because logic formulas are more similar in the representation to our natural language than numerical formulas. The algorithm which can find a fuzzy logic function with minimum error for data has already been proposed. However, as the time complexity of this algorithm exponentially increases with the numbers of variables and data, it does not allow us to deal with enough number of data. Therefore, in this paper, we will propose one method which adopts a *k-shortest-path algorithm*. In this way, we can find a fuzzy logic function faster than the previous system. But the present system needs a lot of memory to find it.

1 はじめに

近年，与えられた入出力データに内在する変数間の大雑把な関係をファジィ論理関数をもちいて表現する方法が研究されている．この方法は入出力データ間の写像との誤差が最小となるファジィ論理関数を求め，その論理式表現によりデータ内の関係を表そうとしようとするものである．前回の報告では誤差最小のファジィ論理関数を求めるアルゴリズム[1]をワークステーション上に実装した結果[6]を示した．しかし，その計算量が入力変数やデータ数の増加に伴い指数的に増加するため，大量データを扱うことが困難であった．

今回我々は誤差最小のファジィ論理関数を求めるアルゴリズムに対して，k-shortest-path(以下 KSP と略す) アルゴリズムが適用できることに着目し，最適解の導出における計算時間の短縮を試みた．本稿では，k-sortest-path アルゴリズムの当てはめアルゴリズムへの導入について述べ，前システム[6]との比較をおこなう．

2 ファジィ論理関数

真理値の集合 V, V_3 を $V=[0,1]$, $V_3=\{0, 0.5, 1\}$ とする，論理式とは、定数 0，1 と変数 x_i $(i=1,\cdots,n)$ と論理演算$\vee$，$\wedge$，$\sim$ の有限回の繰り返しである．論理演算は 次式で定義される．

$$\begin{aligned} x \wedge y &= \min(x,y) \\ x \vee y &= \max(x,y) \\ \sim x &= 1-x \end{aligned}$$

但し $x, y \in V$. n 変数のファジィ論理関数 f とは，論理式が表現する V^n から V への写像 f で定義する．

n 変数の場合，リテラルは $2n$ 個存在する．つまり，$x_1,\cdots,x_n,\sim x_1,\cdots,\sim x_n$ である．また，x_i' でリテラル x_i または $\sim x_i$ のいずれかを表すものとする．つまり，$x_i'=x_i$ ならば $\sim x_i'=\sim x_i$，$x_i'=\sim x_i$ ならば $\sim x_i'=x_i$ である．ここで，以下に示されるような $2n$ 個のリテラルからなる不等式によって，V^n の部分集合を定めることができる．

$$S_{x'_{\pi(1)},\cdots,x'_{\pi(n)}} = \Big\{ (x_1,\cdots,x_n) \in V^n \mid x'_{\pi(1)} \le \cdots \le x'_{\pi(n)} \le \sim x'_{\pi(n)} \le \cdots \le x'_{\pi(1)} \Big\}$$

但し，π は集合 $\{1,\cdots,n\}$ 上のある順列を表している．ここで，各 V^n の部分集合 $S_{x'_{\pi(1)},\cdots,x'_{\pi(n)}}$ をセル空間と呼ぶことにする．一般に，ファジィ論理関数では，$x_i' \le 1/2 \le \sim x_i'$ が成立しているので上式で定義されるセル空間は，次式で定義しなおすことができる．

$$S_{x'_{\pi(1)},\cdots,x'_{\pi(n)}} = \Big\{ (x_1,\cdots,x_n) \in V^n \mid x'_{\pi(1)} \le \cdots \le x'_{\pi(n)} \le 1/2 \Big\}$$

集合 $\{1,\cdots,n\}$ 上の異なる順列の総数は $n!$である．また，ある順列に対しては，$x'_{\pi(i)}$ の選び方には二通りあるので，結局 $x'_{\pi(1)},\cdots,x'_{\pi(n)}$ の決め方は 2^n 通り存在する．従って，n 変数の場合，異なるセル空間の数は $2^n \cdot n!$個存在することになる．

ここで，定義域をセル空間に限った部分関数を，次の定理 1に示す，ファジィ論理関数の必要十分条件から得るとともに，写像間の距離を定義 1によって定義する．

定理 1 [2] 関数 $f: V^n \to V$ がファジィ論理関数であるための必要十分条件は，各セル空間 $S_{x'_{\pi(1)},\cdots,x'_{\pi(n)}}$ の任意の元 $(x_1,\cdots,x_n)$ に対する f の値 $f(x_1,\cdots,x_n)$ が $x_1,\cdots,x_n,\sim x_1,\cdots\sim x_n, 0$ または 1 であることである．

定義 1 写像 $f: A \to V$ と $g: B \to V$ の距離 $D(f,g)$ を次式で定める．

$$D(f,g) = \sum_{a \in A \cap B} | f(a) - g(a) |^2 \qquad (1)$$

3 KSP アルゴリズムを用いた最適解の探索

3.1 探索のながれ

当てはめアルゴリズム[1]では，ファジィ論理関数の局所的に決められる性質に着目し，問題をいくつかの小規模な部分問題に分割して局所解を求め，それらを統合して全域的な解とする分割統治のアプローチをとる．ここで，は分割の際にセル空間[2]の概念を導入した．

前システム[6]においては，各セル空間から 1 つの部分関数を選ぶ組合せ全てについて，ファジィ論理関数となるかを判定し最適解を導出する手法を用いた．結局前システムでは，深さ優先探索を実現していることになる．なお，簡単な評価による枝刈を解の探索時に実行している．ここで入力変数が n で，入力データが異なる m 個の

セル空間に分割されたときには，総組合せ数は$(2n)^m$通り存在する．この組合せ数は，変数やデータ数の増加に伴って飛躍的に多くなり，計算の大半を占めることになる．

ここで計算時間の短縮をはかるためにKSPアルゴリズムを適用する．KSPアルゴリズムでは，まず最初に求めたいパス数kを設定し，重み付き有向連結グラフにおける始点から終点までのパスを，重みの合計の小さいパスから順にk個求めることができる．

いま，扱うV^nの有限部分集合Aの各要素がm個の異なるセル空間$S_1,\cdots,S_m$に分割されたとする．定理1より，あるセル空間S_iに属する任意の入力元$a \in S_i$の値$f(a)$が，$x_1,\cdots,x_n,\sim x_1,\cdots,\sim x_n$の$2n$個のリテラルのいずれかで定まることが，$f$のファジィ論理関数であるための必要十分条件となる．この条件を満たすのは，各セル空間から$2n$個のリテラルを独立に選び出す組合せ数だけ存在し，その数は$(2n)^m$通りとなる．ここで図1に示すように，セル空間$S_1,\cdots,S_m$を一列に並べ，リテラルx'_iと与えられた入出力データ間の写像f_0との誤差$D(f_0,x'_i)$をパスの重みとする．この非巡回有向グラフからKSPアルゴリズムにより，節点1から節点$m+1$までのパスを，誤差の和が最小順にk個求めることができる．すなわち，この節点1から節点$m+1$までのパスを求めることは，各セル空間からリテラルを1つずつ選んだことに相当し，ある写像fが得られることになる．KSPアルゴリズムにより求まったパス(すなわちf)を，誤差の和が小さいものから順にファジィ論理関数となるかを判定し，最初にファジィ論理関数となるfが求めたい解となる．この探索方法は，幅優先探索であるといえる．

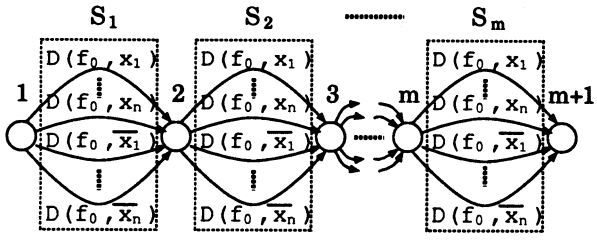


図1 KSPアルゴリズムの適用

以下にKSPアルゴリズムを適用した誤差最小のファジィ論理関数導出の流れを示す．

input: V^nの有限部分集合$A=\{a_1,\cdots,a_m\}$と，Aの各要素に対する評価値を与える写像$f_0 : A \to V$.

step1: 集合Aをセル空間に基づいて分割する．つまり，

$$A_{x'_{\pi(1)},\cdots,x'_{\pi(n)}} = \left\{ a \in A \mid a \in S_{x'_{\pi(1)},\cdots,x'_{\pi(n)}} \right\},$$

$$A = \bigcup_{for\ all\ x'_{\pi(1)},\cdots,x'_{\pi(n)}} A_{x'_{\pi(1)},\cdots,x'_{\pi(n)}}$$ となるように集合Aを分割する．

step2: 各セル空間について，部分関数$0,1,x_1,\cdots,x_n,\sim x_1,\cdots,\sim x_n$と$f_0$の距離の総和を求める．

step3: 各セル空間から部分関数を1つずつ選び出す組合せをKSPアルゴリズムを用いて誤差最小順にk個求める．

step4: 誤差の小さい組合せから順にファジィ論理関数となるかどうかを判定する．最初に見つかったファジィ論理関数が最適解となる．ただし，最適解は1つとは限らないので，同じ誤差の組合せについても判定をおこなう．

step5: 誤差最小のファジィ論理関数の論理式表現を求める．

output: 誤差最小のファジィ論理関数f^*とその論理式F^*.

3.2 システムの比較，評価

KSPアルゴリズムによる探索と深さ優先探索の計算時間を表1に示す．表1におけるセル空間は，セル空間の総数と入力元が存在するセル空間の数を示している．また括弧内の数字は，KSPアルゴリズムによる探索において解が見つかったときのパス数を表す．たとえば，表1の2変数の場合，入力データは8つのセル空間中6つの異なるセル空間に分割されたことを表し，誤差最小順における2番目のパスにおいてファジィ論理関数が得られたことを表す．

表1より変数やセル空間の増加により，深さ優先探索アルゴリズムとの計算時間の差が顕著になっていることがわかる．

KSPアルゴリズムは実行前に求めるパス数を決定しなくてはならない．表2は，このパス数の変化に対する計算時間をまとめたものである．ここでは3変数の入出力データを用いた．たとえば，入力データ数が20においては，まずKSPアルゴリズムで100個のパスを求め，その後，ファジィ論理関数であるかを順番に判定し，80番目のパスで解が求まったことを表している．

表1 計算時間の比較(sec)

n	セル空間	誤差	KSP	深さ優先
2	6/8	1.8	0.07(2)	0.23
3	16/48	0.5	4.98(80)	143
4	20/384	0.1	3.76(64)	12660

表2 kの変化に対する計算時間(sec)

data	セル空間	誤差	k_{min}	k_{100}	k_{200}	k_{500}
20	16/48	0.5	80	7.09	32.91	221
50	29/48	0.5	65	14.05	62.13	464
100	42/48	0.5	65	22.01	91.53	720

4 まとめ

今回の比較結果から，KSPアルゴリズムの適用により計算時間の短縮が示された．しかしながらKSPアルゴリズムは，その性質から求めるパス数を設定する必要がありる．このため，パス数を小さな値で設定すると解が得られないこともあり得る．また，KSPアルゴリズムはその計算過程において過去のパスの情報を蓄えておく必要があり，求めることのできる最大パス数は使用コンピュータのメモリ量に依存する．すなわち，大量データを扱う場合，扱うことのできるメモリ量内に解がなければならない．

今回はファジィ論理関数の判定を，パスを求めてから一括しておこなったが，節点間で逐次判定することにより探索空間の減少が期待できる．また，隣り合うセル空間の並び方を工夫することにより，より効果的に処理できると考えられる．

参考文献

[1] 菊池 浩明, 向殿 政男: "ファジー論理関数の当てはめ問題–論理式による知識獲得–", 信学論 D-I, J77-D-I, No. 9, pp. 595-604(1994-09)

[2] M. Mukaidono: "A Necessary and Suffient Condition for Fuzzy Logic Functions", in Proc. The 9th Int. Sym. on Multiple-Valude Logic, IEEE, pp. 159-166(1976)

[3] 高木 昇 他: "不完全多値クリーネ関数について", 多値論理とその応用研究会 技術研究報告, vol, MVL-95. pp. 19-28(1995)

[4] H. Kikuch, N. Takagi and M. Mukaidono: "Identification of Fuzzy logic Functions with Constns", in Proc. Int. Joint Conference of the 4th IEEE Int. Conference on Fuzzy Systems and the 2nd Int. Fuzzy Engineering Symposium, pp. 2165-2172(1995)

[5] James R.Evans,Edward Minieka : "Optimization Algorithms for Networks and Graphs", pp. 102-109(1992)

[6] 巻田 崇, 高木 昇, 菊池 浩明, 中島 恭一 : "ファジィ論理関数による知識抽出システムの開発", 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 407-410(1996)

連絡先 〒939-03 富山県射水郡小杉町黒河 5180
富山県立大学工学部制御システム工学研究室　巻田 崇
TEL : (0766)56-7500 内線 463　FAX : (0766)56-8022
e-mail : taka@mozart.pu-toyama.ac.jp

THF4-4

ファジイ数間のパラメトリックな順序関係とファジイ最短路問題への応用

Parametric Order Relations on Fuzzy Numbers and Their Applications to Fuzzy Shortest Route Problems

古川　長太
Nagata FURUKAWA
創価大学　工学部　情報システム学科
Dept. of Information Systems Science, Fac.of Engineering, Soka University

Abstract- Two types of parametric order relations on the class of symmetric fuzzy numbers are introduced. The first type one is a total order relation on the class of fuzzy numbers, but the second one is not necessarily a total order. We consider minimizing problems in which objectives are of fuzzy valued. A minimal solution among fuzzy numbers means a nondominated solution with respect to the fuzzy max order on the class of fuzzy numbers. The notion of a " mutually nondominant " set of fuzzy numbers is introduced. Necessary and sufficient conditions for a set of mutually nondominant minimal solutions to be exhaustively detected are given for each case of the first and the second types of order relations. As an application of the above-mentioned results, fuzzy shortest route problems are studied and a numerical example is illustrated.

Key words : Ranking of fuzzy numbers, fuzzy max order, parametric order, fuzzy shortest route problem.

1．はじめに

目的関数の値がファジイ数として与えられる最小化問題を、ファジイマックス順序に関して解こうとすると、最小解が存在することは極めて稀で一般に沢山の極小解が存在する。このとき、極小解の一つをどれでもいいから求めようとするなら簡単であるが、極小解の出来るだけ多くを、場合によってはそれらの全てを求めようとすると、種々の困難が生じて来る。

本論文ではこの問題を解決するために、ファジイ数の間にパラメトリックな２種類の順序関係を導入し、パラメータの値を０と１の間で少しづつ変えてこれら２種類の順序関係を併用することにより、上述の意味の極小解を殆どすべて検出できることを示す。応用としてファジイ最短路問題を扱い、数値例をあげて説明する。

2．ファジイ数とファジイマックス順序

定義２．１　ファジイ数 A, B に対して、ファジイマックス順序は次の関係式で定義される。

$$A \preceq B \Leftrightarrow (\inf A_\alpha \le \inf B_\alpha \text{ and } \sup A_\alpha \le \sup B_\alpha) \quad \forall \alpha \in [0,1], \tag{2.1}$$

ここで A_α , B_α はそれぞれ A , B の α カット。

定義２．２　$L : \mathbf{R} \to \mathbf{R}$ は次の条件をみたすとする。 (i) $L(x) = L(-x) \quad \forall x \in \mathbf{R}$,

(ii) $L(x) = 1 \quad \text{iff} \quad x = 0$,

(iii) L は $[0, +\infty)$ 上で広義単調減少,

(iv) $x_0 = \inf\{x > 0 \mid L(x) = 0\}$ とおくとき

$0 < x_0 < +\infty$ が成り立つ。

このとき L を**型関数** (shape function)と呼び、(iv) の x_0 を L の**零点**と呼ぶ。

定義２．３　m を任意の実数, α を任意の正数とする。ファジイ数 A のメンバーシップ関数 μ_A が型関数 L を使って

$$\mu_A(x) = L((x-m)/\alpha) \vee 0, \quad x \in \mathbf{R}, \tag{2.2}$$

と表されるとき A を L-ファジイ数とよぶ。

簡単のために L-ファジイ数 (2.2) をパラメータで表現して

$$A=(m,\alpha)_L$$

と書く。

定理 2.1 L を型関数、x_0 をその零点とする。このとき

$$A=(m,\alpha)_L,\ B=(n,\beta)_L,$$
$$\alpha\geq 0,\ \beta\geq 0,$$

に対して次の関係が成立する。

$$A\preceq B \Leftrightarrow x_0|\alpha-\beta|\leq(n-m). \qquad (2.3)$$

3. パラメトリックな順序関係

定義 3.1 λ を $0\leq\lambda\leq 1$ をみたす任意の数とする。$A=(m,\alpha)_L$, $B=(n,\beta)_L$ に対して次式で2種類の順序関係を定義する。

$A\leq_\lambda B \Leftrightarrow$

$$\begin{cases}\text{(i)}\ A\preceq B,\\ \quad\text{or}\\ \text{(ii)}\ \lambda x_0|\alpha-\beta|<n-m<x_0|\alpha-\beta|,\\ \quad\text{or}\\ \text{(iii)}\ |n-m|<\lambda x_0(\beta-\alpha).\end{cases}$$

$A\leq^\lambda B \Leftrightarrow$

$$\begin{cases}\text{(i)}\ A\preceq B,\\ \quad\text{or}\\ \text{(ii)}\ 0<\lambda x_0(\beta-\alpha)\leq|n-m|<x_0(\beta-\alpha),\\ \quad\text{or}\\ \text{(iii)}\ 0<n-m<\lambda x_0|\alpha-\beta|,\\ \quad\text{or}\\ \text{(iv)}\ m=n\ \text{ and }\ \alpha<\beta.\end{cases}$$

定理 3.1 任意の λ に対して順序関係 $\leq_\lambda$ は、L-ファジイ数の集合上の全順序関係である。

定義 3.2 $A=(m,\alpha)_L$, $B=(n,\beta)_L$ に対して

$A\succ\prec B \Leftrightarrow$ [neither $A\preceq B$ nor $B\preceq A$ holds].

このとき A と B は**互いに非支配的**であるという。

補題 3.1

$A=(m,\alpha)_L$, $B=(n,\beta)_L$, $C=(l,\gamma)_L$ に対して、

$$m<\mathrm{Min}\{n,l\}\ \text{ and }\ \alpha<\mathrm{Min}\{\beta,\gamma\}$$

ならば、$0<\lambda<1$ をどのようにとっても、定義 3.1 のどちらの順序関係に関しても A, B, C の中で A が最小である。

以後、L-ファジイ数の center の値と deviation パラメータの値をそれぞれ x 軸, y 軸にとった xy 平面を考え、L-ファジイ数

$$A=(m,\alpha)_L$$

を xy 平面上の点

$$(m,\alpha)$$

と同一視することにする。xy 平面における2点 A, B を結ぶ線分の勾配を γ_{AB} で表す。また簡単のために $x_0=1$ としておく。

定理 3.2

$\mathbf{G}=\{A_1,A_2,\cdots,A_N\}, A_i=(m_i,\alpha_i), i=1,2,\cdots N$ において、

$$\left.\begin{array}{l}m_i<m_{i+1}\\ \alpha_i>\alpha_{i+1}\end{array}\right\} \quad i=1,2,\cdots,N-1 \qquad (3.1)$$

とし、さらに

$$A_i\succ\prec A_{i+1},\quad i=1,2,\cdots,N-1, \qquad (3.2)$$
$$\gamma_{A_{i-1}A_i}<\gamma_{A_iA_{i+1}},\quad i=2,3,\cdots,N-1, \qquad (3.3)$$

を仮定する。各 $k=1,2,\ldots,N$ に対し

$$\lambda_{ki}=\frac{m_k-m_i}{\alpha_i-\alpha_k},\qquad i=1,2,\cdots,N,\ \ i\neq k$$

とおく。このとき

$$0<\lambda_{12}<\lambda_{23}<\cdots<\lambda_{k-1,k}$$
$$<\lambda_{k,k+1}<\cdots<\lambda_{N-1,N}<1$$

が成立して、順序関係 $\leq_\lambda$ に関して次のことが成り立つ。

$0\leq\lambda\leq\lambda_{12}$ ならば $\mathbf{G}$ の中で A_1 が最小

$\lambda_{12}<\lambda\leq\lambda_{23}$ ならば $\mathbf{G}$ の中で A_2 が最小

.....

$\lambda_{k-1,k}<\lambda\leq\lambda_{k,k+1}$ ならば $\mathbf{G}$ の中で A_k が最小

.....

$\lambda_{N-1,N}<\lambda\leq 1$ ならば $\mathbf{G}$ の中で A_N が最小。

定理 3.3 順序関係 $\leq^\lambda$ は (3.1) と (3.2) をみたす L-ファジイ数の列の上では全順序関係である。

定理 3.4

$\mathbf{G}=\{A_1,A_2,\cdots,A_N\}, A_i=(m_i,\alpha_i), i=1,2,\cdots N$ に対して (3.1), (3.2) および

$$\gamma_{A_{i-1}A_i}>\gamma_{A_iA_{i+1}},\quad i=2,3,\cdots,N-1. \qquad (3.4)$$

を仮定する。λ_{ki} を定理 3.2 と同じく定義する。このとき

$$1>\lambda_{12}>\lambda_{23}>\cdots>\lambda_{k-1,k}$$
$$>\lambda_{k,k+1}>\cdots>\lambda_{N-1,N}>0$$

が成立して、順序関係 $\leq^\lambda$ に関して次のことが成り立つ。

$\lambda_{12}\leq\lambda\leq 1$ ならば $\mathbf{G}$ の中で A_1 が最小

$\lambda_{23}<\lambda\leq\lambda_{12}$ ならば $\mathbf{G}$ の中で A_2 が最小

.....

$\lambda_{k,k+1}<\lambda\leq\lambda_{k-1,k}$ ならば $\mathbf{G}$ の中で A_k が最小

.....

$0\leq\lambda\leq\lambda_{N-1,N}$ ならば $\mathbf{G}$ の中で A_N が最小。

定理 3.5

$\mathbf{G}=\{A_1,A_2,\cdots,A_N\}, A_i=(m_i,\alpha_i), i=1,2,\cdots N$ が (3.1) および (3.2) をみたすが、(3.3) と (3.4) のどちらもみたさないとする。

このとき定義 3.1 で与えられた 2 種類の順序関係を併用することにより、$\mathbf{G}$ の凸包の極値点 (extremal point) のすべてが検出される。

4. ファジイ最短路問題への応用

前節までに述べた結果は、2 つのノード間を直接つなぐ辺の距離がすべて共通の型関数 L による L-ファジイ数で与えらているようなファジイ最短路問題の解法に適用出来る。この場合、ルートの距離は、通常のファジイ数の和の演算で定まるノード間のファジイ距離の和で定義する。

異なる 2 つのノード i,j に対し、i から j に向かって i,j を直接つなぐ向き付けられた辺がグラフ上に存在するとき、この辺を (i,j) で表し、有向グラフ上に存在する辺の全体を $\mathbf{E}$ とおき、ノードの全体を $\mathbf{V}$ で表す。辺 (i,j) の距離 T_{ij} はすべて共通の型関数 L による L-ファジイ数で与えられているものとする。すなわち

$$T_{ij}=(m_{ij},\alpha_{ij})_L \quad \forall(i,j)\in\mathbf{E}.$$

さらに次のことを仮定する。

(a) $T_{ij}\succeq 0 \qquad \forall(i,j)\in\mathbf{E}$,

(b) $0<m_{ij}<+\infty \quad \forall(i,j)\in\mathbf{E}$.

定義 3.1 で与えた 2 つの順序関係のうち $\leq_\lambda$ は、λ の値をどのようにとっても L-ファジイ数の全体の上で全順序関係となるので (定理3.1)、ファジイ最短路問題を $\leq_\lambda$ に関して解くには、通常のダイクストラ法を $\leq_\lambda$ に関して直接適用すればよい。

さて λ の値をいろいろに変えて $\leq_\lambda$ に関してファジイ最短路問題を解くと、互いに非支配的である極小解の全体が (3.1), (3.3) の関係をみたすときは、定理 3.2 により、それらをすべて検出できることになる。しかしながら互いに非

支配的である極小解の全体が (3.1) をみたしていても (3.3) をみたさないときは、それらのうちの幾つかは、λ の値をどのように変えても $\leq_\lambda$によっては検出できないことになる。

この場合、$\leq_\lambda$ に代わるもう一方の順序関係が有効に働くことになる。すなわち、互いに非支配的である極小解の全体が (3.1), (3.4) の関係をみたすときは、λ の値をいろいろに変えて

$\leq^\lambda$ に関して解けばよい。ただし、ここで注意することは、この順序関係が L-ファジイ数の全体の上では全順序関係にならないので、$\leq_\lambda$ の場合のようにダイクストラ法をそのまま適用するわけには行かないことである。しかしこの場合も定理 3.3 が保証されているので、ダイクストラ法を部分的に修正したものを用いればよいことが分かる。そのために若干の記号と定義が必要である。

$$V(i) = \{j \in \mathbf{V} \mid (i,j) \in \mathbf{E}\}$$

とおく。

<u>定義 4.1</u>　2つの L-ファジイ数

$$A = (m, \alpha)_L,\ B = (n, \beta)_L$$

に対して 2 種類の大小関係を次式で定義する。

$$A \prec B \Leftrightarrow (A \preceq B \text{ and } A \neq B)$$
$$A < B \Leftrightarrow (m \leq n \text{ and } \alpha < \beta)$$

ダイクストラ法を部分的に修正したアルゴリズムとは、次に示すものである。ただし、このアルゴリズムにおいて、単に形式上の理由から全ての L-ファジイ数 A は任意の λ に対して

$$A \leq^\lambda +\infty$$

をみたすことが仮定されている。

また s は source node を表すものとする。

algorithm modified Dijkstra

begin
Choose $\lambda \in [0,1]$ arbitrarily;
$S := \mathbf{N}$
$d(i) := +\infty$ for each node $i \in \mathbf{N} - \{s\}$;
$d(s) := 0$ and pred$(s) := 0$;
while $S \neq \emptyset$ **do**
begin
$D := \{j \in S \mid (\exists i \in S)(d(i) \prec d(j) \text{ or } d(i) < d(j))\}$
$M := S \setminus D$;
let $i_0 \in M$ be a node satisfying that

$$d(i_0) \leq^\lambda d(j) \text{ for } \forall j \in M;$$

$S := S \setminus \{i_0\}$;
for each $j \in V(i_0)$ **do**
if $d(i_0) + T_{i_0 j} \leq^\lambda d(j)$ and $d(i_0) + T_{i_0 j} \neq d(j)$
then $d(j) := d(i_0) + T_{i_0 j}$ and pred$(j) := i_0$;
end;
end.

References

[1] Bortolan, G. and Degani, R.A. (1985) A review of some methods for ranking fuzzy subsets. *Fuzzy Sets and Systems*, 15, 1 – 20.

[2] Dubois, D. and Prade, H. (1983) Ranking fuzzy numbers in the setting of possibility theory. *Information Sciences*, 30, 183 – 224.

[3] Furukawa, N. (1993) An order relation and fundamental operations on fuzzy numbers and their applications to fuzzy linear programming. *Bulletin of Informatics and Cybernetics*, 25, 161 – 179.

[4] Furukawa, N. (1994) A parametric total order on fuzzy numbers and a fuzzy shortest route problem. *Optimization*, 30, 367 – 377.

[5] Ramík, J. and Rímánek, J. (1985) Inequality relation between fuzzy numbers and its use in fuzzy optimization. *Fuzzy Sets and Systems*, 16, 123 – 138.

〒192 東京都八王子市丹木町 1－236
創価大学工学部情報システム学科　古川　長太
TEL (0426) 92-9326
E-mail furukawa@t.soka.ac.jp

THS1-1

ファジィ・コンピューティング研究会　企画セッション

パネル・ディスカッション
ファジィ知識の学習・獲得・発見

司会者：林 勲（阪南大学）
討論者：田野 俊一（電気通信大学）
古橋 武（名古屋大学）
高木 英行（九州芸術工科大学）
石渕 久生（大阪府立大学）

1. パネルディスカッションの意義：

林 勲（阪南大学） ihaya@zadeh.hannan-u.ac.jp

ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムなどを用いたファジィルールの調整の研究に始まり、最近ファジィルールの獲得や学習に関する研究が盛んに行なわれつつあります。ファジィルールをより上位概念から見たファジィ知識の学習・獲得・発見は重要な研究テーマです。制御やデータベース、評価といった分野への影響も大きいと考えられます。今回、この機をとらえ、パネル・ディスカッション「ファジィ知識の学習・獲得・発見」を企画致しました。パネラーとして、顕著な先生方に参加して頂き、次のテーマにて、好き勝手なことを話し、熱い議論をかわし、相手の意見も尊重する。そのようなディスカッションになればと思います。

【討論テーマ】

- 従来の知識獲得手法の限界と問題点
- ファジィ知識の新たな学習・獲得・発見方法とは
- 新手法を確立するために参考にできる分野や手法とは
- 新手法の特徴と応用分野
- 将来の研究方向

しかし、ディスカッションをより活発にするため、皆さんからの意見を『アンケート』にて汲み上げます。当日、アンケート用紙を用意しますが、できれば、あらかじめ準備していただいたコピーに自分の意見を書き、提出して頂ければ幸いです。皆さんの積極的なご参加をお待ち申し上げております。

2. 討論者の発表内容

「言語的立場からみたファジィ知識の学習」　田野 俊一（電気通信大学） tano@is.uec.ac.jp

パネルディスカッションでは次の４つのステップで問題提起しつつ、私の考え方を、主張し、納得させ、押し付けたいと思います。

1）ファジィ知識とは一体何？　ファジィ理論はそもそも人間の持つあいまいな言語的知識の表現／処理を目的とする。

2）その言語的知識表現はうまく使われているか？　確かにファジィルールはシステム構築の初期フェーズでは可読性が高く有用であるが、一旦、チューニングのフェーズに入るとそれ以降、言語的意味は無視されている。また、言語表現の多様さゆえに、同一入出力関係に対して複数の表現が可能となり計算論的には冗長である。

3）それなのになぜ使われている？　入出力関係の記述能力はニューロに比べて向上せず、また、利用されない言語表現のための冗長なパラメータを持つファジィ・ニューロが用いられている。この理由として、(a) 言語的表現が人間にとって理解しやすい形態であること、(b) 計算機にとっても言語的表現が有用であることが考えられる。

4）それでは「ファジィ知識の学習・獲得・発見」をどのような観点で探究すべきか？　前記 (a) からは、言語的表現を介した、人間を構成要素とする学習・獲得・発見手法の探究、前記 (b) からは、シンボル操作 (Symbolic AI) と分布・刺激等の数値操作 (Computational AI) が深い意味レベルで統合した問題解決システムの探究、および、この枠組み内での機械学習の探究、の必要性が導き出される。

つまり、ファジィ理論の本質的なよさを生かした学習・獲得・発見はこれからの研究にかかっていて、現在、そのための準備が整ってきた状況にあると感じている。特に後者に関しては、人工知能でもファジィでもその芽が出てきており、重要な研究テーマになるであろうと考えている。

「ソフトコンピューティング＝あいまいさの本質の追究」　古橋 武（名古屋大学） furuhashi@nuee.nagoya-u.ac.jp

ソフトコンピューティングはあいまい性を追及する学問分野である。単なるファジィ、ニューロ、ＧＡ、確率、カオス等の集まりではない。あいまい性の本質を追及するところに、ソフトコンピューティングがパラダイムとして生き残り得る方向がある。

1）ファジィ知識表現は情報のあいまい性を十分に表してはいない。例えば画像認識問題において、対象から互いに相関のない特徴を抽出することは困難である。特徴空間内のデータ分布に応じてメンバーシップ関数を当てはめ、ファジィ推論により認識を行っても、得られる性能には限界がある。利用できるデータが元々不十分であるときに、ファジィ推論はデータの持つ種々の情報をたった一つのグレードなるものに集約して用いる。

2）データ認識の有効な方法とは何か。データの集合が持つ情報をあらゆる角度から見ることで、解の候補を種々生成する不良設定問題解法のアプローチが、非線形空間内のデータ認識の有効な方法である。データの集合をパターンと捉え、パターン・記号推

論による不良設定問題解法の枠組みを示し、この手法がファジィ推論に並び立つ、あいまい情報処理の有効な手法になる可能性を持つことを論じる。

「得られた知識は本当の知識？」　高木 英行（九州芸術工科大学）　takagi@kyushu-id.ac.jp

ディスカッションでは３つの問題提起をしたい。

1）ファジィルール表現の自由度の大きさのために与えられた入出力データを満たすファジィルール群とメンバーシップ関数の解が複数存在するにも関わらず、当該データを生成した唯一の原理やメカニズムであるかのように利用できるのであろうか。

2）今のアプローチでは現象（観測データ）を満たす浅いレベルのルールは得られるかも知れないが、その現象を生成している物事の本質を説明できる深い知識は得られないという点である。

3）ファジィルールが言語的に知識を表現できることに固執するがために、得られる知識が限定されてしまうという点である。非明示的なファジィ知識表現も積極的に導入すべきではなかろうか。ことばで記述できるということと記述しなければならないということは別の話である。

「知識獲得は何のため？ -パターン識別問題に対する知識獲得-」　石渕 久生（大阪府立大学）　hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

パターン識別問題へ適用する場合でのファジィルールの特徴および問題点を、統計的手法、クリスプなルールを用いた機械学習手法およびニューラルネットワークとの比較から考えてみたい。

1）統計的手法が適用できる状況でのファジィルールの有用性を検討する。すなわち、識別対象となるパターンの分布が既知の場合では、誤識別率最小化などの基準を用いて識別関数が得られるが、このような状況でのファジィルールの有用性を検討する。

2）クリスプルールを用いた場合での識別境界とファジィルールによる識別境界の形状の違いという観点から、ファジィルールの特徴を示す。

3）非線型写像の近似能力という観点からは等価であると言われているニューラルネットワークとファジィルールとの比較を、多次元パターン識別問題へ適用する場合での識別システムの複雑さという観点から検討する。

4）識別システムの分かり易さと識別性能とのトレードオフについて考えてみることにする。

---------- 切り取り線 ----------

3. 聴講者へのアンケート　（所属：　　氏名：　　）

1）あなたは従来からの知識獲得手法は有効だと考えますか　（有効・問題あり）
もし、問題点があるとすれば、それは何でしょうか？

2）ファジィ知識の学習・獲得・発見方法は必要と考えますか　（必要・不必要）
もし、不必要ならば、それは何故でしょうか？

3）ファジィ知識の学習・獲得・発見方法のために参考にできる分野や手法があればお書き下さい。

4）討論者の内容を聞いて、賛同できるでしょうか　（賛同できる・別の意見がある）

5）知識学習・獲得・発見方法について、討論者への質問やあなたの意見があれば、書いてください。

THS2-1

知識獲得作業における課題と考察
A Survey of Knowledge Acquisition - Analysis and Problems

熊本　浩、糀谷　和人、中嶋　宏
Hiroshi Kumamoto、Kazuto Koujitani、Hiroshi Nakajima

オムロン株式会社　新事業開発センタ　ファジィ推進室
Fuzzy Technology and Business Promotion Division
OMRON Corporation

Abstract

The development of intelligent systems is one of the subjects OMRON Corporation has worked on. The development procedure can be analyzed into the steps, "selection", "preprocessing", "feature extraction", "modeling", and "interpretation/evaluation". To develop an intelligent system efficiently, the point is effective acquiring the knowledge necessary for problem solving through the procedure.

In this paper, the results and emerged problems through our interviews to engineers regarding the problems in developing an intelligent system are introduced. Subsequently, a development environment that supports the whole development procedure, not only the step of "modeling", with which problem solving is comparatively easy, is suggested in it.

1.はじめに

我々はこれまでに多くの知的システムをファジィ技術応用製品として開発してきた。アプリケーションの領域としては制御、認識、診断など様々な領域に関係している（表１に一例を示す）。システムに組み込まれるアプリケーション領域の知識は、開発者が専門家へのヒアリングあるいはサンプルデータを利用して試行錯誤的に知識を抽出する場合も多い。このため、いかにして効率的に有効な知識を獲得・生成するかがポイントとなっている。

近年、上記のような問題を解決するため、データベースや事例などから目的に応じた知識を抽出する手法として Knowledge Discovery in Database (KDD)や Data Mining といった技術が研究されている[1]。これらの手法を活用することで知的システムを効率的に開発できるようになることが期待されている。

しかしながら、現在の知識獲得技術は、知識獲得作業手順の部分的ステップにおける支援を行うものがほとんどであり、知識獲得手順全体を通じて人手を要する作業が数多く残されている。

本稿では、知的システム開発における問題点に関して開発者へのヒアリングを行った結果を示し、開発工程における問題点明確にするとともに課題を定義する。また、課題に対する解決策として、開発手順全体を支援することで効率よく知的システムを開発するための環境を提案する。

表１　ファジィ技術応用製品一例

制御	ファジィ温調[3]、FIMC アルミ・樹脂押出成形[3]、ファジィ血圧計[4]
認識	似顔絵、コピー防止、筆者照合[5]
診断	感震センサ、防犯センサ
調整	磁気ヘッドオートチューニング
予測	ＡＴＭ媒体補充量予測
ＤＴＰ	箱組み、カーニング

2.知的システム開発における問題

2.1.知的システム開発のプロセス

我々は既に実システム開発の経験を通して知識獲得作業の手順を提案している[2]。それは図１に示すように［選択］［前処理］［特徴量抽出］［モデリング］［解釈／評価］の順で進められる。

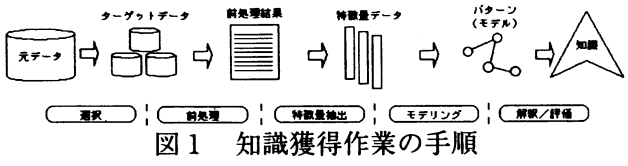


図１　知識獲得作業の手順

以下に知識獲得作業の各ステップにおける作業項目を示す。

（１）選択

解決すべき問題の目的・目標の明確化と、その問題を解決するために必要なデータを収集する。

①目的・手段・達成基準の明確化

たとえば、故障診断システムにおいては「故障の検知を行う」「どこの故障であるかを識別する」などの目的とその手段と達成基準を明確にする。

②必要データの収集

取得可能な入出力データや専門家からのヒアリング結果といったシステム開発に必要なデータを収集する。

（２）前処理

収集したデータは完全なものばかりではないため、問題解決に利用可能なデータのみを抽出する。あるいは問題解決に利用可能な状態に補完する。

①データの整理

収集したデータを整理し入出力関係を明確にする。また、収集したデータを学習用データおよび評価用データに分類する。

②不良データ・ノイズの除去

データの欠けやノイズのあるデータなど、利用

できないデータを削除あるいは補正する。

（3）特徴量抽出

システムの構造決定を行い、問題解決に有効な有効な特徴量を決定する。

①目的・手段および入出力関係の整理

再度、目的と手段および入出力関係を整理する。当初の目的を達成できるか検討する。

②特徴量の選択

入出力関係から、特徴量候補を出す。また、グラフ化や数値解析により特徴量候補から有効な特徴量を選択する。

（4）モデリング

解くべき問題に合致したモデルを決定し、抽出した特徴量を利用してモデルを作成する。

①モデルの選択

ファジィモデル、ニューラルネットワーク（NN）モデルなどアプリケーションに適合したモデリング手法を選択する。

②モデルの作成

学習用データを利用してモデルを作成する。

（5）解釈・評価

作成したモデルを評価し、精度を向上させるための調整を行う。

①シミュレーション

評価用データを利用してモデルの評価を行う。

②モデルの調整

目標を達成できない場合はモデルの調整を行う。

上記の各ステップは完全に切り分けられる分けではなく、また流れも一意的なものではない。場合によっては前ステップへフィードバックされ、同一ステップが繰り返し行われる。

2.2.知的システム開発における問題

開発工程における問題を明確にするため、開発者に対してヒアリングを行った結果、以下の問題が明確になった（ヒアリング結果は付録として末尾に添付する）。

（1）アプリケーションの環境に関する問題

モデルの作成、修正、評価に必要なデータが不足し、十分な評価が出来ない。あるいは多すぎて、評価に時間がかかりすぎる。

開発目的、目標が不明確なまま開発に着手し、手戻りが大きくなる。

（2）開発者のスキルに関する問題

「ルールやMFのどこを修正すればよいか」「ノイズデータの除去などの前処理をどうすればよいか」など、アプリケーション領域、開発手順、開発手法に関する開発者のスキル不足により、試行錯誤を繰り返す。

（3）開発ツールに関する問題

知的システムの開発には、表2に示すような開発ツールが利用可能である。しかし、「自動でルールを作ると、ルールが多くなりすぎて意味がわからなくなる」「人手による修正が不可能である」「修正結果を即座に検証できない」「使いにくい」「ツール間でデータの互換性がない」など、開発ツールが、開発者の要求を満たさないため、ツールが十分に活用されない。

表2　知識獲得作業で利用可能なツール

選択	ERモデル DOA
前処理	データベースクリーナ データ可視化ツール ノイズフィルタ 表計算ツール
特徴量抽出	データ可視化ツール 表計算ツール ノイズフィルタ 多変量解析ツール（次元圧縮）
モデリング	ニューラルネットワーク ファジィモデリング ファジィID3 ファジィクラスタリング 遺伝的アルゴリズム 多変量解析ツール（回帰・判別）
解釈／評価	統計解析ツール 知識可視化ツール（ルール・MF） ESツール FAM

（4）成果物に関する問題

開発した知的システムがアプリケーションに特化した部分と汎用的な部分の切りわけが出来ていなかったり、獲得・作成した知識が残されていないため今後の開発に活用できない。

また、開発者が開発段階で得たノウハウ（データの分析方法など）も残されていないため今後の開発に活用できない。

3.知的システム開発の課題

上記の問題点に対して次の課題を設定する。

（1）開発者への情報提供に関する課題

アプリケーション領域、開発手順に関する開発者のスキル不足により調査工数が増大する。あるいはユーザとの意識のギャップによる仕様変更といった手戻りが発生する。

これに対し、不足情報を開発者のレベルに合わせた内容で提供することで、開発者のスキルを補い、調査・検討・試行錯誤にかかる工数を軽減する。また、類似開発事例の情報を提示することで、開発する知的システムの目的、目標設定を補助する。

（2）開発ツールの有効活用に関する課題

知的システム開発手順全体を通じて、問題解決に適したツールが存在しない。あるいは開発ツールの使い勝手が悪い、使い方がわからないといった原因により、知的システムを開発するごとに同一の機能を開発してしまっている。

この問題に対し、知識獲得作業手順の各ステップにおいて、複数の知的システムの開発で共有に利用される機能を提供することで、開発の手

間および再開発を省く。各機能は汎用性を持たせるとともに使い勝手のよいものでなければならない。また、各ツールの適応領域やどのような場合に適応可能かを明確にする必要がある。

（3）知識、ノウハウ、ソフトウェアの再利用に関する課題

開発した知的システムに組み込まれた知識（利用した特徴量、ルール、MFなど）は、その知的システムでのみ使われるだけであり、類似した知的システムにおいても利用することができない。

さらに、開発者が開発において得られたノウハウは、各個人に蓄積されることが多く、組織として十分に活用されない。また、知識・ノウハウの形態としてドキュメント化できない、あるいはしないものがあり開発成果として残らないものも多い。たとえば、開発者が利用した論文情報、特許情報、メモ書き、補助的なソフトウェア（汎用的ではないが、開発時に補助的に作成したもの）。このような知識、ノウハウ、ソフトウェアを蓄積し、共有する環境が必要である。

4.おわりに

知的システムを効率的に開発する場合の課題として、知識獲得作業におけるモデリングというステップだけでなく、知識獲得作業全体としての課題を示した。これらの課題を解決する手段として、以下に示すような機能を持つ統合的な知的システムの開発環境（知識獲得プラットホーム）を提供していくことが必要である考える[6]。

（1）手順書

特徴量の有効性評価のための解析手法の利用方法などの手順を示すことで、データ分析やモデル作成時の試行錯誤的な繰り返しを防ぐ。

（2）ソフトウェア部品群

知識獲得作業手順の各ステップに必要な機能を再利用可能なソフトウェアの部品として提供する。

（3）知識／ノウハウの蓄積機能

開発時に得られた知識、実際の活用事例を蓄積し、必要に応じて検索する。また、ある程度情報が集まった段階で、内容を解析し開発手順、開発ツールに反映させる。

（4）使い勝手の良い開発／評価環境

ビジュアルプログラミングやシミュレーション機能を持つツールとの連携を行い、知的システム開発を容易にする。

今後は、まず知識獲得プラットホームとしての枠組みを構築（汎用的な手順書、蓄積・検索機能、ソフトウェア部品のI／F）する。

また、蓄積すべき機能と知識に関しては、今後の技術開発および実際の知的システムの開発を通じて問題解決に必要な機能を順次追加し、開発によって得られた知識およびノウハウを追加していく。

さらに、個々の機能を有機的に結合させ、蓄積された知識、ノウハウ、機能をベースにして、開発者が計算機とのインタラクションを通じて効率的に知識を獲得する環境を実現していく。

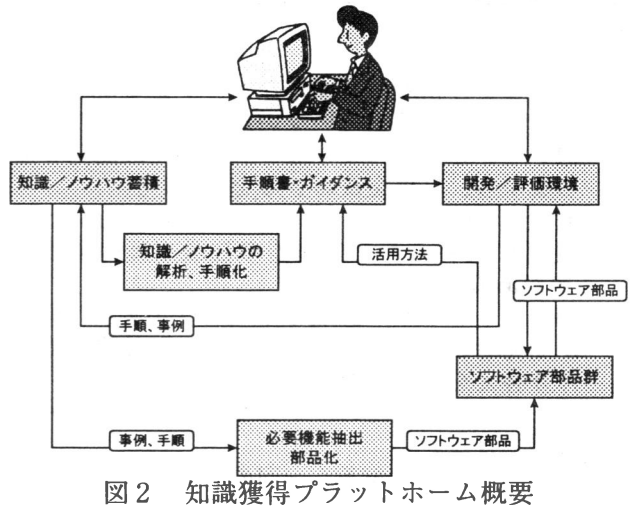


図2　知識獲得プラットホーム概要

【参考文献】

[1] U.M.Fayyad, G.Piatetsky-Shapiro, and P.Smyth : ADVANCES IN KNOWLEDGE DISCOVERY AND DATA MINING, AAAI PRESS / THE MIT PRESS (1996)

[2] Hiroshi Nakajima : Fuzzy Logic and Data Mining, SOFT COMPUTING in Intelligent Systems and Information Processing, Proceeding of the 1996 Asian Fuzzy Systems Symposium, pp.133-138 (1996)

[3] ファジィ・FI技術使い方入門, オートメーション, 96年4月号特集, 日刊工業新聞社

[4] 稲毛 他：自動血圧計「HEM-707 ファジィ」におけるカフ圧制御, OMRON TECHNICS, Vol.13, No.1(1993)

[5] 森　他：ファジィテンプレートを用いた筆者照合アルゴリズム, OMRON TECHNICS, Vol.30, No.4(1990)

[6] 糀谷　他：知識獲得作業のためのアーキテクチャーに関する考察, 第13回ファジィシステムシンポジウム (1997)

【問い合わせ先】

〒617
京都府長岡京市下海印寺
オムロン（株）新事業開発センタ ファジィ推進室
熊本　浩
TEL 075-957-9862
FAX 075-952-0411
E-mail kumamoto@zoo.ncl.omron.co.jp

【開発工での問題点に関するヒアリング結果】
できるだけ「生の声」を示すため、ステップ間で重複する内容もまとめずに列記している。

（1）選択
・どこまでの精度（認識率など）が必要かをユーザ側も明確に持っていないため、開発当初に目標レベルを明確にできない。そのため開発を進めながら、目標を決めざるを得ない。
・開発者がシステム、機器の知識を持たない。開発者が変わるごとに機器の知識を獲得する必要がある。
・開発者とユーザの意識のギャップがあり、目標が開発者とユーザで違ってしまう。最悪の場合作り替えを行う必要がある。
・データが少ないため、十分なモデルの学習・評価ができない。
・収集するデータが多く一回のデータ収集に時間がかかる。
・データの収集と管理が大変である。開発者がデータのフォーマットから管理方法まで決める必要がある。

（2）前処理
・ノイズを除去する場合など、どのフィルタを利用すればよいかなど、必要な前処理がわからない。数種類のフィルタで試し結果の良い方を採用する必要がある。
・どの前処理を利用するかにより、以降の処理が変わってくる。前処理を変更するごとにシステムの変更が必要となる。
・真偽を判定するアプリケーションにおいて、真データは比較的容易に収集できるが、偽のデータは容易に収集できない（あるいはその逆）ため、十分な評価が出来ない。
・ノイズ除去などのパラメータの設定方法がわからないため、試行錯誤を繰り返して決定する。

（3）特徴量抽出
・複数ある特徴量候補のうちどの特徴量が有効かわからない。どのように特徴量を抽出するかわからない。
・グラフ化や数値解析手法などどれを使えば特徴量の有効性を容易に評価できるかわからない。何度か繰り返し結果の良い方法を利用する。
・特徴量を変更するたびにシステムの修正が大変である。

（4）モデリング
・ファジィモデル（推論方法はどれが良いのか）、ＮＮモデルなど、どのモデルを使えばよいか（問題に適合していか）わからない。あるいは使い方が分からない。
・どのようなルールが有効であるか、有効なルールの作り方がわからない。
・ルール、ＭＦを試行錯誤的に作るしかない。
・自動でルールを作ると、ルールが多くなりすぎ、意味がわからなくなる。また、人手によるチューニングが出来なくなる。
・異状時の事象は推測で作らざる得ない。信頼性、性能保証が困難になるため、採用できない。
・機器への組み込みの場合、ルールが増大し、所定の容量をオーバーする。このため、ルールの作り替えが必要になる。
・ＮＮなどの学習が収束しない。また、その原因を追究できない（学習データが悪いのかモデルが悪いのか）。
・問題によっては単純な推論だけでは対応できない。システムの構造から変更する必要がある。
・最初に大まかな判定を行いその後詳細な判定を行うなどの多段推論になると途中段階での目標値を明確に決められない。

（5）評価／検証
・評価用のデータが少ないため、作成したモデルが正しいか十分検証できない。
・真偽判定を行うアプリケーションの場合、真あるいは偽のデータが少ないため、真偽の検証が偏る。このため、真あるいは偽の評価ができなくなり、信頼性、性能保証が困難になる。
・データが多く一回のシミュレーション・検証に時間がかかる。
・作成したプログラムを実機に組み込んだ場合、想定外のノイズにより結果が悪くなる。
・ＭＦやルールを調整する際にどこをどのように調整すれば効率よくできるかわからない。開発者がある程度見当を付け、試行錯誤的に行うしかない。ＭＦやルールの調整は経験に頼るしかない。
・調整した結果を十分検証できない。
・ＭＦやルールの調整後、即時に調整結果を検証できない。

（6）その他の問題
・汎用ツールは設定の方法がわからない。アプリに特化したツールを作る方が容易にできる。
・汎用ツールは機能的に冗長すぎるあるいは機能が不足している。

THS2-2

知識獲得作業の効率化のためのアーキテクチャに関する考察

An Architecture for Effective Knowledge Acquisition

糀谷 和人 熊本 浩 中嶋 宏

Kazuto Koujitani Hiroshi Kumamoto Hiroshi Nakajima

オムロン株式会社 新事業開発センタ ファジィ推進室

Fuzzy Technology and Business Promotion Division, OMRON Corporation

The purposes of this paper are to propose *the knowledge acquisition platform architecture* for effective knowledge acquisition and to discuss methods to apply the architecture to real systems. Through development of intelligent systems, such as fuzzy controllers and classifiers using neural networks, the developers decide the knowledge acquisition strategies in ad-hoc ways. In addition, know-how and software tools which were used in past development are distributed to individual developers and are not reused. The *knowledge acquisition platform* consists of three functional components: a) documents of knowledge acquisition process ,b) software tool libraries for knowledge acquisition, and c) know-how databases for knowledge acquisition. Using these components organically enhances usability of the platform and reusability of the past products and by-products.

1. はじめに

現在制御、診断、認識などさまざまな分野で知的システムが用いられるようになっているが、その知識の作成は、専門家へのヒヤリング結果を知識化したり、開発者がサンプルデータを参照しながら試行錯誤的に決定したりしているのが現状である。

データから知識を自動生成する手法として、 KDD (Knowledge discovery in databases)やデータマイニングと呼ばれる知識獲得技術が注目されている[1] 。知識獲得は、経済予測や市場分析のようなトップダウンに知識を記述するのが困難な推論タスクに対してよく用いられており、データや事例から規則性を学習して知識をボトムアップに帰納するものである。

しかしながら現在の知識獲得技術は、入力データの種類や均質性・完全性、出力知識の形式、解く問題の性質等に制限を設けているものが多く、実データから知的システムで使える知識を抽出する（モデリング）までには、データ選択・前処理、モデリングツールの選択、知識の評価等、人手を要する作業が残されている。

本稿では、開発事例を蓄積し、知識獲得作業全体を視野に入れた支援を行うことで、知的システムの開発を効率化する「知識獲得プラットフォーム」のアーキテクチャを提案する。まず 2 節では、知識獲得作業の概要とその課題についてサーベイする。次に 3 節では「知識獲得プラットフォーム」のアーキテクチャについて説明する。知識獲得プラットフォームは(1)知識獲得手順書、(2) 知識獲得ソフトウェア部品ライブラリ 、(3)知識獲得ノウハウデータベースの 3 つ機能要素を有機的に結び付け、過去の開発事例をフィードバックすることで知識獲得作業を効率化する。さらに 4 節では知識獲得プラットフォームのプロトタイプとして作成した KAP1 について説明する。最後に 5 節ではまとめと今後の課題について述べる。

2 知的システムの開発における知識獲得作業の概要と課題

2.1 知的システムの開発

知的システムの開発では、開発目的（判別・制御など）とデータ（システムへの入力と理想出力など）を入力とし、システムとそこに組み込む知識を成果物として出力すると考えられる。しかし実際にはソフトウェアツールや開発者の持っているノウハウも用いるであろうし、また成果物以外に副産物として調査の結果収集された論文や開発のために作ったソフトウェアツール、システムの仕様書等のドキュメント、開発で得たノウハウなどが得られる（図 1）。知的システムにおける知識獲得作業は、成果物の中の知識を作成する作業である。

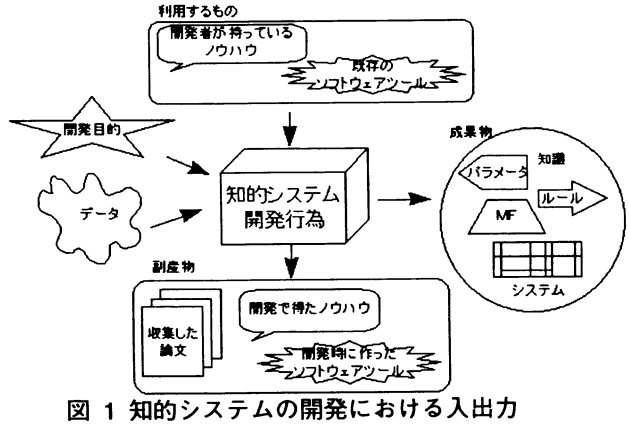


図 1 知的システムの開発における入出力

2.2 知識獲得作業

知識獲得作業は一般的に図 1 のような手順で行われる[1]。

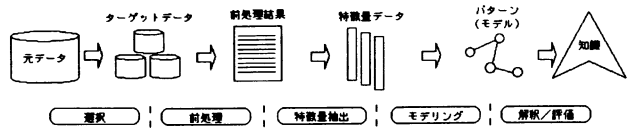


図2知識獲得作業の手順

知識獲得を行うシステムには、このプロセスをどのように実行していくかによって、(1)ユーザインタラクションを用いて次ステップの戦略決定を行う、(2)固定された知識獲得戦略を用いる(商用知識獲得ツールに多い)、(3)アプリケーション知識を組み込んでプロセスを自動化する、の 3 つのタイプがある[2]。

知的システムの開発における知識獲得作業は、各ステップで処理するデータの種類と作業の目的に応じて次のステップの戦略を決定するため、(1)のタイプに分類される。(1)のタイプの知識獲得作業では特にユーザインタラクションによる「目的の明確化」が戦略決定に有効であることが指摘されている[3]。つまり開発環境のユーザインタフェースや開発者のスキルが問題になってくるため、(2)や(3)のような自動化アプローチの知識獲得手法がそのまま適用できない。

2.3 知識獲得作業の課題

このように知的システム開発における知識獲得作業の効率にはソフトウェアツールの整備だけでなく開発者とのインタラクションの効率が大きく影響する。

[4]は知識システムの開発者からのヒヤリング結果をもとに表1に示すような知識獲得作業における課題を抽出し、(1)知識・ノウハウの蓄積、(2)ソフトウェア部品の充実、(3)手順・ガイダンスのサポート、(4)柔軟な開発環境の4つの機能の必要性を指摘している。

表1　知識獲得作業の課題

項目	課題	期待効果
開発者への情報提供	汎用な開発手順の提供 類似開発事例の情報提供 グラフ化・統計処理・特徴量選択・特徴量有効性の評価	開発者のスキル向上 調査・検討・試行錯誤の軽減 各ステップの目的の明確化 各作業成果物の目標設定の支援
開発ツールの有効利用	複数の開発で共通に使われる機能の提供 ツールインタフェースの統合環境 過去に作成・使用したツールの再利用環境 ツールの適応領域の明確化 グラフィカルな開発／シミュレーション環境	開発の自動化促進 同一機能の再開発防止 ツール操作負担の軽減 保守性の向上
知識の再利用	開発の副産物（ノウハウ・ソフトウェアツール）の共有・再利用 開発の成果物の共有と再利用	情報検索・ツール検索作業負担の軽減

3 知識獲得プラットフォーム

以上のような課題を解決する知的システム開発環境として「知識獲得プラットフォーム」を提案する。知識獲得プラットフォームは(1)知識獲得手順書、(2)知識獲得ソフトウェア部品ライブラリ、(3)知識獲得ノウハウデータベースの3つの機能要素で構成される。知識獲得プラットフォームは次の5つの特徴を持つ。

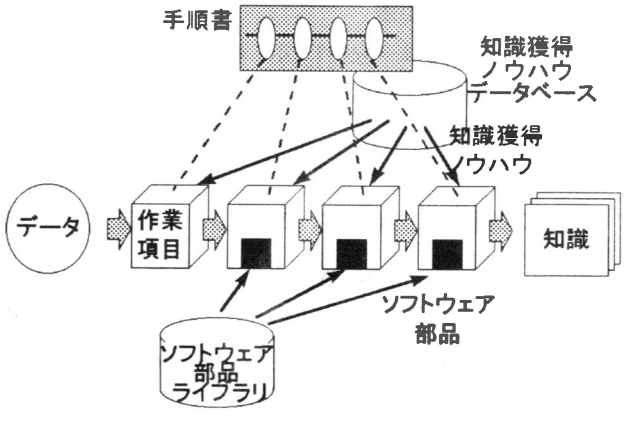


図3 知識獲得プラットフォームの構成

●手順書によって各ステップで行われる開発者の知識獲得戦略決定を支援する

●知識獲得ソフトウェアライブラリによって開発の自動化を促進し、開発者のツール操作負担を軽減する

●知識獲得ノウハウデータベースによって開発者が必要な情報の検索・調査作業負担を軽減する

●開発事例の蓄積を行い各機能要素にフィードバックを行うことで情報の共有と再利用を促進する。またこれによってプラットフォーム自体も段階的に拡張していく。

●機能要素間を有機的に結合し、開発・事例蓄積・フィードバックの各作業におけるデータ交換・情報参照を促進する

3.1.知識獲得手順書

手順書の構造

知識獲得作業の典型的なものは図1で示されるような手順を踏むが、たとえば評価-モデリング間などでループやフィードバックが必要となるなど、手順の構造が異なる場合がある。また各ステップのなかの作業項目は全てのアプリケーションをカバーできないので、さらに詳細な作業手順へのブレイクダウンのしかたは各開発者に任されることになる。

このように手順書の構造を設計するには(1)手順の構造の差異、(2)手順の詳細度のレベルを考慮する必要がある。

手順のフィードバック

開発が終了する段階では行った開発が手順書のどの作業項目を用いてどのパスで行われたかがわかっている。②は開発が終わった時点でそのたどった手順の履歴を記述する。完全に一致する作業項目や作業パスが存在せず、何らかの修正を必要としたとき、すなわち手順書が実開発の手順をカバーできない場合、そのような項目やパスを手順書にフィードバックする必要がある。手順の抽象化や構造への組み込み作業は労を要するので、作業項目ごとに作業目的や行ったデータ処理の種類、使用したデータやツールの種類などを記入するフォーマットを決めて実事例の情報を容易に蓄積できる環境を用意し、開発事例が蓄積されたときに共通項目や類似項目を抽象化していくというアプローチが有効である。

手順の知識表現

事例の蓄積を行うという観点から、知識獲得手順を記述する知識表現には、開発者の易理解性、表現力の豊かさ、アプリケーション間の共通語彙の設定が要求される。しかし事例蓄積が十分でない初期の段階では手順や部品のサンプルが少ないのでどの程度の表現力が必要か、どのような共通語彙を用意すればよいか等を決定するのは困難である。このような段階では手順をドキュメントベースで記述して開発者の易理解性をよくすることで事例蓄積を促進し、事例がある程度蓄積された時点で共通語彙や知識表現を定義するというアプローチが有効である。

3.4 知識獲得ソフトウェア部品ライブラリ

知識獲得手順の各ステップでさまざまなツールが使われる。たとえば前処理や特徴量抽出ではノイズフィルタ設計ツールや多変量解析ツールの利用などがあげられるが、現在最も多くサポートされているのはモデリングのステップで用いるツールであり、ニューラルネットワークやファジィモデリング等多くのツールが存在する。

知識獲得作業におけるソフトウェアツールの提供形態には次の3種類が考えられる。

(1)既存または市販のツールをカスタマイズして使う

(2)複数の知的システム開発で必要な機能の共通機能を分析し、ニーズの高いものを汎用ソフトウェア部品として開発する

(3)知的システムの開発者が必要に応じてアプリケーション依存のツールを一から作る

ソフトウェアツールのインタフェース統合

知識獲得作業においての複数のツールを使う場合には次のような課題がある。

(1)入出力インタフェースの統合

評価し、次の作業の目的を明確にすれば、次のにどの作業を行えばよいかを示した戦略が記述されている。この作業は中間生成物であるデータやサブ問題の性質に依存するので実際に開発を行う過程で動的に行うことになる。たとえばモデリングにニューラルネットワークを用いるかファジィ推論システムを用いるかは実際に比較してより目的に合致した結果を出力するものを選択する。

開発事例の手順書

本手順書は過去の事例を手順書にフィードバックして(2)の手順書を充実するための中間表現である

4.2 KAP1の知識獲得ソフトウェア部品ライブラリ

KAP1は既存ツールライブラリとしてデータ解析ツールとシミュレーションツールを、汎用部品ライブラリとして(1)ファジィ推論部品、(2)ニューラルネットワーク部品、(3)遺伝的アルゴリズム部品、(4)ファジィ決定木部品、(5)階層的クラスタリング部品をサポートしている。このほかに再利用部品ライブラリとして開発者が開発の副産物として作成したツールが登録されている。汎用部品ライブラリには共通APIを定義されており、データ解析ツール等から容易に呼び出すことが可能である。汎用部品の機能を用いる時もあたかも全ての解析を既存ツール上で行っているように利用することができる。現在はモデリング部品に限って提供しており、入出力インタフェースを共通化して複数のモデリング手法でシミュレーションして比較検討することができるようになっている。前処理等の部品についてはモデリング部品を用いた開発事例を蓄積する過程で必要と思われる機能を決定し、段階的に作成していく。

4.3 KAP1のノウハウデータベース

KAP1のノウハウデータベースはWWWブラウザから検索・登録できる4つのデータベースを実装している。

ノウハウベース

アプリケーションに特化した知識や開発者のメモ、資料や専門家へのポインタ（～～についてはあの本に詳しい、～～はあの人に聞けばわかる等）など手順や知識にならない開発ノウハウをドキュメント化し蓄積したものである。

論文データベース・パテントデータベース

論文データベースとパテントデータベースは過去の開発の技術調査で参照した論文・特許公報、開発時に執筆した論文、出願した特許の情報をデータベース化したものである。

開発事例データベース

過去の開発で作成したドキュメントを蓄積し、新規開発時に類似事例を参考に作業を進めることができる。

既存のデータベースとの統合

WWWブラウザから検索・登録できるインタフェースを持つ既存の技術情報データベースとの結合を行った。

4.4 開発事例の再利用と機能要素間の有機的な結合

手順のフィードバック、部品の再利用、ノウハウの手順化を行なうための枠組みは現在は事例を蓄積する入れ物（開発事例手順書、再利用部品ライブラリ、ノウハウベース）のみをサポートしているが、図6のような各機能要素を結び付けてそれぞれの再利用作業を支援する環境を検討している。

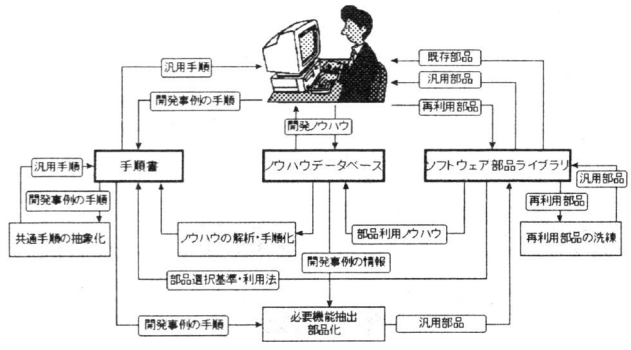


図6 KAP1の構成

5.まとめ

本稿では(1)知識獲得手順書、(2) 知識獲得ソフトウェア部品ライブラリ 、(3)知識獲得ノウハウデータベースの3つ機能要素を有機的に結び付け、過去の開発事例をフィードバックすることで知識獲得作業を効率化する知識獲得プラットフォームのアーキテクチャを提案した。

知的システムに限らず、ソフトウェア開発の手順を記述することで問題点を明らかにし、開発効率を向上させようという研究には、ソフトウェアプロセスにおけるPSEE（プロセス支援環境）の研究[5]やCSCWにおけるワークフロー技術のソフトウェア開発への応用[6]などがあるが、知識システム開発のようなトップダウンに記述できない手順をいかに制御するかという共通の課題を持っている。

知識獲得プラットフォームではこのような課題を解決する手法として、人間と計算機のインタラクションを通じて段階的にシステムの構造や知識表現を発展させていくというアプローチ[7][8]を採用している。3つの構成要素への実開発の知識獲得事例のフィードバックは現在完全に人手で行なっているが、この作業を通じて手順やノウハウの抽象化や汎用ツールの生成を計算機支援する枠組みを検討していく予定である。

【参考文献】

[1] U.M.Fayyad, G.Piatetsky-Shapilo, and P.Smyth.: Advances In Knowledge Discovery and Data Mining, AAAI Press/The MIT Press (1996).

[2] G.Piatetsky-Shapilo: An Overview of Knowledge Discovery in Databases: Recent Progress and Challenges: W.P.Ziarko (Ed.): Roughsets,FuzzySets and Knowkledge Discovery, pp.1-10, Springer-Verlag (1995).

[3] H.Nakajima: Fuzzy Logic and Data Mining, Proc. Of the 1996 Asian Fuzzy Systems Symposium, pp.133-138 (1996).

[4] 熊本浩他:知識獲得作業における課題と考察, 第13回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(1997)

[5]鯵坂恒夫: プロセス支援環境, 情報処理,Vol.36, No.5, pp.431-437 (1995).

[6]垂水弘幸 金政ふじ 小笠原章夫: ワークフロー技術とその応用, 計測と制御 Vol.34, No.12, pp.932-933, (1995).

[7] Stefik, M: The Next Knowledge Medium, The AI Magazine, Vol.7, No.1, pp.34-46, Spring (1986)

[8]糀谷和人, 前田晴美, 西田豊明. 弱構造知識メディアを用いた情 報ベースの構築, Progress in Human Interface, Vol.5 No.2, pp.69-76. (1996).

【連絡先】

〒617 長岡京市下海印寺
オムロン(株) 新事業開発センタ ファジィ推進室 糀谷和人
Tel: 075-957-9862 FAX: 075-952-0411
Email: Kazuto-k@zoo.ncl.omron.co.jp

たとえば表＊の既存ツールを集めてきても、フィルタのデータ出力形式をモデリングの入力形式がサポートしていないとその間で開発者がデータ変換を行なわないといけない。データ処理と評価を繰り返す知識獲得作業ではこのような問題が作業効率に大きな影響を及ぼす。このためよく使うツールについてはインタフェースについての調査を行ない、必要ならば部品間のデータの仲介を行なう部品を作成する必要がある。

(2)アプリケーションプログラムインタフェースの統合

汎用部品に関しては共通のアプリケーションプログラムインタフェースを定義するのが望ましい。またよく使う既存部品との間では、汎用部品のアプリケーションインタフェースとの仲介を行なう部品を作成する必要がある。

(3)ユーザインタフェースの統合

既存ツールのインタフェースは場合によっては同じ操作が違う機能を行なったり、同じ機能を実現するのに異なる操作を必要とするものがある。これらの差異は双方のツールに熟練した開発者でなければ認識が難しく、誤操作や試行錯誤の原因になる。プラットフォームで整備するツールにおいてはできるだけ操作性を統一し、統一できない既存ツールについてはその違いを明示しておく必要がある。

部品の再利用

ソフトウェアの再利用環境が整っていない現在の段階で開発の副産物として作成するツールで汎用性を求める困難である。このようなツールはドキュメントを十分整備して再利用部品ライブラリに蓄積し、複数の開発で共通な機能のツール作成していることがわかれば、共通機能部分を切り出して汎用部品として登録したり、その機能を持った汎用部品をサポートする。このようにツールとして直接使えなくても、開発で必要な機能の貴重な情報源となる。

3.3.知識獲得ノウハウデータベース

開発の過程では、ツールの選択やパラメータ設定などの自動化できない作業や、アプリケーションに特有な抽象化できない手順が存在する。また論文や特許公報のような技術情報や他の開発者が作ったメモ、過去の開発の仕様書等、開発者が利用するドキュメントはさまざまである。

このような手順書や部品ライブラリにできない情報についても同じプラットフォームの上で検索、提供のサービスを行うことが作業効率を上げる上で重要である。さらに、ある作業項目で使われる技術情報やノウハウは手順書の該当項目のオブジェクトドキュメントとリンクしていることが望ましいし、ツールの利用方法に関するノウハウであれば、ツールライブラリのヘルプやガイダンスやサンプルと連携したものであればより効果が大きい。

4.知識獲得プラットフォームプロトタイプ KAP1

知識獲得プラットフォームのプロトタイプとしてKAP1を開発した。 KAP1は時系列波形データを入力とする判別問題、制御問題を解く知的システムの開発環境である。

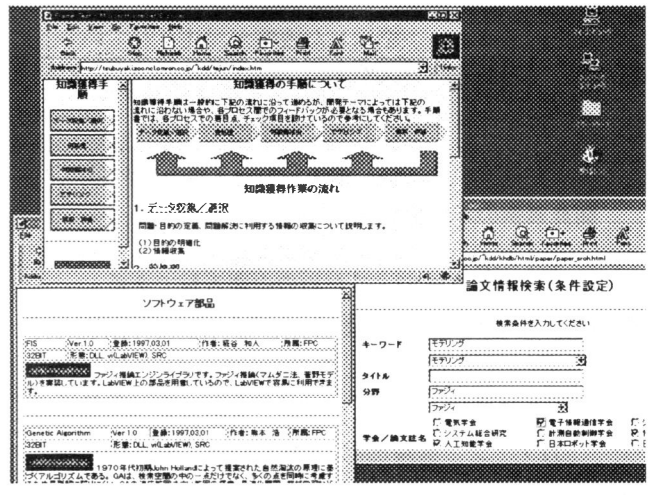


図4 KAP1 の画面イメージ

4.1 KAP1 の知識獲得作業手順書

KAP1 は以下の３つの記述レベルの手順書を実装している

(1)汎用手順：全ステップをひとつの系列で記述

(2)構造化された汎用手順：作業手順を、作業項目を要素として、手順の流れ方向（水平方向）と作業の詳細度（垂直方向）の２つの方向で構造化して記述する

(3)開発事例の手順：開発事例ごとに各作業項目を決まったフォーマットで記述

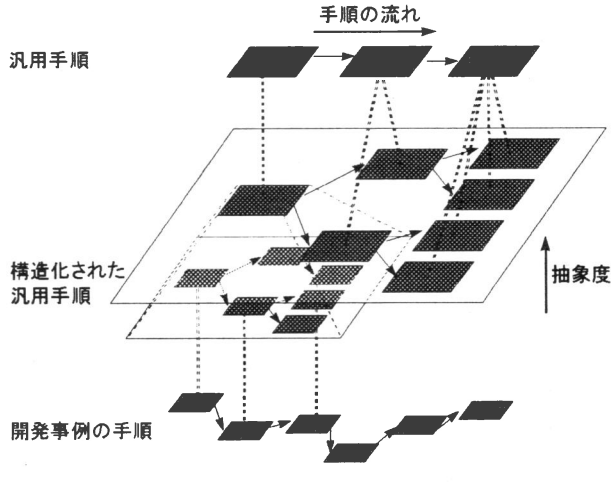


図5　KAP1 の手順書の構造のイメージ

汎用手順書

図１の手順は本手順書に相当する。開発者はこの手順書をまず参照し、開発目的と使用するデータから知識獲得作業の大まかなステップを理解する。この手順書が(2)へのインデックスとなる。

構造化された汎用手順書

本手順書は開発者の意思決定を支援する。この手順書は、HTML 文書で記述されており、作業項目を１文書とし、次の作業項目の選択をリンクとした木構造で表現される水平構造のリンクと、各作業項目をさらに詳細化する垂直構造のリンクをもつ。

この水平構造の分岐は知識獲得戦略の選択候補を表している。各作業項目の最後には、その作業での成果物を

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THS2-3

ルールの生成法を変化させる学習について

Leaning by Switching Rule Generation Method

馬野 元秀[1] 北辻 佳憲[2] 鳩野 逸生[2] 田村 坦之[2]
Motohide UMANO Yoshinori KITATSUJI Itsuo HATONO Hiroyuki TAMURA

1: 大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

2: 大阪大学 大学院基礎工学研究科 システム人間系専攻 システム科学分野
Division of Systems Science, Department of Systems and Human Science
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Abstract When we solve a problem, we firstly have no knowledge and gradually acquire some piece of knowledge by observing new data, and at last arrive at complete knowledge for solving the problem. We have a simple form of specific knowledge in the first stage but a complex form of general one in the final stage. To implement such kind of learning mechanism, we must combine several kinds of learning methods for several stages. In this paper, the first step of the research, we switch 10 kinds of fuzzy-rule generation methods with increasing data and show the result.

1. はじめに

人間は、ある問題を解くための知識を最初から持っている訳ではない。知識をまったく持っていない状況から始めて、学習データを少しずつ観察しながら知識を作り上げていく。このとき、初めは学習データに近い簡単な構造の知識しか持っていないが、学習が進むにしたがって、しだいに一般的な知識(構造も複雑かも知れない)を持つようになる。このような学習は、1つの学習方式では対処できず、学習方法自身が変化して行くような方式を考える必要があると思われる。

本研究の大きな目的は、このような学習データが逐次的に増加していくという状況において、知識表現法が変化していくような知識の学習方式を定式化し、その有効性を示すことにある。本論文では、状況を限定し、ファジィルールの学習に対して、学習データの増加にしたがって、ルールの生成法を変化させて(切り替えて)行くような学習方式について考える。

そのために、簡単な10種類のファジィルールの生成法を用いて、まず学習データを増加させながら各方法でルールを生成し、正解率やルール数の変化を調べる。そして、データが増加するにつれて、ルールを生成し直し、ルール生成法を変更する方法を提案し、シミュレーションを行なう。

2. ファジィルールのさまざまな生成方法

現在、さまざまなファジィ推論法とそれらに応じたファジィルールの生成法が提案されている。ここでは、比較的簡単な次の10種類の推論法を用いる。なお、ここでは分類問題を想定している。

推論 1: ユークリッド距離が最も近い学習データによる方法

推論 2: すべての学習データを考慮するユークリッド距離による方法

推論 3: すべての学習データに各属性ごとのファジイ集合を対応させる方法

推論 4: 学習データの各クラスごとの重心のユークリッド距離による方法

推論 5: 学習データの各クラスごとの重心に各属性のファジイ集合を対応させる方法

推論 6: 学習データの各クラスごとの複数クラスタすべてを考慮するユークリッド距離による方法

推論 7: 学習データの各クラスごとの複数クラスタに各属性ごとのファジイ集合を対応させる方法

推論 8: 学習データの各クラスごとの各属性の複数クラスタの組合せすべてを考慮するユークリッド距離による方法

推論 9: 学習データの各クラスごとの各属性の複数クラスタにファジイ集合を対応させる方法

推論 10: 学習データの各属性ごとに生成したクラスタをファジィ集合としたときのファジィID3によるファジィ決定木に基づく方法

これらのルールの生成法は大きく2つに分類することができる。1つは、データに基づく方法で、過去に得られた学習データをすべて記憶しておき、新たなデータに対して推論を行なう場合には過去のよく似たデータの結果を推論結果とする方法である。もう1つは、良く似た学習データをまとめて、一般的なルールを作成する方法である。前者は、学習データの数が少ないときに用いられ、後者は学習データ数が多くなったときに用いられる。

上の推論 1 ～ 3 はデータに基づく方法である。**推論 1** では、新たなデータに対して、最もユークリッド距離が小さい学習データの分類クラスを推論結果とする。**推論 2** では、新たなデータに対して、そのデータから一定の距離内にある学習データの分類クラスを、距離に応じて考慮する。実質的には、各学習データを1つのファジィルールと考え、その条件部のメンバシップ関数を一定の半径の円錐に対応させ、各ルールからの結果[1]を分類クラスごとに加算したものを推論結果とするのと同じである。**推論 3** でも、各学習データを1つのルールと考えるが、その条件部は各属性(変数)ごとに分けて考え、そのデータで1となり、隣のデータで0となる3角型のメンバシップ関数(左右対称ではない)とし、推論では各属性のマッチ度の積をそのルールの結果の度合いとする推論となる。

もう1つの良く似たデータをまとめて一般的なルールを作成する方法には、上の推論 4 ～ 10 が対応する。良く似たデータをまとめる方法はクラスタリングと呼ばれ、さまざまな手法が研究されている[1]が、ここでは非常に簡単なクラスタリングの方法を用いる。

まず、学習データを分類クラスごとに1つのクラスタにまとめることにして、属性値の重心を用いる。すると、分類クラスの数の学習データがあるのと同じになるので、推論 1 と同じ方法(推論 2 でも同じである)を使って推論結果を求める方法が**推論 4** で、推論 3 と同じ方法を使って推論結果を求める方法が**推論 5** である。

次に、学習データを分類クラスごとに複数のクラスタにまとめることを考える。これも簡単な方法として、同じ分類クラスで距離が一定以下のものを距離が最小のものから重心により順次1つにまとめていくという方法を用いる。これを全属性で行なうと、各分類クラスごとに複数のクラスタ中心が得られるので、これらを学習データと考えると、推論 1 ～ 3 と同じ方法で推論結果を求めることができる。推論 2 と同じ方法を用いるのが**推論 6** で、推論 3 と同じ方法を用いるのが**推論 7** である(推論 1 と同じ方法は用いていない)。さらに、クラスタリングを各属性ごとに行ない、各属性ごとのクラスタ中心のすべての組合せに対して、推論 2 と同じ方法で推論結果を求める方法が**推論 8** で、推論 3 と同じ方法で求める方法が**推論 9** である。

最後の**推論 10** は学習データからクラスタリングにより各属性ごとのファジィ集合をつくり、これを用いてファジィ ID3 によりファジィ決定木を生成し、ファジィ推論を行なう[2]。ファジィ決定木はすべての属性を使わないルールを作成することができ、少数のルールで良い分類が可能である。

これらの推論方法がどのような特徴を持っているかを調べるために、データを1つずつ増加させたときにルール数や正解率がどのように変化するかを調べてみよう。データとしては、R.A. Fisher のアヤメの分類データ[3]を用いる。このデータは 3 種類のアヤメについて、「がくの長さ (sepal length)」、「がくの幅 (sepal width)」、「花弁の長さ (petal length)」、「花弁の幅 (petal width)」の 4 種類の特徴量を計測したもので、各種類 50 個ずつ、合計 150 個存在する。

実験方法は、ランダムにデータを1つずつ選び出し、それを含めてそのときまでに得られた n 個の学

[1] 分類型で、結論には確信度が付いていない場合、条件部のマッチ度と結論部の分類クラスがそのままそのルールの結果となる。

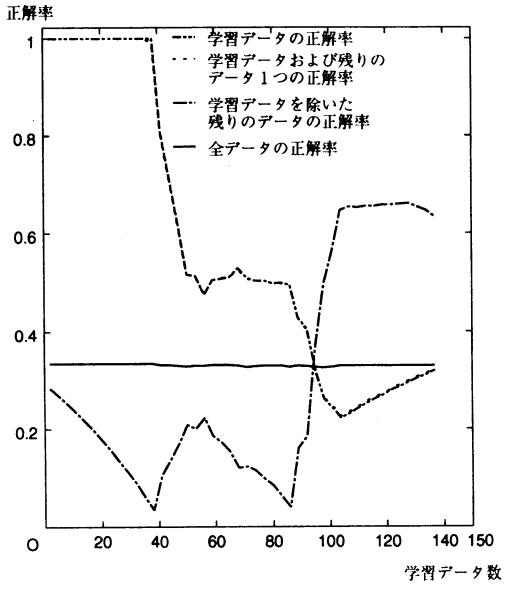


図 1. 推論 8 の正解率の変化

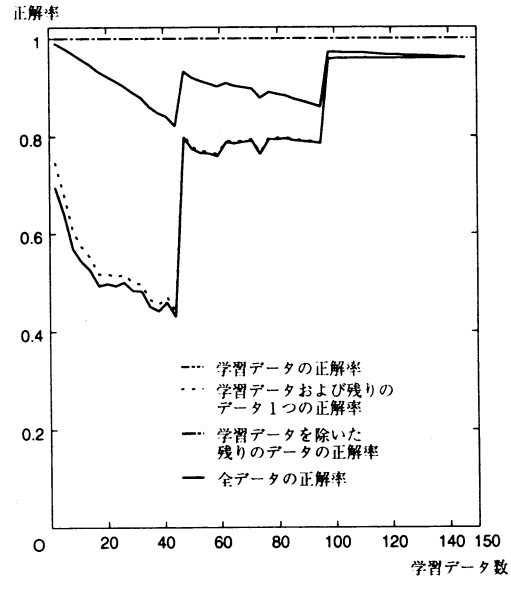


図 2. 推論 10 の正解率の変化

習データを用いてルールを生成し、それに対して次のテストデータに対する正解率を計算した。

(1) 学習データ自身 (n 個)

(2) 学習データ + 残りから 1 つ ($n+1$ 個)

(3) 学習データ以外のデータ ($150-n$ 個)

(4) 全データ (150 個)

これを 1 回のテストとして、100 回のテスト行ない平均値を求めた。各テストにおいて、ランダムに与えるデータ列は各推論手法とも同じ順序で与えている。

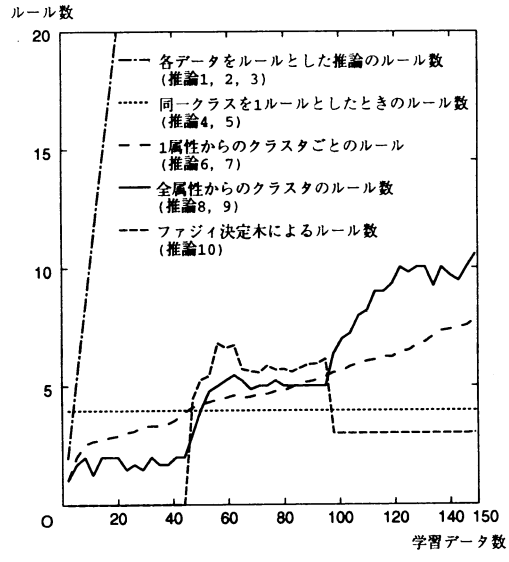


図 3. 推論 1 ～ 10 のルール数の変化

アヤメの分類データに対して、推論 1 ～ 10 を適用したときの正解率の変化のうち、推論 8 と推論 10 に対するものを**図 1** と**図 2** に、ルール数の変化を**図 3** に示す。ルール数が大きく変化する場所が 2 ヶ所あり、それに合わせて正解率も変化している。これは、その時点でクラスタが大きく変わり、ルールやファジィ決定木の構造が変わるためであると思われる。

3. ルール生成法を変化させる学習

前節で調べたように、学習データによってどのようなルールを用いるのがよいかが異なる。そこで、学習データによってルール生成方法を変化させてみる。ここでは、現在の正解率やルール数などから、今のルールを作り直すべきか (ルール生成方法は同じである)、別のルール生成法に変更すべきかなどを決定する。

ルールの作り直しは、学習データ自身の正解率の変化に注目し、正解率が下がり始めたときに作り直しを行ない、学習方法の変更は、ルールを何回か (M 回) 作り直しても正解率が下がり続けるときに行なうことにする。そして、新たな学習方法の選択は、すべての学習手法でルールを生成し、ある回数 (N 回) の実行を続け、その後の正解率とルール数との関係から最も良い方法を選び出すという方法で行なう。このときの正解率とルール数

による選択基準としては、

$$H(C_a, R_a) = \alpha \frac{1}{C_a} + \beta R_a \qquad (1)$$

α : 正解率定数

β : ルール数定数

C_a : 学習方法 a の正解率

R_a : 学習方法 a のルール数

を用い、この値が最小の学習方法を選択する。ここで、正解率定数 α を大きくすると、学習方法の正解率の影響が大きくなり、ルール数定数 β を大きくすると、ルール数の影響が大きくなる。

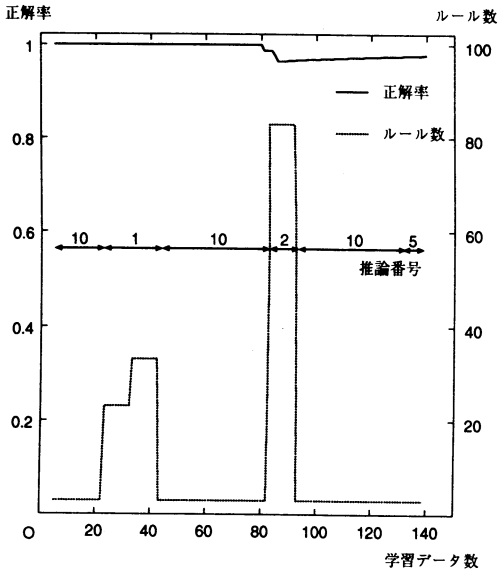


図 4. $\alpha = 1.0$、$\beta = 0.0$ の学習方法の変化

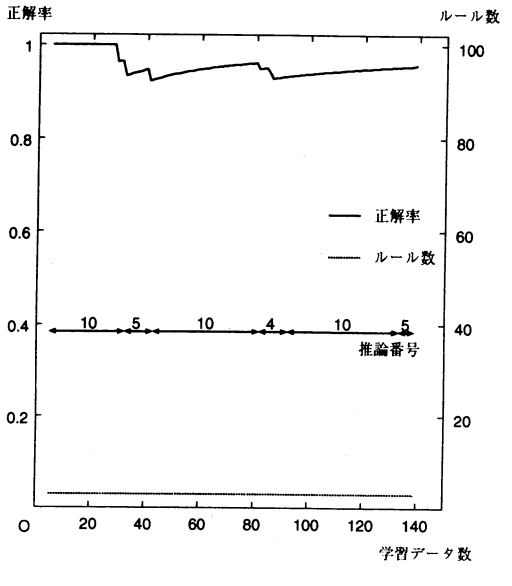


図 5. $\alpha = 0.01$、$\beta = 1.0$ の学習方法の変化

アヤメの分類データを用いて正解率定数 α とルール数定数 β を変化させたときの、推論方法 (ルール生成法) と正解率とルール数とを調べるための数値実験を行なった。$\alpha = 1.0$、$\beta = 0.0$ と $\alpha = 0.01$、$\beta = 1.0$ のときの学習方法の変化を図示したのが、それぞれ、**図 4** と**図 5** である。このとき、ルール生成後の正解率の算出は 10 回の学習後 ($N = 10$) に行ない、ルール生成法を変更するための正解率の連続減少回数は 2 回 ($M = 2$) とした。また、各ルール生成におけるクラスタリングのクラスタ最短距離は 0.1、ファジィID3 による葉のクラス最小占有率は 0.6、最小データ数は 1.0 とした。

4. おわりに

以上、学習データの増加にしたがって、ファジィルールを生成し直したり、ルール生成法を変更する方法を提案し、シミュレーションを行なった。

本論文では、ルールを生成し直したり、ルール生成法を変更して新たなルールを生成する場合に今までの学習データをすべて保存しておき、それを用いている。しかし、これは不自然で、現在のルールといくつかのデータ (例えば、不正解のデータ) から新たなルールを生成する方法を考える必要があるが、これは今後の課題である。

参 考 文 献

[1] 宮本 定明 編 (1996): 特集 ファジィクラスタリングとその応用、日本ファジィ学会誌、Vol.8、No.3、pp.405–462

[2] 馬野 元秀、岡本 宏隆、鳩野 逸生、田村 坦之、河内 二三夫、梅津 祐久、木下 淳一 (1993) : 「ID3 に基づくファジィ決定木の油中ガス分析診断への適用について」、システム制御情報学会 第 4 回インテリジェント FA シンポジウム pp.201–204

[3] R.A. Fisher (1936) : "The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems," *Annals of Eugenics*, Vol.7, No.2, pp.170–188

[問い合わせ先]

〒 593 堺市学園町 1 – 1

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科

馬野 元秀

TEL: 0722-52-1161 内線 2739

FAX: 0722-55-2981

Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

THS3-1

パターンと記号の相互作用に関する一考察
A Study on Inference between Patterns and Symbols

竹内一郎　　古橋 武
Ichiro TAKEUCHI　　Takeshi FURUHASHI
(名古屋大学工学研究科)
(Graduate School of Engineering, Nagoya University)

Abstract : This paper studies inferences based on patterns and symbols. This paper defines pattern as information to which plural measures are definable. In this paper symbol means information labeled to a pattern based on a particular measure. This paper proposes an inference system with interactions between patterns and symbols. Inference among patterns causes "explosion of vagueness". To suppress the explosion, the proposed system utilizes the interactions between patterns and symbols, and symbols based on different measures affects pattern inference into different directions. Some simulations show that proposed system works well.

1 はじめに

本稿では、パターンと記号の相互作用についての一考察を行う。ここで、パターン、記号とはそれぞれ情報の表現形態をいう。本稿では、複数の距離測度を定義し得る情報をパターンと呼び、パターンに特定の距離測度を定義し、ラベル付けした情報を記号と呼ぶ。パターンと記号を利用することで、あいまいさを扱う新たな推論法の構築が期待される。

R. Sun[1]はルールに基づいて推論を行う層と、コネクショニズムにより推論を行う層の2層間の相互作用による推論法を提案しているが、本稿で定義するパターン・記号の視点はない。大森ら[2]は、情報間の距離を利用して処理される情報をパターン、距離を利用しないで処理される情報を記号と定義し、神経回路網モデルPATONを提案している。PATONでは、ある距離測度を前提条件としており、様々な距離測度により様々な記号が存在するという視点が見られない。山口、高木、銅谷[3]の提案するFuzzy Associative Memory(FAM)では、メンバーシップ関数とそのラベルを用いて推論を行う。高木、山口、菅野[4]は、FAMを発展させ、Conceptual FuzzySets(CFS)を提案している。しかし、メンバーシップ関数は特定の距離測度のもとで定義されており、本稿で定義するパターンを扱うものではない。また、クリスプなラベルがメンバーシップ間に介在し、メンバーシップ間の推論、すなわち、パターン間の推論は行われない。萩原[5]の提案する多方向連想記憶(MAM)は、分布情報間の推論を行っているが、本稿のパターン・記号の視点、並びにパターン・記号の相互作用という視点は見られない。古橋、服部、内川は[6]はパターン層と記号層からなる2層構造連想記憶ネットワークを提案した。しかし、パターン・記号を扱う意義は充分には検討されていなかった。

本稿では、パターン・記号の相互作用の視点に基づいた新たな推論システムを提案する。本稿では、パターン間の推論におけるあいまいさの増大過程、およびパターンの記号化についてあいまいさに基づいた考察を行う。本システムはあいまいさの増大を防ぐためのパターンと記号の相互作用のメカニズムを持つ。異なる距離測度を用いることにより、パターン・記号の相互作用は異なる推論結果を導出する。数値実験を行うことによりこれらの提案手法の有効性を示す。

2 パターンと記号

従来の推論において、パターンは記号化される対象であった。例えば、多次元の情報同士の推論を行う場合には、それぞれを特定の次元に射影してから推論を行う。図1は、このような従来の推論を抽象的に表現したものである。複数のパターンは、それぞれ特定の距離測度に基づいて記号化され、推論は記号間で行われる。

これに対し、図2は、筆者等の提案する推論を抽象的に表したものである。図1と比較すると、パターン間での推論(パターンとパターンを結ぶ矢印)、パターンと記号との相互作用(パターンと記号を結ぶ双方向の矢印)が異なる。従来の推論では、それぞれのパターンが記号化されるが、その過程で不適切な前提条件を加えてしまう危険性と重要な情報を失ってしまう危険性がある。実際のパターン認識において、対象とする問題に適した記号化の方法を見付けられないことは少なくなく、これらの危険性に直面する可能性は高い。これ

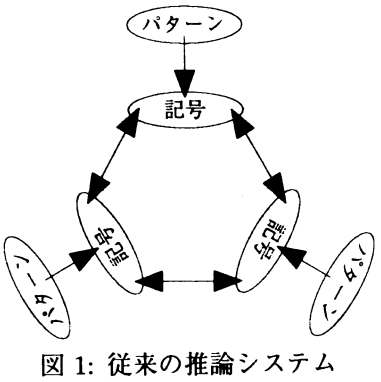


図 1: 従来の推論システム

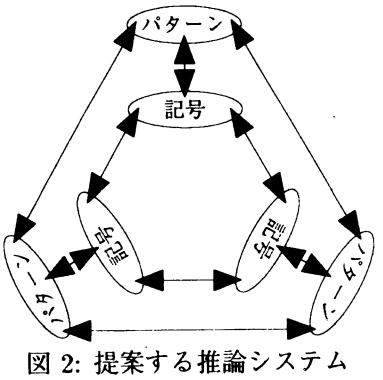


図 2: 提案する推論システム

に対し、様々な距離測度を定義し得るパターン同士で推論を行えば、これらの危険性を回避できる可能性が高いと思われる。

しかしながら、パターンは一般に多くの情報を含むため、パターン間の推論はあいまいさの増大を引き起こす[7]。多段, 多重の推論を行い、あいまいさの増大が繰り返されれば、推論結果は「あいまいさの爆発」と呼ばれる何ら情報を持たない状態となる。筆者等の提案する図2の推論は、パターンと記号間の相互作用により、パターン間の推論におけるあいまいさの増大を防ぐことができる。

3 パターン間の推論

本章では、パターン間の推論を行なうネットワークモデルとそのネットワークによる数値実験について説明する。

3.1 パターン間の推論を行うネットワーク

本推論システムのパターン間推論を行う部分は、連想記憶ネットワークの一種である双方向連想記憶(BAM)[8]と同じ構造を持つ。BAM は、2 層構造を持ち、複数のベクトル対を結合荷重を表す行列により記憶する。本研究では、3 個以上のパターン間の推論についても考察するので、一般的に図 3に示すような多方向連想記憶 (MAM)[5]と同じ構造を持つ。文献 [5]、[8] らの連想記憶モデルでは、バイポーラデータを扱っているが、本システムでは、負でない実数値を扱う。

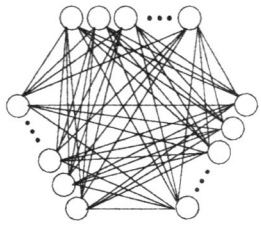


図 3: MAM

本稿の数値実験において、ネットワークに記憶される情報を図 4に示す。この設定では、複数の特徴量 "color, taste, shape, etc." を用いて認識対象 "apple, etc."(以後、対象と呼ぶ) が表現される。特徴量はパターンとして記憶され (これを記憶パターンと呼ぶ)、各記憶パターンに対象がラベルとして割当てられている。各対象において、すべての特徴量同士が MAM により記憶されている。このような記憶情報を持つシステムに、パターンが入力され、パターン間の推論が行われる。

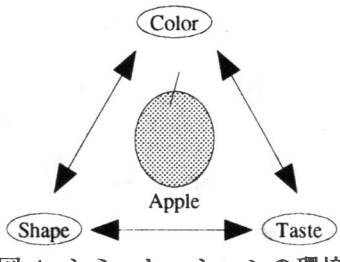


図 4: シミュレーションの環境

各対象 c の各特徴量 a における記憶パターン $\boldsymbol{mp}_{ca}$ を、和が 1.0 になるように正規化された U次元ベクトルとすると、2 つの特徴量 a_1、a_2の記憶パターン間の関係を表す行列$\boldsymbol{M}_{a_1a_2}$、$\boldsymbol{M}_{a_2a_1}$ は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{M}_{a_1a_2} = \frac{1}{C}\sum_{c=1}^{C} \boldsymbol{mp}_{ca_1}\boldsymbol{mp}_{ca_2}^{T} \quad \boldsymbol{M}_{a_2a_1} = \boldsymbol{M}_{a_1a_2}^{T} \tag{1}$$

ここで Cは記憶される対象の数を表し Tは行列およびベクトルの転置を表す。

特徴量 a への入力パターン$\boldsymbol{i}_a$を正規化された U次元ベクトルとすると、特徴量 a のパターンの初期状態を表す U次元ベクトル$\boldsymbol{x}_a(0)$ は次式で表される。

$$\boldsymbol{x}_a(0) = \boldsymbol{i}_a. \tag{2}$$

推論を t+1 回行なった後の特徴量 a のパターン$\boldsymbol{x}_a(t+1)$ は U次元ベクトルで次式により表される。

$$\boldsymbol{x}_a(t+1) = \boldsymbol{x}_a(t) + \alpha\boldsymbol{x}_{othera}(t) \tag{3}$$

ここで、αは、パターン間の推論の程度を表す係数、$\boldsymbol{x}_{othera}(t)$ は、他の特徴量からの情報を表し、次式で表される U次元ベクトルである。

$$\boldsymbol{x}_{othera}(t) = \sum_{a'=1\ a'\neq a}^{A} \boldsymbol{M}_{a'a}\boldsymbol{x}_{a'}(t) \tag{4}$$

ここで A は特徴量の数を示す。$\boldsymbol{x}_{othera}(t)$ は正規化される。

パターン間の推論を t 回繰り返した時のすべての特徴量のパターンが、推論結果であるが、これを何らかの距離測度により、記号化して表現する必要がある。本章では、次式による距離測度 $d_{1\,c}(t)$ を採用する。

$$d_{1\,c}(t) = \sum_{a=1}^{A}\sum_{u=1}^{U} \min\{mp_{cau},\ x_{au}(t)\} \tag{5}$$

$d_{1\,c}(t)$ は、この距離測度における認識結果が対象 c である度合いを表現している。(5) 式は、各対象 c の各特徴量 a における記憶パターン$\boldsymbol{mp}_{ca}$と t 回の推論後の特徴量 a のパターン$\boldsymbol{x}_a(t)$ の convolution をすべての特徴量に対して足し合わせる距離測度である。ここで、$\min(x_1, x_2)$ は、x_1, x_2のうち小さい方の要素を出力する関数である。$d_{1\,c}(t)$ はすべての対象における和が 1.0 になるように正規化される。本章では、この $d_{1\,c}(t)$ がネットワークの推論回数 t における出力とする。

3.2 数値実験

表 1: 記憶パターン (平均, 標準偏差)

		特徴量				
		color	shape	taste	size	touch
対象	apple	90,5	35,5	55,10	55,20	70,5
	banana	20,5	85,5	30,5	40,10	15,5
	pear	70,10	65,15	35,15	85,5	85,5
	orange	40,15	25,5	70,5	10,10	45,15

上記の推論システムを用いて数値実験を行った。この時の条件は $U = 100$, $C = 4$, $A = 5$, $\alpha = 1$ である。

本稿では、記憶パターンは正規分布に従うものとした。表1に各記憶パターンの平均と分散を示した。図5は入力のパターンとして“apple”パターンと同一のものを与えた場合の結果を表す。横軸はパターン間推論の回数を表し、縦軸は距離測度 $d_{1\,c}(t)$ による各対象の想起される度合いを表している。どのような入力を与えた場合においても、推論を繰り返すたびにあいまいさが増大し、最終的にはすべての対象 c の想起される度合いがほぼ等しくなってしまう。前述した「あいまいさの爆発」が起きている。

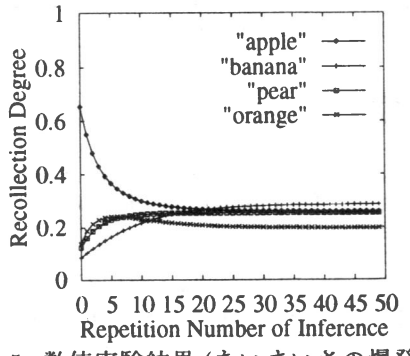


図 5: 数値実験結果 (あいまいさの爆発)

4 パターンと記号の相互作用

本章では、パターンと記号の相互作用について説明する。まず、パターンを記号化する過程をあいまいさに基づいて考察し、次に記号によるパターンへの作用を説明する。

4.1 パターンの記号化

図 6は、特徴量空間内のパターンの一例である。“color” 特徴量空間の記憶パターン “apple” と “orange”、ならびに入力パターンが表現されている。この入力パターンはそれぞれの記憶パターンとの間に何らかの距離測度を定義することにより記号化される。前章の convolution を用いた距離測度 (図中 d_1 : ハッチ部分の面積の各特徴量における和を入力とする単調増加関数) の場合、“apple”=0.3、“orange”=0.7 といったように記号化される。この段階を記号化の第1段階と呼ぶ。次に、0.3(apple) < 0.7(orange) より、この情報は “orange” であると表現される。この状態を記号化の第2段階と呼ぶ。また、記憶パターンと入力パターンの重心間の距離を距離測度 (図中 d_2 : 図中の線分の長さの各特徴量における和を入力とする単調減少関数) とする場合、記号化の第1段階では “apple”=0.6、“pear” =0.4 と表現され、第2段階では、0.6(apple) > 0.4(orange) より、この情報は “apple” であると表現される。なお、本稿においては、大きい値ほど距離が “近い”(パターン同士が類似している) ことを意味する。

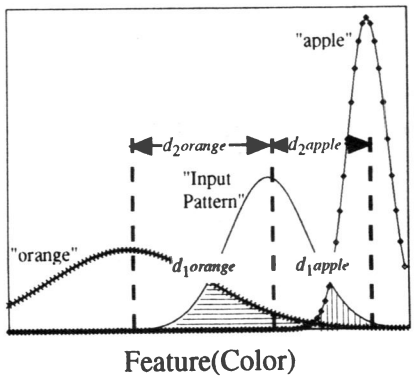


図 6: 特徴量空間”color” 内のパターン

情報がパターンで表現されている状態、記号化の第1段階、第2段階の3つの状態では、それぞれに含まれているあいまいさが異なる。記号化の第2段階では、いかなるあいまいさも含まれない。記号化の第1段階では、シャノンエントロピーなどの指標で表される多義性というあいまいさが含まれる[9]。パターンにおいては、記号化の第1段階が持つ多義性に加え、別のあいまいさを持つ。これは、様々な距離測度を持ちうるという意味でのあいまいさで、パターンのあいまいさと呼ぶ。

4.2 記号によるパターンへの作用

記号によるパターンへの作用とは、記号化された情報をパターンに含めることである。これは、特定の距離測度をパターンに含めることであり、上述の「パターンのあいまいさ」を減らすアプローチと捉えることができる。特定の距離測度をパターンに含めることは仮説の設定であり、この検証を行いながら、推論をすることで不良設定問題解法の枠組みとして考えることもできる。

記号によるパターンへの作用を考慮すると、前章の (3) 式は、次式のように修正される。

$$\boldsymbol{x}_a(t+1) = \boldsymbol{x}_a(t) + \alpha \boldsymbol{x}_{other\,a}(t) + \beta \boldsymbol{y}_a(t) \quad (6)$$

ここで、βは作用の程度を表す係数、$\boldsymbol{y}_a(t)$ は、推論を t 回行った後の記号からの作用を表す。本稿においては、$\boldsymbol{y}_a(t)$ は次の2式で表される。

$$\boldsymbol{y}_a(t) = \boldsymbol{m}\boldsymbol{p}_{c'a} \quad (7)$$

$$c' = \max_c \Big(\sum_{a=0}^{A} d(\boldsymbol{x}_a(t),\ \boldsymbol{m}\boldsymbol{p}_{ca}) \Big) \quad (8)$$

ここで、$\max_c(x_c)$ は、x_cの値を最大にする c を出力とする関数で、$d(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2)$ は、ある距離測度 d における、パターン$\boldsymbol{x}_1$と$\boldsymbol{x}_2$の距離を表す関数である。

次節に述べる数値実験で用いる距離測度は、(5) 式で表される convolution によるものと次式で表されるパターンの重心間の距離によるものである。

$$d_{2\,c}(t) = \sum_{a=0}^{A} (\max_{c'=0}^{C}(eu_{c'a}) - eu_{ca}) + \gamma \quad (9)$$

ここで、$\max_{c=0}^{C}(x_c)$ は、x_cの最大のものを出力する関数で、γは、定数である。eu_{ca}は対象 c の特徴量 a における記憶パターンの重心と特徴量 a の空間のパターンの重心との距離で次式で表される。

$$eu_{ca} = |cg(\boldsymbol{m}\boldsymbol{p}_{ca}) - cg(\boldsymbol{x}_a)|^2 \quad (10)$$

ここで、$cg(\boldsymbol{x})$ は u 次元ベクトル $\boldsymbol{x}$ の重心を出力する関数で、次式で表される。

$$cg(\boldsymbol{x}) = \frac{\sum_{u=1}^{U} u x_u}{\sum_{u=1}^{U} x_u} \tag{11}$$

4.3 数値実験

表 2: 入力パターン (平均, 標準偏差)

	特徴量				
	color	shape	taste	size	touch
input pattern	60,10	30,10	62.5,5	32.5,15	57.5,10

パターンと記号の相互作用を導入して、数値実験を行った。入力パターンは、表2に示される平均、分散をもつ正規分布 ("apple" と "orange" の記憶パターンの間をとった分布) である。この時の条件は、すべて前章の数値実験と同じである。パラメータ β、γは、それぞれ $\beta = 1, \gamma = 100$ とした。(5) 式、(11) 式を距離測度とした時の結果を図 7, 図 8にそれぞれ示す。ここで横軸は推論回数を表し、縦軸は、それぞれの距離測度による各対象の想起される度合い (記号の第 1 段階) を表している。convolution を距離測度に用いた場合では、"apple" が最も強く想起され、重心間の距離を距離測度に用いた場合では、"orange" が最も強く想起されている。前章のような「あいまいさの爆発」を防ぎ、1 つの対象がはっきりと想起されていること、距離測度により異なる記号化が行われていることがわかる。

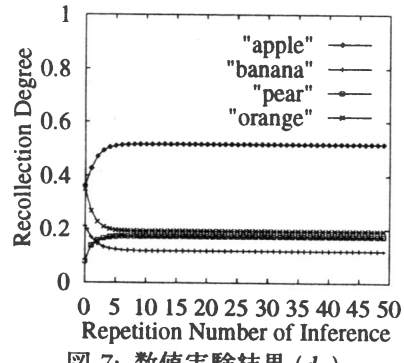


図 7: 数値実験結果 (d_1)

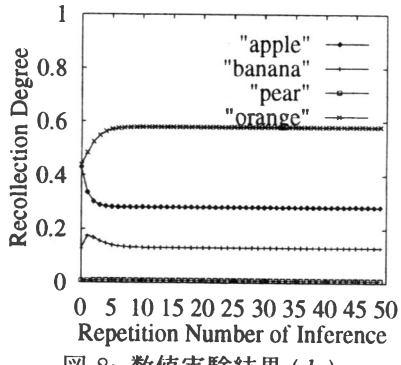


図 8: 数値実験結果 (d_2)

5 まとめ

本稿では、パターン、記号という観点から推論法に関する考察を行った。パターンの記号化におけるあいまいさの考察の中で、「パターンのあいまいさ」について述べ、それを減らすために記号が作用するシステムを提案した。数値実験により、提案手法の有効性を示した。今後は、パターン間の推論やその他の過程において、どのようなあいまいさが扱われているのかを定量的に解析し、筆者等の提案するパターン・記号の計算論におけるあいまいさの測度を構築することを目指す。

本研究の一部は (財) 電気通信普及財団の助成を受けて行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

[1] R. Sun, "Integrating Rules and Connectionism for Robust Commonsense Reasoning", Wiley-interscience, (1994)

[2] T. Omori, N. Yamanashi, "PATON: A Model of Concept Representation and Operation in Brain ", Proc. of Int'l Conf. on Neural Network'94, pp. 2227-2232, (1994)

[3] 山口, 高木, 銅谷, "連想記憶システムを用いたファジィ推論", 日本ファジィ学会第 6 回ファジィシステムシンポジウム講演集, pp. 93-96,(1990)

[4] 高木, 山口, 菅野, "概念ファジィ集合とその連想記憶による実現", 日本ファジィ学会第 7 回ファジィシステムシンポジウム講演集, pp. 359-364, (1991)

[5] M. Hagiwara, "Multidirectional Associative Memory", Porc. IEEE Joint Conf. on Neural Networks, Washington, D.C, January 15-19, 1990. New York: IEEE, Vol I, pp. 3-6, (1990)

[6] 古橋、服部、内川 "パターンと記号を扱う連想記憶モデルとカオス的想起", 第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 749-752, (1995)

[7] 前田, 井室, 村上, "多重多段ファジィ推論におけるあいまいさの広がりに関する考察", 日本ファジィ学会誌 Vol.7, No.1, pp. 113-130, (1995)

[8] B. Kosko, "Adaptive Bidirectional Associative Memories", Applied Optics, Vol.26, No.23, pp. 4947-4960, (1987)

[9] G.J.Klir, T.A.Folger, (本多中二 訳), "ファジィ情報学", 日刊工業新聞社, (1993)

[問い合わせ先]
〒 464-01 名古屋市千種区不老町
名古屋大学工学部電子情報学科
竹内 一郎
TEL (052)789-2793 FAX (052)789-3166
e-mail takeuchi@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THS3-2

記号とパターンによる情報表現と不良設定問題の枠組み

Information Representation Using Patterns and Symbols and a Framework for Solving Ill-defined Problems

服部 陽一郎　　古橋 武
Yoichiro HATTORI　　Takeshi FURUHASHI

名古屋大学工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

Abstract: In intelligence of human beings, both symbolic information processing and pattern information processing exist. Patterns and symbols are inseparable information which constitute the concepts in human brain. It is expected that a new function will be realized by the information processing with interaction between patterns and symbols.

The authors proposed a 2-layered network which consisted of a pattern layer and a symbol layer for the realization of the processing of patterns and symbols. This paper presents a framework for solving ill-defined problem using pattern - symbol inference. The meaning of pattern is clarified in this paper. The 2-layered network is used to implement the framework. A self-organizing method for the generation of patterns is presented in this paper. An experiment is done to demonstrate the solution generation capability by the proposed network.

1. はじめに

人間の知能には記号情報処理と、感覚のように言葉では言い表すことのできないパターン情報処理が存在する。パターンと記号は概念を構成する不可分の情報であり、記号とパターンの相互作用を通した情報処理により新しい機能を実現できると期待される。

R. Sun[1]はif-then形式などのルールに基づいて推論を行う層とコネショニズムにより推論を行う層の2層間の相互作用による推論法を提案しているが、パターンと記号という視点はない。高木らは概念ファジィ集合（CFS）を提案している[2]。CFSは活性度をもつラベルの集合である。一つのラベルのもつ種々の意味は他の活性度付の複数のラベルによって表現される。しかし、CFSではパターンのあいまいさは取り扱われていない。一方、桜井・大森は画像理解のために、記号とパターンの相互作用を実現するアーキテクチャを提案した[3]。大森・山梨はパターン層と記号層からなる概念モデルであるPATONを提案した[4]。しかし、これらのモデルでは、パターンはクリスプな情報として扱われ、あいまいなパターンは取り扱われていない。筆者らはパターンと記号を扱う新しい手法として、パターン層と記号層からなる2層構造連想記憶ネットワークを提案してきた[5]。記号層の想起には非線形ダイナミクス[6]が導入されており、ネットワーク内では各層の想起結果が互いに影響を及ぼしあいながら連想が進む。しかし、このモデルでは扱う情報を初めからパターン情報と記号情報の組み合せとして与えており、パターンと記号を扱う意義についても深く検討されてはいない。

本稿では、あいまい情報としてパターンを定義し、パターンと記号の推論を不十分データからの不良設定問題の解法の枠組みで捉える。そして、パターンと記号の生成にコホーネンモデル[7]を適用し、入力情報から抽出した複数の特徴量からパターンと記号を自己組織的に生成し、パターンと記号の相互作用により、未知の入力から種々の解の候補を生成する手法を提案する。

2. パターンと記号の位置づけ

ここで、本研究におけるパターン情報と記号情報の位置づけについて述べる。

パターン認識問題などにおいては情報が持つあいまいさをどのように扱うかが問題となっている。一般に、対象から抽出される特徴は主成分分析などにより取捨選択された後に、その対象の認識に利用される。例えば、図1のような魚からv_1～v_6の寸法特徴を得たとする。これらの特徴を要素とする特徴ベクトル空間が形成され、図2に示すように各種の魚のデータは特徴ベクトル空間内にプロットされる。認識はこの特徴空間内の距離を利用してなされる。しかし、抽出される特徴が互いに非線型な相関を持つことは多く、実際問題では相関を全く持たない独立の特徴を抽出することは極めて困難であると考えられる。このため、画像認識において特徴ベクトル間の距離をそのまま認識に利用することには限界がある。ファジィクラスタリングを用いたファジィ推論ではメンバシップ関数を上手に設定・調整することで、非線型空間内の認識性能の向上を期待している。本研究では、新しい観点として、特徴ベクトルを点として捉えるのではなく、空間的に広がりを持つ特徴パターンとして捉える。パターンという言葉は非常に広い意味を持つが、ここで扱うパターンとは特徴空間上のベクトルの集合であるとする。

図3の例では、画像A、B、Cからは特徴パターン

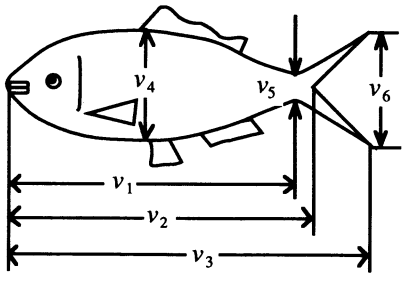


図1 特徴量の抽出の例

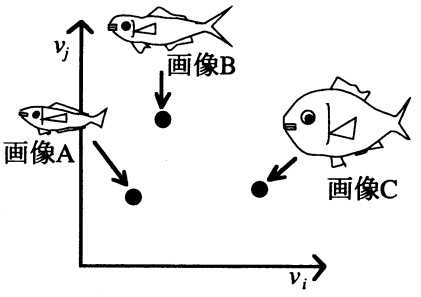


図2 特徴ベクトルによる表現

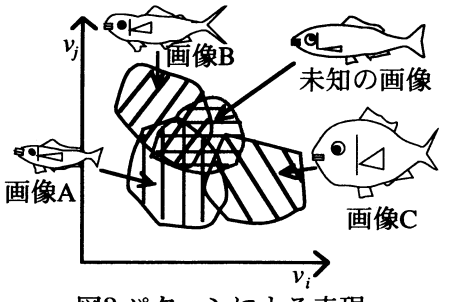


図3 パターンによる表現

A、B、Cがそれぞれ生成されている。これらパターン同士間には種々の距離が定義され得る。これらに対して、未知の画像から特徴パターンDが得られたとする。本稿ではパターン同士の種々の距離を利用することで、この未知画像の候補を次々と生成する不良設定問題解法の枠組みを提案する。

3. 提案システム

3.1 不良設定問題解法の枠組み

図4は本稿で提案する不良設定問題解法の枠組みを示す。本枠組みは仮説生成部と仮説検証部とからなる。特徴パターンの持つ距離から仮説生成部において記号が仮説として想起され、その仮説に対応する記憶パターンと入力パターンとの間でパターン推論が行われることで仮説の検証がなされる。この仮説生成、検証の過程を繰り返すことで、入力画像の解候補を生成する。

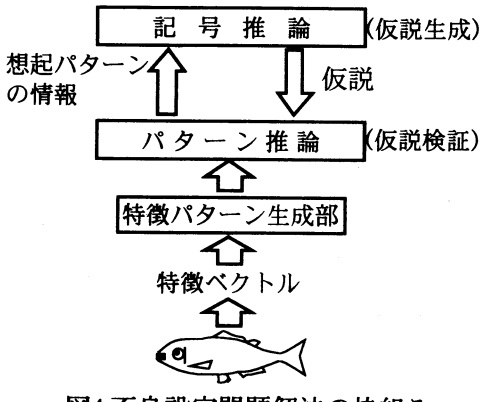


図4 不良設定問題解法の枠組み

3.2 特徴パターンの生成

提案するシステムにおいて、特徴パターンの生成はニューラルネットワークの一種であるコホーネンモデル[7]を利用する。図5(a)に示すように、コホーネンモデルは入力層と特徴マップ層からなり、入力層の各ユニットには各特徴量が入力される。特徴マップ層ではユニットが2次元格子状に配置されており、各ユニットは入力層の各ユニットとの間に重み付きの結合を持っている。特徴ベクトルが入力層に入力されると、特徴マップ層の各ユニットの重みベクトルと入力ベクトルとのユークリッド距離が計算され、この入力ベクトルとのユークリッド距離が最も近い重みベクトルを持つユニットが発火する。コホーネンモデルの特色としては、コホーネンモデルの学習アルゴリズムにより、特徴マップ層のユニット同士の近傍関係と各ユニットが反応する入力ベクトルの近傍関係が保存されること、また、特徴マップ層ユニットが持つ重みベクトルは一様には分布せず、コホーネンモデルの学習時に入力された特徴ベクトルの頻度分布に従うことなどが挙げられる。

前述の通り、従来のコホーネンモデルは特徴ベクトルの入力に対して特徴マップ層のユニットを一つだけ発火させる。それに対し、本稿では図5(b)に示すように入力ベクトルと重みベクトルとのユークリッド距離が小さいものから順に複数個発火させることにより特徴パターンを生成する。画像AとBの関係のように、特徴が近いもの同士は特徴パターン同士の重なりも大きくなる。

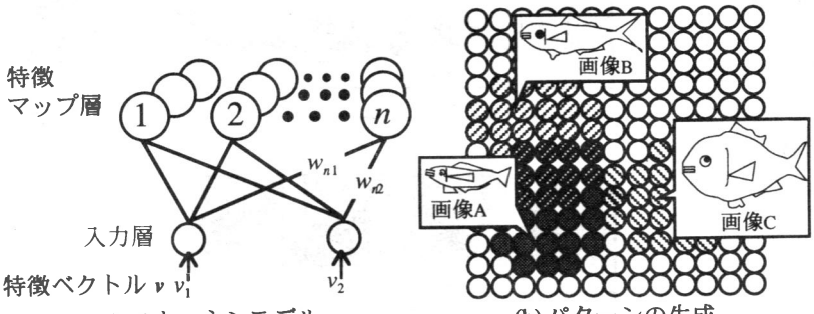
3.3 提案モデルの構造と学習

図6に提案するパターンと記号による推論を行うモデルを示す。提案モデルは入力層、特徴パターン生成部、パターン層と記号層からなる2層構造連想記憶ネットワークからなる。

ここでは提案モデルの学習について説明する。まず、観測された画像から抽出された特徴ベクトルが特徴パターン生成部に入力され、特徴パターンが生成される。特徴パターン生成部は前節で説明したコホーネンモデルにより実現され、あらかじめ、多数の画像から抽出された特徴ベクトルから特徴マップ層の重みベクトルを学習しておく。

パターン層はニューラルネットワークの一種である連想記憶モデルとなっており、各クラスを代表する画像から抽出された特徴ベクトルから生成された典型パターンを直交化したのちヘップ則により学習する。連想記憶モデル内では多重の距離を持つパターン同士で推論がなされる。

さらに、典型パターンそれぞれに対して記号層ユニットを一つずつ割り当てる。そして、それぞれの記号層ユニットはパターン層内のランダムに選ばれ



(a) コホーネンモデル　(b) パターンの生成

図5 特徴パターンの生成

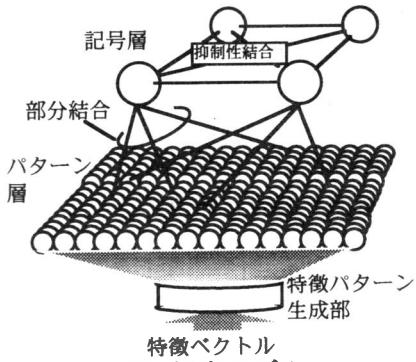


図6 提案モデル

た一部のユニットと結合を持ち、記号層ユニット l と特徴パターン層ユニット i 間の結合荷重 spw_{il} は

$$spw_{il} = \begin{cases} p_i \ (\text{結合有り}) \\ 0 \quad (\text{結合無し}) \end{cases} \tag{1}$$

とする。ここで p_i はパターン層ユニット i の状態(1 or -1)である。パターン層と記号層との間は、このモデルではパターン間の相関値を距離情報として用いている。

記号層のユニット j と l は抑制性の結合 sw_{jl} (< 0)を持ち、その抑制の度合いは経験的に定めたクラス間の距離、例えば、画像AはBとは近いがCとは遠い等というように経験的に決めた距離に応じて定めることができる。

3.4 パターン・記号推論

提案モデルにおける不良設定問題解法のプロセスであるパターン・記号推論について説明する。まず、入力画像から各種の特徴量が抽出され、特徴パターン生成部により生成された特徴パターンがパターン層に入力される。そして、記号層のユニット l はそれぞれに対応する典型パターンと入力パターンとの相関値をバイポーラ変換した α_l をパターン層からの入力として受ける。さらに他のユニットからの抑制性刺激を受けて次の非線形ダイナミクス[6]による想起を行う。l 番目の記号層ユニットの内部状態 u_l を次式で与える。

$$m\ddot{u}_l + f\left(\dot{u}_l, \omega t\right) + ku_l = \varepsilon \sum_m sw_{lm}\, s_m + d_3\alpha_l \tag{2}$$

$$f\left(\dot{u}, \omega t\right) = \left[d_0 \sin\left(\omega t\right) + d_1\right]\dot{u} + d_2\dot{u}^2 \mathrm{sgn}\left(\dot{u}\right) \tag{3}$$

ここで s_m は記号層の m 番目のユニットの出力、d_0、d_1 は線形抵抗の係数、d_2 は非線形抵抗の係数、sgn(・)は符号関数をあらわす。ただし、s_m、α_l は次式で表されるものとする。

$$s_m = \frac{1}{1 + \exp\left(-u_m\right)} \tag{4}$$

$$\alpha_l = \frac{2}{N_p}\sum_j p^l_j p_j(k) - 1 \tag{5}$$

ただし、N_p はパターン層のユニット数、p^l_j はクラス l を代表する典型パターンが入力されている時のパターン層ユニット j の出力である。(3)式の関数 f により(2)式の微分方程式は非線形ダイナミクスを有し、記号層ユニットの内部状態 u_l は、パターン層ユニットからの外部入力 α_l によって決まる値を中心に、不安定な振動を繰り返す。この振動は(3)式の係数 d_2 を小さくすると大きくなる。すなわち d_2 を小さくすると、記号層内の各ユニットの出力値の大小関係は逆転しやすくなる。記号層においては、出力値の最も大きなユニットが発火し、そのユニットが示す記号が想起されるものとする。そして、パターン層では記号層の発火ユニットから2層間の結合を介して刺激を受けながらパターンの想起が行われる。

いま、時刻 k における記号層のユニット l の出力が1であるとする。このときパターン層のユニット i がこの記号層ユニット l と結合しているとき p_i $(k+1)$は

$$p_i\left(k+1\right) = spw_{il} \tag{6}$$

と決定される。記号層のユニット l と結合がないパターン層のユニット i の出力は

$$p_i\left(k+1\right) = \begin{cases} 1 \left(\sum_j pw_{ij} p_j(k) \geq 0 \text{ のとき}\right) \\ -1 \left(\sum_j pw_{ij} p_j(k) < 0 \text{ のとき}\right) \end{cases} \tag{7}$$

と決定される。ただし、pw_{ij} はパターン層のユニット j から i への結合荷重である。そして、再びパターン層からの刺激を受けながら記号層の想起が行われ、その結果がパターン層へ返される。

以上のような相互作用を繰り返しながら、記号層のゆらぎにより未知の入力に対する異なる候補が次々と提示される。

4. 提案システムによる基礎的実験

4.1 実験条件

提案モデルを用いた基礎的な実験を行った。領域(0≤x<1，0≤y<1)内に一様に分布する各点を入力として、次式により相関を持った特徴ベクトル$\boldsymbol{v}$ を生成し、特徴パターン生成部の学習を行った。

$$v_1 = \left(\frac{x^2 + y^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

$$v_2 = \frac{1}{2}\left(x^{\frac{1}{2}} + x \cdot y\right) \tag{9}$$

また、(0≤x<1，0≤y<1)の領域を4×4の領域に等分割して16個にクラス分けを行い、各領域の中心からそのクラスを代表する典型パターンを生成した。また、この中心同士の(0≤x<1，0≤y<1)空間内における距離をクラス間の距離とした。

そして、ある値を50ステップおきに入力したときに、どのクラスが候補として提示されるかを観察した。

4.2 実験結果

図7(a)はゆらぎが小さい場合の実験結果の一部である。図の各ます内は上から想起パターン、クラスにつけられた記号、連想のステップ数を示す。パターン層では異なる典型パターンが次々と想起され、それに伴いクラスの候補として記号が提示されている。このように、想起される特徴パターンが移り変わるとともに提示されるクラスの候補が移り変わるのがわかる。図7(b)は記号層の動作に導入したゆらぎが大きい場合の実験結果の一部である。ゆらぎが小さい場合の結果と比べて、パターン層、記号層ともに変化が激しく、また、入力パターンとは重なり度合いの低い特徴パターンも観測された。

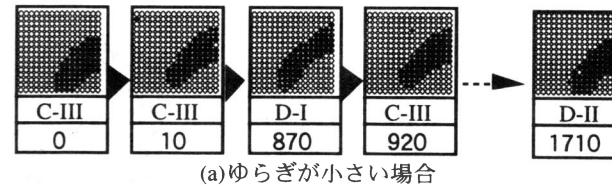
以上のことから、ゆらぎが大きいときには候補の探索を広く粗く行い、ゆらぎが小さいときには狭い範囲で詳細に探索していると解釈できる。

5. まとめ

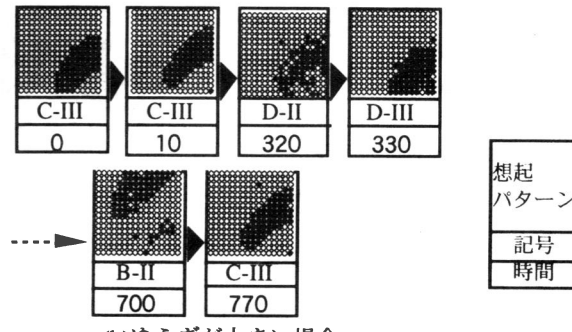
情報のあいまい性を扱う手法として、不良設定問題解法の枠組みを示し、ファジィ推論とは観点の異なる、パターンと記号による推論手法を提案し、パターンと記号を扱う推論モデルにより基礎的な推論実験を行った。

今後の課題として、次々と提示されるクラスの候補を自動的に絞り込む機構を検討する。

本研究の一部は（財）電気通信普及財団の助成を受けて行われた。ここに謝意を表する。



(a)ゆらぎが小さい場合



(b)ゆらぎが大きい場合

図7 実験結果

6. 参考文献

[1]R. Sun, "Integrating Rules and Connectionism for Robust Commonsense Reasoning", Wiley-Interscience.

[2]T. Takagi, T. Yamaguchi, M.Sugeno, "Conceptual Fuzzy Sets", Proc. of Int'l Fuzzy Eng. Symposium '91, pp.261-272(1991).

[3]N. Sakurai and T. Omori, "Image Recognition with Cooperation of Symbolic Inference and Neural Networks", Proc. of Int'l Conf. on Artificial Neural Network '92(1992).

[4]T. Omori, N. Yamanashi, "PATON: A Model of Concept Representation and Operation in Brain", Proc. of Int'l Conf. on Neural Network'94, pp.2227-2232(1994).

[5]古橋、服部、内川「パターンと記号を扱う連想記憶モデルとカオス的想起」第11回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 pp749-752

[6]谷「カオス的再急降下法を適用したニューラルネットにおける学習及び記憶想起の動特性について」電子情報通信学会論文誌，vol.j74-A No.8 pp.1208-1215 (1991).

[7]T.Kohonen「自己組織化マップ」シュプリンガー・フェラーク東京.

問い合わせ先
〒464-01 名古屋市千種区不老町名古屋大学
工学研究科電子情報学専攻 服部 陽一郎
TEL: 052-789-2793 FAX: 052-789-3166
Email: hattori@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THS3-3

マルチモーダルユーザインタフェースにおける計算的・記号的コンピューティングの融合
Fusion of Symbolic and Computational Processing for Multi Modal User Interface

田野　俊一
Shun'ichi TANO

電気通信大学　大学院情報システム学研究科
Graduate School of Information Systems
University of Electro-Communications

Abstract. Recently, the multi media technology and the network technology enable us freely to access various multi media information spread in the world. However, people is tied up in front of a small CRT screen and the input modalities to the computer are also limited to a keyboard and a mouse. We proposed the new design concept of the next generation user interface and developed a system, called RVI-desk, which provides with the intelligent user interface in which a user can communicate with the computing environment through multi modalities, such as voice, handwriting, pen gesture, printed material, touch screen and keyboard. Through the development of the system, we found that it was indispensable deeply to combine the symbolic and computational processing in order to realize a software architecture for the next generation user interface. Potentially the fuzzy methodologies play an important role to combine the symbolic and computational processing due to the inherent nature of fuzzy theory. The purpose of this paper is (i) to show that the next generation user interface is the attractive field for fuzzy methodologies, (ii) to clarify that the breakthrough is the deep fusion of the symbolic and computation processing, (iii) to introduce two leading systems we have developed as examples of the fusion of the symbolic and computation processing, and (iv) to appeal that further research is needed.

1．はじめに

近年、マルチメディア技術、ネットワーク技術の飛躍的な進展により、多種多様な情報を自由自在に利用可能な個人情報環境が出現し、まさに第２世代の情報化社会を迎えつつあるように見える。しかしながら、コンピュータの利用者は相変わらず17インチや20インチの狭いモニタに縛りつけられ、コンピュータへの入力はキーボード、マウスの組み合わせに限定されているのが現状である。さらに、このようなコンピュータ側からの不自然な制約は単に使いやすさを減少するばかりでなく、知的創造活動をも潜在的に阻害していると考えるべきである。

現在ユーザインタフェースの主流となっているグラフィカルユーザインタフェース(GUI)が登場してすでに３０年近くが経過している。最近、ユーザインタフェースをコンセプトから根本的に考え直しポストGUIを模索する研究が活発に行われている。

本稿では、２章で、次世代ユーザインタフェースの我々のコンセプトを提案し、有効性検証のために開発した実験システムRVI-Deskを説明する。３章で、次世代UIの実現のために必要となるソフトウエアーキテクチュアを示し、Symbolic AI（記号的知的処理）とComputational AI（計算的知的処理）の融合が必須であることを明らかにする。４章では、この記号的処理と計算的処理の融合として位置付けられる従来研究を概観し、より深い意味のレベルでの融合の例として、我々が開発した２つのシステムを５章、６章で紹介する。これら２つのシステムは本来別の目的で開発したシステムではあるが、Symbolic AIとComputational AIの深いレベルでの融合に関する、初期の研究とみなせる。最後に７章で今後の課題をまとめる。

2．次世代ユーザインタフェースのコンセプトと実験システム　RVI-Desk

2．1　RVIコンセプト

ポストGUIを目指し多くのUI研究が世界各所で進められている。これらの研究は斬新なUIコンセプトに基づき設計されており、下記の３つに分類することができる[6,7]。

[仮想世界指向UI]　コンピュータの中にデスク環境やオフィス環境をVirtual RealityやComputer Graphicsの技術を用いて、そっくり生成し、その中で仕事をすればよいという考え方。つまり、コンピュータの中に実世界を作るというアプローチ。

[実世界指向UI]　上記とは逆に、実世界をコンピュータによって強化しようという考え方。実世界へ回帰するという意味で、Back to Real Worldと呼ばれたり、また、コンピュータによって実世界が機能的に強化されるという意味で、Computer-Augmented Environmentsと呼ばれたり、コンピュータによって機能強化された実世界の物がいたるところにあるという意味で、Ubiquitous Computingと呼ばれる。

[知的UI]　ユーザインタフェースの世界にも知的処理が必要であるという考え方。従来は知的処理は特定のアプリケーション内で複雑な問題解決のために利用されてきたが、これがユーザインタフェースの世界でも利用されるようになってきた。

従来のユーザインタフェースは図１に示すように、上記３つのコンセプトの軸で位置付けることができる。

一見、現実世界重視と仮想世界重視の考え方は正反対に見えるが、実は融合可能であり、融合したシステムの方がより現実的、人間的ではないかと考えられる。また、完全な現実世界重視、完全な仮想世界重視はいずれもほ

とんど実現困難であり、両者の融合がキーである。

一方、現在ではすべての操作を例えばGUIによるダイレクトマニピュレーションなどで明示的に指示しなければならない。複雑になる一方のアプリケーションソフトウエアで何ができるかということに加えて、どのようにやるかまでユーザが知らなければならない。また、現在、パソコンやネットワークには莫大なデータが保持されているにもかかわらず、コンピュータがその意味を認識できないでいるために、その貴重なデータの活用が十分行われていない。

この状況を打破するためには、ダイレクトマニピュレーションからインダイレクトマネージメントへの進化が必須であり、このためにはユーザインタフェースは知的にならなくてはならない。

このように、次世代のユーザインタフェースは、現実世界指向UI、仮想世界指向UI、ＭＭＩを含む知的UIの融合をキーコンセプトとして実現されると予想している。我々はこのキーコンセプトをそれぞれの頭文字をとってRVI-conceptと呼んでいる[6,7]。

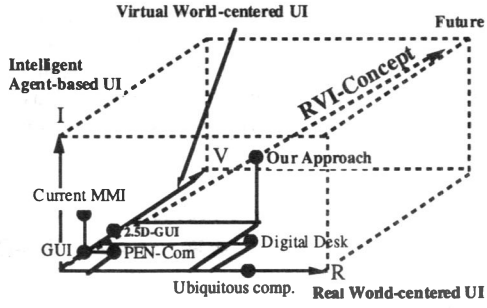


図１　３つのコンセプトの融合：RVI-Concept

２．２　RVI-Desk

RVI-conceptの有効性を実証するために、RVI-conceptを用いて個人情報環境の設計を行い、RVI-Deskと呼ぶ個人情報環境の試作を行った[7-10]。個人情報環境RVI-Deskは、机の上に紙とペンがあるという実世界のよさを重視したコンピュータ利用環境であり、コンピュータの存在を意識させることなく、その強力な処理能力を、キーボード、マウスを含む、音声、手書き、ジェスチャ等のマルチモーダルな形態で自然に利用できる。

具体的には、図２の写真に示すように、実デスクの上に仮想的な作業環境を表示する環境ビューワ（タッチセンサ付モニタ）、紙の使い勝手を忠実に実現したインタフェースを持つ複数の仮想ペーパ（ペンパッド）、実物の印刷物とのインタフェースに用いるスキャナ付ペン、マイク、スピーカなどで構成される環境全体である。

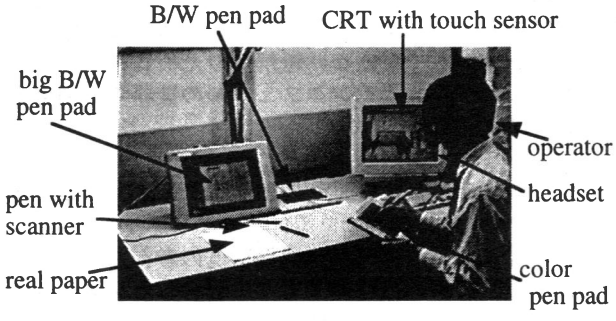


図２　RVI-Desk

RVI-Deskにおいて音声、テキスト（ペン、キーボード、印刷物）、ジェスチャ（ペン、タッチパネル）を組み合わせて処理依頼を行うと、その意図を解釈し、従来のGUIをユーザに代わって操作したり、あるいはアプリケーションを自動的に起動し、その処理結果を、聴覚（非言語音、音声）、視覚（文字、表、閃光、アニメーション）に訴える形式でユーザに提示する。

RVI-Deskは、図３に示すように３つのサブシステムーMMA (Multi Modal Analyzer), MMIP (Multi Modal Information Processing), MMG (Multi Modal Generator)ーから構成されるソフトウエアで実現されている。

MMAでは、キーボードによるテキスト、マイクによる音声、ペン型スキャナによる印刷文字、ペンによる手書き文字およびジェスチャの入力を扱う。これらの入力は、まず、個々のモダリティごとに対応する認識エンジンにより認識され、その後、それらの認識結果は統合される。

MMIPでは、これらのマルチモーダル入力認識結果および現在の対話過程の文脈から、ユーザの発話意図を推論により推定し、次にその意図を実現するための各機器の制御方法、アプリケーションソフトウェアを制御するコマンドシーケンス、あるいは、ユーザへ応答すべき情報を、推論により導出する。

MMGでは、MMIPで生成されたユーザへ応答すべき情報を、どのメディアで、どの時間順序で表示するかを計画立案し、さらに、それらの実行を監視する。この実行には、MMIPで生成された各機器の制御方法、アプリケーションソフトウェアを制御するコマンドシーケンスの実行を含んでいる。

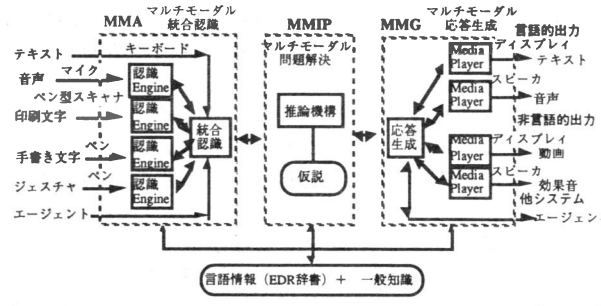


図３　RVI-Deskのソフトウエア構造

３．基本アーキテクチュアと実現上の問題点

RVI-Conceptで設計されたシステムではマルチモーダル情報を用いた知的処理が基本になるので、図４に示すシステムアーキテクチャは共通して現われる[6]。つまり、キーボードによるテキスト、マイクによる音声、ペンによる手書き文字およびジェスチャの入力などを、まず個々のモダリティごとに対応する認識エンジンにより認識する。その後それらの認識結果は統合され、これらのマルチモーダル入力認識結果および現在の対話過程の文脈から、ユーザの意図を推定しユーザへ応答すべき情報を導出する。生成されたユーザへ応答すべき情報を、どのメディアで、どの時間順序で表示するかを計画立案し、さらにそれらの実行を監視する。

認識率の向上や自然な出力の生成のために、これらのコンポーネントは単方向でなく協調動作が可能な密なフィードバック連携で結合され、かつ、迅速な反応を確保するために、刺激-反応のショートカットが複数段存在す

る構造となっていることが必要である。

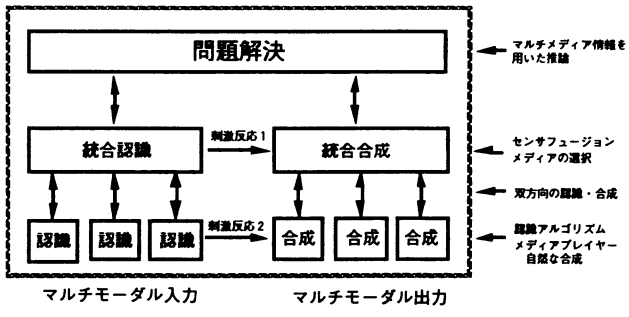


図4　システムアーキテクチュア

この基本ソフトウエアの各コンポーネントは密な連携を行う必要があり、基本ソフトウエア全体が統一的な手法で実現されることが望ましい。

問題はいかなる理論を基に構築するかにある。現在、旧ＡＩと呼ばれている記号操作に基づく知的処理手法とComputational IntelligenceやSoft Computingと呼ばれる計算に基づく知的処理手法がある。前者は論理的な意味の処理に向いており、後者は、刺激・反応的な処理に向いていると言われている。

従って、図4のシステムアーキテクチュアでは、入出力に近い認識や合成はComputational AIを用い、高度な問題解決部分はSymbolic AIを用い、実現するといった分担が自然であると考えられており、実際、認識エンジンや推論エンジンはそのように構築されているケースが多い。前章で説明したRVI-Deskも例外ではない。ところが、現実には、認識・合成において処理性能の向上のために意味の処理を統合したアルゴリズムが求められ始めてきており、また、問題解決においてもあいまいさへの対応やロバスト性の確保のために計算論的アプローチの取り込みが課題となりつつある（表1参照）。

これは現在、Computational Intelligenceと呼ばれる計算に基づく知的処理の欠点が次第に明確になり、シンボリズムへ回帰する動きと符合する。

以上のように、図4のシステムアーキテクチュアの実現には、自然言語などの高次な意味の処理から、音声入出力や手書き文字認識などの低次のデータ処理まで統一的に取り扱える方法が必須であり、Computational AIとSymbolic AIを統合するアプローチが有望であると考える。

現在のファジィ理論の用いられ方はどちらかと言えば、計算的手法としての利用である。しかしその本質は、自然言語の意味の表現と処理にあり、計算的手法により意味の論理的処理を目指したアプローチであったはずであり、次世代のユーザインタフェース構築のための中心的方法として用いられる可能性を秘めている。

表1　Symbolic & Computational AI

	刺激-反応	推論
シンボリズム 旧ＡＩ	×	○
Symbolic & Computational AI	◎ (知的さの付与)	◎ (ロバスト、高次)
コネクショニズム Computational Intelligence Soft Computing	○	× (△)

4．Symbolic & Computational AIの従来手法

Symbolicな手法とComputationalな手法の融合の出発点はファジィ集合論[1]であるとも言える。つまり、「高い」というシンボルとメンバシップ関数で表わされた分布を相互変換するという着想は、SymbolとComputationの融合である。さらに概念ファジィ集合[2]ではこのシンボルと分布の関係を拡張している。また、最近ではパターンと記号を関連づけて行う研究も進められている。例えば、人工知能の研究では、様々な情報の統合において、パターンと記号の融合が主張されるようになっており[4,5]、また、ファジィ研究においては、同様に、パターンと記号の融合が研究されている[3]。

しかしながら、その融合のセマンティックレベルは低く、表1に示した融合による問題解決能力の質的向上が得られるまでには至っていない。

ファジィ理論はその本質的な性質から考えて、SymbolとComputationの融合において重要な役割を果たす能力を潜在的に持っていると考えられるが、現在のところ利用可能な方式は得られていないのが現状である。そこで、以下２つの章では、より深い意味のレベルでの融合の例として、我々が開発した２つのシステムを説明する。これら２つのシステムは異なる目的で開発したシステムではあるが、Symbolic AIとComputational AIの深いレベルでの融合に関する、初期の研究とみなせる。

5．　ファジィ推論システムFINEST
―　論理的シンボルと計算論的手法の融合　―

FINEST (Fuzzy Inference Environment Software with Tuning)と呼ぶチューニング機構を持つあいまい推論のためのソフトウエア環境を開発した[11,12]。FINESTの特徴として下記[a],[b]がある。

[a] 相乗性／相殺性を有する結合演算子

単に"If X and Y Then Z"と表現した場合、多くの場合そこに表れる"and"の意味はあいまいである。厳格なandかもしれないし、弱いandかもしれない。外国為替予測システムの開発過程では、"and"に相乗性がある場合が頻出した。

そこで、従来の論理積(T-norm)，論理和(T-conorm)に、相乗性の性質を付加し新たな結合演算子とした。この演算子は、相乗性の強さや、相乗性が表れる範囲等のパラメータにより特徴付けられている。さらに、同種の性質である相殺性も相乗性の特殊ケースとして表すことができる。

[b] Implication方法

ファジィ理論には多種多様なImplication　関数が存在しているが、実応用の場面においてそのImplication　関数の選択が困難であるという問題点がある。

あいまい推論のよさは、Implication　関数を適切に選択すれば、非ファジィ理論では対応できないさまざまな推論形態が実現できることにある。例えば、"The more ..., the more ..."型のグラジュアルルールがその例である。

Implication　関数の一般化（パラメータ化）を行い、パラメータの値を変化させることにより、推論の性質が変化し、推論方式の選択を容易化した。

上記[a]は、論理的なシンボルである「かつ」「または」と計算論的手法との融合、[b]は条件と結論の関係を表わす論理的なシンボルである「ならば」と計算論的手法との融合、であると考えられる。つまり計算論的手法との融合が、形容詞的シンボルから論理的シンボルへと拡張したという点が重要である。

6. ファジィ自然言語システムFLINS
ー メタ推論・類推と計算論的手法の融合 ー

一般の会話で用いるあいまいな自然言語の取り扱いを目標に、自然言語対話システム FLINS: Fuzzy Lingual Systemの開発を行った[13,14]。

自然言語内に現われるあいまいさの分析に基づき、3階層からなるあいまい推論機構を設計した。

3階層あいまい推論の最下層は、通常の非ファジィ推論、中間層が現在のファジィ理論を直接使ったファジィ集合、ファジィシンボルベースのあいまい推論、最上位層は、ファジィの手法により拡張された事例ベース推論である。最下層である基本部では非ファジィな推論、logicalな推論を行う。いわゆるモダスポネンスである。つまり、自然言語の単語は単なるラベルとして扱われ、厳密なマッチが行われる。中間層のあいまい推論部ではいわゆるファジィ推論、fuzzy logicalな推論を行う。つまり、自然言語の単語はファジィセット（分布）で表現できるとして扱われ、分布が似ていればマッチできる。このレベルまでは、一応logicalな推論だとみなせる。最上位のあいまい事例ベース推論部（F-CBR: Fuzzy Case-based Reasoning）部では、論理的には誤っているが、直観的には正しい推論を行う。つまり、事象間に明らかな相似性がなくても、むりやりに理由をつけて推論を行わせる。

入力された質問に対して、最下層の推論機構で完全にマッチできない場合、自動的に中間層においてあいまいなマッチングが試みられる。即ち、最下層では文字列の完全なマッチが要求されるが、中間層ではファジィ理論を用いたファジィマッチングが許されることになる。ただし、このファジィマッチングでも言葉の意味するファジィ集合が与えられている必要がある。最上位層のF-CBRでは、このような表面上の類似性ではなく、知識を用いた類似性を取り扱う。例えば、太陽系と原子モデルの類似性がそれに当たる。FLINSでは、従来の類推を(a)知識ベースの利用を明確にしアルゴリズムに組み込んだこと、(b)ファジィ理論によって拡張したことを特徴とするF-CBRを有しており、中間層でのファジィ理論によるマッチが失敗した場合、自動的にF-CBRが呼び出される。

FLINSでは、一般の推論（上記で説明した3階層推論）がメタ推論機構として動作し、一般の知識がメタ知識として利用されるように設計されている。つまり、F-CBRまでもがメタ推論に用いられることになる。このような構造をとることよりメタ知識と一般知識の差を無くすことができ、メタ推論に一般知識が適用可能となった。

この研究では、高度な記号推論であるメタ推論、類推に対し、ファジィ理論による計算論的手法を組み合わせることによって、ロバストでかつ高度な推論の実現を試みた点が重要である。

7. 今後の課題

次世代UIには、マルチメディア情報を認識し、マルチメディア知識を用いて高度な知的判断を行い、マルチメディアを使って出力する機能が必須である。ハードウエア、ソフトウエア技術の進展により、次世代UIの実現が夢ではなくなってきている。完全な実現には、センサ情報などのローレベルな情報から人間の有する高度な常識まで統一的に表現／処理可能なモデルの構築がブレークスルーとなる。つまり、シンボル操作（Symbolic AI）と分布・刺激等の数値操作（Computational AI）が深い意味レベルで統合した問題解決システムの探究、および、この枠組み内での機械学習の探究が望まれている。ファジィ技術が重要な役割を果たす可能性があり、今後様々な観点からの研究が期待される。

参考文献

[1] L. A. Zadeh: Fuzzy sets, Information and Control, vol. 8, pp.338-353, 1965.

[2] 高木, 山口, 菅野：概念ファジィ集合とその連想記憶による実現, 第7回ファジィシステムシンポジウム講演集, pp.359-364, 1991.

[3] 竹内、古橋、濱田、内川：あいまい情報と記号情報による情報処理の一提案, 電気関係学会関東支部連合大会講演集, p. 299, 1996.

[4] 岡：パターン情報から情報統合にむけて－場という概念を中心に－, 人工知能学会誌, vol. 11, no. 2, pp.177-184, 1996.

[5] 森：人工知能とパターン認識, 人工知能学会誌, vol. 12, no. 1, pp.46-47, 1997.

[6] 田野：次世代ユーザインタフェースの研究トレンド, 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.2, pp.216-228, 1996.

[7] Tano, S., et. al. : Design Concept Based on Real-Virtual-Intelligent User Interface and Its Software Architecture, HCI-97 (to appear).

[8] Namba, Y., et. al.: Complex Chained Function Structure for Human-Computer Interface, HCI International '95 Poster Session, p. 32, 1995.

[9] 青島,難波,田野：機能連鎖構造に基づくヘルプ応答の生成, 第10回人工知能学会全国大会, pp.513-516, 1996.

[10] 冨田、他：ペン型スキャナを用いたマルチモーダル統合認識, 情処第54回全国大会, 4分冊, pp.113-114, 1997.

[11] Tano, Oyama and Arnould: Deep Combination of Fuzzy Inference and Neural Network in Fuzzy Inference Software - FINEST, Fuzzy Set and Systems , 1996.

[12] Arnould, Tano, Miyoshi, Kato, Oyama, Bastian and Umano: Algorithms for Fuzzy Inference and Tuning in the Fuzzy Inference Software FINEST, FUZZ-IEEE'95, pp. 1057-1062, 1995.

[13] Tano, Okamoto, Iwatani, Inoue and Fujioka: Three-layered Fuzzy Inference and Self-wondering Mechanism as Natural Language Processing Engine of FLINS, IEEE-TAI'94, pp. 212-218 , 1994.

[14] 岡本, 田野, 井上, 藤岡：ファジィ量限定子を含む言語命題に対する真理値限定に伴う制約と推論方法, 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.3, pp.519-531, 1996.

[問い合わせ先]
田野 俊一
電気通信大学 大学院情報システム学研究科
〒182 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1
Tel:0424-83-2161 (ext.5222) Fax:0424-81-5934
tano@is.uec.ac.jp

THS4-1

ファジィ集合を用いた概念形成モデルの提案

A Proposal of Conceptual Clustering Model Using Fuzzy Sets

林 勲*，津田 エミ子*，小澤 順**
I.Hayashi, E.Tsuda, J.Ozawa

* 阪南大学 経営情報学部
** 松下電器産業(株) 中央研究所
* Dept. of Management and Computer Sciences, Hannan University
** Central Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

Abstract. A new conceptual clustering model is discussed here to construct conceptual trees using membership values. In this paper, a new similarity measure is first defined to scale the relationships between membership values in a class or classes. Next, we discuss how to assign the data to any class of the conceptual tree. we define here the four kinds of operators to do it, which are placing operator, creating operator, merging operator and splitting operator. Since the new model is formulated using fuzzy sets, the model is called here the fuzzy conceptual clustering model. The fuzzy conceptual clustering algorithm is formulated and applied to a simple numerical example to verifying its effectiveness.

1. はじめに

ある対象物を分類する場合，人間は分類作業の過程で典型的概念を暗黙的に形成し，対象物との類似性を計測しているといわれている[1]．この概念形成モデルをプロトタイプモデル[2),3)]といい，認知心理学の観点から多くの臨床データや実験により妥当性が証明されている．S.K.Reed[3)]は顔図形を2つのカテゴリーに分類する実験で，被験者がプロトタイプを含む新たな顔図形を高正解率で分類できることを証明した．また，J.R.Andersonら[4)]は，人間の分類作業や再認テストから知識をルールとして獲得し，知識ネットワークを形成している．一方，機械学習において，分類木を構築する概念クラスタリング手法[5)]が提案されている．その一手法として，COBWEB[6),7)]は有用である．対象データが与えられた場合，データ間やクラス間の類似度を計算し，分類指標が最大となる分類木のクラスにデータを割り当てる．この手順を繰り返し，分類木の構造を変更し，結果の分類木を得る．

本論文では，ファジィ集合を用いて人間の主観量と属性の重みを取り扱う新たな概念クラスタリング手法[8)]を提案する．このモデルをファジィ概念形成モデルと呼ぶ．データが与えられた場合，メンバーシップ値からデータ間やクラス間の類似指標を計算し，分類木を構成する．ただし，クラス内類似指標とクラス間類似指標に加えて，クラス間の占有率を新たに定義した分類指標を提案する．COBWEBでは，クラス間の占有率はクラス間類似指標と等しくなる．メンバーシップ値の場合には，クラス間類似指標が等しい場合でも，クラス間に占有率の差が生じるので，この違いを分類指標に考慮した．分類木はCOBWEBと同様な4つの変更操作により構成される．ただし，従来の4操作に修正を加えた新たな操作手順を提案する．データは分類木の中で分類指標が最小となるクラスに割り当てられる．ここでは，本手法とCOBWEBの拡張手法を数値例に適用し，本手法の有効性を検証する．

2. 分類指標

いま，n個の属性x_j, j=1,2,…,nに対して，N個のデータx_{ij}, i=1,2,…,Nが与えられているとする．データx_{ij}を分類木のL個のクラスC_k, k=1,2,…,Lに分類することを考える．ただし，属性x_jには，$m(j)$個のファジィ集合F_{js}, s=1,2,…,$m(j)$が設定されており，各クラスC_kにはデータx_{ij}, i=1,2,…,$N(k)$が含まれているとする．クラスの分類指標Iを次のように定義する．

$$I=\sum_{j=1}^{n}\mu_j\sum_{k=1}^{L}\sum_{s=1}^{m(j)}(w_1I_1+w_2I_2+w_3I_3) \tag{1}$$

$$0\leqq w_1, w_2, w_3\leqq 1,\quad w_1+w_2+w_3=1$$

$$I_1=\sum_{i=1}^{N(k)}|\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})-\mu_{Fis}{}^k|\log(2/|\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})-\mu_{Fis}{}^k|)/2 \tag{2}$$

$$I_2=\sum_{k=1}^{{}_LC_2}(|\mu_{Fis}{}^k-\mu_{Fit}{}^k|+1)\log(2/(|\mu_{Fis}{}^k-\mu_{Fit}{}^k|+1))/2 \tag{3}$$

$$t=1,2,\cdots,m(j),\quad t\neq s$$

$$I_3=\sum_{k=1}^{L}\sum_{i=1}^{N(k)}(\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})\log(\sum_{k=1}^{L}\sum_{i=1}^{N(k)}\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})/\sum_{i=1}^{N(k)}\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})))/\sum_{k=1}^{L}\sum_{i=1}^{N(k)}\mu_{Fis}{}^k(x_{ij}) \tag{4}$$

$$\mu_{Fis}{}^k=\sum_{i=1}^{N(k)}\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})/N(k) \tag{5}$$

ただし，μ_jは属性x_jに対する重みであり，w_1, w_2, w_3はそれぞれ，I_1, I_2, I_3に対する重みである．

I_1はデータx_{ij}のメンバーシップ値$\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})$に対するクラスC_kのクラス内類似指標を表している．$\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})$のクラスC_kでの平均値からの偏差を計算し，情報エントロピーを計算する．平均値のデータはプロトタイプを形成する[1]．I_1の値は小さいほどよい．次に，I_2はクラスC_kのクラス間の類似指標を表している．クラス間での$\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})$の平均値の差に対する情報エントロピーを計算する．I_2の値は小さいほどよい．また，I_3はクラスC_kの$\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})$に対するクラス間の比率を表している．ここでは，この指標をクラス比類似指標と呼ぶ．クラスC_kのメンバーシップ値$\mu_{Fis}{}^k(x_{ij})$に対する占有率から情報エントロピーを計算する．I_3の値は小さいほどよい．

分類指標Iは，I_1, I_2, I_3の重みつき平均である．したがって，Iの値が小さいほど，その分類木の構成が正しいことを表す．COBWEBでは，クラス内類似度とクラス間類似度から分類指標が定義されている．しかし，メンバーシップ値を取り扱う場合，クラス比類似指標を考慮する必要がある．

類似指標I_1, I_2, I_3を用いて，与えられたデータによって生じるクラス内の矛盾の度合いを次のように定義する．

$$C = 2I_1 / (I_2 + I_3) \tag{6}$$

クラス内類似指標I_1の値がI_2やI_3の値よりも大きい場合には，クラス内部の非類似度がクラス間の非類似度よりも大きくなるので，分類木のクラスの構成は矛盾した状態といえる．この場合，$C > 1$となる．一方，I_1の値が小さい場合には，それぞれのクラスでの類似度は高いといえるので，矛盾の度合いは小さい．この場合，$C < 1$となる．

3. 分類木の構築操作とアルゴリズム

与えられたデータに対して，次の４操作の中で，分類指標が最小となる分類木のクラスにデータを追加させる．

(操作1) 既存クラスへの付加
(操作2) 新たなクラスの生成
(操作3) 既存クラスの統合
(操作4) 既存クラスの解体

操作1の既存クラス付加とは，分類木の既存クラスにデータを追加する操作をいう．図1に事例を示す．クラスC_pの分類木にデータcを与えた場合，既存クラスC_pへ付加される．操作2の新規クラス作成とは，新規クラスにデータを追加する操作をいう．図2に事例を示す．与えられたデータcは既存データbとともに新規クラスC_qに追加される．操作3のクラス統合とは，分類指標の小さい２つのクラスを統合し，与えられたデータを追加する操作をいう．図3に事例を示す．分類指標の小さいクラスC_qとクラスC_rとがクラスC_sに統合している．操作4のクラス解体とは，分類指標が最小なクラスを解体する操作をいう．図4に事例を示す．データa,bが所属するクラスC_qが解体され，データa,bは上位クラスのC_pに所属する．

分類木は次のアルゴリズムにしたがって構築される．

手順1) データを逐次的に選択する．

手順2) 分類木のクラスの中で，4つの操作から適応できる操作を選択する．

手順3) 分類指標Iを計算し，最小となる操作を選択して，データをそのクラスに追加する．ただし，分類指標の値が同値の場合には，適用する順で最後の操作を採用する．

手順4) すべてのデータが分類木に分類された時点で，アルゴリズムを終了する．

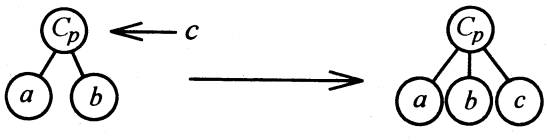


図1 既存クラスへの付加の事例

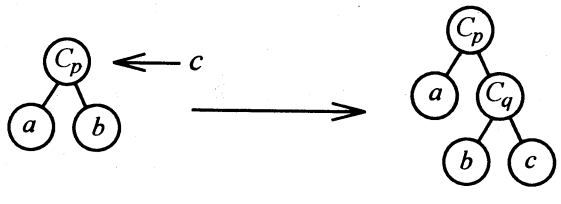


図2 新規クラスの作成の事例

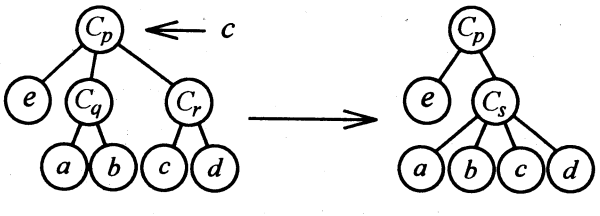


図3 既存クラスの統合の事例

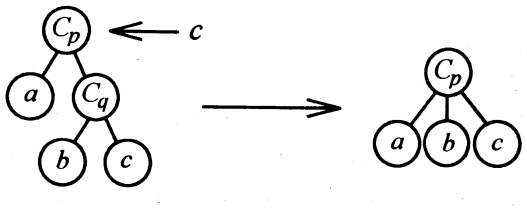


図4 既存クラスの解体の事例

4. 数値例

ファジィ概念形成モデルの有用性を検討するために，アルコール飲料の分類の事例を取り上げる．いま，表1のような，原料，製造法，アルコール度数，発酵･貯蔵期間，価格の5つの属性に対する各種のアルコール飲料のデータが与えられているとする．各属性に対して，ファジィ集合を設定する．図5に発酵貯蔵期間のファジィ集合を示す．全体では，16種類のファジィ集合を設定した．

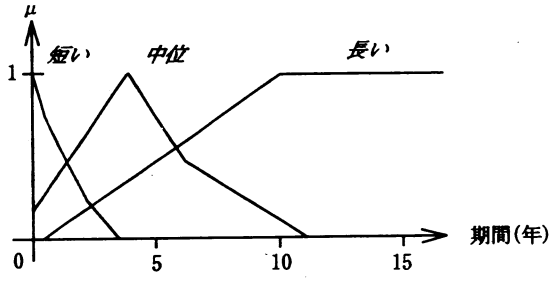


図5　酵貯蔵期間のファジィ集合

表1　アルコール飲料のデータ

種類	原料	製造法	度数	発酵貯蔵期間	価格(円)
ウイスキー	麦，穀物	蒸留法	40	10年	2,000
ワイン	ブドウ	発酵法	10	2年	3,500
ビール	麦，米	発酵法	5	1カ月	600
ブランデー	ブドウ, 果実, 穀物	蒸留法	60	6年	5,000
清酒	米，麦，穀物	発酵法	15	2カ月	1,500

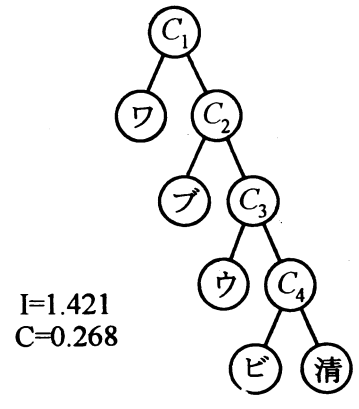


図7　結果の分類木

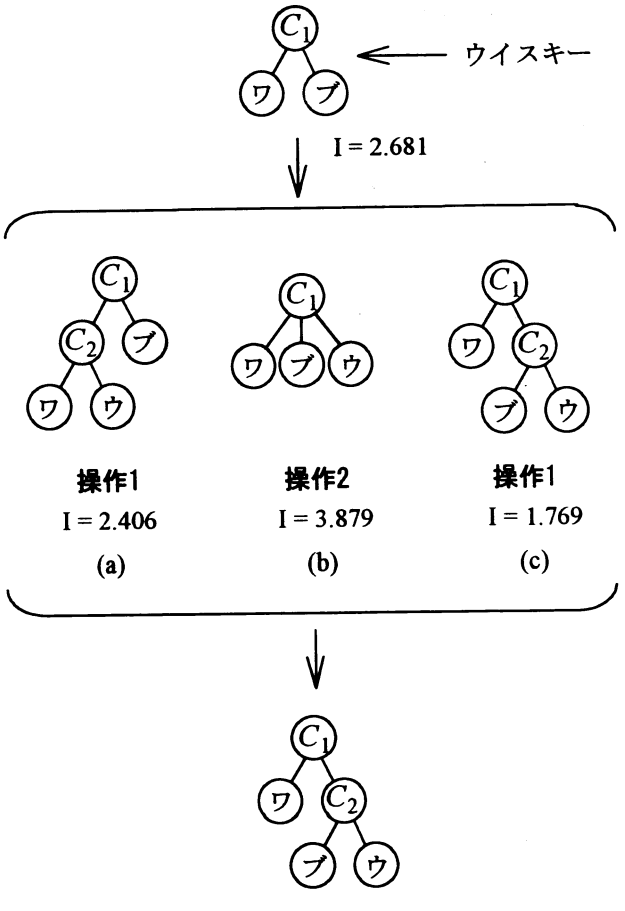


図6　分類木の構築過程

実験として，ワイン→ブランデー→ウイスキー→ビール→清酒の順にデータを与えて分類木を構成した．分類木の構成過程を図6に示す．ワインとブランデーのクラスC_1から構成されている分類木に，ウイスキーのデータを加える．ここでは，操作1と操作2が適用できるので，候補として，(a)，(b)，(c)の分類木が考えられる．分類指標を計算し，I(a)=2.406, I(b)=3.879, I(c)=1.769より，(c)の分類木を採用する．これらの手順を繰り返し，最終的に図7の分類木を得た．同じクラスC_4に所属するビールと清酒は，表1より属性値が類似していることがわかるので，結果の分類木は納得ができる．また，ウイスキーとブランデーとは製造法やアルコール度数が類似しており，この点も分類木に反映されている．

次に，本手法の有効性を検討するために，本手法とCOBWEBの拡張手法との比較をおこなった．COBWEBの拡張手法の分類指標を次のように定義した．

$$I = 1 - \sum_{j=1}^{n} \mu_j \left(\dot{+}_{s=1}^{m(j)} \prod_{k=1}^{L} \mu(x_{ij}|C_k) + \dot{+}_{k=1}^{L} \prod_{s=1}^{m(j)} \mu(C_k|x_{ij}) \right) / 2 \quad (7)$$

$$\mu(x_{ij}|C_k) = 1 - \sum_{i=1}^{N(k)} | \mu_{Fis^k}(x_{ij}) - \mu_{Fis^k} | / N(k) \quad (8)$$

$$\mu(C_k|x_{ij}) = | \mu_{Fis^k} - \sum_{k=1}^{L} \mu_{Fis^k} / L | \quad (9)$$

ここで，$\mu(x_{ij}|C_k)$はクラスC_kのクラス内類似指標であり，$\mu(C_k|x_{ij})$はクラス間類似指標である．なお，$a \dot{+} b = a+b-ab$ である．分類指標Iの値が小さいほど，分類木の構成が正しいことを表す．

比較実験では，30種類のデータを異なる順で分類木に与え，本手法と拡張手法によって得られた分類木の分類指標と矛盾量を比較した．結果を表2に示す．本手法によって得られた分類木の分類指標I_{AA}に対して，拡張手法の(7)式を計算した値をI_{AB}としている．一方，拡張手法によって得られた分類木の分類指標I_{BB}に対して，本手法の(1)式を計算した値をI_{BA}としている．$I_{AA}<I_{AB}$かつ$I_{BA}<I_{BB}$の場合，本手法が優位であることを示している．$I_{AB}<I_{AA}$かつ$I_{BB}<I_{BA}$ の場合には，拡張手法が優位であることを示している．一方，$I_{AA}<I_{AB}$かつ$I_{BB}<I_{BA}$の場合には，各手法が優位であることを主張しているので，比較不能となる．$I_{AB}<I_{AA}$かつ$I_{BA}<I_{BB}$の場合には，両手法以外に優れた手法が存在する．本手法が優位である場合が全体の40%を占め，両手法の分類指標が同値である場合を含めると，63%を占める．また，拡張手法が優位である場合や両手法以外に優れた手法が存在する場合は0%であり，この点からも本手法の優位性が示せる．さらに，両手法の矛盾量を比較すると，どの場合でも，I_{AA}の矛盾量がI_{AB}の矛盾量よりも値が小さく，本手法の分類木が矛盾する程度が低いことがわかる．

5. おわりに

本論文では，ファジィ集合を用いた概念形成モデルを提案した．しかし，アルゴリズムでは，分類木の階層の差異が分類指標に考慮されていないので，正しい分類木を構成できない場合がある．今後，分類指標を再検討する必要がある．なお，本研究の一部は，1997年度阪南大学産業経済研究所共同研究「ソフトコンピューティングとその経済動学への応用(2)」の成果報告である．

表2　手法の比較の結果

	COBWEBの拡張手法		提案手法					
	I_{BB}	I_{BA}	I_{AA}	矛盾量	I_{AB}	矛盾量	回数	占有率 (%)
$I_{BB}>I_{BA}$, $I_{AA}<I_{AB}$	0.437	0.418	1.497	0.295	1.995	0.749	12	40
$I_{BB}<I_{BA}$, $I_{AA}<I_{AB}$	0.440	0.452	1.622	0.397	1.971	0.729	11	37
$I_{BB}=I_{BA}$, $I_{AA}=I_{AB}$	0.421	0.421	0.451	0.306	0.451	0.306	7	23
$I_{BB}<I_{BA}$, $I_{AA}>I_{AB}$	—	—	—	—	—	—	0	0
$I_{BB}>I_{BA}$, $I_{AA}>I_{AB}$	—	—	—	—	—	—	0	0
平均値	0.438	0.418	1.585	0.331	1.859	0.639		

参考文献

1) 市川伸一，伊東裕司，渡邉正孝，酒井邦嘉，安西祐一郎：“記憶と学習”，認知科学5，岩波書店 (1994)
2) M.I.Posner, S.W.Keele : “On the Genesis of Abstract Idea,” Journal of Experimental Psychology,Vol.77, pp.353-363 (1968)
3) S.K.Reed : “Pattern Recognition and Categorization,” Cognitive Psychology, Vol.3, pp.382-407 (1972)
4) J.R.Anderson, P.J.Kline, C.M.Jr.Beasley : “General Learning Theory and its Application to Schema Abstraction,” The Psychology of Learning and Motivation, Vol.13, Academic Press, pp.277-318 (1979)
5) R.S.Michalski, Y.Kodratoff : “Research in Machine Learning : Recent Progress, Classification of Methods, and Future Directions,” Machine Learning Ⅲ, pp.3-30, Morgan Kaufmann (1990)
6) D.H.Fisher : “Knowledge Acquisition via Incremental Conceptual Clustering,” Doctoral Dissertation, Department of Information and Computer Science, University of California, Irvine (1987)
7) 椹木哲夫，岩井壮介，片井修：“概念クラスタリング手法による決定モデルの動的学習とリアクティブルールの獲得”，第18回知能システムシンポジウム，第19回システムシンポジウム合同シンポジウム，pp.199-203 (1993)
8) 林 勲，津田エミ子，横井真也，市川隆男：“ファジィ集合による概念形成モデルの一提案”，第41回システム制御情報学会研究発表講演会 (1997)

【問い合わせ先】
580 大阪府松原市天美東5-4-33
阪南大学 経営情報学部
林　勲
phone. 0723-32-1224 (ext.8412)
fax.　0723-36-2633
Internet ihaya@hannan-u.ac.jp
URL http://www.hannan-u.ac.jp/~ihaya

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

THS4-2

ディストータによるＲＢＦネットワークのモデル選択

Determination of Number of Units in Hidden Layer of RBF Networks by Using Distorter

○三好哲也　市橋秀友　田渕　創　田中洋司（大阪府立大学）

○T.Miyoshi, H.Ichihashi, H.Tabuchi and H.Tanaka(Osaka Prefecture University)

ABSTRACT

In applying neural networks it is an important but difficult problem to determine the number of parameters in the networks. In this paper we propose an Unbiasedness Criterion using Distorter(UCD) which is a heuristic model selection criterion, and apply it to determining the number of hidden units of RBF networks. The new criterion is defined as the difference between outputs of two RBF networks, the one is trained to minimize the ordinary training error and the other is trained to minimize the error between the training data and output of the network transformed by the distorter. We compare the performance of proposed criterion with other criteria such as AIC and NIC by applying to the model selection of Neurofuzzy Tomography which is a specific application of RBFN.

Keywords: Model selection, AIC, NIC, RBF networks, Neurofuzzy

1. はじめに

ニューラルネットワークモデルを適用する際の課題のひとつに，最適なパラメータ数をどう決定するかというモデル選択の問題がある．少ない計測データから対象断面の媒質分布を復元するニューロ・ファジィ・トモグラフィー[1,2]などの適応学習ネットワークのモデル選択に，統計的な基準を用いる際にはローカルミニマムの問題や，パラメータの非一意性に起因する問題点が顕著に表れる．本研究ではモデルに変形を加えることによって適当なモデルを選択する，発見的モデル選択規範であるディストータを提案し，他の統計的規範と比較する．提案法は，誤差分布などの統計的前提やデータ分割を必要とせず，学習則の導出が容易でかつ比較的計算量が少ない．また乱数により人工的に作成したデータを用いてモデルを評価することができる．

2. ディストータ

あまり大きくない観測雑音の場合，真の構造を持つモデルは観測データの変化に敏感でない．この考え方を具体的に表現する量としてディストータを用いた不偏性規範(Unbiasedness Criterion using Distorter:UCD)を提案する．図 1にディストータの概念図を示す．

破線で囲まれた2つの同じ構造を持つモデルをそれぞれ F_1 ，F_2 とし，同じ入力 $\mathbf{x}^j$ が与えられるとそれぞれ $F_1(\mathbf{x}^j)$ ，$F_2(\mathbf{x}^j)$ を出力するものとする．モデル F_1 は次の2乗誤差 E_1 を最小化するように逐次的に学習を行う．

$$E_1 = \frac{1}{2}\left\{y^{j*} - F_1\left(\mathbf{x}^j\right)\right\}^2 \tag{1}$$

モデル F_2 にはディストータとして非線形変換式 $g(\cdot)$ が付加されているので，次の2乗誤差 E_2 を最小化するように逐次的に学習を行う．

$$E_2 = \frac{1}{2}\left\{g\left(y^{j*}\right) - g\left(F_2\left(\mathbf{x}^j\right)\right)\right\}^2 \tag{2}$$

ここで非線形変換式 $g(\cdot)$ には単調増加または単調減少関数を用いる．sin 関数のような周期関数や単峰形関数を用いると，たとえば $y^{i*} \neq y^{j*}$ であっても $g(y^{i*}) = g(y^{j*})$ となる場合があり，$F_2(\mathbf{x}^i) = F_2(\mathbf{x}^j)$ と学習される．

モデル F_2 の学習則は，モデル F_1 の学習則と同様であるが，F_2の出力に対応した誤差 δ は

$$\delta = -\left\{g\left(y^{j*}\right) - g\left(F_2\left(\mathbf{x}^j\right)\right)\right\} \cdot g'\left(F_2\left(\mathbf{x}^j\right)\right) \tag{3}$$

となる．

こうして得られた2つのモデル F_1 と F_2 は，同じ構造を持つが未知パラメータの値は必ずしも一致しない．モデルが観測データの真の構造を表現していると，モデル F_1 と F_2 は，未知パラメータの値が互いに等しくなると考えられ，パラメータ数が過剰であっても少なすぎてもパラメータの値が異なるようになる．ディストータを用いた不偏性規範を次のように定義する．

$$UCD = \sum_{j=1}^{n}\left\{F_1\left(\mathbf{x}^j\right) - F_2\left(\mathbf{x}^j\right)\right\}^2 \tag{4}$$

UCD は F_1 と F_2 の差によって定義されるが，学習が十分であればトレーニングデータに対する出力値は異なるモデル間でもほぼ同じ大きさで，それらの差にはモデルの違いは顕著には現れない．モデルの構造の違いはむしろ内挿・外挿における出力値の違いに顕著に現れるであろう．この考え方をディストータを用いた不偏性規範に応用した αUCD を次のように定める．

$$\alpha UCD = \sum_{j=1}^{\alpha\times n}\left\{F_1\left(\mathbf{x}^j\right) - F_2\left(\mathbf{x}^j\right)\right\}^2 \tag{5}$$

$j = n+1$ から $\alpha \times n$ までの $\mathbf{x}^j$ （チェッキングデータ）は乱数を用いて人工的に作成することができる．αUCD が最小となるパラメータ数のモデルが最適なものとして選択される．

3. 数値実験

1) 関数近似問題での比較

1入力1出力のRBFネットワークを用いた関数近似にディストータを適用した結果を示す．トレーニングデータには，sin関数より発生させた値に $N(0,0.1)$ に従う正規乱数を付加した15個のデータを用いた．図 2における "•" はデータ点を表している．ARTに基づく学習法[2]における緩和係数を0.07，学習回数を5000回とした．学習回数は誤差が十分収束する回数を選んだ．

UCD，αUCD，MSE(C)では基底数が2個のモデル，10-fold CV法では基底数が3個のモデル，AIC，NICでは基底数が4個のモデルが選択された．各基底数での学習後のRBFネットワークの出力を図 2に示す．3個以上の基底数を用いた場合は過適合(over-fitting)となっており，ディストータを用いたUCD，αUCDは真

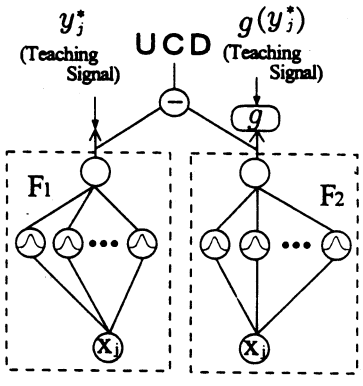
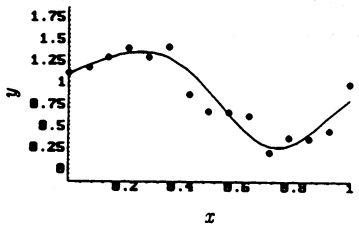
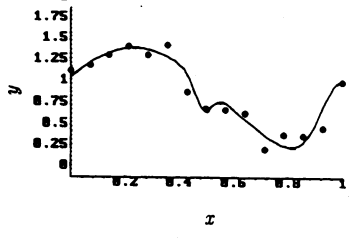


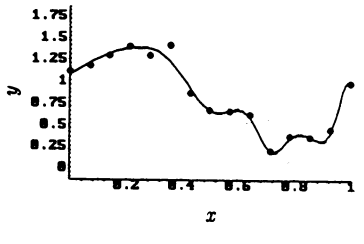
図 1: ディストータの概念図



(1) ガウス基底数 2個



(2) ガウス基底数 3個



(3) ガウス基底数 4個

図 2: 学習後のRBFネットワークの出力

のモデルであるsin関数に近い関数形のものを選択している.

2) ニューロ・ファジィ・トモグラフィーでの比較

ニューロ・ファジィ・トモグラフィーに用いられるモデルのパラメータ数の決定にディストータを用い, 10-fold CV法, AIC, NICによる結果と比較する. 対象断面において合計72個の投影データが得られる場合のシミュレーションを行った. 投影データには, $N(0,\sigma^2)$ に従う正規乱数($\sigma = 0.01$)をノイズとして付加した. 学習則にARTを用いて1万回学習した.

図 3は72個のトレーニングデータについて, ガウス関数の数を変化させたときの10-fold CV法におけるチェッキングデータでの2乗誤差の平均 (10-fold CV), AIC, NIC, ディストータを用い

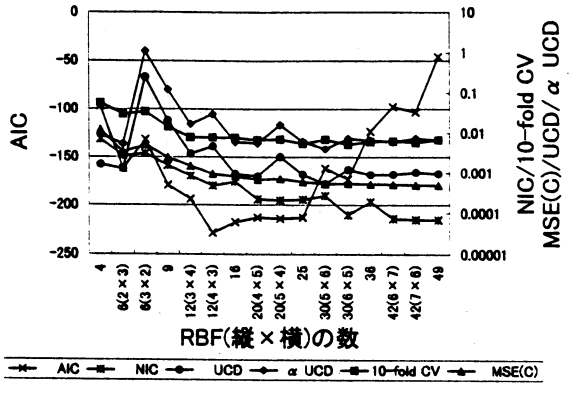


図 3: 各基準の比較

た不偏性規範(UCD, αUCD), チェッキングデータについてのモデルの出力と理想出力との平均2乗誤差(MSE(C))を示している. MSE(C)は新たにチェッキングデータ (学習には用いないデータ) としてランダムに伝播路を設定して得られた投影データ288個を用いている. αUCDでは$\alpha = 5$とした. ガウス関数の数が同じであっても初期配置によって結果は異なるので縦(x_2方向), 横(x_1方向)の数によって区別している.

AICは簡単なモデル (12(4×3)個) を選んでいるのに対して, NICはパラメータ数の多い複雑なモデル(49個)を選んでいる. ニューロ, ファジィ・トモグラフィーのような複雑な場合には, 図3の10-fold CV法やMSE(C)にみられるようにパラメータ数を多くしても, あまりオーバーフィッティングにならず明確に差が現れない. AICやNICではパラメータ数の差によりその値が明確に異なる傾向が見られるのに対し, UCDの場合は10-fold CVやMSE(C)によく一致している.

4. おわりに

本研究では, 適応学習ネットワークのモデル選択の基準としてディストータを用いる不偏性規範(UCD, αUCD)を提案した. 数値実験の結果, AICやNICなどの統計的規範と比較してパラメータ数の決定法として有効であることを示した.

参考文献

[1] 市橋, 三好, 長坂, 木村: ニューロ・ファジィ逆解析による断層撮影法; 日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.2, pp.333-341(1994)

[2] 三好, 田渕, 市橋, 戸奈, 大野: ニューロ・ファジィ地盤断層撮影法へのARTの応用; システム制御情報学会論文誌 (採録予定)

[3] N.Murata, S.Yoshizawa and S.Amari: Network Information Criterion - Determining the Number of Hidden Units for an Artificial Neural Network Model; *IEEE Trans. Neural Net.*, Vol. 5, No. 6, pp.865-872(1994)

[問い合わせ先] 〒593 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学工学部経営工学科 三好 哲也
TEL:0722-52-1161 FAX:0722-59-3340
E-mail: miyoshi@ie.osakafu-u.ac.jp

THS4-3

M-アポトーシスによるニューロ・ファジィGMDHの構造明確化学習

Structural Learning with M-Apoptosis in Neurofuzzy GMDH

○大谷 崇　金海 好彦　市橋 秀友　三好 哲也　長坂 一徳

Takashi Ohtani Yoshihiko Kanaumi Hidetomo Ichihashi Tetsuya Miyoshi Kazunori Nagasaka

大阪府立大学　工学部

College of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract: Successful applications of neural networks have been achieved. However there always arises a problem of determining their optimal structures because of lack of the prior information. It is widely known in the physiology that the apoptosis is an active form of cell death in most multicellular organisms. We propose the M-apoptosis for the structural clarification of neurofuzzy GMDH whose partial descriptions are represented by the Radial Basis Functions network. The method is validated in the numerical example of artificially generated data and Iris data.

1 はじめに

人工ニューラルネットワークの階層数やユニット数などのネットワーク構造は，事前知識が欠如しているために，試行錯誤によって決めざるを得ないが，実際の脳は遺伝子情報に基づいて形成される．また，その時に正常な細胞死を意味するアポトーシスが関係していることが知られている．

Ishikawaによる忘却学習 [1]は学習則を導出するための評価関数にニューロン間の結合重みの絶対値の和を加えたもので，出力の誤差を減らしながら，不要な結合重みを0に近づけようとするものである．しかし，リンクを削除し構造をより明確化するためには絶対値の小さな重みを優先して0に近づける必要がある．そこで三角型（屋根型）の距離関数を設定する構造明確化学習が提案されている [1]．

ネットワーク型GMDHの部分表現にRBFを用いるニューロファジィ(NF-)GMDH [2, 3]の場合，出力に関係しない不要なリンクは部分表現の入力に関する出力の偏微分値の絶対値和が0に近いものである．すなわち，そのリンクからの入力が変化してもユニットの出力が変化しないリンクが不要である．そこで学習の評価関数に偏微分値のミンコフスキーノルムを加えた構造明確化学習としてM-アポトーシスを提案する．NF-GMDHの特長は，各部分表現が2変数関数であるので3次元グラフィックスでその構造を可視化できる点であり，構造明確化学習の結果もグラフィックスで確認することができる．

2 ニューロ・ファジィGMDH

ニューロ・ファジィGMDH(NF-GMDH)は式(1)～(3)の階層構造をもつ適応学習ネットワークである．このネットワークの第 p 層第 m 部分表現の出力 y^{pm} は，μ_k^{pm} を第 p 層第 m 部分表現の第 k 番目のガウス基底とすると次のように表される．

$$y^{pm} = F(y^{p-1,m-1}, y^{p-1,m}) = \sum_{k=1}^{4} \mu_k^{pm} w_k^{pm} \tag{1}$$

$$\mu_k^{pm} = exp\left[-\frac{(y^{p-1,m-1} - a_{k1}^{pm})^2}{b_{k1}^{pm}} - \frac{(y^{p-1,m} - a_{k2}^{pm})^2}{b_{k2}^{pm}} \right] \tag{2}$$

$$y = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} y^{Pm} \tag{3}$$

3 構造学習アルゴリズム

3.1 忘却学習

NF-GMDHの各部分表現は2入力1出力であるが，2つの入力の両方が出力に関係しているとは限らない．そこで，評価関数 E を

$$E_1 = \frac{1}{2}(y - y^*)^2 \tag{4}$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{P} \sum_{m=1}^{M} \sum_{i=1}^{2} \left| \frac{\partial y^{pm}}{\partial x_i^{pm}} \right| \tag{5}$$

$$E = E_1 + \eta E_2 \tag{6}$$

とする．ただし，ηは小さな正数とする．E_2を用いることで，部分表現の出力yの偏微分値(傾き)が0に近くなるリンクを削除の対象とする．

3.2 M-アポトーシスによる構造明確化学習

本節では，忘却学習や構造明確化学習をNF-GMDHの各部分表現について出力の偏微分値の r 乗ノルム（ミンコフスキーノルム）を用いることによって統一的に定式化したM-アポトーシスを提案する．

忘却すべきリンクを明確化するには，誤差が大きく増大しない範囲で $|\partial y^{pm}/\partial x_i^{pm}|$ の値が小さいリンクをさらに小さくすればよい．

$$E_3 = -\frac{A}{2r} \sum_{p=1}^{P} \sum_{m=1}^{M} \sum_{i=1}^{2} \left\{ 1 - \frac{1}{A} \left| \frac{\partial y^{pm}}{\partial x_i^{pm}} \right| \right\}^r \tag{7}$$

を E_2の代わりに用いる．ただし，

$$A = \max_{p,m,i} \left\{ \left| \frac{\partial y^{pm}}{\partial x_i^{pm}} \right| \right\} \tag{8}$$

$$\frac{\partial y^{pm}}{\partial x_i^{pm}} = -2 \sum_{k=1}^{4} \mu_k^{pm} w_k^{pm} \frac{(x_i^{pm} - a_{ki}^{pm})}{b_{ki}^{pm}} \tag{9}$$

である．E_3 の未知パラメータ w_k^{pm} についての勾配は

$$\frac{\partial E_3}{\partial w_k^{pm}} = -\sum_{i=1}^{2} \left[\left\{ 1 - \frac{1}{A} \left| \frac{\partial y^{pm}}{\partial x_i^{pm}} \right| \right\}^{r-1} \mathrm{sgn}\left(\frac{\partial y^{pm}}{\partial x_i^{pm}} \right) \mu_k^{pm} \frac{(x_i^{pm} - a_{ki}^{pm})}{b_{ki}^{pm}} \right] \tag{10}$$

表 1: 各部分表現の偏微分値の平均絶対値

	通常のBP学習			忘却学習			M-アポトーシス		
第1層	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
$i=1$	0.33	0.32	0.23	0.33	0.21	0.21	0.32	0.19	0.20
$i=2$	0.35	0.32	0.11	0.29	0.21	0.14	0.35	0.18	<u>0.05</u>
第2層	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
$i=1$	0.63	0.61	0.22	0.40	0.17	0.17	0.62	0.24	<u>0.00</u>
$i=2$	0.17	0.54	0.41	0.15	0.41	0.18	<u>0.02</u>	0.67	<u>0.00</u>
第3層	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
$i=1$	0.47	0.69	0.29	0.28	0.30	<u>0.01</u>	0.65	0.56	<u>0.00</u>
$i=2$	0.32	0.42	0.70	<u>0.01</u>	0.28	0.30	<u>0.00</u>	0.43	0.57

となるので，学習則は

$$w_k^{pmNEW} = w_k^{pmOLD} - \tau_1 \frac{\partial E_1}{\partial w_k^{pm}} - \tau_3 \frac{\partial E_3}{\partial w_k^{pm}} \qquad (11)$$

である．ただし，$\tau_1, \tau_3 (= \eta\tau_1)$ は正の学習係数である．同様にして a_{ki}^{pm}, b_{ki}^{pm} についての学習則も導出することができる．評価関数を新たに $E = E_1 + \eta E_3$ とすると $|\partial y^{pm}/\partial x_i^{pm}|$ の値が小さいものを優先的にさらに小さくすることができると考えられる．

M-アポトーシスによる構造明確化学習は，あらかじめ前節の忘却学習によってある程度トレーニングデータの入出力関係の構造を明確化した後に適用される．

4 数値例

1) 非線形写像の構造明確化学習

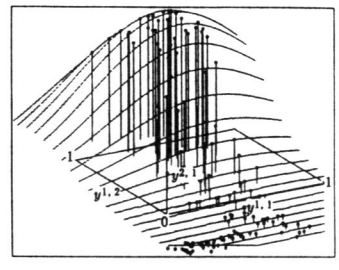
入力変数の変域を区間 $[0, 1]$ とし，その中の一様乱数を x_i として次式よりトレーニングデータ100件を得て学習した．なお，x_6 は出力 y に関係しないダミーである．

$$y^* = 0.5 + 0.5 \prod_{i=1}^{5} \sin(\pi x_i) \qquad (12)$$

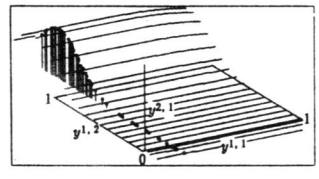
表 1 の通常のBP学習は1000回，忘却学習は500回，M-アポトーシスによる構造明確化学習は忘却学習500回後1000回まで学習を行った後の各部分表現の出力の偏微分値の絶対値の平均を示している．忘却学習で微分値の小さいリンクはM-アポトーシスではさらに小さくなり，大きいリンクは小さくならず逆に大きくなっている．削除されるのは，第1層第3部分表現の第1入力，第2層第3部分表現，第3層第1部分表現の第2入力と第3層第3部分表現の第1入力である．

2) アヤメのデータの構造明確化学習

3つのクラス setosa,versicolor,virginica に対する理想出力をそれぞれ 0, 0.5, 1.0 として学習した．学習前と後の第2層第1部分表現のグラフィックスを図 1 に示す．



通常のBP学習



構造明確化後

図 1: 第2層第1部分表現の3Dグラフィックス

5 おわりに

本研究ではNF-GMDHにM-アポトーシスを用いた構造明確化学習を提案し，パラメータ r の値を大きくすることで構造が明確化されることを数値例で示した．提案法によって，通常のBP学習や忘却学習では削除の対象とならない冗長なリンクがM-アポトーシスで明確化された．しかし，どのリンクまで削除すべきかを，得られた数値から判断するための客観的な基準が必要で，今後の課題である．

参考文献

[1] M.Ishikawa: Neural Networks, Vol.9, No.3, pp. 509-521 (1996)

[2] 大谷，市橋，長坂，三好: 日本経営工学会誌，Vol.47, No.6, pp. 384-392 (1997)

[3] 大谷，市橋，長坂，三好: 日本ファジィ学会誌，Vol.9, No.4, (1997)（掲載予定）

連絡先

〒593 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学工学部経営工学科
市橋　秀友
TEL:0722-52-1161. FAX:0722-59-3340
E-mail:ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

一般講演論文
6月6日（金）

A室

FRA1	知識獲得・概念学習	司会 椹木哲夫（京都大学）
FRA2	学習システム	司会 三好哲也（大阪府立大学）
FRA3	講演：複雑系モデルとしてのカオスとファジィ 講師：寺野寿郎（東京工業大学）	司会 中村和男（長岡技術科学大学）
FRA4	カオスとその応用（その１）	司会 五百旗頭正（明電舎）
FRA5	カオスとその応用（その２）	司会 木村孝（明電舎）

B室

FRB1	ニューラルネットワーク（１）	司会 内野英治（九州工業大学）
FRB2	ニューラルネットワーク（２）	司会 田崎栄一郎（桐蔭学園横浜大学）
FRB3	ニューラルネットワーク（３）	司会 秋山孝正（岐阜大学）
FRB4	チュートリアル講演：DEAの理論と応用 講師：上田 徹	司会 椎塚久雄 （工学院大学）
FRB5	ＤＥＡ（包絡分析法）	司会 高萩栄一郎（専修大学）

C室

FRC1	エボリューショナリ・コンピュテーション	司会 中西祥八郎（東海大学）
FRC2	認知心理	司会 椎名乾平（早稲田大学）
FRC3	心理・評価	司会 奥田裕紀（金城短期大学）
FRC4	ロボット（１）	司会 前田陽一郎（大阪電気通信大学）
FRC5	ロボット（２）	司会 福田敏男（名古屋大学）

D室

FRD1	教育工学（１）	司会 宮武直樹（法政大学）
FRD2	教育工学（２）	司会 北垣郁雄（ポリテクカレッジ群馬）
FRD3	教育工学（３）	司会 吉根勝美 （南山大学）
FRD4	教育工学（４）	司会 磯本征雄（名古屋市立大学）
FRD5	ノンエンジニアリング	司会 大薮多可志（富山国際大学）

E室

FRE1	ファジィＯＲ（２）	司会 石井博昭（大阪大学）
FRE2	ファジィＯＲ（３）	司会 乾口雅弘（広島大学）
FRE3	ファジィＯＲ（４）	司会 市橋秀友（大阪府立大学）
FRE4	ファジィＯＲ（５）	司会 井田憲一（足利工業大学）

F室

FRF1	生活計測・人間分析	司会 山口静馬（山口大学）
FRF2	ヒューマン・インタフェース	司会 荒井良徳（東京工芸大学）
FRF3	測度・積分（１）	司会 今岡春樹（奈良女子大学）
FRF4	測度・積分（２）	司会 室伏俊明（東京工業大学）
FRF5	不確実性	司会 鬼沢武久（筑波大学）

S室

FRS1	感性工学	司会 長沢伸也 （立命館大学）
FRS2	パネルディスカッション：感性工学	司会 中森義輝（甲南大学）

ID3の概念を用いた制御ルール獲得手法の提案とその応用

Knowledge Acquisition Method for Control Rules Using Idea of ID3

高木浩　　亀井且有

Hiroshi TAKAGI　　Katsuari KAMEI

立命館大学

Ritsumeikan University

abstract : There are many control systems changed from manual control to machine control. Generally, it is difficult for experts (control operators) to express knowledge, because they control objects using their experience and intuition. Therefore, many researches on inductive learning which obtain rules from operator's data have been developed.

In knowledge engneering, knowledge aquisition methods using decision trees have been proposed. ID3 is one of the algorithms used for making a decision tree, and it can be used to make a small tree. But it couldn't deal with control data that has multi-inputs/outputs including noise. Therefore, we couldn't use ID3 for control rules until now. In this paper, we propose a new knowledge aquisition method using ID3 and Fuzzy *c*-means algorithm. Then we apply this method to inverted pendulum control system.

1. はじめに

現代社会に存在する多くのシステム，例えば制御分野では，人の手からコンピュータによる制御へと変化している．しかし，いまだ人の手による方がコストや品質の面で優れているものがあるのも事実である．

一般に熟練者は経験や勘に依存して制御を行っていることが多く，知識をルールとして明確に表現することは困難とされている．そこで，熟練者から得られるオペレータデータに着目し，データ間に内在するルールを抽出する帰納学習の研究が行われている．これらの研究では，知識獲得手法のひとつとしてファジィクラスタリングが用いられ，この代表的な手法としてFCM(Fuzzy *c*-means)[1] が知られている．

また，知識工学分野からのアプローチとしては決定木による知識の獲得がある．この決定木は，データの分類状況を視覚的に捉えることができるだけでなく，加工が容易であることから知識を表現するのに適している．

決定木はその構造ゆえ，作成アルゴリズムも数多く存在し，HuntによるCLS[2]，QuinlanのID3(Interactive Dichotomizer 3)[3]といった多数のアルゴリズムが提案され，同じデータ集合からでも多数のパターンを作り出すことができる．これらのアルゴリズムは，問題（属性）とその解（分類クラス）からなるデータの集合から，分類クラスに対する情報量を基準にした属性選択を行い，決定木を作成していく．ことにID3は，アルゴリズムが簡単であることから広く利用されている．このアルゴリズムは情報量の概念を利用するため，決定木作成に要する分割回数を少なくすることができる．

しかし，このアルゴリズムは，基本的に離散属性を扱うように設計されている．そのため，連続属性を扱うには，連続属性を適切な離散属性にあらかじめ変換する必要があり，これが決定木の性能に大きく影響する．また前述したとおりID3は，平均情報量を基準として分割属性を決定している．そのため，分類クラスが連続値をとるときやノイズを含んだデータを扱うとき，過剰な分割を行い特殊化した決定木を作成してしまう．

本稿では，上記の問題に対してID3の概念を用い，FCM*アルゴリズム[4,5]における帰属度を導入した制御ルール獲得手法を提案し，さらに倒立振子制御に適用する．

2. FCM (Fuzzy c-means)* アルゴリズム

2.1 FCMアルゴリズム

有限個のデータ集合が与えられたとき，これらを互いに重なり合わない複数の部分集合であるクラスタに分類することをハードクラスタリングという．データは必ずひとつのクラスタにのみ帰属し，$\{0,1\}$ の2値論理で表現される．これに対し，ファジィクラスタリングとは，境界付近のデータは複数のクラスタに属するように，$[0,1]$ の無限多値論理で表現し定式化した手法である．

ファジィクラスタリングの代表的手法であるFCMは，クラスタセンタとデータの帰属度を算出し，ファジィ分割を行う．クラスタセンタとは各クラスタの中心ベクトルであり，式(1)のように帰属度を重みとしたデータの平均により算出される．また，帰属度は式(2)により算出される．ここで $\boldsymbol{v}$ はクラスタセンタ，$\boldsymbol{x}$ はデータ，u_{ik} は $\boldsymbol{v}_i$ に対する $\boldsymbol{x}_k$ の帰属度，$m=2.0$ は重みとする．

$$\boldsymbol{v}_i = \frac{\sum_{k=1}^{|N|} (u_{ik})^m \boldsymbol{x}_k}{\sum_{k=1}^{|N|} (u_{ik})^m} \quad \text{for} \forall i \tag{1}$$

$$u_{ik} = \frac{\left(\frac{1}{d_{ik}}\right)^{\frac{2}{m-1}}}{\sum_{j=1}^{c} \left(\frac{1}{d_{ik}}\right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad \text{for} \forall i,k \tag{2}$$

$$d_{ik} = \left| \boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{v}_i \right| \tag{3}$$

2.2 FCM*アルゴリズム

FCMはデータの分類方法としては非常に強力なアルゴリズムである．しかし，オペレータデータのような集合に適用するには以下のような問題が挙げられる．

まず，FCMで算出される帰属度は，各クラスタセンタに対する帰属度の総和が1となるように決定されることである．また，帰属度はデータとクラスタセンタとの距離で定義されるがゆえに，クラスタセンタからの距離の違うデータが同じ帰属度をもつ．すなわち，FCMはノイズデータに対しても有効なデータと同等の価値を与えていることになる．

また，クラスタ数をクラスタリング前に決定しなければならない．しかし，オペレータデータのように分布の規則性がつかみにくく多次元の場合，人の感覚でクラスタ数を決定するのは不可能に近い．

そこで，これらの問題の解決を図ったFCM*アルゴリズムが提案されている．このアルゴリズムは，図1のようにクラスタセンタが1.0，最遠望データ点が0.0，クラスタ半径上のデータ点が0.5となる形状が釣り鐘型の帰属度を与える．

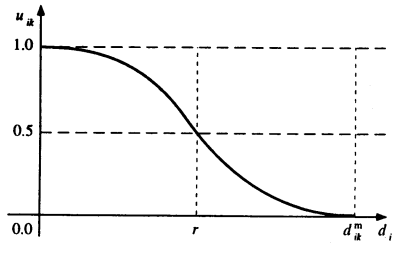


図1　帰属度関数

ここで，クラスタ半径は式(4)により算出される．ただし，式(4)中のv_iはFCMにより算出されたクラスタセンタである．

$$r_i=\frac{\sum_{k=1}^{|N|}\left|x_k-v_i\right|u_{ik}^{*}}{\sum_{k=1}^{|N|}u_{ik}^{*}}\quad \text{for } \forall i \tag{4}$$

以後，用いるu_{ik}はFCMにおけるu_{ik}^{*}とする．

3. 提案手法のアルゴリズム

3.1 新情報量

分類クラスデータをFCM*でクラスタリングすることにより得られる帰属度をクラスタに対する確信度とする．新たに定義する情報量は，クラスタ数を分類クラス数とし，この確信度をID3で用いる確率と置き換えることで算出する．また，この確信度はデータの価値と見ることもできる．つまり，ノイズデータ（集合から外れたデータ点で主に最遠望点）の価値は必然的に下がり，作成される決定木，さらには生成されるルールに対するノイズデータの影響は小さくなる．さらに，クラスタ数は分割ごとに動的に変化させる．次に提案するアルゴリズムを示す．まず，用いる変数について以下に述べる．

N　：ルートノードに存在するデータ集合（全データ集合）
N_h　：各ノードに存在するデータ集合
$|N|,|N_h|$　：各集合のデータ数
F　：あるノードから派生するリンク数（=2）
u_{ik}　：データkのクラスタC_iに対する帰属度

提案する手法の基本式はオリジナルのID3と同式で定義される．

$$G(A_m,N)=I(N)-E(A_m,N) \tag{5}$$

ここで，右辺の各項は式(6)，(7)で表される．

$$I(N)=\sum_{i=1}^{C}\left(P_i\cdot\log_2\frac{1}{P_i}\right) \tag{6}$$

$$E(A_m,N)=\sum_{h=1}^{F}\left(\frac{|N_h|}{|N|}\sum_{i=1}^{C}\left(P_h\cdot\log_2\frac{1}{P_h}\right)\right) \tag{7}$$

ただし，

$$P_i=\frac{\sum_{k=1}^{|N|}u_{ik}}{|N|},\quad P_h=\frac{\sum_{k=1}^{|N_h|}u_{ik}}{|N_h|} \tag{8}$$

とする．

以上より，分類クラス空間は閾値による領域分割ではなく，集合による分類が行われることになる．

3.2 終了条件

本来，ID3は各ノードにおいてある分類クラスの占有率が基準を満たしたとき，それ以降の分割を中止する．しかし，クラスタセンタ上のデータとクラスタセンタから最遠望にあるデータ以外は，必ず複数のクラスタに属することから，提案アルゴリズムでは既存の占有率を用いることはできない．そこで，新たに次のような2つの終了条件を考える．

閾値を用いた判定

各ノードにおいて，帰属度を用いて判定する．対象となるノードに存在するデータkのもつクラスタC_iに対する帰属度をu_{ik}とする．このとき

$$\frac{\sum_{k=1}^{|N_h|}u_{ik}}{\sum_{i=1}^{C}\sum_{k=1}^{|N_h|}u_{ik}}\geq\alpha\quad(0\leq\alpha\leq1) \tag{9}$$

となるiが存在するとき分割を終了させ，分類クラスC_iをラベル付けする．ただし，αは経験的に求めるものとする．

分散を用いた判定

本稿の適用例で用いるデータが2入力2出力であることから，各ノードにおいて属性空間と分類クラス空間の集密度により判定する．ここで集密度は以下の手順で求める．

属性空間上のデータをそれぞれ属性A_m軸上に射影したときの属性値を$x_{k,m}$とすると平均値$x_{ave,m}$は，式(10)で算出される．

$$x_{ave,m}=\frac{\sum_{k=1}^{|N_h|}x_{k,m}}{|N_h|} \tag{10}$$

同様にデータをすべての属性軸に射影し，平均値を算出する．次にこの平均値より属性空間に存在するデータ集合の共分散S_aを式(11)により求める．

$$S_a=\frac{1}{|N_h|}\sum_{k=1}^{|N_h|}\prod_{m=1}^{L}\left(x_{k,m}-x_{ave,m}\right) \tag{11}$$

以上を分類クラス空間についても同様に行い，共分散S_cを求める．この共分散を集密度として定義し，以下の終了判定を行う．

$S_a \geq S_c$ ：これ以降の分割を中止する．

$S_a < S_c$ ：さらに分割を行う．

3.3 操作量

作成された決定木より，if - then形式のルールを生成する手法について述べる．

ルートノードを除く各ノードは，ひとつ上の階層の影響を受けている．つまり，ターミナルノードにおける条件部は，ルートノードにたどり着くまでに通過したすべてのノードの影響を受けていることになる．従ってルールの前件部は，ターミナルノードからルートノードまでのリンクに付けられたラベルの論理積をとる．

ターミナルノードに存在するデータ集合は，ひとつ上の階層のノードにおいてクラスタリングを行い，その帰属度によって決定されている．つまり，ターミナルノードは二階層より上の階層の情報をすべて継承しているわけではない．そこで後件部τは式(12)のように帰属度を用いた重みを付けたクラスタセンタの代数和をとる．ただし，式(12)で用いたクラスタセンタと帰属度は，最後のリンクを張った際に行われたクラスタリングにより算出されたものとする．

$$\tau=\sum_{i=1}^{C}\left(\frac{\sum_{k=1}^{|N_h|}u_{ik}}{\sum_{i=1}^{C}\sum_{k=1}^{|N_h|}u_{ik}}\cdot v_i\right) \tag{12}$$

4. シミュレーション結果

4.1 制御対象

提案手法の有効性を検証するため，倒立振子の制御に適用した．倒立振子は非線形かつ不安定な対象であるが，身近であることから様々な検証に使用されている．図2に倒立振子のモデルを示す．

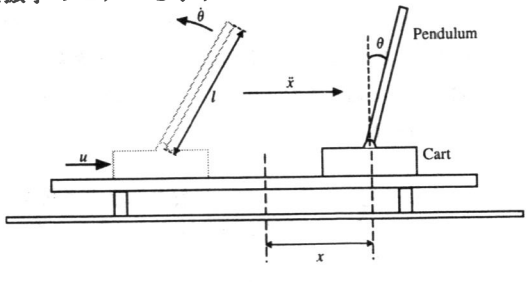


図2 倒立振子のモデル

ここで用いられている変数は以下の通りである．

θ ： 振子の傾き（右向き正）[rad]

x ： 振子の位置（右向き正）[m]

M ： 台車の質量[kg]（=0.5）

m ： 振子の質量[kg]（=0.5）

l ： 振子の長さ[m]（=3.0）

u ： 台車に加える力[kg·m/s^2]

また，‘·’は，時間微分を示す．

本稿では，マウスを倒立振子の台車と見立て，人間が操作することでオペレータデータを取得した．そのため，振子の長さや質量はマウスの操作性を考慮して決定した．各パラメータは，前述の通りである．

4.2 シミュレーション結果

終了条件に閾値を用いたルールの評価

終了条件の閾値は，$\alpha=\{0.8, 0.7, 0.6\}$とした．また，ノードがターミナルノードになれる基準数（最大データ数σ）を変化させ，シミュレーションを行った．σの変化によるルール数の推移の一例を図3に示す．図3中のカッコ内の数値はそれぞれクラスタ数を分割ごとに可変，固定$(C=2)$としたときのルール数である．$\sigma=45$のとき，制御不可能なルール集合が生成されている．

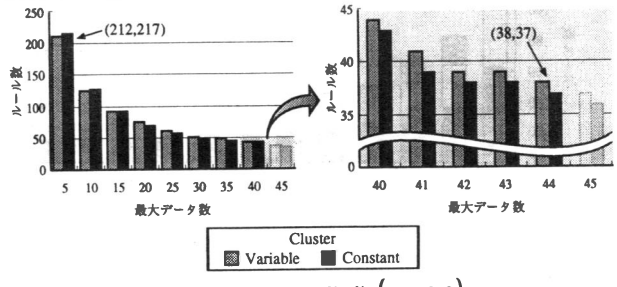


図3 ルール数の推移$(\alpha=0.8)$

また，$\alpha=0.8, \sigma=44$のときのシミュレーション結果を図4に示す．

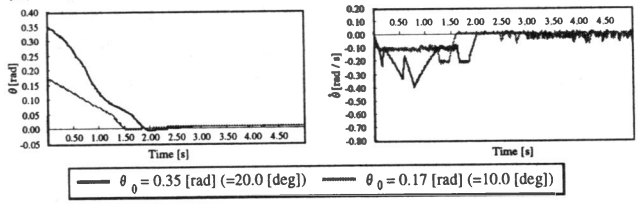
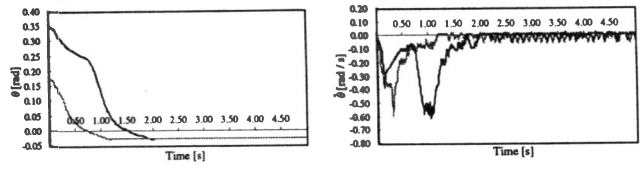
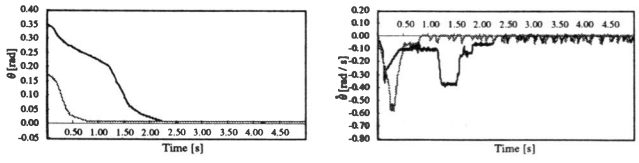


図4 シミュレーション結果1

図5に示すように，クラスタ数を可変とした場合，オーバーシュートしている．しかし，クラスタ数を固定して得られたルールは，オーバーシュートせずに制御可能であるだけでなく，ルール数も少ない上，精度が高い．クラスタ数を固定すると，終了条件を満足しやすく，ルール数，ルール間の干渉が減少するためと考えられる．



(a) クラスタ数可変



(b) クラスタ数固定

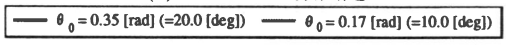


図5 シミュレーション結果2 $(\alpha=0.7, \sigma=5)$

終了条件に分散を用いたルールの評価

倒立振子制御において，台車に加える力の向きは $\theta, \dot{\theta}$ の符号により完全に異なる．しかし，オペレータデータは人間が操作した結果であるため，反応の遅延などにより逆方向の力を加えているものも存在する．そこでまず，$\theta, \dot{\theta}$ の符号の組合せにより4つの領域に分割した．その上で，それぞれの集合を初期集合（ルートノード）として提案手法を適用し，各集合から得られたルールを統合してひとつのルール集合とした．図6にデータ集合を分割し，提案手法を適用した場合のルール数の推移を示す．ただし，クラスタ数は可変とする．

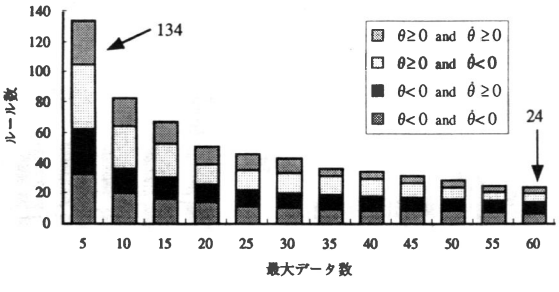
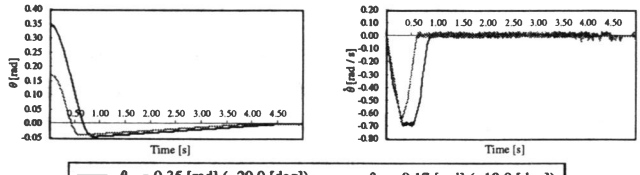


図6 ルール数の推移

初期値が $\theta_0=10, 20$ [deg] ともに制御可能となる最少のルール数は24であり，そのときの最大データ数は $\sigma=60$ となった．しかし，$\theta_0=10$ [deg] に限定すれば，$\sigma=130$ ，ルール数が9のときまで制御可能である．ここで，本シミュレーションでは 5.00 [s] 以内に振幅が $|\theta|<0.05$ [rad] に収束したとき，制御成功とみなしている．次に，生成されたルールによるシミュレーション結果を図7に示す．



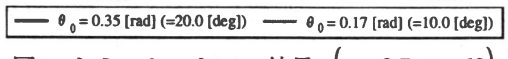
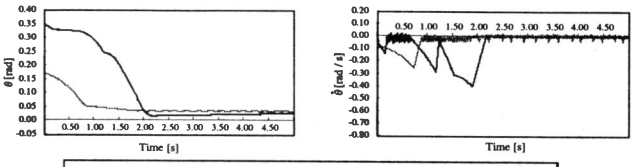


図7 シミュレーション結果3 $(\alpha=0.7, \sigma=60)$

クラスタ数を $C=2$ と固定した場合，ほぼ同数のルールが生成された．しかし，図7と図8のように収束までの時間や初期挙動など制御結果には，明らかな違いがあった．また，$\sigma>35$ の条件で生成されたルールには，初期値 $\theta_0=20$ [deg] からの制御能力が観られなかった．



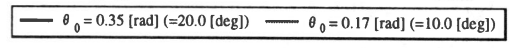


図8 シミュレーション結果4 $(\alpha=0.7, \sigma=60)$

分散を用いるとクラスタ数を可変とした方が良い結果が出ている．これは，集合（属性空間，分類クラス空間）を構成するデータの分布に依存しているためである．

また，データの分布密度は倒立点から離れるほど小さくなるため，それぞれのデータの比重が大きくなる．そのため，初期値が倒立点より離れるほどノイズデータの影響が無視できず，失敗事例が増加する．

5. おわりに

本稿では，ID3の概念を用い，FCM* アルゴリズムにおける帰属度を導入した制御ルール獲得手法を提案した．

この手法の特徴は，対象システムの評価関数を使用せずデータのみ用いてルールを生成するため，非線形性を考慮する必要がないことである．

そして，この手法を分類クラスが多次元連続値となる倒立振子の制御データに適用した結果，良好な制御結果が得られ，本手法の有効性が示された．また，本稿で用いたデータにはノイズが含まれているにも関わらず良好な結果が得られていることから，本手法はノイズに対しての適応力が高いと考えられる．

しかし，異なるデータ集合を用いてルールの生成，検証を行った結果，決定された最適な閾値 α や基準値 σ は，データ集合ごとに異なる値を示した．つまり，この手法はデータ集合の特性への依存度が高く，汎化能力に関してはまだ検討しなければならない．

参考文献

1) R.N.Chanon, J.V.Dave and J.C.Bezdek：“Efficient Implementation of the Fuzzy *c*-means Clustering Algorithms”, IEEE Trns on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-8,No.2,pp.248-255 (1968)
2) Hunt, E.B, Marin, j.and Stone, P.J.：“Experiments in Induction”, New York Academic Press (1966)
3) J. R. Quinlan：“Induction of Decision Trees”, Machine Learning, Vol.1, pp88-106 (1986)
4) 亀井且有：“ファジィクラスタリングの制御への応用”，日本ファジィ学会誌，Vol.8,No.3,pp.448-455 (1996)
5) 乾誠貴，亀井且有，井上和夫：“クラスタ数推定機能付きFuzzy *c*-meansアルゴリズム”，電気学会誌C, Vol.114-C,No.11 (1994)

[問い合わせ先] 〒525-77 滋賀県草津市野路東1-1-1
立命館大学理工学部情報学科 亀井且有
Tel. (0775) 61-2699 Fax. (0775) 61-2669
E-mail: kamei@spice.cs.ritsumei.ac.jp

FRA1-2

ファジイクラシファイアシステムによる言語指示の理解と一般化知識獲得に関する一提案

A Proposal of Understanding of Linguistic Instructions and Acquisition of General Knowledge Using Fuzzy Classifier System.

○藤井 誠　　古橋 武
Makoto FUJII　Takeshi FURUHASHI
(名古屋大学工学部)
(Faculty of Engineering, Nagoya University)
TEL (052)789-2793 & FAX(052)789-3166
email: fujii@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp or furuhashi@nuee.nagoya-u.ac.jp

Abstract: It is easy for humans to communicate with each other using natural language. If a system can understand humans' linguistic instructions, the system will be easy for humans to use. But the linguistic instructions are usually vague, and the communication between humans and machines has been a difficult task. For the smooth communication, the system must have an ability to understand vague linguistic expressions, and to acquire general knowledge from the instructions.

This paper presents a new system which has the above ability. The new system uses a fuzzy classifier system. Simulations are done to demonstrate the capability of the proposed method.

1 はじめに

自然言語は人間にとって最も有効なコミュニケーション手段の一つであり、システムが自然言語を理解できれば、人間とシステムの効率的なコミュニケーションが可能となる。例えば、システムが人間の言語指示を学習可能であれば、人間の利用しやすいシステムを構築することができる。しかし、あいまいな言語指示を用いてシステムとのコミュニケーションを行うためには、システム自身が指示の意図を解釈し、指示に関係のある情報を自ら発見し、それらを "知識" として学習しながら、的確に動作することが必要となる。

言語の持つあいまいさを取り扱う手法としてファジィ推論があり、ファジィ推論を用いた学習インターフェースに関する研究が行なわれている。文献[1]は、定性言語モデルを用いた言語指示学習法を化学反応プロセスのファジィ制御に適用している。この手法により、オペレータの意図に合った制御規則の調整が可能となり、過去の指示内容を組み合わせることにより指示回数40%削減を可能としている。文献[2]は、人間の言語指示をすでに持っている知識や言語と結びつけることにより、マクロで含蓄的な言語指示から新たな知識を獲得する学習法FULLINSを提案している。応用例として、トレーラトラックシステムと知的ゲームの五目並べにFULLINSの枠組みを適用して有効性を示した。これらの手法では、自然言語を用いて容易にシステムとのコミュニケーションをとることが可能であるが、言語指示の意味付けに人間の評価を必要とする。

これに対して、ファジィクラシファイアシステムによる知識発見手法が提案されている。文献[3]は、ファジィクラシファイアシステムの知識発見能力について考察し、報酬と信頼度割り当て手法を提案している。文献[4]は、ファジィクラシファイアシステムを多入力システムに応用した場合について、有効なメンバーシップ関数の数に応じた報酬と信頼度割り当て手法を提案している。この手法により、遺伝的アルゴリズムの特徴である交叉を有効に活用し、多入力変数を扱う場合に重要な前件部適合度を持つルールの発見を効果的に行なうことが可能である。文献[5][6]は、ファジィクラシファイアシステムに対して、新たに言語指示を自ら解釈し、その指示に対して自律的に行動改善を行なうシステムの提案を行なっている。この手法は、人間から与えられた言語指示の内容をシステムが自律的に解釈し、その指示内容に基づき行動改善を行なうことを実現している。しかし、人間の指示の意図を汲み取るまでには至っていない。

本稿では、これらの研究に対して、人間のあいまいな言語指示から、指示に関係のある情報を自ら発見し、指示内容の一般化知識として、指示の意図を抽出できるシステムの提案を行なう。これにより、従来人間が介入することができなかった文献[3][4]のシステムに対して、人間の指示に基づいて行動を改善することが可能となる。文献[5][6]のシステムは、人間のあいまいな言語指示までを

汲み取ることはできなかったが、本システムは不要な入力情報の削除を可能とすることにより、意図を抽出できる。

本研究では、人間の指示から人間の意図を解釈するシステムを開発することで、人間とシステムの言語を通したコミュニケーションの実現を目指している。

2 提案システム

2.1 言語指示解釈システム

本システムはファジィクラシファイアシステムを基本システムとして構築される [5][6]。図 1に、言語指示解釈システムの概略を示す。本システムの特徴は2つのファジィルールベースと1つのデータベースを用いて、状況に応じて言語指示を自律的に解釈する。

1. 基本行動ルールベース:

   基本的な行動を行なうためのファジィルールベース。

2. 指示状況データベース:

   人間の指示と指示の与えられた状況を記憶するためのデータベース。

3. 言語指示解釈ルールベース:

   言語指示を解釈し、指示と行動を対応づけるファジィルールベース。

基本行動ルールはシステムが事前に獲得したルールである。システムは対象に対する基本的な知識をファジィクラシファイアシステムにより獲得する。この基本ルールがない場合、システムは対象に関する知識を全く持たないため、人間の指示を適切に解釈することが困難となる。

図 1中のルール生成機構は基本行動ルール、言語指示解釈ルールを生成するための機構である。指示状況データは前件部に指示の出された状況、後件部に指示の記号を持ち、指示が出されるごとに生成され、指示状況データベースに蓄えられる。

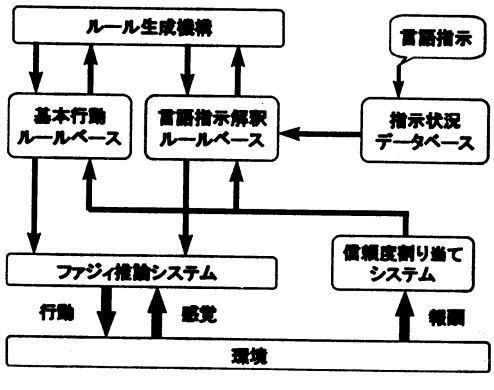


図 1: 言語指示解釈システム

言語指示解釈ルールは前件部に言語指示、後件部にその言語指示の言語に対応する行動を持つ。入力された言語指示に対して、指示の行なわれた状況を確認し、異なった状況で同じ言語指示により指示が出されている場合は、別々のルールにより推論が行なわれる。推論の結果、失敗した場合には、ルール生成機構により新たなルールの候補が生成される。これにより、システムは人間の言語指示を行動として獲得することができる。

人間が言語指示を出すと、システムは指示と指示の出された状況を指示状況データベースに登録し、その出力を前件部に持つ言語指示解釈ルールを用いてファジィ推論を行なうことにより、次の行動を決定する。行動の結果、成功した場合はその解釈は正しかったものとして、発火したすべてのルールに対して正の報酬が与えられる。失敗した場合は、その解釈が間違っていたものとして同様に負の報酬が与えられる。この報酬に基づいて、信頼度割り当てシステムにより各ルールに信頼度が与えられる。ルール生成機構はこの信頼度に基づいて、ルールの淘汰、生成を行なう。

2.2 提案アルゴリズム

さて、人間の指示から意図を解釈するに当って、本稿では、指示の意図を言語指示解釈ルールベースにおける、適切な前件部実数のみを持ったルールと捉える。すなわち、前節の言語指示解釈システムにおいて獲得された各言語指示解釈ルールから、不要な前件部実数の削除を行い、各ルールが指示の意図を的確に表すものとする必要がある。

そこで、前件部変数の削除を容易にするために、本システムではファジィルールの適合度計算法として“幾何平均法” を用いる。

ファジィルールの前件部 i 番めの変数を x_i とし、前件部変数の数を n 個とすると、幾何平均法におけるルールの適合度ωを次のように定義する。

$$\omega = \sqrt[(n-a)]{\prod_{k=1}^{n} h(x_k)} \qquad (1)$$

ここで $h(x_i)$ は、ルール前件部 i 番めの変数が don't care である場合に 1、そうでない場合に x_k のメンバーシップのグレードとなるスイッチング関数である。a はルール前件部の don't care の個数である。(1) 式を用いることにより、ルールの適合度に次のような意味づけができる。

> “ルールの各前件部変数の平均発火状況が、
> ルールの適合度となる”

着目しない前件部変数に don't care を挿入することで、着目する前件部変数の平均発火状況がルールの適合度となり、不用な前件部変数の除去がファジィルールの推論値への影響なく行うことができる。

また、算術平均を用いず、幾何平均を用いることによって、前件部にひとつでも適合度をもたない

変数がある場合はルールの適合度が0になるので、ファジィ推論の特徴をふまえた形になっている。

従来のmin-max重心法、積和重心法では、don't careを用いる際に推論値を大きく変えてしまい、前件部変数の削除を行い難かったが、本手法ではこの困難を克服している。

3 シミュレーション

3.1 問題設定

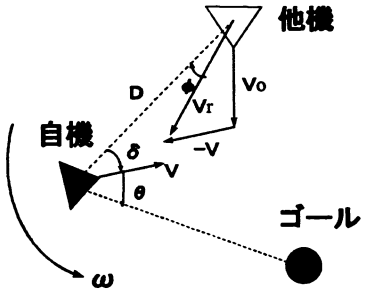


図 2: シミュレーションパラメータ

本稿で提案したシステムをロボットの衝突回避問題に適用する。本研究では、1体の他機との衝突を回避しながら自機をゴールに入れる問題とする。図2に自機と他機とゴールの位置関係及び各パラメータを示す。自機と他機のスピードはそれぞれ、$|V|,|V_o|$で一定とし、他機は直進動作のみとする。

自機と他機との直線距離をD、自機と他機を結ぶ直線と、自機の進行方向とのなす角をδ、自機とゴールを結ぶ直線と、自機の進行方向とのなす角をθとする。V_Rは自機から見た他機の相対速度で、自機と他機を結ぶ直線とV_Rとのなす角をϕとする。また、自機の旋回角速度をωとする。

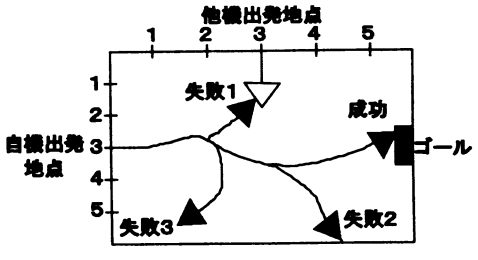
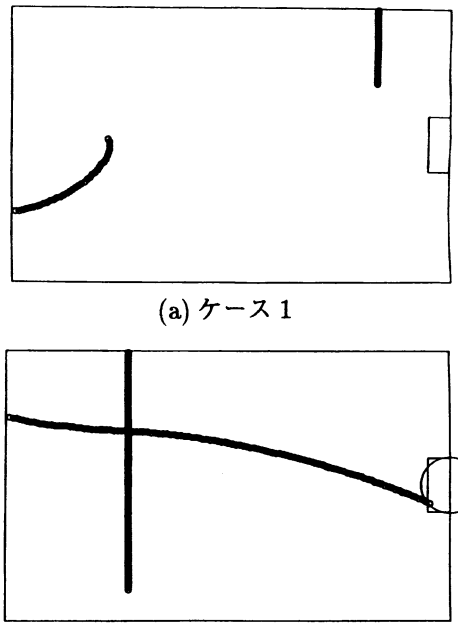


図 3: シミュレーション環境

図3にシミュレーション環境を示す。自機は左の壁から出発して右のゴールを目指し、他機は画面の上から下に横切る設定とする。ここで成功とは、自機が衝突回避を行ないながらゴールに到達することである。失敗は、自機が他機と衝突する、自機が指定された範囲の外に出る、または自機の進行方向とゴールとの相対角度θの絶対値が90度以上になる事を表す。自機は、他機との相対距離、角度などにより認識を行ない、ゴールをゴールとの相対角度により認識を行なう。自機と他機の位置関係を5通り変化させ、それぞれの場合ごとに成功、失敗の判定を行なう。

3.2 衝突回避



(a) ケース1

(b) ケース2

図 4: 基本ルールによる行動

本システムでは、基本行動ルールはファジィクラシファイアシステムにより獲得される。基本行動ルールは、入力は他機との相対距離D、相対速度角ϕ、他機との相対角度δ、ゴールとの相対角度θ、自機の旋回角速度ωを用いた。また、出力は旋回角速度ωの修正分$\Delta\omega$を用いた。入力変数には、Negative Big(NB), Negative Small(NS), Zero(ZO), Positive Small(PS), Positive Big(PB)の5つのラベルを持つメンバーシップ関数を用いた。また、ファジィルールの適合度計算法は幾何平均法を用いた。

図4は、ファジィクラシファイアシステムにより獲得された基本行動ルールによる操舵結果を示す。この時のファジィクラシファイアシステムの終了条件は5通りの試行のうち少なくとも1つ以上ゴールすることとした。このうち、ゴールへ入れなかったケース2に対して、自機をゴールに向かわせるために3回の言語指示を行なった。図5は、その結果得られたロボットの軌跡である。

この時に獲得されたルールは以下の様であった

指示状況データベース

- If D is PB, ϕ is ZO, δ is ZO, θ is ZO, ω is ZO then 言語指示 is "右" (A)
- If D is NB, ϕ is ZO, δ is ZO, θ is ZO, ω is NS then 言語指示 is "少し右" (B)
- If D is NB, ϕ is ZO, δ is NS, θ is ZO, ω is ZO then 言語指示 is "少し上" (C)

言語指示解釈ルールベース

- If 言語指示 is "右" then $\Delta\omega$ is PS
- If 言語指示 is "少し右" then $\Delta\omega$ is PB
- If 言語指示 is "少し上" then $\Delta\omega$ is PS

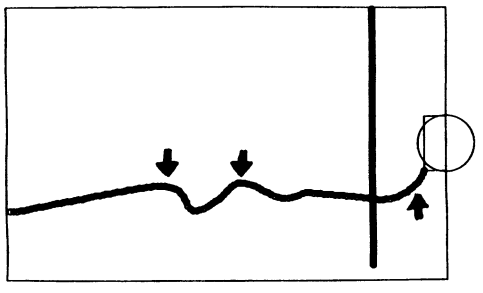


図 5: ゴール到達 (ケース 2)

指示の意図を解釈するために、得られた指示状況データの前件部変数から、指示に関係のある情報を抽出した。得られた 3 個の指示状況データの前件部に、ひとつずつ総当たりで don't care を挿入し、"意図" の抽出を行った。以下に、もっとも don't care の数が多く、抽出度の高いものを示す。(ただし、don't care の項は除いてある)

- If D is PB, θ is ZO then 言語指示 is "右" (A)
- If D is NB, ϕ is ZO, ω is NS then 言語指示 is "少し右" (B)
- If ϕ is ZO, δ is NS, ω is ZO then 言語指示 is "少し上" (C)

また、これらのルールを用いた時のロボットの軌跡を 6に示す。

図 5, 6より意図抽出前と意図抽出後では、著しい行動の差は見られない。これより、行動に必要のない前件部変数は don't care を用いて削除され、行動に必要な前件部変数たけが抽出されて残っていることがわかる。

このとき抽出された "意図" は、人間がシステムに言語指示を行った場合、人間が念頭に置いたものと理解される。また、意図抽出後の方が抽出前より軌跡がなめらかになっているが、これは行動に必要のない前件部変数が削除されたことにより、行動を掻き乱す "雑音" が無くなったためであると考えられる。

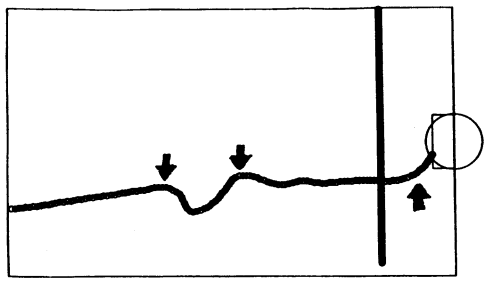


図 6: 知識抽出後の行動 (ケース 2)

4 まとめ

本稿では、人間のあいまいな言語指示から、指示の意図を抽出できるシステムの提案を行った。これにより、人間とシステムの言語を通したコミュニケーションの実現を容易にすると期待される。

参考文献

[1] 宮本、伊藤、後藤、菅野 : "言語指示による制御規則調整方法"、第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 pp.779–780(1995)

[2] 菅野、朴 : "ファジィ理論を用いた言語指示による学習"、日本ファジィ学会誌 Vol.4, No.6, pp.1164–1181(1992)

[3] 古橋、中岡、森川、前田、内川 : "ファジィクラシファイアシステムによる知識発見に関する一考察"、日本ファジィ学会誌 Vol.7, No.4, pp.839–848(1995)

[4] 中岡、古橋、内川、前田 : "ファジィクラシファイアシステムの報酬と信頼度割り当てに関する一提案"、日本ファジィ学会誌 Vol.8, No.1, pp.65–72(1996)

[5] 長谷川、亀井、古橋、内川 : "ファジィクラシファイアシステムを用いた言語指示に対する解釈及び行動改善に関する考察"、第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 pp.459–462(1996)

[6] 藤井、長谷川、古橋、内川 : "状況に応じた言語指示の解釈及び行動改善に関する研究"、第 6 回インテリジェントシステム・シンポジウム講演論文集 pp.185–188(1996)

FRA1-3

ニューラルネットワークとＧＡによる知識獲得

Knowledge Acquisition by Neural Networks and Genetic Algorithms

石渕　久生，新居　学，村田　忠彦
Hisao Ishibuchi,　Manabu Nii　and　Tadahiko Murata

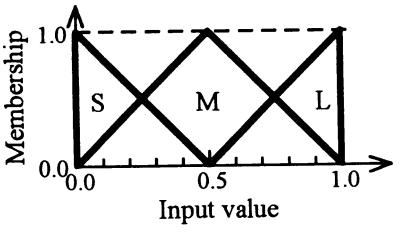
大阪府立大学工学部経営工学科
Department of Industrial Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract　In this paper, we propose a hybrid approach for knowledge acquisition from neural networks. The proposed approach consists of two procedures: rule extraction from a trained neural network and rule selection by a genetic algorithm. First, we describe how linguistic rules can be extracted from a trained multilayer feedforward neural network for a classification problem with many continuous attributes. Next we explain how a genetic algorithm can be utilized for selecting a small number of significant linguistic rules from a large number of extracted rules. Finally we illustrate our hybrid approach by computer simulations on a real-world test problem.

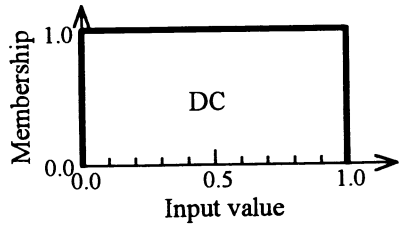
１．はじめに

本研究では，ニューラルネットワークとＧＡによる知識獲得手法を提案する．提案手法は，次の二つの手続きで構成されている．すなわち，（１）ニューラルネットワークからのルール獲得，（２）ＧＡに基づくルール選択，である．

はじめに，ニューラルネットワークからの言語的ルール獲得[1]について述べる．ニューラルネットワークからのルール獲得では，パターン識別問題に対して多数の識別ルールが獲得される．獲得された知識を理解するという観点からは，得られる識別ルールは少数であることが好ましい．そこで，獲得された多数のルールから少数のルールを選択するため，ＧＡに基づくルール選択[2]を行う．ＧＡに基づくルール選択では，正答数最大化とルール数最小化の二つの目的を満足するようなルール集合が得られる．提案手法により，少数の言語的 If-Then ルールという形式で知識を獲得することができる．



S: *small*, M: *medium*, L: *large*



DC: *Don't care*

図１　言語値のメンバーシップ関数

２．ルール獲得

２．１　言語的識別ルール

パターン識別問題として，実数属性値を持つ n 次元 c クラス問題を考えることにする．このとき，パターン空間は，n 次元超立方体 $[0,1]^n$ に規格化されていると仮定する．パターン空間 $[0,1]^n$ でのパターン識別を行うためのファジィ If-Then ルールとして，次のような形式のものを考える．

$$\text{Rule } R_p: \text{If } x_1 \text{ is } A_{p1} \text{ and } \ldots \text{ and } x_n \text{ is } A_{pn} \quad \text{then Class } C_p \text{ with } CF = CF_p \quad (1)$$

ここで，R_p はファジィ If-Then ルールのラベル，p はルール番号を示す添字，A_{pi} は区間 $[0,1]$ 上の条件部ファジィ集合，C_p は結論部クラス，CF_p はルールの確信度である．本研究では，条件部ファジィ集合として，図１に示す４つの言語値を用いる．

２．２　ルール獲得手法

条件部ファジィ集合により構成される n 次元ファジィ数ベクトル $\mathbf{A}_p = (A_{p1}, \ldots, A_{pn})$ が学習後のニューラルネットワークへ入力され，ファジィ数出力ベクトルが計算される．ルール獲得は，ファジィ数ベクトル $\mathbf{O}_p = (O_{p1}, O_{p2}, \ldots, O_{pc})$ の間での大小関係 $O_{ph} > O_{pk}$ に基づき行われる．このため，まず，レベル集合に関する大小関係を次のように定義する．

$$[O_{ph}]_\alpha > [O_{pk}]_\alpha \quad \Leftrightarrow \quad [O_{ph}]_\alpha^L > [O_{pk}]_\alpha^U \qquad (2)$$

ここで，$[O_{ph}]_\alpha^L$ は α レベル集合の下限値，$[O_{pk}]_\alpha^U$ は α レベル集合の上限値である．式(2)の大小関係に基づき，$\mathbf{O}_p$ が次の式を満たすとき $\mathbf{A}_p$ の α レベル集合をクラス h に識別することにする．

$$[O_{ph}]_\alpha > [O_{pk}]_\alpha \text{ for } k = 1,2,...,c\ (k \neq h) \quad (3)$$

さらに，α が $\hat{\alpha} < \alpha \leq 1$ のときに，$\mathbf{A}_p$ の α レベル集合がクラス h に識別され，α が $0 < \alpha \leq \hat{\alpha}$ のときに識別不能になるとする．このとき，次のようなファジィIf-Thenルールが獲得される．

Rule R_p: If $\mathbf{x}$ is $\mathbf{A}_p$ then Class h with $CF = CF_p$

ここで，ファジィIf-Thenルールの確信度 CF_p を次のように設定する．

$$CF_p = 1 - \hat{\alpha} \quad (4)$$

また，確信度の低いルールの生成をさけるため，確信度のしきい値 θ を設定する．したがって，確信度が θ 以上のルールが獲得される．

3．ＧＡに基づくルール選択

ルール獲得手法により，学習済みのニューラルネットワークから多数のルールが獲得される．このルール集合から少数で高性能なルールを選択し，コンパクトなファジィ識別システムを構築する．少数で高性能なルールを選択するために，石渕ら[2]の２目的ＧＡを用いる．ここで２目的とは，正答数最大化とルール数最小化である．

２目的ＧＡにおいて，ルール集合を $S = s_1 \ldots s_r$ と表現する．ここで，r はニューラルネットワークから獲得されたルールの総数である．$s_p = 1$ は p 番目のルールが S に含まれていることを示し，$s_p = 0$ は p 番目のルールが S に含まれていないことを示す．まず，ＧＡの初期世代で，ルール集合がランダムに生成される．それから，次の式にしたがって各ルール集合の適応度が計算される．

$$fitness(S) = \omega_{\mathrm{NCP}} \cdot NCP(S) - \omega_{\mathrm{S}} \cdot |S| \quad (5)$$

ここで，$NCP(S)$ は S により正しく識別されたパターン数，$|S|$ は S におけるルールの総数，ω_{NCP} と ω_{S} はランダムに変化する正の重みである．適応度に応じて親となる個体（すなわち，ルール集合）が選ばれ，交叉操作と突然変異操作により次世代の個体を生成する．

２目的ＧＡから得られるのは，正答数最大化とルール数最小化の二つの目的に対する非劣解集合である．最終的には，非劣解集合から一つの解が意思決定者により選択される．

4．数値実験

提案手法の有効性を示すために，ワインの識別問題に対して数値実験を行った．ワインの識別問題は178個のデータからなる13次元３クラス識別問題である．ワインデータに対して数値実験を行う場合，学習済みのニューラルネットワークに入力する条件部ファジィ集合の組合せの数は $4^{13} \approx 6.7 \times 10^7$ となり，すべての組合せを入力ベクトルとして用いることは不可能である．したがって，以下のような方法で入力に用いる条件部ファジィ集合を生成する．

Step 1: S, M, Lを用いて学習用パターンに対して最も適合する入力ベクトルを生成する．$K = 12$ とする．ここで，K はStep２でDCに置き換えられる言語値の数である．

Step 2: K 個の言語値をDCで置き換えることにより ${}_{13}C_K$ 個の入力ベクトルを生成する．生成された入力ベクトルを用いてルール獲得を行い，もし，１つでもルールが獲得されたら，Step１で生成された対応する入力ベクトルを削除する．

Step 3: Step１で生成された入力ベクトル集合が空になるか $K = 0$ になれば終了する．そうでなければ $K = K - 1$ としてStep２に戻る．

以上の手続きにより，10個の学習済みのニューラルネットワークから平均で590.4個のルールを獲得できた．獲得されたルール集合に２目的ＧＡを適用した結果を表１に示す．表１から，提案手法により，少数で高性能な識別ルール集合が得られていることが分かる．

表1　ワインデータに対する非劣解集合

ルール数	17	13	10	9	7
正答数	178	177	176	175	173
正答率（%）	100	99.4	98.9	98.3	97.2
ルール数	6	5	4	3	
正答数	170	166	161	148	
正答率（%）	95.5	93.3	90.4	83.1	

5．おわりに

本研究では，ニューラルネットワークとＧＡによる知識獲得手法を提案した．提案手法では，知識は少数の言語的 If-Then ルールという形式で獲得される．

参考文献

1) H.Ishibuchi and M.Nii, "Generating fuzzy if-then rules from trained neural networks: Linguistic analysis of neural networks," *Proc. of ICNN'96*, pp. 1133-1138, 1996.

2) 石渕，村田：２目的GAによる言語的識別ルールの選択，日本ファジィ学会誌，Vol.7，No.5，1041-1048，1995.

連絡先：
〒593　大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学 工学部 経営工学科
石渕 久生
TEL: 0722-52-1161(Ext. 2377)
FAX: 0722-59-3340
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRA1-4

属性値重要度に基づく逐次呈示型概念学習についての一考察

Incremental concept learning based on weight of attribute value

白石 匡央　　林 陽一
Masao Shiraishi　　Yoichi Hayashi

明治大学 理工学部 情報科学科
Dept. of Computer Science, Meiji University

Abstract: This paper proposes incremental concept learning model. Concept learning acquires concept for a class from examples, eg., ID3, C4.5 etc. have been proposed. Under antecedent that attribute of example of the same class has similar value, this learning model makes weight-map of attribute value every each class and updates the weight with each example presented incrementally. The concept is acquired by repeating this operation.

1 はじめに

概念学習は、事例集合から事例の一般化記述を得る学習である。ID3, C4.5[1] などは、これを属性によって張られる概念空間を分割する分類問題として決定木による分類を考え、決定木の同定を行なう。

本研究は、この概念獲得問題に対し事例の類似性を用いて、その一般化概念を得ることを目的とする。ここで扱う事例はいくつかの属性群によって表現される。同一クラスに属す事例の属性は同じような傾向をもつという仮定をもとに、各属性値に重要度を与え、呈示された事例の属性に対しその重要度を変化させる。より多く表れる属性値は重要度が高くなり、また頻度の少ない属性値は重要度が低くなるように調整する。全属性値の重要度を配置したマップを考え、各クラスごとにこの属性値重要度マップを用意し、訓練を重ねることによりクラスを代表する属性値（概念）を獲得する。

ID3などの決定木導出型の学習は訓練事例の集合を全て与えるのに対し、本学習法では事例を逐次的に与える。これにより学習済みのシステムに対し追加学習を行なうことができる。

属性値重要度

このような属性値重要度が満たすべき性質としては、上述のように出現頻度により値を増減させるという事と、各クラス間でクラスの出現頻度によらないで重要度の比較を行なえるということが必要になる。このような指針をもとに、今回は重要度として属性値の出現頻度による確率をもとにした値を用いた。

2 学習アルゴリズム

本学習法の概略は以下のようである。あらかじめシステムに与えられる情報は属性の数だけである。

1. 事例を一つ呈示する
2. 新属性値に対しマップの拡張を行なう
3. 新クラスである場合は、新しく重要度マップを作成する。(5) へ
4. 各マップとのマッチングによりクラスを推論
   (i) 推論結果が正しい。次の処理へ（重要度更新）
   (ii) 推論結果が誤り。重要度マップの分割を考慮する
5. 重要度の更新を行なう
6. マップの生存期間を越えるものについて、マップの融合を行なうかをテストする
7. (1) に戻る

2.1 属性値重要度マップ

以下の説明では、クラスを $C_k(1 \leq k \leq n)$、クラス数を n (動的に変化する) とし、属性 $A_i(1 \leq i \leq p)$ の属性値 $a_{ij}(1 \leq j \leq \tau(i))$ とする。属性数 p は事前に与えられ、属性値数は属性ごとに異なる。後述するが、一つのクラスが複数の概念を持つ場合には、複数の重要度マップを持つことになるので、そのマップが示すクラスを $M_k \in \{C_1, C_2, \cdots, C_n\}$ としておく。各重要度マップでの属性値の出現頻度は条件付確率 $P(a_{ij}/M_k)$ となる。

$$\sum_j P(a_{ij}/M_k) = 1$$

入力属性値は $\alpha_m(1 \leq m \leq p)$ とする。属性値重要度マップは $P(a_{ij}/M_k)$ の値を保持するものとなる。

属性値重要度マップ

クラス M_k			
A_1	A_2	$\cdots$	A_p
$P(a_{11}/M_k)$	$P(a_{21}/M_k)$		$P(a_{p1}/M_k)$
$P(a_{12}/M_k)$	$\vdots$		
$\vdots$	$P(a_{2\tau(2)}/M_k)$		$\vdots$
$P(a_{1\tau(1)}/M_k)$			$P(a_{p\tau(p)}/M_k)$

2.2 推論

入力事例の推論は次の様に行なう。入力属性値に対し、各重要度マップごとに次の計算を行なう。

$$\sum_m P(\alpha_m/M_k) \times X \qquad (*)$$

$$X = \begin{cases} Y^2 & (Y \geq \frac{1}{n+1}) \\ 0 & (Y < \frac{1}{n+1}) \end{cases}$$

$$Y = \frac{P(C_k/\alpha_m)P(C_1)/P(C_k)}{\sum_l P(C_l/\alpha_m)P(C_1)/P(C_l)}$$

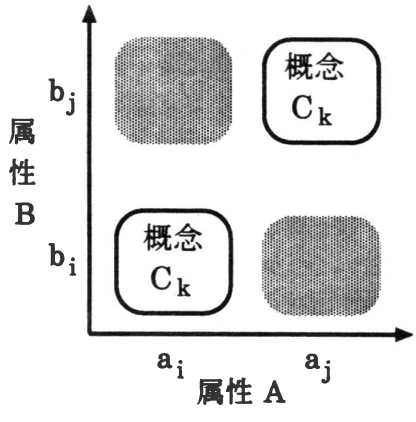
式 (*) の値のうち、最大値をとるマップのクラスを推論クラスとする。ここで条件付確率 $P(C_k/\alpha_m)$ は入力属性値 α_m に対するクラスの分布を示し、属性値 α_m がクラス C_k を判別する有用度をあらわす。$P(C_1/\alpha_m) = 0.9$ ならば、α_m をとる事例の 90%がクラス C_1 であるので、クラス C_1 であるかの判定に用いるのに役立つ。

Y の計算は学習において、各クラスの出現頻度の差が $P(C_k/\alpha_m)$ に影響することへの補正である。例えば、属性値 a_{ij} において、理論的な値として $P(C_1/a_{ij}) : P(C_2/a_{ij}) = 2:1$ であったとき、$P(C_1) : P(C_2) = 1:4$ であったならば、$P(C_1/a_{ij}) : P(C_2/a_{ij}) = 1:2$ のように観測される。a_{ij} はクラス C_2 を判別するのによさそうに見えるが、実質的には C_1 を判別するのに役立つ。

Y を自乗しているのは 1 に近い値をより際だたせるためである。またその時点で分かっているクラス数を n として、Y の値が $1/(n+1)$ を境界とし、それ以下のときには 0 としているのは、属性値 a_{ij} に対して、全てのクラスが同じ割合で表れるとき、補正した $P(C_k/a_{ij})$ が $1/n$ となることから、クラス C_k において、属性値 a_{ij} が他のクラスよりも多い頻度で表れるとき $(> 1/n)$ には、その属性値を有効とし、少ない時には無効にするためである。これにより汎化を行ないやすくする。$1/(n+1)$ 以上で判別を行なっているのは、汎化しにくいデータではデータに特徴が表れ難く、ほとんどの属性値で有用度 $P(C_k/a_{ij})$ が境界値 $1/n$ 近辺をとるため、条件をゆるくすることにより学習を収束させるためである。

2.3 属性値重要度マップの分割

1 つのクラスに対し、複数の概念が存在する場合など、次のような問題がある。



上図のように属性 A, B に対し、クラス C_k が属性値 $(a_i, b_i), (a_j, b_j)$ をとることが学習された時に、1 つのマップでこれらの重要度を増加させると $(a_i, b_j), (a_j, b_i)$ も C_k に属すように見えてしまう場合がある。この問題に対処するために重要度マップの分割を行なう。分割は新たに重要度マップを作成することにより行なわれる。これにより 1 つのマップはクラスに対する 1 つの概念を表すものとなる。

分割は推論に失敗した時に行なわれる。誤った推論を行なう理由として、その事例が新しい概念である場合か、または事例がノイズデータであるということが考えられる。

ノイズデータであるかを判定するため、分割後に推論を行ない正しく推論されるようになったかを調べる。誤った場合はそれをノイズデータとして扱われる。例

えば次の2つの事例

$$\begin{aligned} e_1: &\ a_1\ a_2\ a_3\ a_4\ a_5\ a_6 \quad C_1 \\ e_2: &\ a_1\ a_2\ a_3\ a_4\ a_5\ a_6 \quad C_2 \end{aligned}$$

同じ属性値に対してクラスが違う事例である。e_1に関しては重要度マップが作成されている時に、e_2が入力されたならばそれはクラスC_1として推論される。その推論は間違いなので新たに重要度マップが作成される。この状態でもう一度e_2を入力すると、$P(a_i/M_{e_2})$の値は1であるが$P(M_{e_2}/a_i)$の値が低いので再びクラスC_1と推論される。このような状態の時、事例e_2はノイズとして重要度マップは作られない。

ノイズと判定された時、分割されたマップは同一クラスのマップへ融合される。これにより、このような入力があったという情報は蓄積される。

2.4 重要度マップの生存時間

ノイズデータであるかを判定するのに、上記の方法だけでは判定しきれず、分割後にある程度事例を読み込んだ後に分かる場合がある。分割時にはクラスに対し、新しい概念であるように見えたが、その後の出現頻度がほとんどない場合はノイズとして扱う。これらの情報（マップ）をすべて保持しておいても良いのだが、マップ数の増大は概念の形成という目的においては好ましくない。そのため誤差率が多少上昇しても、それらのマップは消去（融合）する。このことを行なうために、各重要度マップに生存時間を設定し、時間がたったものは、そのマップが時間内にどの程度使われたかを調べ、ほとんど使われなかったものは融合される。融合は以下の式

$$\sum_i \sum_j |P(a_{ij}/M_s) - P(a_{ij}/M_t)|$$

この値が最小になるマップと行なわれる。ここでM_tはテストされるマップ、M_sはM_tと同一クラスのマップ。生存時間はマップが使われた時点でリセットされる。

また、生存時間は動的に変化させる必要がある。汎化しにくい事例に対しては、重要度マップの分割が多く行なわれ、それらのほとんどが同じような頻度で表れ、その出現確率は相対的に低くなる。このような場合、生存時間を伸ばさないとほとんどの事例がノイズとして判定され、学習ができなくなるおそれがある。生存時間は次の式により決める。

$$\text{生存時間} = \begin{cases} \alpha \times \text{該当クラスのマップ数} \\ \qquad\qquad (\alpha > 1) \\ \beta\ (\text{上記の値} < \beta) \\ \qquad\qquad \beta: \text{下限値} \end{cases}$$

2.5 不明な (Unknown) 属性値の取り扱い

事例のなかには、ある属性の属性値が不明のものが存在する。そのような事例に対しては、次のようにする。

学習時には、入力クラスに従い確率$P(a_{ij}/C_k)$ (C_k: 入力クラス) で不明属性値を補間する。未知データに対するクラス分けでは、推論時に評価するマップごとに属性値a_{ij}の生起確率$P(a_{ij}/C_{M_k})$ (C_{M_k}:マップの属すクラス) をもとに補間して評価を行なう。

3 実験

ここで、本手法の有用性を示すため、いくつかのデータに対し適用した。クラス分けテストでは、学習した重要度マップに対し推論を行ない正しくクラス分けできたかを評価する。このとき重要度の値は変化させない。

3.1 Vote データ

このデータは16属性、democrat, republicanの2クラスの事例からなる選挙の投票のデータである。訓練事例として300、テスト事例として135事例がある。まず訓練事例を一通り示した後、テスト事例を用いて認識率を調べた。

以下の表で'回数'は訓練データを一通り学習させた回数を示し、'マップ数'はその時点での生成された属性値重要度マップの数である。これは概念数を示すものである。

投票データ

回数	正解数	誤り数	誤り率	マップ数
1	135	0	0.0000	2

表に示したとおり、非常に良い結果を得ることができた。生成されたマップ数も2であることから、各クラスについて1つの概念で表すことができたといえる。

3.2 パリティ問題

次に汎化が困難な事例に対して本手法を適用した場合について示す。パリティはバイナリ表現された数値に対し、'1'の数が偶数か奇数かを判別するものである。各ビットを属性とし、偶数、奇数の2クラスの事例と考えると、この事例群は汎化することができないものとなる。分類木を考えるとn属性に対して葉が2^nになり全ての属性を調べなければ判別できない。これは1つの事例が1つの概念を示している状態である。

ここでは、8ビットパリティに適用してみた。事例を256個用意し、訓練事例とテスト事例として用いた。

8ビットパリティ

回数	正解数	誤り数	誤り率	マップ数
1	131	125	0.4883	159
2	214	42	0.1641	288
3	243	13	0.0508	294
4	256	0	0.0000	287
5	250	6	0.0234	264
6	256	0	0.0000	267
7	256	0	0.0000	257
8	256	0	0.0000	258
9	256	0	0.0000	257
10	256	0	0.0000	256

汎化できないデータなので、最終的に重要度マップが256個出来上がっている。1回目で生成マップ数が159なのは、マップ生存期間の下限値が小さいことによるものであると考えられる。マップ生成数が大きくなると生存期間が増大し、より多くのデータが推論できる。2,3回目に過剰に反応したマップは徐々に融合されることにより定常状態になる。5回目で誤り率が増えるのは融合により誤差が表れたものと考えられる。

汎化のできない最悪のケースでは事例の数だけマップが生成されてしまうのだが、このようなデータに対しても学習を収束させることができることを示せた。

3.3 Soybean desease

Michalskiの大豆の病気に関するデータの適用を行なった。このデータは、35の属性、19のクラスからなり683の事例を持つ。また、不明な属性値を持つ属性が存在している。

Soybean desease

回数	正解数	誤り数	誤り率	マップ数
1	646	37	0.0542	27
2	653	30	0.0439	46
3	663	20	0.0293	52
4	663	20	0.0293	54
5	662	21	0.0307	57
6	666	17	0.0249	58
7	666	17	0.0249	59
8	665	18	0.0264	58
9	666	17	0.0249	56
10	666	17	0.0249	55

不明な属性値を持つため、結果には多少ゆらぎが存在する。最終的には誤り率2.5%ぐらいで、生成マップ数は57程度になった。同じデータをC4.5に適用した結果は、誤り率が2.2%で、決定木の葉の数が124、枝刈りを行なった後では誤り率3.8%で、葉の数が70である。この実験からかなり良い結果が得られたと考えられる。

4 おわりに

属性値の出現頻度を基にした概念学習の手法を提案し、実験により本手法の有用性を示すことができた。しかし、学習された属性値重要度マップがどのような概念を表しているのかについては、すぐには把握できない。今後の課題として、学習済みの重要度マップからルール抽出を行なえるようにすることを考えている。また連続値属性への適用、重要度マップの生存時間に関しての定式化についても考えている。

参考文献

[1] J.R.Quinlan: "Programs for Machine Learning" Morgan Kaufmann Publishers,Inc.

連絡先:
〒214 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科
林 陽一
e-mail: hayashiy@cs.meiji.ac.jp
Tel:044-934-7475 Fax:044-934-7912

FRA2-1

大局性志向型学習法によるあいまいな概念のファジィ集合化アルゴリズム

An Algorithm of Fuzzy Set-Forming of the Vagueness
with a Globality-Oriented Algorithmic Learning Method

鈴木 泉　　大里 有生
Izumi Suzuki　　Ario Osato

長岡技術科学大学
Nagaoka University of Technology

Abstract : This paper proposes a new Leaning method which achieves the following purpose in the machines which can change the environment towards the users from the machine in response to the request of the uses. The purpose is to identify the true environments of which the uses desire, as a result that these machines present the various kind of environment towards the users and collect the responses from the users, which must be done under considering their requests of the environment which is suppose to be the part of each response. We introduce a new Generator of learning algorithm named 'GOAL Method' as a model of the way to present the environment like above and refer to the example of operation of it. In this example, we use the Fuzzy Decision Making for the purpose of deciding the environment to present. Besides this, we suppose that the environment of which the uses desire is a vagueness and express them by the fuzzy sets.

1 はじめに

大衆的に利用される機械装置について、近年はその多機能化とパーソナル化の傾向が強く、個々のユーザーに対する「個人化対応」が要求されるようになっている。本報告では次のようなマンマシン・システムを想定する。

まずシステムの構成は、マシンは計算知能から「指令」$x \in X$ が入力されると、人間に「環境」$M(x) \in Y$ を呈示する。すなわちマシンは X から Y への写像 M に等しく、M は明らかになっているとする。人間は「環境」に対し、計算知能へ「応答」$z \in Z$ を与える。人間のシステムは明らかではない。（図 1）

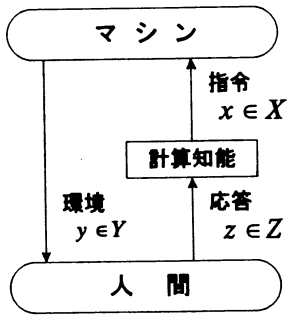


図 1　対象とするマン・マシンシステム

次に、計算知能に与えられた課題は、人間が要求する環境を Y 上で特定することである。これは Y 上のあいまいな概念と考えられ、ファジィ集合はその外延的モデルの一つと考えられる [1]。あいまいな概念をファジィ集合として特定する手法はメンバーシップ関数構成法 [4] と呼ばれる。とくに呈示要素評定法においては、Y の様々な要素を人間に呈示し、それがあいまいな概念に該当するか否かを答えてもらうことによって、メンバーシップ関数を構成する。

一方、我々は次を仮定する。

① 求めるべきあいまいな概念（以下、人間が真に**要求する**環境と呼ぶ）は、Y 上ファジィ集合であるとする。これを $\tilde{G}$ とあらわす。

② 環境とそれに対する人間の応答の組から、人間の環境に対するあいまいさを含んだ希望（以下単に人間の **希望** と呼ぶ）が 1 個導かれる。しかしそれらはいずれも $\tilde{G}$ とは必ずしも一致しない。とくに Y の真部分集合の上においてのみ、人間の真に要求する環境をあらわしている。（ cf. 数式 (5.1) ）

③ $\tilde{G}$ を特定するためには、Y 上の多様な環境を人間に呈示しなければならない。

本報告は、[7] で提案したあいまいな概念をファジィ集合として特定するアルゴリズムを整理し直し、上記の概念を獲得するための学習アルゴリズムにおける基本的な枠組み、特に試行値の Generator（ GOAL 法という ）を提案するものである。GOAL 法が通常のメンバーシップ関数構成法における要素の呈示方法と異なる点は、次の要請を加えていることである。『人間が与える「応答」には環境 Y に対する人間の希望を含み（上記仮定②）、あ

る程度これに従いつつ、Yの様々な要素を人間に呈示しなければならない』。人間の希望とは例えば、温熱環境であれば「暑い＝室温を下げてほしい」などである。

本報告の構成は次のようである。第2節はGOAL法の定義。第3節、第4節はそれを実現するための具体的な方法の一例。第5節ではGOAL法を本マン・マシンシステムにおけるあいまいな概念の獲得に適用した場合の、ファジィ集合$\tilde{G}$の構成法について検討する。

2 GOAL法

以下で用いる集合上の「あいまいな概念」とは「外延的モデル」、つまり全体集合は確定しているが、それに属する要素が必ずしも明示できない対象を意味する。

GOAL法（大局性志向型学習法）Globality-Oriented Algorithmic Learning Methodとは、一連の試行系列からなる教師付き対話的学習における、教師の試行値に対するあいまいさを含む希望が教師情報の中に含まれる場合の、試行値の決定方法に関するモデル化である。

定義（GOAL法）

$U, V, \Re$ を集合とし、$\Re$はその要素がUにおけるあいまいな概念に対応しているとする。

次を満たすダイナミカルな入出力システム S をGOAL法 **(大局性志向型学習法)** という。

- Sの入力属性を V, 出力属性をUとする。
- 時間軸を $N=1,2\cdots$ とし、時点$n \in N$における入出力値をそれぞれ v_n , u_nとあらわす。
- 集合 KをSの状態空間と呼び、 Kの要素をSの状態という。

① $k_0 \in K$があらかじめ与えられている。

② 状態遷移関数という写像 $\phi: K \times V \to K$ があり、時点 $n \in N$における状態 k_n は

$$k_n = \phi(k_{n-1}, v_n)$$

によって求められる。

③ 教師希望出力Generatorという写像 γ^1 とシステム希望出力Generatorという写像 γ^2

$$\gamma^1, \gamma^2 : K \to \Re$$

出力選択関数という写像 $\delta: K \times \Re \times \Re \to U$

があり、u_{n+1}は k_nから

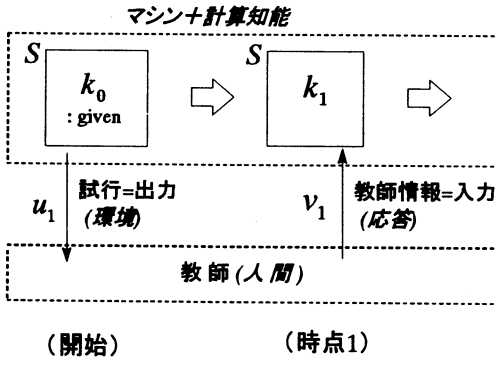
$$u_{n+1} = \delta\left(k_n, \gamma^1(k_n), \gamma^2(k_n)\right), n \in N \cup \{0\} \tag{2.1}$$

によって求められる。

④ $\gamma^2(k_n)$ に良く該当する要素が無いとき終了。

（定義終り）

$\gamma^1(k_n)$は、出力u_nに対する教師の希望、$\gamma^2(k_n)$はu_nに対する、知識を獲得するために必要な入出力システム側の希望を意味する。出力値は学習における試行値 、入力値は教師情報にそれぞれ相当する。学習の目的は何らかの知識を獲得することであって、それはKの中に含まれる。しかしそれがどのような知識であるかは限定しない。



u_iはk_{i-1}に、k_iはk_{i-1}とv_iに依存する。

（斜字は図1における表現）

図2 入出力システムSの流れ

$\Re$の例は、 U上のファジィ集合の族である。以下$\Re$は U上のファジィ集合の族とする。

GOAL法を、本マン・マシンシステムにおける人間が要求する環境をファジィ集合として特定する学習に用いる場合、出力 Uは環境属性 Y 、また入力 V は応答 Z 、獲得すべき知識は U上ファジィ集合$\tilde{G}$である。

次に、第3節で状態空間Kと状態遷移関数ϕ、第4節で教師希望出力Generator γ^1とシステム希望出力Generator γ^2、および出力選択関数δを順に考察する。

3 状態空間

入出力システムSの挙動は、初期状態k_0と現時点までの入出力値によって決定される。従って状態空間Kの例として、現時点までの入出力値を記録する対象が考えられる。

Kの定義例

$V' = V \cup \{\theta\}$, $U' = U \cup \{\theta\}$

ただし $\theta \notin U$, $\theta \notin V$ とする

$$K := \left\{ \{(u_i, v_i)\}_{i \in N} \in (U' \times V')^{|N|} \;\middle|\; \text{制約(3.1)} \right\}$$

制約(3.1) :

$$\exists n' \in N \text{ s.t. } \begin{cases} u_n \in U,\ v_n \in V & \text{for all } n < n' \\ u_n = v_n = \theta & \text{for all } n \geq n' \end{cases}$$

ϕの定義例

Kを上で定義する場合、ϕは次のように定義される。

$k_0 := ((\theta,\theta),(\theta,\theta),\cdots)$

$k_n = ((u_1,v_1),\cdots,(u_n,v_n),(\theta,\theta),\cdots)$

に対し

$k_{n+1} = \phi(k_n, v_{n+1})$

$= ((u_1,v_1),\cdots,(u_n,v_n),(u_{n+1},v_{n+1}),(\theta,\theta),\cdots)$

ただし u_{n+1}は式(2.1)に従い、v_{n+1}は教師からの入力である

以上によって帰納的に定義する。

4 出力関数

ここでは状態空間Kと状態遷移関数ϕを前節のように定義した場合の、出力値u_nを求める手続きについて考察する。

4-1 教師希望出力 Generator

教師希望出力Generator $\gamma^1 : K \to \Re$ は過去の履歴など、現時点におけるシステムの状態k_nに依存して、u_{n+1}に対する人間の希望をU上ファジィ集合として特徴づけるものである。

ここでは、簡単のため $n \in N$ に対し $\gamma^1(k_n)$が直前の入出力値、つまりu_n, v_nのみに依存すると仮定し、γ^1の一例を示す。

γ^1の定義例

$V = \{v_1, v_2\}$ とし、v_1は「快適」、v_2は「不快」を意味する。

全ての $u \in U$ に対し、「uに類似した環境」を表わすU上ファジィ集合 $\tilde{A}_u$が与えられていると仮定する。

このとき、各$(u,v) \in U \times V$ に対し、

"$\tilde{A}_u$において快適[不快]である" (4.1)

なるファジィ命題が得られ、「教師すなわち人間の希望は快適な要素である」という前提に立てば、ファジィ命題(4.1)の真理値限定により、

$\gamma^1(k_n)$ は

$$\mu_{\gamma^1(k_n)}(u) = \mu_{\tau_i}\left(\mu_{\tilde{A}_u}(u)\right),\ u \in U,\ i = 1,2 \quad (4.2)$$

で与えられる。

ただし式(4.2)においてτ_1, τ_2はそれぞれ true, falseのラベルが付けられた言語的真理値とし、(4.1)で快適の場合(4.2)では i =1 を、(4.1)で不快の場合(4.2)ではi =2 を用いる。

このほか$\tilde{A}_u$としては「 uより寒いと感ずる要素」などが考えられる。（ cf. 例4.1）

4-2 システム希望出力 Generator

システム希望出力 Generator γ^2は教師希望出力Generator γ^1との対をなし、知識を獲得するために必要な、u_{n+1}に対する入出力システム側の希望を生成するものである。

4-1項における$\tilde{A}_u$を用いた例として、

$$\gamma^2(k_n) := \left(\tilde{A}_{u_1} \cup \cdots \cup \tilde{A}_{u_n}\right)^C \quad (4.3)$$

ここにCはファジィ集合の否定演算

式(4.3)によるγ^2の定義は、「過去に出力した部分以外の要素を出力すること」つまり「 Uの全域にわたって一通り出力すること」を意味している。このほか、UあるいはVの属性、獲得すべき知識の種類などに応じて、様々なγ^2の定義方法が考えられる。

4-3 出力選択関数

簡単のため、k_nには依存せず、$\gamma^1(k_n)$と$\gamma^2(k_n)$のみからu_{n+1}を決定する方法を一例述べる。

[5]のファジィ意思決定法に従うならば、

$\gamma^1(k_n) \cap \gamma^2(k_n) \neq \tilde{0}$ （ただし$\tilde{0}$は$\mu_{\tilde{0}}(u) := 0$ for $\forall u \in U$ ）の場合に限定すれば、u_{n+1} は

$\gamma^1(k_n) \cap \gamma^2(k_n)$ の最大化決定

で与えられる。

4-4 数値例

$U = \{x_1,\cdots,x_6\} \times \{y_1,\cdots,y_6\}$ とする。例えば x_i:湿度, y_i:温度など。

$\gamma^i(k_j)$を$\gamma^i{}_j$と略記する。(I=1,2, j=N)

（時点1） 出力 $u_1 = (x_3, y_4)$, 入力 v_1 =「快適」に対し、$\tilde{A}_{u_1}$が次で与えられ、$\gamma^i{}_1$が定義された。

$\tilde{A}_{u_1}$ =

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
x_1				.2		
x_2			.3	.6	.3	
x_3		.2	.6	1	.6	.2
x_4			.3	.6	.3	
x_5				.2		
x_6						

$$\gamma^1{}_1 = \tilde{A}_{u_1},\ \gamma^2{}_1 = \tilde{A}_{u_1}{}^c$$

（時点2） 出力 $u_2 = (x_3, y_2)$, 入力 v_2 =「寒い」に対し、「u_2より寒いと感じる環境」としての$\tilde{A}_{u_2}$が次で与えられ、$\gamma^i{}_2$が定義された。

$\tilde{A}_{u_2}$ =

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
x_1		.3	.8	1	1	1
x_2		.3	.8	1	1	1
x_3		.3	.8	1	1	1
x_4		.3	.8	1	1	1
x_5		.3	.8	1	1	1
x_6		.3	.8	1	1	1

$$\gamma^1{}_2 = (2\tilde{A}_{u_1} + \tilde{A}_{u_2})/3 \qquad (4.4)$$
$$\gamma^2{}_2 = \tilde{A}_{u_1}{}^c \cap \tilde{A}_{u_2}$$

式(4.4)はメンバーシップ値の重み付き平均である。$\gamma^i{}_2$ は、時点2の $\tilde{A}_{u_2}$、時点1の $\tilde{A}_{u_1}$ に2:1の配分で依存する。このとき、

$\gamma_2^1 \cap \gamma_2^2$ = normalized

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
x_1		.2	.5	.9	.6	.6
x_2		.2	.9	.8	1	.6
x_3		.4	.8		.8	.9
x_4		.2	.9	.8	1	.6
x_5		.2	.5	.9	.6	.6
x_6		.2	.5	.6	.6	.6

よって、その最大化決定により、$u_3 = (x_2, y_5)$ または (x_4, y_5) が選択される。

5 ファジィ集合の構成法

GOAL法は試行値のGeneratorであって、それによって如何なる知識を獲得すべきかは限定しない。しかし本マン・マシンシステムに適用するならば、それは人間の要求する U 上ファジィ集合 $\tilde{G}$ であった。

同一時点の出力値と入力値のペアー (u_n, v_n) から、U の部分集合と、その上に限定された「快適な $u \in U$」をあらわすファジィ集合が与えられる場合を仮定した。（第1節の仮定②）
すなわち

$\eta : U \times V \to \Re \times Q$ ， Q は U の部分集合の族 (5.1)

が与えられている。

ここで、η の像を

$\eta(u_n, v_n) = (\tilde{G}_n, C_n)$ ， $\tilde{G}_n \in \Re, C_n \in Q$

のように表記する。つまり $\tilde{G}_n$ は、求めるべき $\tilde{G}$ を C_n へ限定して表わしたものである。

次に、各時点 $n \in N$ において、当時点までに得られた出入力値 $\{(u_i, v_i)\}_{i \le n}$ から $\bigcup_{i \le n} C_n$ に限定を拡大して $\tilde{G}$ を求めたい。しかし、ある $u \in U$ があって、u でメンバーシップ値が複数得られている場合があり、その場合それらの平均を用いることにすれば、$\tilde{G}$ は、

$$\mu_{\tilde{G}}(u) = \frac{\sum_{i \le n} \nu_{C_i}(u) \cdot \mu_{\tilde{G}_i}(u)}{\sum_{i \le n} \nu_{C_i}(u)} \ , \ u \in \bigcup_{i \le n} C_n \qquad (5.2)$$

で与えられる。

ここに ν_C は $C \in Q$ の特性関数で、次式で定義される。

$$\nu_C(u) = \begin{cases} 1 \cdots u \in C \\ 0 \cdots u \notin C \end{cases}$$

さらに(5.1)式で Q を $\Re$ で置き換える場合、数式(5.2)の特性関数 ν_{C_i} はメンバーシップ関数 $\mu_{\tilde{C}_i}$ に置き換える。

6 まとめ

本報告で提案したGOAL法は、マシンのユーザーによって異なる快適な使用環境などの特定を、マシン側から積極的に様々な使用環境を提案することによって実現させるアルゴリズムの基本的な枠組みの一つになると考えられる。ここで注目した点は、人間の環境に対するあいまいさを含んだ要求と、様々な使用環境を提案することの折り合いを如何に付けるかであった。そして我々が示した解決法は、ファジィ意思決定法を利用することであった。

GOAL法はあくまでも数理モデルに過ぎない。従って探索手法、知識獲得支援、ヒューマンモデル、音声支援システムなどの技術と効果的に組み合わせて初めて、実用的かつユーザーフレンドリーなマン・マシンインターフェースの一部として機能するであろう。

参考文献

[1] 岩井 他, 知識システム工学, 計測自動制御学会 (1991)

[2]R.E. Bellmann and L.A.Zadeh : Decision Making in a Fuzzy Environment, Management Sci. Vol.17, 141/164 (1970)

[3] 高原, システム工学の理論 , 日刊工業新聞社 47/145 (1974)

[4] 中村, メンバーシップ関数の諸測定手法の関連について, 第2回ノンエンジニアリング・ファジィワークショップ講演論文集 66/67 (1992)

[5] Zadeh,L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning (Ⅰ),(Ⅱ),(Ⅲ) Inform. Science 8, 199/249; 8, 301/357; 9, 43/80 (1975)

[6] Zadeh,L.A. Fuzzy logic and approximate reasoning , Synthese, 30, 407/428 (1975)

[7] 鈴木, 大里, 大局的学習によるあいまいな概念のファジィ集合化アルゴリズム, 第12回ファジィシステム・シンポジウム講演論文集 365/368 (1996)

連絡先

〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603 - 1
長岡技術科学大学工学部
計画・経営系　大里研究室
鈴木 泉　TEL 0258-46-6000(内 3160)
FAX 0258-46-6504

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRA2-2

学習機能付ファジィシステム構築ツール

Design tool for fuzzy inference systems with learning capabilities

今崎 直樹 Naoki Imasaki　愛須 英之 Hideyuki Aisu　関根 智 Satoshi Sekine　加納 誠 Makoto Kanou

(株) 東芝 研究開発センター
Research & Developement Center, Toshiba Corporation

Abstract

This paper introduces a design and simulation tool Enfant™, *with which users can construct fuzzy inference systems with learning capabilities by visual programming. The software supports various types of fuzzy inference while it keeps a feature that users do not have to program the learning mechanisms.*

1 はじめに

ファジィコントローラなどのファジィ推論システムの開発において、メンバーシップ関数の調整をニューラルネット的学習で行うことは、面倒な試行錯誤を低減することができ有効である。しかし、メンバーシップ関数の調整機構のプログラミングは、ファジィ推論機構自体のプログラミング同様、開発者にとって容易とはいえない。既存のファジィ推論システムの設計を支援するソフトウェアには、この調整機構を自動的に実装してくれるものがあるが、ファジィ推論の多様な手法を幅広くサポートできるものは残念ながら見あたらないのが現状である。

筆者らは、誤差逆伝播メカニズムを内蔵する部品の組合せによる学習システムの構築法を提案する [1] とともに、この手法を実現するための手段としてオブジェクト指向言語 C++ によるクラスライブラリを開発している [2]。

今回、このクラスライブラリを適用した学習機能付ファジィシステムの設計・シミュレーションを支援するツール (ソフトウェア) を開発したので報告する。

2 ファジィ推論システムの構成

まず、筆者らが開発したクラスライブラリ [2] で定義される部品の動作について説明する。

部品は、(a) 順方向動作モード、(b) 逆方向動作モード、および (c) 修正動作モードの 3 つの動作モードをもつ (図 1参照)。順方向動作モード時、部品は入力 (x) を受けて、0 個以上の内部パラメータ (p) に基づいて信号処理を行い結果 (z) を出力する。逆方向動作モード時には、誤差入力 (ζ) を受けて内部パラメータの修正量を演算処理するとともに、上流への誤差伝播処理 (出力は ξ) を行う。これらの処理は誤差逆伝播学習アルゴリズム [3] の分解に基づいて行われる。また修正動作モード時には、逆方向動作モードで演算した内部パラメータの修正量を用いて、内部パラメータを更新する。

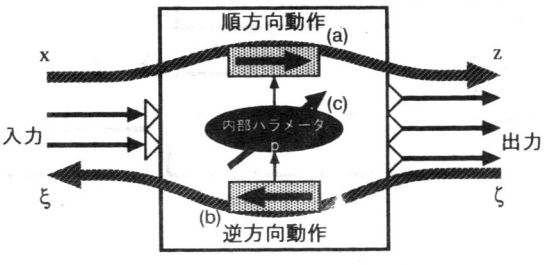


図 1: 各部品の動作

部品は、割り当てられた信号処理機能に応じて固有の信号処理機構および誤差逆伝播機構を備える。複数の部品でネットワークを構築することにより、全体として目的の情報処理を行う枠組が作成できると同時に、誤差逆伝播学習アルゴリズムによる学習機能が実現できる。

このクラスライブラリが定義する部品の組合せにより、ファジィ推論システムを構成することができる。本クラスライブラリでは、各部品の内部パラメータは外部に対し隠ぺいされるため、ファジィ推論システムは次の 3 つのパートまで分解することができる。

- 前件部メンバーシップ関数パート (1 入力 1 部品)
- 前件部論理結合子パート (1 ルール 1 部品)
- 後件部メンバーシップ関数パート (1 出力 1 部品)

後件部メンバーシップ関数パートは、ファジィ合成演算、非ファジィ化演算を包含する。クラスライブラリはそれぞれのパートを担当できる部品を複数種備えている。ファジィ推論システムの構成例を図 2に示す。同図の例では、前件部メンバーシップ関数パートに、三角型メンバーシップ関数部品、前件部論理結合子パートに論理積部品、後件部メンバーシップ関数パートに三角型メンバーシップ関数部品を配置しており、オーソドックスなファジィ推論システムを構成している。適宜部品を交換することにより、多様な推論方式のシステムが構築できる。しかも、全ての部品は一貫した誤差逆伝播機構をもっているため、常にメンバーシップ関数の調整機能が自動的に実装される。

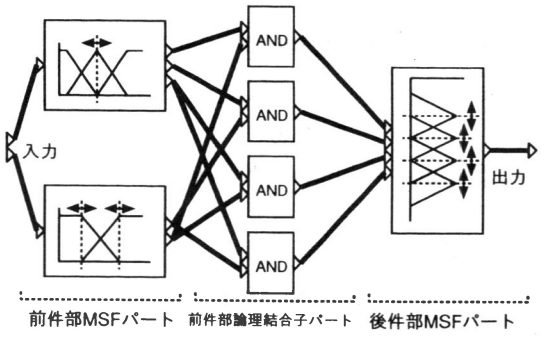


図 2: ファジィ推論システムの構成例

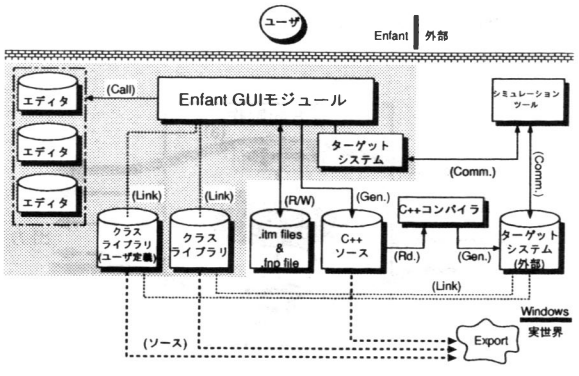


図 3: システム構成

3 構築ツールの開発

信号処理機構、誤差逆伝播機構のプログラミングを不要とするクラスライブラリであるが、これを利用するためには依然としてC++プログラミングのスキルが多少なりとも必要である。

そこで、クラスライブラリを隠ぺいし、ビジュアル・プログラミングによる設計・シミュレーション環境を提供するソフトウェアEnfant™を開発した。

Enfant™はパソコン上で動作するアプリケーションであり、図3に示すように複数のモジュールから構成される。ユーザはメニューより、必要な部品を選択しエディタ上に配置するとともに、部品間を信号線で接続してシステムを設計する。部品固有の情報の編集には、専用のエディタが別途用意される。例えばファジィ推論システムを設計する際には、ファジィルールエディタおよびメンバーシップ関数エディタが利用できる。

エディタ上では、クラスライブラリで定義される部品のオブジェクトが実際にインスタンス化されるため、設計結果はただちにシミュレーションにより動作検証ができる。また単なる動作検証のほかに、システムの学習を行わせることも可能である。検証が完了した場合には、設計結果をC++ソースコードに変換し、クラスライブラリとともに、目的のプラットフォームへ移植する。もちろん、パソコン上のソフトウェアに適用することも容易である。

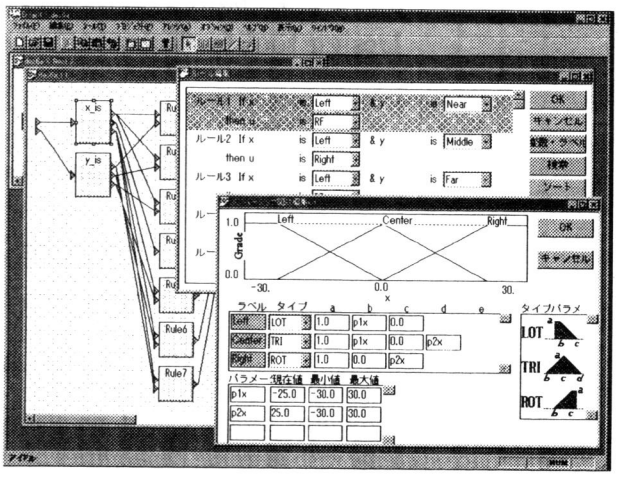


図 4: Enfant 画面例

GUI例を図4に示す。画面は、簡略型ファジィ推論システムの設計の様子を示している。

4 おわりに

本稿では、学習機能付ファジィシステムを効率的に設計・構築できるソフトウェアEnfant™を紹介した。多様なシステム構成をサポートしつつ、学習機構のプログラミングを不要としていることが大きな特長であり、今後もソフトウェアとしての完成度を高めるとともに、クラスライブラリの拡充を進めていく。

参考文献

[1] 今崎他. 学習システムの一構築法. 第12回ファジィシステムシンポジウム予稿集. 日本ファジィ学会, Jun. 1996.

[2] 今崎他. 学習システムの構築法および記述言語. 第35回計測自動制御学会学術講演会予稿集. (社) 計測自動制御学会, Jul. 1996.

[3] D. E. Rumelhart, et al. *Learning internal representations by error propagation*, Vol. I of *Parallel Distributed Processing*, chapter 8, pp. 318–362. MIT press, 1986.

連絡先

〒210 川崎市幸区柳町70番地
(株) 東芝 研究開発センター S&S研究所
今崎 直樹
電話: (044)548-5637 FAX: (044)520-5973
E-mail: saki@ssel.toshiba.co.jp
Enfant URL:
http://www.toshiba.co.jp/tech/software/enfant/

FRA2-3

免疫型学習システムによる信号制御ルール設計
Immune-based Learning System for Traffic Signal Control

○愛須 英之、 加納 誠、 吉川 泰文
○ Hideyuki AISU, Makoto KANO, Yasufumi YOSHIKAWA

株式会社 東芝
Toshiba Corporation

Abstruct:
In this paper, a machine learning framework inspired from biological immune system is proposed. Just as biological immune system generates and controls the diversity of antibodies to prepare for enormous types of new antigens, so our learning system generates a set of if-then rules by self learning to prepare for many types of occurrence.

1 はじめに

生体において、細菌など体外からの異物である抗原から生体を防御する機構が免疫系である。免疫系では、骨髄の幹細胞が分化してできるB細胞およびT細胞と呼ばれるリンパ細胞、白血球、抗体など様々な要素が相互に密接に影響を及ぼし合いながら抗原を無毒化している。

免疫系は脳神経系と並ぶ高度な情報処理機能を備えていることが近年の生理学の進歩により明らかになりつつある。まず、遺伝子組合わせと突然変異により膨大な種類のリンパ細胞を生成し、抗原に対抗できるリンパ細胞のクローンが選択的に増殖することにより、後天的に多様な抗体を獲得している。つまり、生態系の進化のプロセスに近いことが非常に短い周期で行なわれている。さらに、イディオタイプネットワーク仮説 [1] では、リンパ細胞および抗体と抗原との間の刺激抑制関係と同様に、異なる種類のリンパ細胞および抗体の間においても相互に刺激抑制が行なわれるとしている。これにより、複雑な相互刺激抑制のネットワークを自己組織的に形成し、各抗体間の適切な濃度バランスを状況に合わせて動的に変化させながら維持している。

最近、様々な観点から免疫系の機構を簡略化した工学モデルをつくり、情報処理分野に応用することを目指した研究が展開され始めている [2]。本稿では、免疫系が多様な抗体を後天的に獲得し取捨選択する機構にヒントを得た、免疫型学習システム [3] の概略、及び信号制御ルール自動設計への応用例について紹介する。

2 免疫型学習システムの概略

提案する免疫型学習システムは、体内の抗原に侵された部位全体に相当する抗体データベース、骨髄に相当する抗体産生部、抗原に相当する評価用シミュレータからなる。抗体産生部では、新たな候補抗体を次々に生成し、評価用シミュレータでは、個々の抗体のパフォーマンスを評価する。

本学習システムは、クラシファイアシステムにならい、抗体をIF- THEN 型ルールのコーディング単位とし、抗体をルールの条件（観測値）記述部分と結論（出力）記述部分からなるベクトルとして表現し、濃度を示す値を付加する。評価用シミュレータで求める評価値は、ある時点の抗体の価値を評価するだけであるのに対し、濃度は抗体間の関係も鑑みたより総合的な価値の指標であり、各抗体の取捨選択の基準となる。濃度は、クラシファイアシステムにおける強度に相当する。

以下は処理の概略である。

1. 初期抗体集団の生成
   部品のランダムな組み合わせ等の手段により初期抗体集団を生成し、抗体データベースに格納する。初期抗体濃度は一定の値とする。
2. 新抗体の産生
   部品のランダムな組み合わせ、突然変異、交叉などの手段により新たな候補抗体を生成し、抗体データベースに追加する。生成時の抗体濃度は一定の値とする。実際の免疫系では交叉に相当する処理は行なわれないが、本システムでは特に抗体生成方法に制限は設けず、課題に応じた生成方法を使うものとする。
3. 抗体の評価
   抗体データベースの中から条件部が現在の観測値に適合する抗体それぞれについて、結論部の出力内容をシミュレーション上で試行することにより評価値を求める。
4. 抗体濃度の更新
   抗体間の相互抑制（競合作用）および評価値に基づき各抗体の濃度変化を演算する。
5. 抗体削除
   濃度が最小しきい値を下回った抗体を集団から消去し、2に戻る。

抗体濃度の更新方法としては、J.D.Farmer の免疫系モデル [4] において提案されている濃度ダイナミクス式を利用し濃度更新を行なう方式、及び濃度ダイナミクス式を工学的に単純化しパラメータ設計を容易にした方式の2種類を試みている。

3 信号制御ルール自動設計への応用

3.1 交通信号制御の概要

交通信号制御は、既存の道路構造を変更することなく目的に応じた交通管制を行うための中心的役割を持ち、都市地域における交通の過密化が進むにつれて、よりきめ細かい制御が要求されている。現時点で、殆どの交通信号は、サイクル、スプリット、オフセットの3種類のパラメータを調整することにより制御されている。

- サイクル: 信号表示が一巡する時間
- スプリット: 一サイクルで各方向の交通に与えられる青表示の長さ（もしくは割合）
- オフセット: サイクルの統一されたエリア内での、隣接する交差点間の青表示開始時間のずれ時間

オフセットは系統制御においては特に重要なパラメータであり、この値により一群の連続した交差点間の車群の通過効率が左右される。

信号制御パラメータの調整方法は、日本においては、予め設計したパラメータ決定テーブルを用いて、観測された交通指標に基づき適切なパラメータを選択する方法（パタン選択方式と呼ばれる）が主流である [5]。図1にパタン選択方式

で利用されるパタンの例を示す。英などではオンラインで交差点単位のパラメータ最適化を行う方法も実用化されているが、パタン選択方式は、利用可能な監視系インフラの状況に合せて制御できることやセンサ情報の誤差に対する安全性などの面で、日本の交通状況に適した方式である。

しかし、現状では、パラメータ決定テーブルは人手により設計されているため、熟練と手間を必要とし、交通状況の経年変化に応じた再設定が困難となっている。設計に最適化手法を用いた場合でも、入力情報の場合分け及びそれぞれの場合において使用すべきパラメータを試行錯誤的に設計・評価しなければならず、やはり手間を要する。さらに、最適化されたパラメータは、変動しうる交通状況（交通流量など）の全てがセンサ情報より正しく推定された場合にのみ優れたパフォーマンスを示す。このため、設計されたパラメータは、監視系インフラが不十分な系統においては優れている保証がなく、現実の道路においては最適化手法だけではパラメータ決定テーブルの設計を自動化するには不十分である。

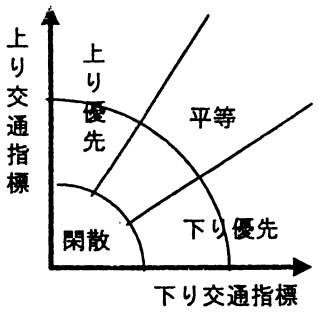


図1 パタンの一例

3.2 パラメータ決定テーブルの自動設計

交通信号パラメータ決定テーブル全体を、交通シミュレータを用いたオフライン学習により自動設計するため、街路交通流シミュレータ TRANSYT[6] と免疫型学習システムを統合し、パラメータ決定テーブルの自動設計システムのプロトタイプを構築した。TRANSYT は、街路交通現象解析および信号パラメータ設計支援のため、世界的に最も広く用いられているツールである。車群単位で交通流を記述するマクロモデルを用い、道路網に交通流量を与え車群をシミュレートする機能と、信号交差点で発生する遅れと停止回数を計算し、設定された交通状況のもとでオフセット、スプリットを山登り法により局所最適化する機能を持つ。最適化の評価基準として、主に以下の評価値 P.I. を用い、これを最小にする。

$$\text{P.I.} = \Sigma\ (\text{遅れ時間} + \alpha \times \text{停止回数})$$

本プロトタイプシステムは、観測交通量を条件部、設定すべきオフセットを結論部とした抗体（ルール）を学習により獲得する。抗体評価関数としては、α =25 として上の P.I. を用いた。また、実用面を重視し学習を高速化するため、新抗体の生成時に TRANSYT 自体の持つ最適化機能を利用する。

ここでは、図3のような、15交差点、31リンクからなる道路モデルを設定しシミュレーション実験を行なった。この道路モデルは、中央の交差点において上り交通流に対し脇から流入する交通流を持つ。信号コントローラは、交差点1に備えられた2つの車両感知器によって上り下り各交通流量を測定し、本系統内における他の14個の交差点におけるオフセットをパラメータ決定テーブルを用いて決定し、全交差点に指示する。サイクル、スプリットは固定した。

上り流入交通量、下り流入交通量、脇からの流入交通量がそれぞれ基準値から±90% の範囲でランダムに増減し、さらにそれぞれの観測値に 20% 以内の観測誤差がランダムに加わる場合を想定しテーブルを設計した。2点の観測値のみでは脇からの流入交通量の上り交通量観測値に占める割合を推定するのが不可能なため、制御のロバスト性が要求される。

作成されたテーブルを、学習時と異なる100ケースの交通量を同じ想定下でランダムに発生させ TRANSYT によりシミュレーション評価することにより、従来手法で設計されたテーブルと比較した。ここで用いた従来方式とは、図1に示したように入力空間を7分割し、それぞれの分割における代表的な上り流入交通量、下り流入交通量、脇からの流入交通量を設定し、TRANSYT 自体の最適化機能によりオフセット設計を行うものである。この際、TRANSYT の解が局所最適解に陥るのを防ぐため、それぞれ 50 通りの異なる初期値から山登り探索を行なわせた。

上り流入交通量 270[vph]、下り流入交通量 540[vph]、脇からの流入交通量 270[vph] を基準値とした場合、平均 P.I. が従来手法 90.1 に対し提案手法 83.2 となり、また P.I. が少しでも勝っていたケースの割合は 0.58 であった。また従来手法は脇からの流入交通量の割合によっては提案手法に比べて大幅に P.I. が劣る場合があり、免疫型学習システムを用いて設計したパラメータ決定テーブルによる制御の方がロバスト性において勝っていることを確認した。

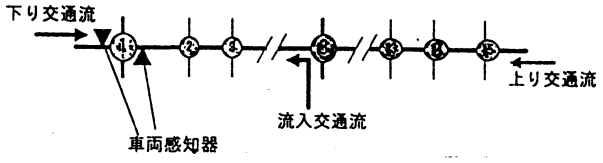


図2 実験用街路道路モデル

4 おわりに

本稿では、免疫系の機構にヒントを得た学習システムの実現方法の概要を述べ、交通信号制御のパラメータ決定テーブル自動設計への応用例を示した。

今後は、より工学的に優れた学習システムを目指し、さらに手法の改良および理論的検討を進める。

References

[1] N. K. Jerne. The immune system. *Sci. Am. 229*, pp. 52–60, 1973.

[2] D.Dasgupta and N.Attoh-Okine. Immunity-based systems: A survey. In *Proceedings of IMBS Workshop on ICMAS96*, pp. 13–24, 1996.

[3] H. AISU and H. MIZUTANI. Immunity-based learning - integration of distributed search and constraint relaxation. In *Proceedings of IMBS Workshop on ICMAS96*, pp. 124–135, 1996.

[4] J. D. Farmer and N. H. Packard. The immune system, adaptation, and machine learning. *Physica D22*, pp. 187–204, 1986.

[5] （社）交通工学研究会. 交通信号の手引. （社）交通工学研究会, 1994.

[6] D.I. Robertson. *TRANSYT: a traffic network study tool.* RRL Report, LR253, 1969.

連絡先

〒 210 川崎市 幸区 柳町 東芝柳町工場
S&S 研究所 研究第一担当 愛須 英之
TEL:044-548-5631 FAX:044-520-5856

FRA2-4

ファジィ推論を用いた落雷予測システム

Thunderbolt Prediction System under Fuzzy Reasoning Method

鎌野琢也，鈴木茂行，安野卓，細谷敏哉（徳島大学），川崎憲介（㈱四国総合研究所）
Takuya KAMANO (The University of Tokushima)
Takayuki SUZUKI (The University of Tokushima)
Takashi YASUNO (The University of Tokushima)
Toshiya HOSOTANI (The University of Tokushima)
Kensuke KAWASAKI (Shikoku Reseach Institute Incorporated)

In this paper,a simple thunderbolt system under fuzzy reasoning shceme is proposed. To predict the lightning location,Shikoku island and its environs are divided into four hundred areas,and the thunderbolt location and the rainfall in each area are measured by LLS(lightning location system)and a weather radar respectively.In the proposed system,the measured thunderbolt data,its change data and the rainfall data in each area are used as the input data to the antecedent part of the fuzzy rules,and the lightning locations after thirty minutes are inferred. To achieve high accuracy prediction,the fuzzy resoning rules are tuned by a learning law so that the prediction results match the past thunderbolt data.Simulated results demonstrate the possibility of the proposed system for prion of the thunderbolt locations.

1. まえがき

高度情報化社会の進展とともに，電力の供給信頼度向上が以前にも増して強く要求されている。この要求に応えるべく送電線の耐雷性向上に関しては多くの努力がなされてきたが，送電線事故の主たる原因は依然として「雷」である。したがって，落雷の発生や移動方向または盛衰をより早く正確に判断できれば，系統の信頼度維持あるいは安全確保などの強化が期待できる。しかしながら，気象学に基づいて落雷の移動予測を行う場合，広範囲に渡る落雷の移動に関する複雑なモデルの構築が避けられず，しかも大規模な気象観測設備や高速な計算処理能力を必要とし，容易に予測を行うことができない。そこで，LLS(Lightning Location System)による落雷データや気象庁からの降雨データなど比較的容易に入手可能なデータを用いて，電力系統の運用面から見て十分な精度を得るための簡易な予測手法の確立が望まれている。

筆者等は先に，落雷データおよび降雨データを用いたファジィ推論による雷移動予測システムを提案している。しかしながら，それは各予測地点のみの情報に基づいており，周辺地域の情報は考慮されていない。また，予測ルール数も予測範囲の細分化により著しく増加する。そこで本稿では，ルール数の低減化と周辺地域の状況を考慮するために，落雷危険度を導入したファジィ予測システムを提案している。シミュレーションにより提案した落雷予測システムの有用性を確かめている。

2. 予測範囲

本稿では，四国を中心とした地域の予測を行っている。予測範囲は図1に示すような東経130.5度から135.5度，北緯32.5度から35.0度の東西約500㎞，南北約500㎞の範囲をそれぞれ20等分した400の地域M(i, j) (i, j = 1 ~ 20)を予測範囲とする。

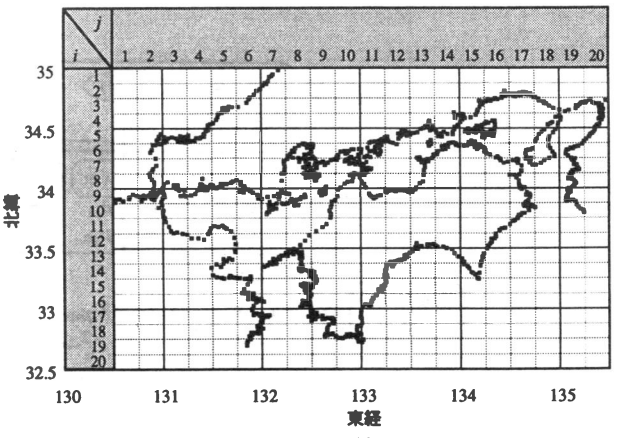
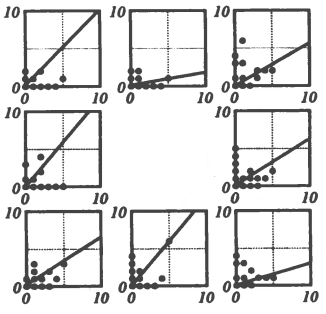


図1　予測範囲

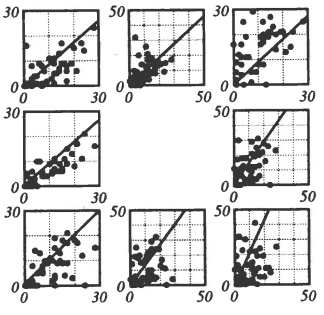
3. 落雷相関図，降雨相関図

周辺地域からの影響を知るため，任意の予測地点の30分後の落雷数とその周辺地域の現時点での落雷数との相関および予測地点の30分後の降雨量とその周辺地域の現在の降雨量との相関を図2に示す。横軸は任意の予測地点の30分後の落雷数（あるいは降雨量）であり，縦軸はその周辺地域の現時点での落雷数（あるいは降雨量）である。相関図の傾きが1であれば

その地域の落雷数（降雨量）は増減もなく30分後の予測地域に影響を与えると考えられる。この傾きが大きければ落雷数あるいは降雨量は減少する傾向にあり，傾きが小さければ増加する傾向にあると考えられる。以上より，両相関図から周辺地域データは，30分後に予測地域に影響を与えていることが確認できる。



(a)　落雷相関図



(b)　降雨相関図

図2　落雷，降雨相関図

4. 推論アルゴリズム

予測システムは当該地域と隣接地域からの影響を考慮した推論ルールを学習により獲得するファジィ推論システムである。入力データとして，当該地域においては落雷データ $L_{i,j}(k)$ とその変化量データ（1サンプリング前のデータとの差分）$\Delta L_{i,j}(k)$，降雨データ $R_{i,j}(k)$ を用いる。隣接地域においては落雷データ $L_{i,j-1}(k)$，落雷変化量データ（予測地域の1地域西側のデータとその周囲8地域のデータの平均との差分）$\Delta L_{i,j-1}(k)$，降雨データ $R_{i,j-1}(k)$ を与える。また，30分後の落雷データ $L_{i,j}(k+1)$ を教師データとする。ファジィ推論システムは，入力データを与えた場合の推論結果が教師データに一致するように学習を行う。

推論ルールの獲得は，図3に示すように2段構成となっている。初段は，当該地域の各データから落雷危険度 α と隣接地域の各データから落雷危険度 β をそれぞれ推定する部分であり，後段は，α，β から当該地域の30分後の落雷数を求める部分である。初段において入力データは，任意の値（落雷データおよび落雷変化量データは20，降雨データは10）で正規化し，3つのラベルをもつメンバシップ関数によりファジィ化する。後段において α，β は5つのラベルをもつメンバシップ関数によりファジィ化され，各ラベルに対するグレードをそれぞれ $\mu_\alpha(k)$，$\mu_\beta(k)$ とすると，後件部のグレード $\mu_{\alpha\beta}(k)$ は次式で与えられる。

$$\mu_{\alpha\beta}(k)=\mu_\alpha(k)\mu_\beta(k) \qquad \cdots(1)$$

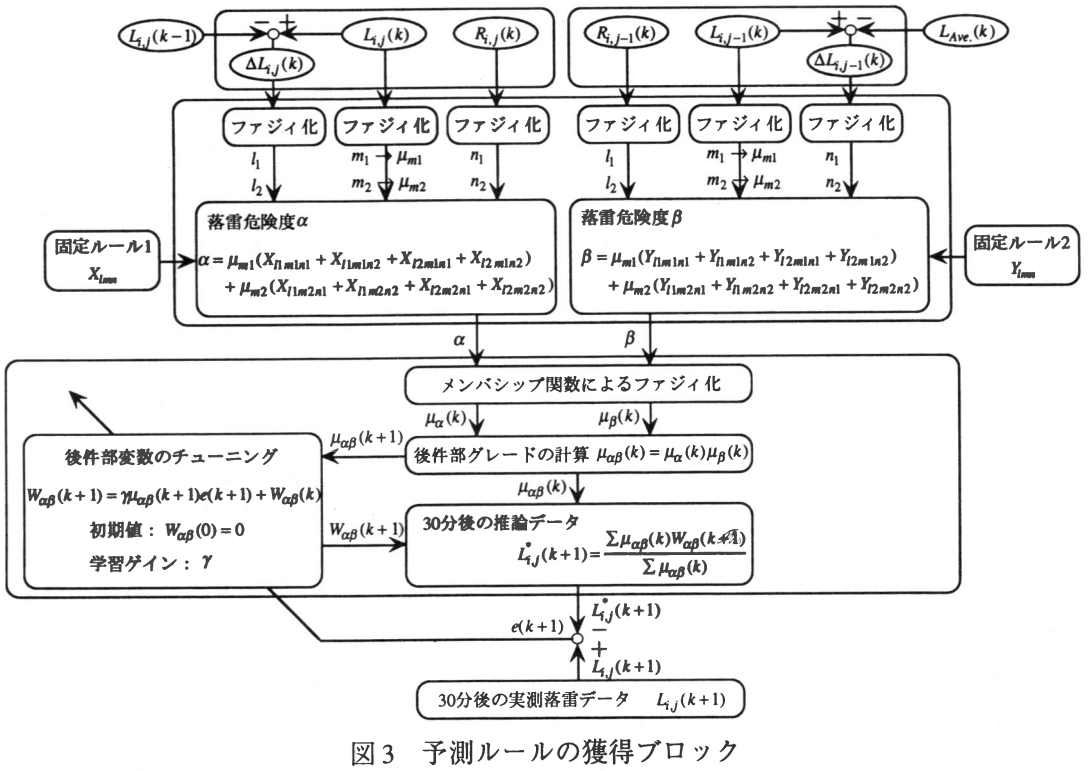


図3　予測ルールの獲得ブロック

1サンプリング後の落雷データの予測値$L^*_{i,j}(k+1)$は，次式で求められる。

$$L^*_{i,j}(k+1)=\frac{\sum\mu_{\alpha\beta}(k)W_{\alpha\beta}(k+1)}{\sum\mu_{\alpha\beta}(k)} \quad \cdots(2)$$

その結果は，k+1時点の実測データ$L_{i,j}(k+1)$と比較され，予測誤差$e(k+1)$が次式で求められる。

$$e(k+1)=L_{i,j}(k+1)-L^*_{i,j}(k+1) \quad \cdots(3)$$

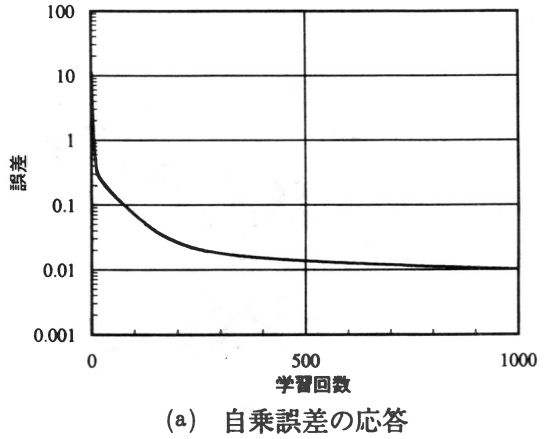
また，後件部変数$W_{\alpha\beta}(k+1)$は，次の学習則によりチューニングされる。

$$W_{\alpha\beta}(k+1)=\gamma\mu_{\alpha\beta}(k+1)e(k+1)+W_{\alpha\beta}(k) \quad \cdots(4)$$

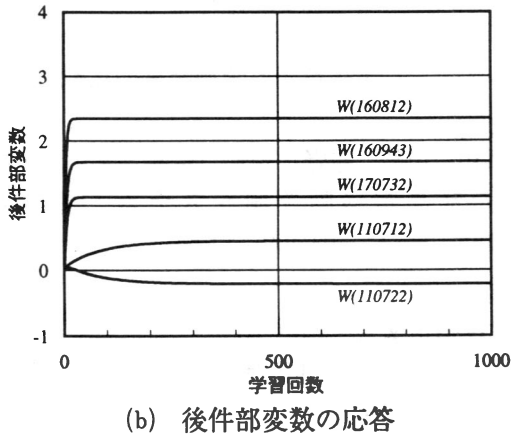
ここで，γは正の定数で学習ゲインである。上式により求められた$W_{\alpha\beta}(k+1)$とk+1時点の入力データを用いて(1)，(2)式から同様に$L^*_{i,j}(k+2)$を予測する。以上の計算過程を発雷から終雷までを1回の学習とし，予測誤差がほぼ零収束するまで繰り返すことにより予測ルールのチューニングを行った。

5. 学習結果

前節の推論アルゴリズムにより，1993年8月2日のデータを用いて予測ルールのチューニングを行った。



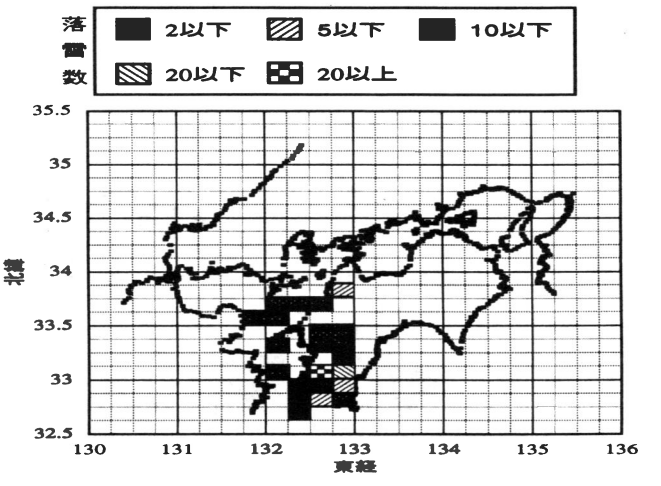
(a) 自乗誤差の応答



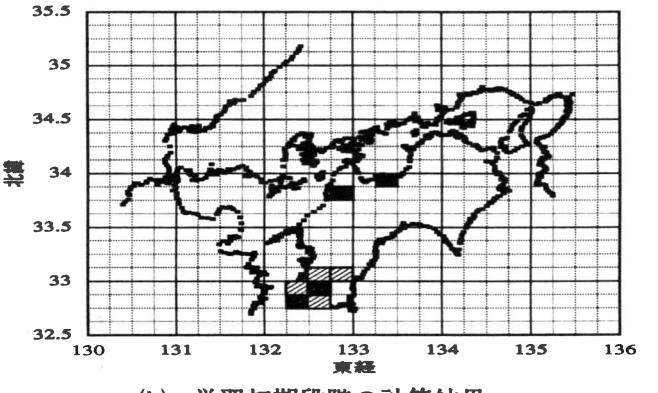
(b) 後件部変数の応答

図4 学習過程における自乗誤差と後件部変数の応答

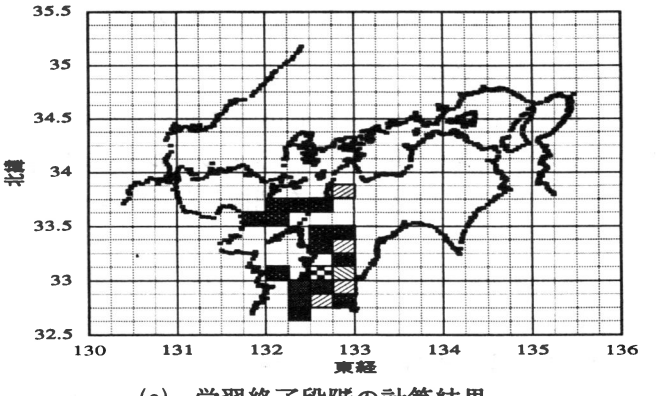
学習過程における自乗平均誤差と後件部変数の応答を図4(a)，(b)に示す。図5(a)，(b)，(c)はそれぞれ8月2日の17時30分の落雷実測データ，学習初期段階（学習回数n=2）の学習結果および学習終了段階（学習回数n=1000）の学習結果を示す。後件部変数を零初期値に設定しているため，学習初期段階では実測データと一致していない。しかしながら，学習の進行とともに予測誤差が減少し，学習後において実測データとほぼ一致した学習結果を得ることができており，この結果，良好な予測ルールを獲得できることが確かめられた。



(a) 実測データ



(b) 学習初期段階の計算結果



(c) 学習終了段階の計算結果

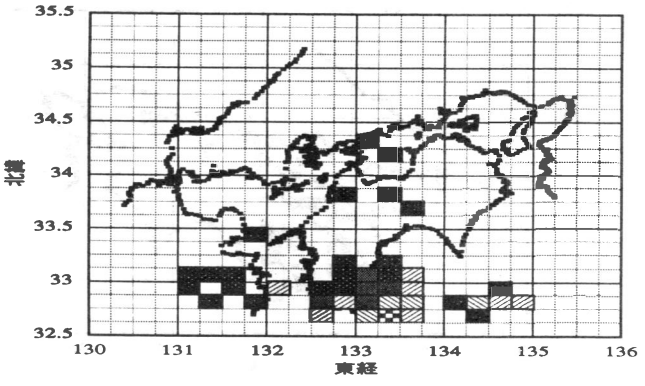
図5 学習結果

6. 予測結果

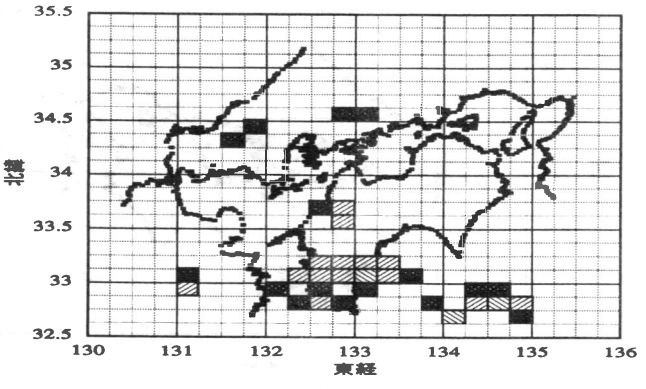
学習した予測ルールを用いて落雷予測を行い，提案する予測手法の有用性を確認する。

図6は1993年8月2日のデータを用いて学習した予測ルールを固定し，同ルールを1993年6月18日の予測に適用した結果である。同図(a)は1993年6月18日の14時30分から30分間の実測データであり，(b)は同時刻の予測結果である。

この結果から，今回の予測に用いたデータと学習を行った際に用いたデータとは両日の気象条件の違いなどにより落雷を発生させる条件に違いが生じているため，予測結果と実測データには若干の誤差が生じている。



(a) 実測データ



(b) 予測結果

図6 実測結果と予測結果の比較

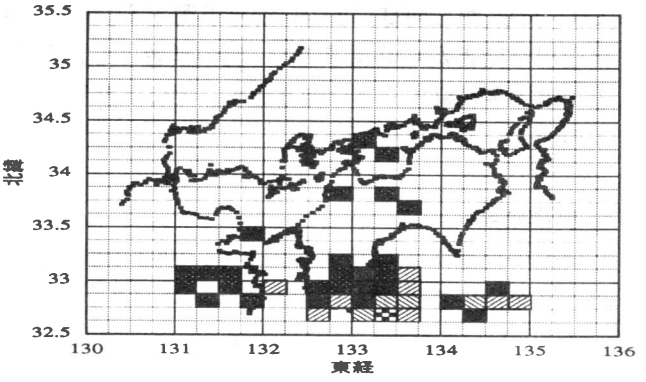
7. 追加予測結果

落雷発生条件の違いを最小限に抑えるために，30分毎の予測誤差を用いてファジィルールを追加学習することで，当日の落雷条件を把握した予測ルールの構築を検討する。

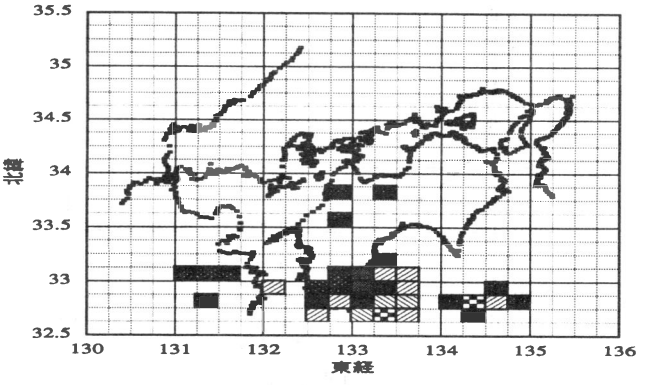
追加学習に用いるデータは，現在，30分前，1時間前の3つのデータとしている。また，追加学習による予測ルールの獲得ブロックは図3と同様であるが，後件部変数の初期値は零ではなく，前回の学習で得られた後件部変数としている。

図7は追加学習により得られた予測ルールを用いて1993年6月18日の予測に適用した結果である。同図(a)は1993年6月18日の14時30分から30分間の実測データであり，(b)は同時刻の予測結果である。

この結果から，追加学習による予測結果は前節に示した予測結果と比較して精度良く，追加学習の有効性が確認できた。これは，30分毎に最新のデータを用いて追加学習を行うことにより，逐次，現在の落雷状況を把握した予測ルールが構築されているためである。以上の結果から，提案した落雷予測システムは容易に入手可能な落雷データと降雨データを用いても予測が可能なことが確かめられた。また，予測ルール数の低減化も可能であることが確認された。



(a) 実測データ



(b) 予測結果

図7 追加学習を行った場合の
実測結果と予測結果の比較

参考文献

1）浜田，川崎，鎌野，安野，鈴木：ファジィ推論を用いた簡易雷移動予測システム，電学論B，Vol.116B，No.4，403/409 (1996)

連絡者

770 徳島市南常三島町2-1
徳島大学工学部電気電子工学科
鎌野 琢也
TEL&FAX 0886-56-7455

FRA3-1

複雑系モデルとしてのカオスとファジィ

Chaos and Fuzzy – As A Modeling of Complex System.

寺野寿郎（東京工業大学），増井重弘（法政大学）
Toshiro Terano (Tokyo Inst. of Tech.), Shigehiro Masui (Hosei Univ.)

Abstract: Chaos Theory is lionized recently as a model of complex system. On the other hand, fuzzy theory also advocates that one of the merit is its modeling ability of large scale complex systems. What is the difference in these two theories and which is the prospective winner ? Major difference is in the philosophy of science and engineering. If we succeed to represent an unknown phenomenon with a simple lucid model in science, we understand the phenomenon and it is the discovery of truth. In engineering, however, modeling is not the final goal but a tool by which we can solve a real problem. In this paper, we make clear the difference and evaluate these theories from both science and engineering aspects.

1．はじめに

最近，複雑系[1][2]という言葉がいろいろな分野で聞かれるが，その定義ははっきりしない．クリア[3]は情報論的にこれを捉え「複雑さはその不確実さを解消するのに必要な情報量に比例する」という．しかし，木村[4]は「知識（情報）がふえると不確実さは減るが，複雑さは増えるので，また不確実になる」と言っている．また，カオス[5]の定義もいろいろあり，「周期性のないある種の秩序」，「決定論的非線形力学の不規則で予測不可能な振舞い」などと言われる．そこで，複雑さを論じている文献から共通のキーワードを探すと，要素でなく全体，分析手法で解けない，混沌と秩序，不確実，ミクロとマクロの相互干渉，自己組織，非平衡，創発，生物，進化，適応，ダイナミズム，カオス，コンピュータ・シミュレーションなどが浮かんでくる．この中のいくつかは既にいろいろな分野（特に工学分野）で指摘された問題であって，その対応策も研究されている．　例えば，システム工学[6]では大規模システムの合理的な設計・運営・評価などが必要なことから，それまでの要素中心の工学から離れて組織や構造の問題を中心に議論するようになった．そこでは要素の特性と，それを組み合わせたシステムとは機能も特性もまったく別物であること，従って従来の科学の本質的方法論である分析的手法が役に立たないことが指摘されている．

複雑問題が諸方で論じられるようになったのは，技術の進歩が非常に早く，かつ，その影響が大きく広範になったため，学問も現実から遊離した立場を取り続けられなくなったことと，コンピュータの発達により大規模問題もある程度取り扱えるようになったことが原因である．更に生物に関係する研究が進むにつれてその複雑性が明らかになり，サイバネテックス，人工知能など生物機能の模擬を目指す分野では新たな対応が必要になった．

表１はそれら情報処理研究の歴史をまとめたものである．カオスはその中では比較的新しいが，単純な構造のシステムでも予測できない複雑な挙動をすることから多くの人々の興味をひいた．すなわち，秩序と無秩序が同じ法則から生まれること，または無秩序に見える現象にもある法則があるらしいことなどが認められた．

2．学問とモデル

学問の研究とは未知の問題を誰にも理解できるようにその論理体系を作ることである．

現実の問題は種々の原因で複雑化しており，それをそのまま体系化することは極めて難しい．そこで余計な部分を除いてすっきりした問題（言い替えると論理化しやすい問題）に変える必要がある．これが広義のモデル化である．しかし，どの部分を除くのか（次元の縮小），また，結果をどういう形で表現するのかによってさまざまなモデルができる．論理性を重視するならば，それが最も明確なのは数学であるから数学をモデルに使うのが一番である．だが，数学は人工的な思考実験であり現実世界のコピーではないから，その論理を過信してはならない．　現実には数学ではどうしても表現できないような現象も多い．そこで自然言語で論理を構築する分野も多い．哲学などでは提唱する概念そのものが一つのモデルである．人文社会系の学問でも同様に一つ一つの論文が対象とする問題のモデルであると言える．

モデルは現実問題を理解し，さらに深く解明するためのものであるから，論理性だけでなく分かり易さと現実問題をどれだけ忠実に反映しているかが重要である．これらの要求はふつうトレードオフの関係にある．これを端的に表したのがザデーの不適合性の原理である．

不適合性の原理：システムの複雑さがある限度を超えると，システムを精密に記述することと，その記述が正しいということは両立しなくなる

妥当性＝現実データとモデル出力の一致度（表現法，計算量，同定の難易，現象理解の難易なども含まれる）．

精密性＝数式（物理，非物理），構造，数量，２値論理，ファジィ論理，言語表現

ザデーの原理を用いて有効なモデルを作るには精密性と妥当性を定量的に評価して妥協点を求めなければならないが，評価にはモデルの目的に応じていろいろなレベルや項目が考えられ単純ではない．実際的なのは同一問題に対しても大局的な理解を得るためのマクロモデルと，局所的な精密な答を得るためのミクロモデルを使い分けることであろう．

3．科学と技術におけるモデルの違い

科学と技術は方法論が似ているためにまとめて議論されることが多いが，目的が全く違うので誤った評価になる恐れがある．ハンガリー生まれの流体力学の大

表1　各種知的情報処理の歴史

分野	1960年	1970年	1980年	1990年
人工知能	ダートマス会議（1956）． 一般問題解決，定理証明． 1階述語論理による推論． 多くの大学にＡＩ研究所． 第1回 IJCAI会議．	知識表現，自然言語理解． ＡＩに対する批判も出る． 知識工学の提唱．	推論とその応用研究． 言語，音声，画像理解． 第1回 AAAI 会議． ＩＣＯＴ 発足 知識工学実用化	学習機能，意味論の研究． ＲＷＣの発足．
大脳生理学	大脳新皮質の機能地図．	ニューロン機能． 分断脳． ＣＴによる局部機能．	分子生物学． 感覚野，運動野，連合野． 言語，音声，画像の認識． ＰＥＴによる局部機能	連合野（意識，認識，言語，思考），大脳辺縁系（情動，記憶，価値判断），動的処理．脳と心．MRI計測．
認知科学	ＡＩに刺激され認知心理学誕生．	イメージ・言語認識． 数理モデル．	ラスムセン認知行動・コネクショニストの学習モデル	アフォーダンス（無意識の合理的行動）の研究．
ニューラルネット	パーセプトロン． アソシアトロン．	小脳モデル． 学習モデル．	NNのダイナミックスと最適問題への応用．ボルツマンマシン．　逆誤差伝播．	学習の応用．極値探索への応用． ファジィとの組合わせ．
遺伝アルゴリズム	ＤＮＡの発見と遺伝過程の研究．	ＧＡの提唱と学習・適応・最適化への利用．	第1回ＧＡ国際会議． 応用研究始まる．	ニューロとの組合わせ．
カオス	19世紀の末から非線形振動の研究．	いろいろの分野で無秩序の研究始まる．フラクタル理論．　最初のカオス会議．	生物・経済・社会・気象・物理などへの応用．	工学（制御・予測など）への応用． ニューロとの組合わせ．
人工生命			複雑・適応システム研究のため生物進化・遺伝を参考	「創発」をキーワードとして共生・学習・適応の研究
ファジィ・システム	ファジィ集合論の提唱． ファジィ意思決定． ファジィ論理．	あいまいシステム研究会． ファジィ理論(測度，制御) 日米セミナー． ＦＳＳ誌発刊． あいまい科学研究会．	ＩＦＳＡ発足． ファジィ・システム・シンポ ＩＦＳＡ東京会議． 制御中心のファジィブーム LIFE，FSL，SOFT 発足．	NAFIPS，BISC，NFSI， ELITE，EUFIT，ERUDIT発足
自動制御	各種オートメーション． システム制御． 最適・学習・適応制御．	現代制御論，大規模システム理論，システム工学． 工業用ロボット，　訓練用シミュレータ	ロバスト制御，フレキシブル・オートメーション． 仮想現実感，ヒューマン・インターフェース．	知的制御，人間との共生． 知的ロボット． マルチメディア

表2　不確かさの種類

人間が情報や知識の認知，理解，伝達，評価および意思決定に際して感じる不確かさ

1．偶然性：　ある事象（クリスプ）の生起の不確定性（確率事象）
2．変動性：　状況や時間によって変化する事象（カオス，創発，進化，経験）
3．境界不明瞭：　言葉の意味，評価，病状，虹の色，天気（ファジィ事象）
4．言葉の多義性：　特定困難（多面性，情報不足，無知）
5．非合理性：　矛盾，多目的・多次元評価（心理現象，錯覚）
6．抽象性：　複雑問題の単純化表現（概念，要約，短歌，諺，芸術）
7．漠然性：　勘，フィーリング（感性，総合判断），理解，悟り，経験的行動

表3　カオスとファジィの違い

項目	カオス	ファジィ
扱う不確実さ	偶然性，変動性	非合理性，境界不明瞭，漠然性
目的	問題理解（あいまい発生機構）	問題解決（あいまい利用）
マクロ性	ミクロとマクロの接点	マクロ（情報過少・過多）
思考	ボトムアップ	トップダウン
生体モデル	発想，適応，学習，進化，生態	感性，概念，連想，定性論理，総合的判断
計算	シミュレーション	アナログ的
結果	外挿的，意外性	内挿的，常識的
エントロピ	非平衡，創発，新秩序誕生	推論によりあいまいさ増大
応用の問題点	統計との差をどうつける，システム同定，長期予測に使えない．	2値論理との差をどうつける，ルール発見，MF同定，設計法がない
情報処理	動的プロセス	言語意味の変換，圧縮，融合
画像	フラクタル，創生	意味理解，言語による変換
意思決定支援	将来，人間とブレーンストーミング，発想支援	対話型エキスパートシステム，複雑問題の論理構造示唆
探索問題	組合わせ問題の最適化	マクロ探索からミクロ探索へ，ヒューリスティック
他手法との組合わせ	？	容易（ファジィ化，意味的融合）

＊　勘や総合判断，創作活動などのモデリング，あるいは思考支援方法
＊＊複雑問題のその他の単純化手法：多変量解析，人工生命，構造モデル，ニューラルネット，AHP，GMDHなど．

表4　ファジィ・パレート解の例

検索条件を満足するアパートは、たくさんあります。ただし、
築年が"新しい"アパートは、次の3つのタイプがあります。
1．家賃が"5-10万円位"で間取りが"2DKより狭い"アパート
2．家賃が"10-15万円位"で間取りが"2DK-3DK位"のアパート
3．家賃が"約15万円以上"で間取りが"3DKより広い"アパート
どちらのタイプがよろしいでしょうか？

表5　最適点の探索

検索条件を満足するアパートはありません。
もし、間取りが"3DKより広い"ならば
　家賃は、"約15万円以上"のアパートか、
　築年が"古く"て
　家賃が"10-15万円位"のアパートになります。

もし、家賃が"5-10万円位"ならば、
　間取り"2DKより狭い"アパートか、
　築年が"古く"て
　間取りが"2DK-3DK位"のアパートになります。

家フォン・カルマンは両者の違いを次のように述べている，「科学は何が真実かを発見するもので，技術は科学に知識を使ってこれまでなかった何かを創造するものである」．即ち，科学者は未知の現象を解釈できるような知識を追求し，技術者は現実に存在する問題の解決方法を工夫する．もう一つの大きな違いは科学の基本思想に「複雑な自然現象でも少数の法則で支配されており，その発見に努めるのが科学の役目である」という素朴な信仰があることである．しかも，その法則は単純明解なもので，不確実性やあいまい性を含まないというものであった．ファジィやカオスが学界から強い反発を受けたのもこの基本思想に抵触したからである．

目的の違いは当然モデル評価にも現れる．科学においてはモデルは現象のメカニズムを表現し，誰にでも分かるように説明するものでなくてはならない．そこには客観性や論理性が必要で，科学では理論とモデルとは表裏一体である．そのため，科学においてはモデル（理論）は現実の一部ではなく全部でなければならず，モデル作成は科学の究極の目的につながる．

一方，技術では対象自体が複雑なこともあってモデルは現実問題のほんの一部を表現しているにすぎない．だが，一般にモデルの用途はシステムの設計，制御，予測，最適化，評価などであるから，目的や求める答のレベルに応じていろいろなモデル（理論）を使い分ければよい．すなわち，普通，技術にとってモデルはゴールではなくツールなのである．その意味で技術は常に学際的である．ただし，技術の研究者の中には新しいツールの開発や利用を目的にする人もいるし，また，知的情報処理では意思決定支援や発想支援のため現象理解モデルを取り込む場合も出てきた．この場合には技術者も科学者と同じ立場になる．だが，あまりにモデル研究に捕らわれすぎると理論のための理論研究（科学もどき）に陥るおそれがある．こうなると，いわゆる「釘とハンマー」の例どおり，理論に合わせて無理やり応用を作り出す結果になり，技術としての本格的発展は望めない．

4．カオスとファジィ

カオスもファジィも複雑系を扱うとはいいながら，その目的，方法，対象はかなり異る．カオスは一見非常に複雑で無秩序に見える多くの現象にはその発生機構には共通の構造があり，ある種の秩序が見られるので，それを知ることで未知の問題を理解しようとしている．これは明らかに科学の立場である．一方，ファジィは複雑な問題に直面したとき，それをどうやって克服し解決するかということを主眼にしており，複雑さの原因については深入りしない．すなわち，技術の立場をとっている．両方に共通なのは複雑な問題に正面から立ち向かい，これを回避しない態度である．また，複雑な問題を従来の科学の方法論のようにこまかく分解することはせず，グローバルに考える点でも類似している．いずれにせよ，複雑な問題をグローバルに扱えば，当然，あいまいさ・不確かさを生じる．表２はいろいろな不確かさをまとめたもので，特に，確率，カオス，ファジィがそれぞれどのような不確実さを主として扱うのかを示している．

これまで述べたようにカオスとファジィでは立場も目的も方法論も違うが，今後，複雑系の問題はあらゆる分野で活発になると思われる．これを技術の立場からはっきりとさせておくことは将来予測のために大切なことである．技術者にとってはファジィもカオスもツールであり，それ自身が最終目的ではない．従来から困っていた問題が新しいツールによって容易に解決可能となれば大成功である．また，これまでなかった新しいニーズを掘り起こすことができれば，これも大成功である．これらは技術のブレークスルーと呼ばれるものである．技術のブレークスルーには新しい思想，ツール，ニーズの３者が必要である．新理論が誕生した時はこの３者がそろっているが，技術が成熟してくるとツールは独自の道を歩き始め，ニーズから遊離してくる（科学にもブレークスルーがあるが，これは新思想と新理論によって広範囲に適合するモデルが発見された場合をいい，ニーズとは関係ない）．新しい技術がブレークスルーとして成長を続けるか否かは他のツールでは実現できないニーズを的確に掴めるかどうかにかかっている．そのためには理論の特徴をしっかり見極める必要がある．表３は主として知的情報処理への応用の目的でファジィとカオスの特徴をまとめたものである．カオスの特徴は不確実問題を動的に捉える所にある［７］．

5．意思決定支援システム

人間が複雑な問題に対応するには，まず，問題を熟知していなければならない．その対えると，カオスは未知現象の新しいモデルとして魅力的であるが，ファジィは真理追求には向かないであろう．なぜならファジィの扱う不確実さは自然現象・物理現象ではなく人間の思考に伴うものが中心だからである．一方，技術の立場からは複雑問題で困るのは不確かな状況での意思決定で，その支援システムが求められる．ファジィ・モデルは問題のマクロ知識を与えてくれるので人間にとって非常に有効である．また，ファジィが人間の論理思考と感性とを調和させて表現する機能はツールとして他の追随を許さず，思考モデルとして応用範囲が広い．カオスも将来は人間の発想支援に使える可能性はあるが，現在，思考モデルとして使えるほど成熟していない．

ここで，複雑問題の意思決定支援というニーズに対して，ファジィとカオスが技術的ブレークスルーとなりそうな例題を取り上げて見る．

（１）非専門家の意思決定支援

決定者が問題かえているが，その構造もデータも知らない時はコンピュータに何を聞いたらよいのか質問が出てこない．この場合，知的情報システムが決定者との対話を通してユーザーが求めているものを探り，不足している知識を選択して提供し，意思決定を支援する必要がある．まず，決定者が直面している問題の基本構造（例えば，多目的問題，ゲーム問題，多人数合意，数理計画，予測，数量化，評価など）が決まれば，ユーザーの感じる問題点をある程度絞り込めるので，コンピュータはユーザーとの対話によってどのような知識を提供すれば意思決定に役立つかを推論することができる．

ここでは多目的最適化の例として対話型エキスパート・システムによる貸家の選好を考えよう[８]．ここでの問題は二つあり，その一つはデータベースのファジィ・クラスタリングによるファジィ・パレート解の発見であり，これによってユーザーは多目的問題のトレードオフ性を理解する．次の問題はパレート解上でユーザーの満足する点を発見することである．コンピューターはユーザーと不動産屋のような対話を交わしながら共同で満足点を探すことになる．いずれの場合もユーザーとの協調的対話が必要で，自然言語を理解し，ユーザーの不確実な意図を推論できる知的インターフェースを開発しなければならない．ＬＩＦＥで行った研究によるファジィ・パレート解の例を表４に，また，満足点の探索例を表５に示す．

（２）専門家の意思決定支援

専門家は問題の所在も必要な情報もすべて知った上で意思決定に迷うことがある．それは問題が非常に複雑で決定の根拠があいまいな場合である．このような問題では専門家は経験や直感で既に意思を決めている場合でも，確信を補強するような知識を求める．それが専門家用のエキスパート・システムである．彼等はコンピュータによる正しい答えを期待している訳ではなく，コンピューターがどのような知識を使い，どのような論理で答えを導いたかという過程に関心を持ち，それを自分の判断の参考にしようとする．即ち，モデリングに関心を示す．これは熟練者が自分の判断に自信を持ちながらも念のため部下の意見を聞いてみるのに相当する．ＬＩＦＥでは外国為替レートの予測システム[9] を研究したが，これは経済の問題であるばかりでなく，政治的，心理的問題でもあり，非常に複雑である．ディーラーと呼ばれる専門家は豊富な知識と長年の経験から市場の状況を一瞬に判断し，レートの変化を予測して売買する．これはどのような数式を用いてもモデル化できないが，経験者の知識で定性的な分析を行い，それをファジィ・ルールでモデル化した．ここでは数値データだけでなく，ニュースなどの文章データも取り扱わなければならない．モデルを構造グラフで示すと，状態項目３００，項目間の因果関係を示すファジィ・ルールは５０００に及んだ．予測結果は２４個のシナリオの一つで示される．勿論，推論過程を辿ることもできる．図１はモデルの原理的構成を示す．このシステムには表１に述べたあらゆる種類の不確実さが含まれ，ファジィ以外の方法では実現できない．

（３）創造を伴う意思決定支援

デザインや企画などの創造的な仕事に対してはブレーン・ストーミングが有効なことが知られているが，これは意外性のある発想を相手に期待するからである．カオスは使い方によってはこのような機能をもった人工知能になり得る．そこでは人間はコンピュータと議論しながら創造力を発揮する．たとえば，多くのシナリオをカオス的に組合わせてストーリーを作るとか，既存技術を組み合わせて新しいシステム作りをするなどが考えられる．組み合わせの選択には何らかの論理が必要で、また、理由説明も必要なのでファジィ事例推論[10]などとの融合も有効であろう．これらはまだ，アイディアだけの段階であるが，将来，実現の可能性はあると思う．

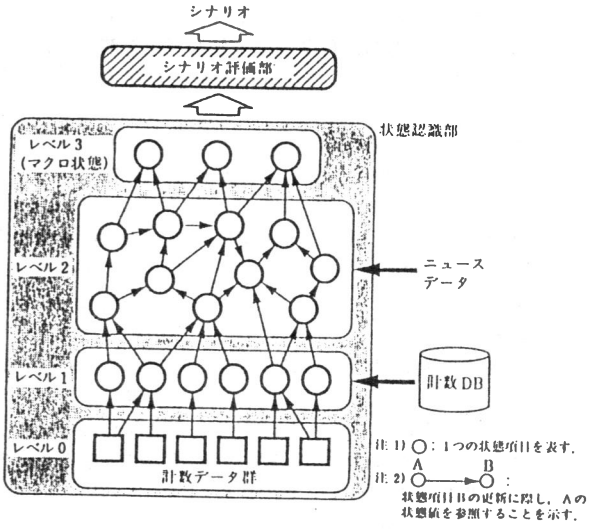


図１　ＦＯＲＥＸ　システム

６．むすび

カオスとファジィの類似点と相違点をモデル論的に述べた．これは技術の将来を予測し，適切な発展を促すために重要なことである．この両者はいずれも従来の科学的思考に真向から反対する一種の思考革命である．これらが今後ブレークスルーとなり得るかどうかは，技術としては新しいニーズを発掘できるか，また，科学としては新事実を発見できるかということにかかっている．

参考文献

［１］Ｍ．ワールドロップ（田中・遠山訳）：複雑系、新潮社、１９９６
［２］松岡正剛、ほか：複雑性の海へ、ＮＴＴ出版、１９９４
［３］Ｊ．クリアー、Ｔ．フォルガー（本多訳）：ファジィ情報学、日刊工業、１９９３
［４］木村英紀：不確かさ工学の提案、日本ファジィ学会誌、４－４、68/75、１９９２
［５］Ｊ．グリック（大貫訳）：カオス、新潮文庫、１９９１
［６］寺野寿郎：システム工学入門、共立出版、１９８５
［７］カオス理論とその特集、日本ファジィ学会誌、７－３、１９９５
［８］国際ファジィ工学研究所：ファジィ思考による知的情報処理（６章)、
コンピュータ・エイジ社、１９９５
［９］国際ファジィ工学研究所：ファジィ技術の先端的応用（２章)、日刊工業、１９９３
［１０］前出［８］の２章参照

問い合わせ先

東京都杉並区永福４－２４－１２
寺野寿郎、ＴＥＬ．０３－３３２８－８１１０

FRA4-1

カオス的想起に基づく知的エージェント群の協調動作生成

Cooperative Works of Intelligent Agent Based on Chaotic Retrieval

山口亨　佐藤誠　若松良行　木幡直樹

Toru YAMAGUCHI　Makoto SATO　Yoshiyuki WAKAMATSU　Naoki KOHATA

宇都宮大学 工学部 情報工学科

Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utsunomiya University

abstract

Agent for an intelligent system should have the following abilities that they can work cooperatively with each other.This paper proposes to realize some cooperative works of intelligent agent with same control systems, based on fuzzy associative memory system and chaotic fuzzy associative memory system. By using the proposed method, each agent robots can decide its own behaviour for human's instruction and the situation of its environment. This research shows examples of cooperative work. Agent learns how to move in order to make efective work as a group and act its own idea.

1　はじめに

近年、米国では情報スーパーウェイが提唱され、情報インフラストラクチャの整備が進んでいる。それに伴い、オフィスや家庭内でもインターネットやビデオオンデマンドなど、情報の与え方・受け取り方の形態のマルチメディア化が進み、高度に人間と情報をやり取りできる技術が確立されつつある。

日本においては、生産システムのさらなる自動化とインテリジェント化を目指し、IMS(Intelligent Manufacturing System)プロジェクトが発足した。これら両者を含む枠組みとして、知的産業システム IIS(Inteligent Industrial System) の研究は重要である。IIS は、小数の人間と多数のエージェントマシンで構成され、大目標へ到達するための大まかな判断を人間が行ない、エージェントに指示を与えたり、情報を受けとったりするシステムである。しかし、対象となるエージェント数の増加に伴い、人間側の管理は複雑になってくる。

そこで、人間が与えた単純な命令に対して、複数のエージェントが同じ目的を果たすためには、エージェントに共通な機構を持たせることが必要である。

本研究では、エージェントに 2 つの機能を持たせることを提案する。一つは、人間とエージェントとのマクロな対話機能である。人間は全てのエージェントに対して、大目標を実現するための単純な命令しか与えない。エージェントは人間がどのような目的を意図しているのかを理解し、細かな判断を自分で行ない行動する。二つ目は、エージェントの自律発想機能である。人間があらかじめ与えておいた知識だけではエージェントが協調動作をできないというような状況に遭遇した時でも、エージェントは自ら新たな知識を発想する。

本研究では、エージェントの制御部をファジィ連想推論 [1] やカオス的想起 [2] を用い、ファジィ連想記憶システムを階層的に構築した CFS （概念ファジィ集合） [3] によって構成する。エージェントは与えられた命令と周囲の状況から自分なりの行動を決定する。このようなシステムを用いることによって、高度なレベルで人間との協調動作が可能となる。

2　知的エージェント群のフォーメーション

本研究では、人間と協調作業をするロボットとして福祉を目的とした歩行補助ロボットを想定する。システム構成を図 1 に示す。

複数のエージェントが協調作業を行なう場面において、基本となるのは各エージェントの配置と役割である。例として取り挙げた歩行補助ロボットは、図 2 のようにロボットが 2 台の時は人間の両脇に配置すればいいが、3 台、4 台と台数が変化してくると、人間を囲むフォーメーションの形も変わってくる。歩行補助の他にも、進路上の障害物や危険物のチェック、荷物運搬などの役割を果たすことも考えられる。

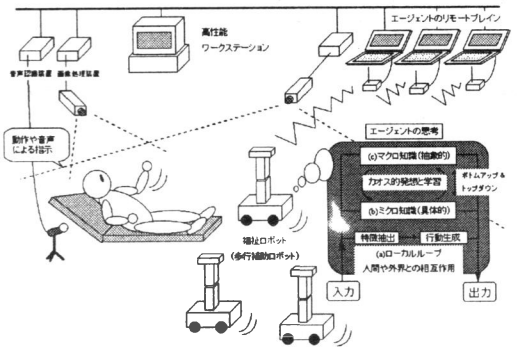


図 1: 福祉ロボットのイメージ

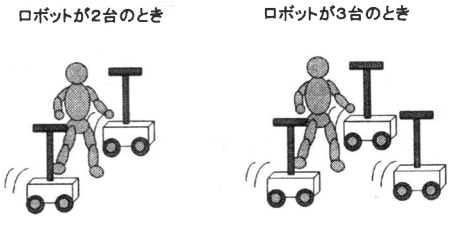


図 2: 台数による配置と役割の変化

また、移動中にフォーメーションが崩れたり、人間や他のロボットとぶつからないように、移動速度やハンドルを調整する機能を持つ [4]。このような細かな指示は人間が与えるのではなく、エージェント自らが発想して知識を獲得する。

3　ファジィ連想記憶システムとカオス的想起

3.1　ファジィ連想推論

ファジィ連想推論は、連想記憶ニューラルネットワークの 1 種である BAM [5] を複数個用いてネットワークを構成し、活性値の伝搬を繰り返すこと（反響動作）によって推論を行なうものである。ここでは、連想推論の基本となる BAM と連想記憶ネットワークを用いたファジィルール表現法、及び連想推論の特徴について述べる。

3.2　ファジィ連想記憶システムの特徴

連想推論では双方向連想記憶を用いてネットワークを構成するため、ルール前件部の命題の活性値をルール後件部の命題の活性値へ伝搬するボトムアップ処理と、ルール後件部の

命題の活性値をルール前件部の命題の活性値へ伝搬するトップダウン処理を融合した伝搬処理による推論の双方向性、という性質を持つ。このため、ネットワークのifレイヤ、thenレイヤのどちらのレイヤも入力、出力層となり得る。また、容易に経験に基づく学習が行えるニューラルネットワークの長所と、その知識を簡単に取り出せ、人間が理解しやすい親和性の高い知識表現を持つファジィ推論の長所も持ち合わせている。以上のような性質から、本稿におけるエージェントロボットにファジィ連想記憶システムを応用することにより、適切な推論と経験に基づく学習が可能である。

3.3 カオスファジィ連想記憶システム

3.3.1 カオス的最急降下法 (CSD 法)

従来のニューラルネットワークモデルにおいては、そのエネルギーを最小化するための一つの方法として最急降下法が用いられていた。しかし、この方法はリアプノフ安定を基盤としているため、ローカルミニマムに陥ってしまうという問題点があった。そこで、この問題点を解決する一つの方法として、カオス的最急降下法 [6](Chaotic Steepest Descent method, 以下 CSD 法と略す) が提案された。この方法は、ニューラルネットワークのエネルギー曲面での運動を記述する力学方程式の散逸項に図 3 のような周期的に変動する非線形抵抗を導入することにより、カオス的にエネルギー極小解の間を遍歴させる方法である。

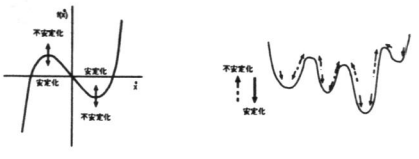


図 3: 非線形抵抗による特性変動とエネルギー曲面上でのカオス的遍歴

3.3.2 カオスファジィ連想記憶システム

人間の発想支援への応用を目的とした場合、ファジィ連想記憶システムにはさらに次の 2 つの機能が必要である。

(1) 記憶させたパターンの中で入力パターンに近い範囲にある記憶パターンを動的に想起する機能

(2) 記憶させていないがルールとして有効である新たなパターンを想起する機能

(1) の機能により、想起パターンがユーザーの意図に反する場合でも別の望ましいパターンをユーザーに提示することができる。また (2) の機能により、発想のヒントになるパターンをユーザーに提示することができるため、ユーザーの発想時における負担を軽減することができる。このような理由により、上記機能は発想支援に有効である。そこで、人間の発想支援を目的として上記機能を実現するため、CSD 法を用いてカオス的記憶探索を行う FAMOUS のことを総称して CFAMOUS(Chaotic Fuzzy Associative Memory Organizing Units System) と呼ぶ。

4 知的エージェント群のフォーメーション

エージェント群の協調動作の例として歩行補助ロボットを取り挙げる。ここでは、各ロボットが自分の位置を決め、全体としてのフォーメーションが形成されるまでを説明する。

4.1 システム構成

システムは図 4 に示すように、ＣＣＤカメラ、カラートラッカー、カラーエクストラッカーから成るトラッキング部、ロボットのハードウェア、ロボット実験を行なう計算機から成る。

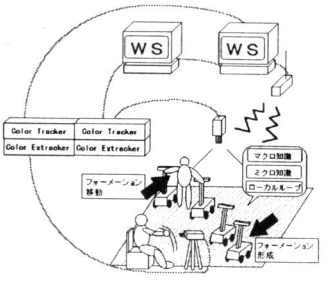


図 4: 実験システム

ここでは特に、ロボットのシミュレーション実験と実機実験について説明する。

ロボット制御部の構成を図 5 に示す。下位のルールはフォーメーションを形成するための基本的な知識を持っており、上位ネットワークはより正確でバランスの取れた形に調整するための知識を持っている。これを図 6 に示すようなＣＦＳで構成した。

下位のルールでは、ロボットの台数と、自分から見た他のロボットの位置で、最大距離や最短距離、角度などの特徴的な位置情報を数値入力とする。人間が与えた命令が、前進・後退・右折・左折・停止の場合は、ローカルループ内で制御を行なう。フォーメーションを作れという命令が与えられた場合のみ、ＣＦＳを通してロボットの進む方向と距離が出力される。

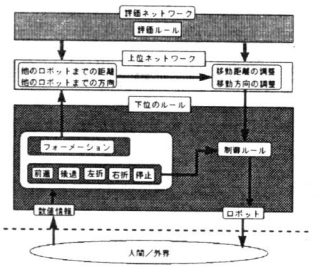


図 5: ロボットの制御部

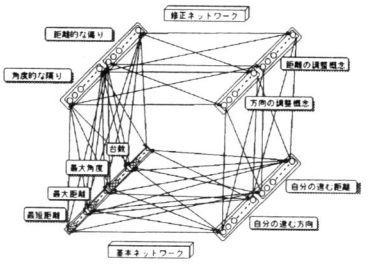


図 6: ＣＦＳ（概念ファジィ集合）

上位ネットワークでは、自分の位置と他のロボットとのバランスを取るために、自分はもっと右でなければいけないとか、もっと大きく動かなくてはいけない、などといった判断が行なわれ、下位の出力はこれによって変化する。

評価ルールでロボットの位置取りが正しいと判断されれば、シミュレーションを終了する。ここで、初期位置から最終位置までの直線距離と移動方向が実機実験でフォーメーションを形成する際の知識となる。

本研究で用いたＣＦＳの有効性を検証する。ＣＦＳは図 6 で示すように、下位の基本ネットワークと上位の修正ネットワークで構成されるが、下位のルールだけでもフォーメーションを形成することは可能である。

3体のロボットの位置をランダムに設定し、それぞれCFSを用いた時と、下位のルールだけの時とでシミュレーションを行なった。表1がゾーン形態、表2がライン形態のフォーメーションを作る命令を与えた結果である。いずれの表も、左側がCFSを用いた時、表右側が下位のネットワークのみの時。

初期状態が同じでも、CFSを用いた時の方が平均移動距離が短く、シミュレート回数も少ない。つまり、無駄の少ない動作で、早く収束することが分かる。

表1. ゾーン形態

	CFSを用いた時		下位のルールだけの時	
	平均移動距離	シミュレート回数	平均移動距離	シミュレート回数
1	36	4	45	5
2	41	13	32	11
3	42	8	50	18
4	39	7	33	24
5	27	3	27	3
6	18	2	18	2
7	36	4	40	5
8	9	1	8	1
9	59	31	87	12
10	27	3	28	8
平均	33.4	7.6	36.8	8.9

表2. ライン形態

	CFSを用いた時		下位のルールだけの時	
	平均移動距離	シミュレート回数	平均移動距離	シミュレート回数
1	30	3	34	4
2	38	4	43	5
3	41	4	44	5
4	30	3	35	4
5	39	4	42	5
6	57	9	56	8
7	20	2	17	2
8	30	3	34	4
9	39	4	43	4
10	29	3	34	4
平均	35.3	3.9	38.2	4.6

4.2 CFS（概念ファジィ集合）

CFS [3]は、単に連想メモリ上にファジィ知識が分散的に表現されているだけでなく、連想メモリの想起過程を用いてファジィ知識処理も行う機構も持つ。また、概念ファジィ集合は連想メモリで実現されていることから、状況依存性の扱いや多層結合による複雑な処理などのメリットが得られる。

ファジィ集合のラベルは概念の名前を、ファジィ集合の形は概念の意味を表現する。CFSは、あいまいな言葉の意味を他の言葉によって形作られるファジィ集合によって表現することができる。活性値の分布は、さまざまの状況に依存して変化するため、状況による意味の変化を表現することができる。またCFSは論理表現に限らずに知識表現が可能なため、論理的には明示的知識表現が不可能なものも明示的に表現することができる。

多層構造を持つCFSを用いた推論は、記号情報と数値情報を融合して扱うことができる。下位層では「ハンドル角」や「移動距離」といった数値で表現される具体的な結論が、上位層では「大きく曲がる」や「速く移動する」といった抽象化された結論が導かれる。

4.3 ロボットのフォーメーション

本研究におけるフォーメーションは、図7に示すように、主に2つの形態から成る。

一つは、全てのエージェントを等間隔なライン状に整列させるフォーメーションである。これは、例えば2体のエージェントで間に人間がいると考えた場合、先に述べた福祉ロボットを実現させる形態でもある。

フォーメーションのもう一つの形態は、3体なら正三角形、4体なら正方形といったように、全てのエージェントを円周上に等間隔に配置させる形態である。

以降、前者をライン形態、後者をゾーン形態として区別することにする。

本稿では、各ロボットが正確なフォーメーションを形成するまでを第一段階とする。第二段階としては、フォーメーションを維持した状態での移動を考える。その場合、ロボットの制御部がより複雑になり、はじめに人間が与えた知識だけでは対応できない場合があるので、新しい知識や、より有効な知識を発想できるカオスファジィ連想記憶システムを用いる。

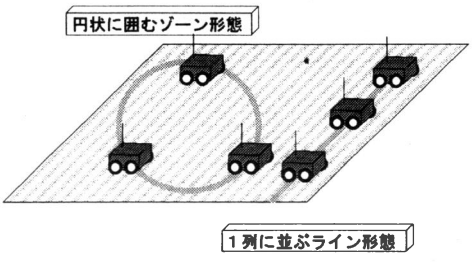


図 7: フォーメーションの形態

4.4 前提条件

天井カメラと画像処理装置により、フィールド内に配置された全てのロボットの座標と向きを、ワークステーションに送る。ワークステーションは、各ロボットに対して、次の条件のもとで情報を与える。

(1) 図8のように各ロボットには「視野」があり、自分の半径1メートル以内の情報しか得られない。

(2) 自分から他のロボットまでの位置は、厳密な数値として与えるのではなく、より人間の感覚に近づけるためにファジィ化され、おおよその位置関係しか分からない。

(3) 視界を遮る壁や、障害物の存在は、ここでは考えないものとする。

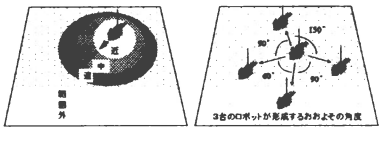


図 8: ロボットの距離感覚と方向感覚

特に、(1)の条件により、ロボットの移動中に、認識できる台数が変化するということが発生する。これは、「環境が変化したとき」として、後で詳しく説明する。

4.5 フォーメーションをつくるアルゴリズム

1) 視界の範囲内にある、自分を含めたロボットの台数nを求める。

2) 自分と自分以外のロボットまでの特徴的な位置関係（最長距離、最短距離、角度）とnの値を下位の基本ネットワークに入力し、移動方向と移動距離を得る。ここでの移動方向は、自分以外のロボット群の重心位置へ向かうか、その逆方向かの2択である。ここで得られる出力を基本パラメータとする。

3) 上位の修正ネットワークにおいて、理想角度で距離に差がある時や、理想距離で角度に差がある時の調整が行なわれる。ここで得られる出力を修正パラメータとする。

4) 修正パラメータによって基本パラメータを修正したものを、最終的な出力とする。

5) 移動した各ロボットの位置取りが正しいかどうか評価し、正しいと評価されるまで1)〜4)を繰り返す。

4.6 環境が変化したとき

ここでいう環境の変化とは、ロボットの台数が増えたとき、または減ったときである。最初の配置の仕方にもよるが、例

えば図9のように、一方では3体のロボット群が正三角形を作ろうとしていて、離れたある場所に別のロボットが1台いる場面を考えてみる。

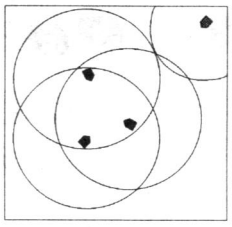


図 9: ロボットの視野

「ゾーン形態のフォーメーションを作れ！」という命令が全てのロボットに与えられているが、1台ではフォーメーションを作ることができない。そこで、この1台は他のロボットを探すような行動をする。シミュレーションでは、収束を早めるために、単にフィールドの中心へ向かうようにした。

移動することで、3体のロボットとの距離が縮まり、それぞれが「全部で4台」ということを認識すると、フォーメーションは正三角形から正方形へと変わる。

4.7 シミュレート結果

以上までで述べた条件の下で、シミュレーションを行った。4台でゾーン形態のフォーメーションを形成した時の軌跡を図10左に、3台のロボットでライン形態のフォーメーションを形成した時の軌跡を同図右に示す。

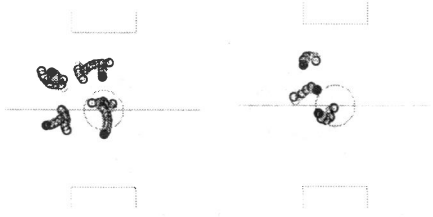


図 10: フォーメーション形成の軌跡

4.8 フォーメーションを維持した移動

協調動作を実現するためには、今までに述べたフォーメーションを作る動作だけでは実現できない。フォーメーションの位置関係を維持したまま移動することが必要である。ここでは、カオス的想起を用いた2台並走の知識獲得 [4] を例に説明する。

4.9 実機による実験

トラッキング部では、設備的な能力の問題から、最高4色までの色情報しか得ることができない。ロボットの座標と方向を得るためには、1台につき2色を必要とするので、同時に動かせるロボットは2台までとなる。そこで、2台のロボットと、定位置に人間がいるという設定で実験を行なった。図11左がゾーン形態、同図右がライン形態の軌跡である。

カオス的想起を用いた2台並走の軌跡を図12に示す。同図左はシミュレーションで得られた軌跡で、直進の他にも大きく左折、小さく左折、大きく右折、小さく右折などのケースで、それぞれのロボットが他方と歩調を合わせるためにどのようなモータースピード値・ステアリング値をとればいいのかを学習した。同図右は、シミュレーションによって得られた知識をもとに実機で2台並走を行なった軌跡である。

5 おわりに

知的産業システムにおけるエージェントマシンは、複数のエージェント群として作業をする時、他のエージェントとの協調性を保ちながら行動する機能を備えることが必要である。本稿では、ファジィ連想記憶システムを用いて、エージェントの制御部を階層的に構築することにより、共通の機構を持つ複数のエージェントマシンによる協調動作を実現することを目的とした。

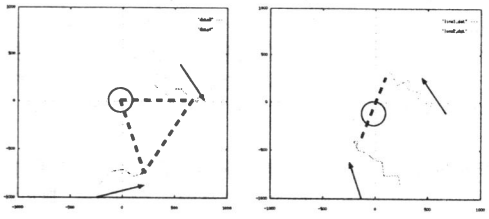


図 11: 2台＋人間によるフォーメーション形成の軌跡

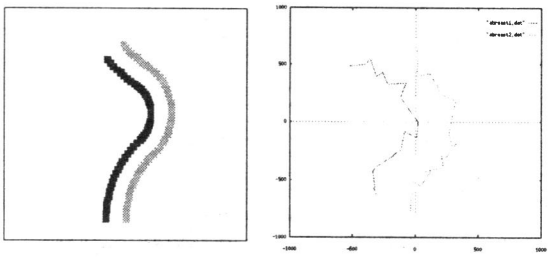


図 12: 2台並走の軌跡

本研究では、複数のエージェントによる協調動作の例として、福祉を目的とした歩行補助ロボットへの応用を取り挙げた。提案の手法では、形成するべきフォーメーションをエージェント自身が判断し、自分がどのような動作をすればいいのかを学習する。これによって、エージェントの台数に関係なく、人間はそれぞれのエージェントに細かな指示を与えずとも全体として協調性を保った行動が可能となる。以上をシミュレーションと実機実験により示した。

参考文献

[1] 山口亨：ファジィ連想記憶システム, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.2, 245-260 (1993).

[2] 佐藤、牛田、山口、井村、高木：ファジィ連想記憶システムにおけるカオス的記憶探索, 日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.4, 765-774 (1994).

[3] ファジィ思考による知的情報処理、ファジィ技術の先端的応用、4章、pp.229-232(1995).

[4] T.Yamaguchi,Y.Wakamatsu,N.Kohata : Knowledge Creation Robots based on Chaotic Retrieval,IIZUKA'96,pp.642-645(1996).

[5] B.Kosko : Adaptive Bidirectional Assosiative Memories, Applied Optics, Vol.26, No.23, 4947-4960 (1987).

[6] 谷淳：カオス的最急降下法を適用したニューラルネットにおける学習および記憶想起の動特性について, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J74-A, No.8, 1208-1215 (1991).

問合わせ先
〒 321 宇都宮市石井町 2753
宇都宮大学工学部情報工学科山口研究室 山口亨
TEL/FAX 028-689-6259
E-mail yamachan@sophy.infor.utsunomiya-u.ac.jp

FRA4-2

通信トラヒックのカオスモデル

Chaos As a Model for Teletraffic Processes

田中 尚樹　岡本 博司　内藤 正美
Naoki Tanaka　Hiroshi Okamoto　Masayoshi Naito
(株)日立製作所　基礎研究所
Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract　Recent statistical analyses of large set of teletraffic measurements in high-speed networks have provided convincing evidence for the presence of features in actual networks such as burstness, long-range dependence and self-similarity. In this paper we demonstrate that these characteristics of the traffic can be modeled successfully by using typical intermittent chaos. We further study several models based on chaotic maps for simple teletraffic processses, and especially show that the maximum waiting time in a queueing system with fractal service time distribution is significantly longer than that in a system with the conventional distribution.

1. はじめに

通信ネットワークの高速化，大容量化が進む中，広帯域サービス総合ディジタル網(B-ISDN)の実現のための研究が行われている。その実現手段と目されている非同期転送モード(ATM)ではトラヒック制御が技術的な成否の鍵を握るとも言われている[1]。また学術的な領域だけでなく商業的な領域でも重要なコミュニケーション手段を提供しているインターネットにおいては，WWW (World Wide Web)という新しいサービスの出現によりトラヒック量が急激に増大し，通信品質の維持のための対策を迫られている。そのひとつの方向がトラヒック制御による資源の有効利用である。

トラヒック制御は，様々なレベルのトラヒックモデルに基づいて行われる。従来研究されてきた通信トラヒックモデルの多くは，解析的な解を得るために，呼の到着間隔，サービス時間などの分布に指数分布を仮定する場合が多かった。これは従来の理論が電話網の解析を主目的として発展してきたためであり，電話網の場合はそれが実状にも合致していた。一方コンピュータ通信による高速ネットワークの出現は，このような従来の理論の拡張を促し，マルコフ性を基礎とした理論が発展しつつある[1]。しかし，トラヒックの統計的性質は，従来の確率過程として表現しようとすると，非常に複雑なものとなる[2]。ところが，力学的過程の中にそれをもとめると，間欠カオス[3,4]と呼ばれる過程がこれらの性質を満足できる可能性がある。したがって，間欠カオスをトラヒックモデルに利用するというのは自然な考え方である。事実，最近になって，Manneville [4]の分類によるタイプIの間欠カオスを通信トラヒックに応用する研究がErramilli により報告され[5]，トラヒックモデルのとしてのカオスの可能性が論じられている。

この報告では，まず代表的な間欠カオス写像の統計的な性質を，通信トラヒックの観点から調べる。次に，Erramilli らが扱った問題を含む，基本的なトラヒック過程を，従来の確率過程のモデルとの比較において扱う。

2. 間欠カオス写像の統計的性質[3, 4, 7]

2.1 高速ネットワークのトラヒック

最近行われた高速ネットワークにおけるパケット測定では，トラヒックに1) バースト性，2) 長期依存性(Joseph 効果)，3) 分散の発散(Noah 効果)，4) 自己相似性等が認められる旨が報告されている[2]。これらの性質は伝統的なトラヒックモデルが示す統計的性質とは著しく異なる。典型的なモデルではどの一つも満足に表現することができない。一方これらの性質を，力学的過程に求めてみると，間欠カオスと呼ばれる過程が，これらの性質を持つ可能性がある。そこで以下では，間欠カオスの典型的な二つのタイプ（タイプ I, III）について，上記の性質を表現し得るかどうかを以下で検討する。

2.2 タイプ I の間欠カオス

間欠カオスとは，周期的な運動が徐々に不安定化して，臨界点を過ぎたところで，バーストに発展し，再び周期的な運動に戻るという過程が，非周期的に繰り返される運動をいう。ところで臨界点は単位円をよぎる特性根の値で分類できる。Manneville の分類によるタイプ I の間欠カオスとは，(+1) で単位円をよぎる場合をさす。

タイプ I の間欠カオス写像として，ここでは Erramilli らの文献[5]でも扱われている，次の写像を考える。

$$x_{n+1} = f(x_n) = \begin{cases} \varepsilon + x_n + c\,x_n^2 & \text{for } x_n \in I_0 = (0, d] \\ (x_n - d)/(1-d) & \text{for } x_n \in I_1 = (d, 1) \end{cases} \quad (1)$$

ただし $c=(1-\varepsilon-d)/d^2$ である。ここでパケットのバースト的な到着を思い起こそう。パケットが到着している状態をオン状態，到着していない状態をオフ状態とし，それぞれ 1 (on), 0 (off) で表す。継続的な観測での状態変化は，例えば，{ 1000011100101011 ……} というシンボル列で表される。(1) 式の写像からそのようなシンボル列を発生させることができる。x_n が I_0 に属すればオフ状態すなわちシンボル 0 に，x_n が I_1 に属すればオン状態すなわちシンボル 1 に対応させればよい。このようにして状態を決定すると，任意のイテレーションでオン状態である確率 p_1 は，不変密度[6]を $\rho(x)$ とすると $p_1=\int_d^1 \rho(x)dx$ であらわされ，$(\varepsilon, d)=(10^{-4}, 0.7)$ の場合，$p_1=0.0894$ となる。

状態滞在時間の分布は従来のトラヒックモデルでも重要な要素である。上で取り上げたパケット到着の問題では，オフ状態の滞在時間の分布はパケットの到着間隔分布に対応している。そのほかサービス時間分布なども重要である。図 1 にオフ状態滞在時間分布の特徴を表すプロットを示す。ある長さ n より長い滞在時間の総数 N の両対数表示である。このプロットが中間的な長さのところでべき的ふるまいを示しているのがわかる。つぎにオフ状態滞在時間の平均値，分散及び最大値に注目する。これらの値がサンプル列の長さによってどのように変わるかを調べた。サンプル列の長さは 10^4 から 10^8 の 5 段階を選んだ。統計計算は異なった初期値から得た 20 個のサンプル列を用いて行った。オフ状態滞在時間の平均は 11.53 に，分散は，586.5 の付近に落ちつく。オフ状態の最大滞在時間はサンプル列が大きくなると203 に収束する。このことはオフ状態滞在時間列 $\{\tau_n\}$ の有界性を示す。

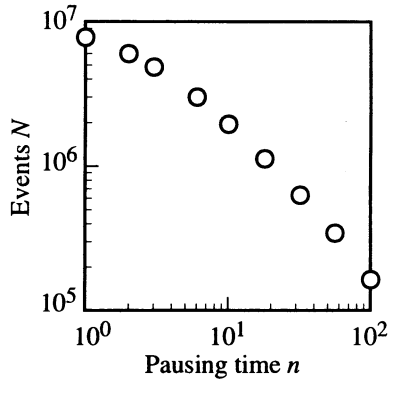


図 1 オフ状態滞在時間の分布（タイプ I）

2.3 タイプ III の間欠カオス

Manneville の分類によるタイプ III の間欠カオスとは，(−1) で単位円をよぎる場合をさす。タイプ III の間欠カオス写像として，次の写像を考えよう。

$$x_{n+1}=g(x_n)=\begin{cases}(1+\varepsilon)x_n+\beta x_n^3 & \text{for } x_n\in I_0=(0,d]\\ (x-d)/(1-d) & \text{for } x_n\in I_1=(d,\,1)\end{cases} \quad (2)$$

ここで $\beta=[1-(1+\varepsilon)d]/d^3$ である。タイプ I の場合と同じようにオン状態，オフ状態を決めることとし，オフ状態滞在時間の平均が d=0.7，サンプル列長10^6 でタイプ I の場合に一致するようにパラメータを決定すると ε = 0.04935 となった。

次にタイプ I の場合と同様にオフ状態滞在時間の分布をしらべる。図 2 は図 1 に対応したプロットであるが，中間的な長さの領域ではタイプ I の場合と同様にべき的にふるまう傾向がみられる。ただし，(図では省略したが) 滞在時間の長い極限の頻度は指数関数的に減少した。オフ状態滞在時間の平均値，分散及び最大値を前節の場合と同様に求めた。滞在時間の平均，分散はそれぞれ 11.5, 400 の付近に落ちついた。図 3 は滞在最大時間のサンプル列長に対する依存性を示したものである。サンプル列が長くなると最大値も大きくなる傾向が現れている。つまりサンプル列の長さを大きくしていくと，いくらでも長い滞在時間が現れる。この点がタイプ I の場合と大きく異なっている。つまり滞在時間列 $\{\tau_n\}$ の非有界性を示す結果である。

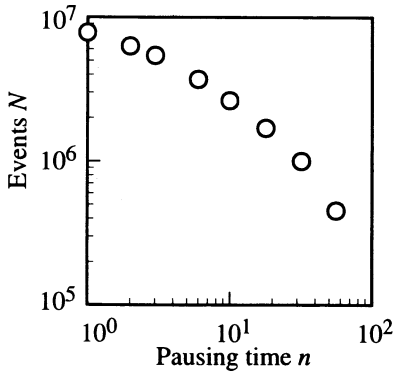


図 2 オフ状態滞在時間の分布（タイプ III）

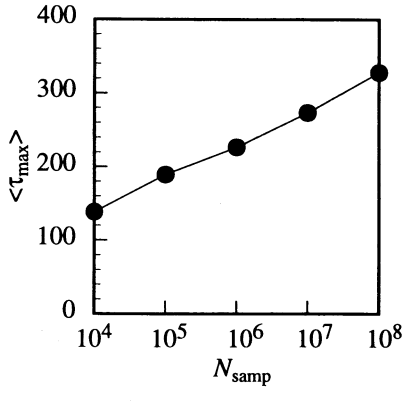


図 3 オフ状態滞在最大時間（タイプ III）

2.4 写像のもつ一般的な性質

またタイプI, III の間欠カオスの性質のうち，オフ状態滞在時間のべき分布性をはじめとする統計的性質（特にその有界性も）は一般的に説明できる。平均，分散はい

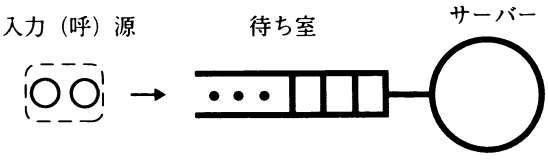
ずれのタイプでも有界であるが，最大滞在時間については，タイプIでは有界，一方タイプIIIでは非有界となる。

これらの性質が一般的なものであるということは，我々が選んだパラメータで偶然に得られた性質ということでないことを表す。すなわち，他のパラメータでも同じ様な性質が現れるということを保証するものである。このことは，間欠カオス写像をトラヒックモデルの構成要素として考えるときには，重要な点である。

3. 間欠カオス写像のトラヒックモデルへの応用

3.1 問題設定

ここでは，文献[5]でも取り上げられている集団到着呼の問題を広い範囲で考える。すなわち，図4のように待ち室無限大の待時式の単一サーバーに複数（大きさk）のパケットが集団到着するという状況である。このような一般的なモデルはケンドールの表記法で $G^{[X]}/G/1(\inf)$とあらわされる。記号Gは一般分布を表す。呼の到着時間分布およびサービス時間分布が一般分布であるというモデルである。図4の中に本報告で検討するモデルを列挙した。サーバーは先着集団を先に処理し，同じ集団の中ではランダムな順序で処理を行う。集団サイズの分布は本報告でも一定分布とした。



$M^{[x]}/D/1(\inf)$　到着：指数分布，　サービス：一定分布
$G1^{[x]}/D/1(\inf)$　到着：カオス式(1)，サービス：一定分布
$G2^{[x]}/D/1(\inf)$　到着：カオス式(4)，サービス：一定分布
$M^{[x]}/G2/1(\inf)$　到着：指数分布，　サービス：カオス式(4)

図4 トラヒックモデル

到着過程にカオス写像を用いたモデルでは，パケット到着をカオス写像を閾値ダイナミクスに組み込んであらわす。サービス時間は一定で，イテレーション間隔に等しいとする。時刻$n+1$の待ち長さl_{n+1}は

$$\begin{cases} l_{n+1} = \max(l_n - 1,\ 0) + k\Theta(x_n - d) \\ x_{n+1} = f(x_n)\ \ [\text{or } g(x_n)] \end{cases} \tag{3}$$

という方程式に従って発展する。ここで関数$\Theta(u)$はステップ関数である。この式の意味するところは，オフ状態（$x_n \in I_0$）ではパケットは到着しないが，オン状態（$x_n \in I_1$）ではk個のパケットが集団で到着するということである。このシステムの状態は$(x_n, l_n) \in I \times Z_+$で規定される。

サービス時間が一定分布に従う場合については次の3通りについて検討する。M[X]/D/1(inf) モデル，G1[X]/D/1(inf) モデル，G2[X]/D/1(inf) モデルである。それぞれ，到着間隔に指数分布を用いたモデル，到着過程ににタイプIの間欠カオス，タイプIIIの間欠カオスを用いたモデルを表す。利用率，平均待ち時間などを調べる。

また，サービス過程にタイプIIIのカオスを用いたM[X]/G2/1(inf) について平均待ち時間，最大待ち時間について検討する。

3.2 結　果

まずサービス時間分布に一定分布を仮定した上記3モデルについて，利用率，平均待ち長さ，平均待ち時間の集団サイズ依存性を調べた結果を図5に示す。図5(a)のように利用率についてはいずれのモデルでも集団サイズに比例して大きくなっている。従って図5(b), (c)で横軸を利用率と読み換えることが可能である。図5(b), (c)の平均待ち長さ，平均待ち時間については，何れの場合もM, G2, G1の順に値が大きくなっている。パケットの平均到着率はすべて同じになるようにパラメータを選んだ。これは到着間隔時間の分散の大きさの順序と一致している。パケット到着間隔が指数分布であると仮定すると，待ち長さや待ち時間を過小評価する可能性があることがわかる。

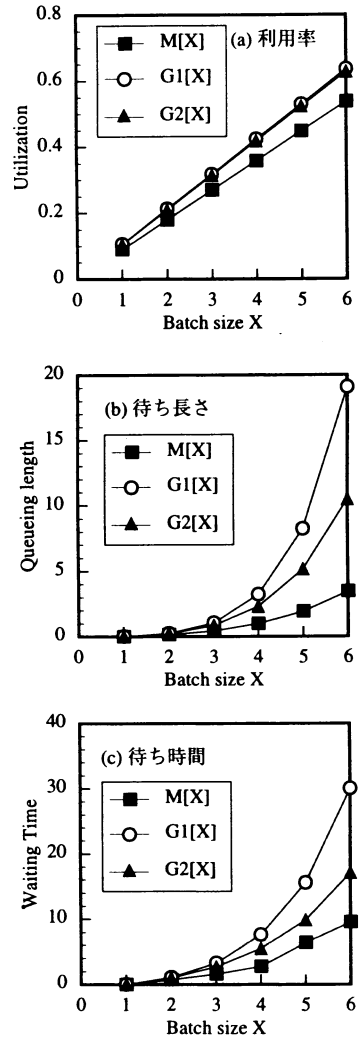


図5 到着間隔分布と集団サイズの影響

次に到着間隔分布に指数分布を用い，サービス過程がG2過程に従う場合について，平均待ち時間の集団サイズ依存性を調べた。比較のためにM[X]/D/1(inf)の場合の結果と一緒に図6に示す。タイプIIIの間欠カオス過程を用いた方(G2)が，待ち時間はやや長くなる傾向がある。ここでM[X]/G2/1(inf) の場合について最大待ち時間を調べた結果を図7に示す。シミュレーションでは時間刻みを0.1とし，イテレーションの数を10^7とした。最大待ち時間をみると，例えば利用率が0.4で集団サイズ4の場合，40.9という非常に大きな値になっている。伝統的なモデルに対して使われる大偏差原理[8]から見積もると，このような値になる確率は10^{-9}程度になる。ところがこのシミュレーションでは10^{-7}程度と計算される。このことは，データ通信において要求されている品質（廃棄率で10^{-9}）[9]を考慮すると，伝統的な統計モデルでは，パケット廃棄率を過小評価する危険性があることを示唆している。

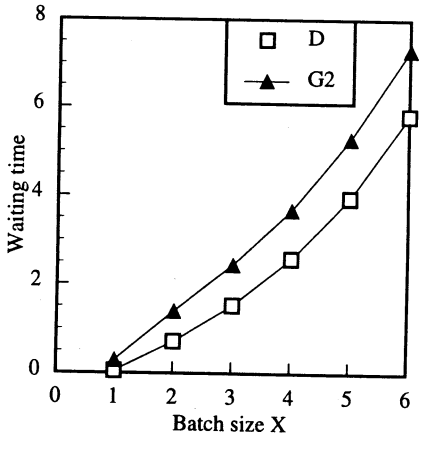


図6 サービス過程をカオスで表した場合の待ち時間の集団サイズ依存性

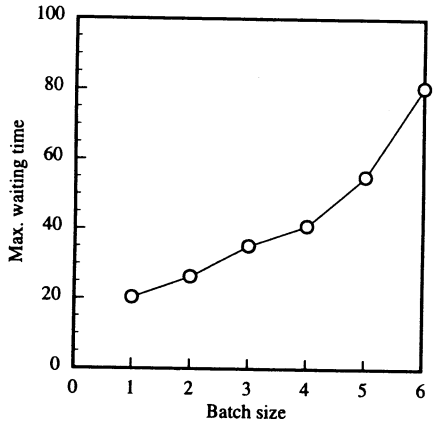


図7 最大待ち時間の集団サイズ依存性

4. まとめ

以上，通信トラヒックの特徴をカオスで表現し得ること，およびカオスモデルが伝統的モデルとは異なる結果を導く例などについて説明した。実際のトラヒック制御へ応用する場合は，さらに詳しい統計解析や実装上の工夫が必要と思われる。

5. 謝辞

本研究に関し御討論頂いた，当社情報通信事業部の太田正孝，相良和彦，青山敬，中央研究所通信システム部の遠藤昇の各氏に感謝いたします。

6. 参考文献

[1] 川島他：通信トラヒック理論の基礎とマルチメディア通信網，信学会(1995年)

[2] W. Willinger: Traffic modeling for high-speed networks: Theory versus practice: in "Stochastic networks, p.395-p.409, Springer, NewYork (1994).

[3] Y. Pomeau and P. Manneville: Intermittent transition to turbulence in dissipative dynamical systems: Commun. Math. Phys. **7 4** 189-197 (1980).

[4] P. Manneville: Intermittency, selfsimilarity and 1/f spectrum: J. de Physique **4 1**, 1235-1243 (1980).

[5] A. Erramilli *et al.*: Chaotic maps as models of packet traffic: Proc. ITC-14, 329-338 (1994).

[6] F. Y. Hunt and Y. Miller: On the approximation of invariant measures: J. Stat. Phys. **6 6**, 535-548 (1992).

[7] P.ベルジェ他2名(相沢訳)：カオスの中の秩序　第IX章，産業図書(1992年).

[8] I. Hsu and J. Walrand: Admission control for ATM networks: in "Stochastic networks", p.411-p.427, Springer,NewYork (1994).

[9] R. J. Gibbens *et al.*: Decision-theoretic approach to call admission in ATM networks: IEEE J. Selected Area Commun. **1 3**, 1101-1114 (1995).

連絡先
adress: 〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520,
phone: 0492-96-6111, fax: 0492-96-6006
e-mail: (tanaka, hokamoto, naito)@harl.hitachi.co.jp

FRA4-3

生体カオスとマンマシンインタフェース応用
－生体信号のカオス力学的構造とその測定分析システムの構築－
Chaotic structure of biological signals and its application to a human-machine interface

○渡部 弘隆 Hirotaka WATANABE　山口 明宏 Akihiro YAMAGUCHI　三上 貞芳 Sadayoshi MIKAMI　和田 充雄 Mitsuo WADA

北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract : Aiming at an application to a human-machine interface, we propose a system for the analysis of a chaotic structure of biological signals. A microvibration of human skin and a pulsation of capillary vessels were simultaneously measured. A phase space structure is reconstructed for the latter as a difference differential equation which is implemented by an artificial neural networks, and coupling effect of the constructed network and a biological signal is discussed.

1. はじめに

カオスは非線形な系全般で生じうる現象であり，自然界のあらゆるところに潜んでいる．それゆえ，非常に複雑な構造を持っている生体においてカオスの存在が一般的であることは，大きな可能性として以前から指摘されていた．そして最近になって，それが実験的に確かめられてきている．カオスが見られる例として，これまでに，指尖容積脈波，心臓電位，心拍，脳波，視調節系機能，検索的眼球運動，体の各部分の協調運動，解糖系の活動，ホルモン分泌，血球数の変動，神経細胞の活動，心筋細胞の活動，声帯の振動などが報告されている[1]~[4].

生体においてカオスの存在が一般的であるならば，生体信号(特に，自律神経系の影響が大きいといわれる末梢から得られる信号)を，カオス力学的視点から解析することで，マンマシンインタフェースとして利用できないか，という興味が起きる．この時，測定された生体信号がどのような力学則に従っているのかが重要である．

本論では，Tsuda らによって生体情報処理過程との対応が研究されている指尖容積脈波[2]，およびこれまでカオス力学的解析の対象となっていなかった皮膚表面微細振動(MV : Microvibration)[6]を対象に，その時系列データの解析およびニューラルネットワークを用いた学習による力学の再構成を行う．更に，インタフェースとしての応用の可能性を模索するために，再構成した力学と測定信号の結合系を構成し，その動作を解析する．

2. システム概要と測定例

指尖容積脈波の計測では反射型ピックアップ(日本光電社製，MPP-3A)により指先毛細血管の血流量を，MV の計測では圧電型加速度ピックアップ(日本光電社製，MT-3T)により皮膚表面の微細な振動を，それぞれ電気信号に変換し，波形記録装置(HIOKI 社製，メモリハイコーダ 8853)でデジタル化，コンピュータに取り込む．アンプには日本光電社製，AA-601H+AK-650H+AB-621G+RMP-6004M を使用した．図1に計測システムの概要を示す．

測定は，左手人差し指先の腹の部分に反射型ピックアップを，母子球上に加速度ピックアップを取り付け，安静にしている状態で1分間行う．デジタル化は，分解能 12bit，サンプリング周波数 2kHz で行い，このデータを 5msec 間隔で 50msec の範囲で平滑化し，解析用の時系列 $x_1, x_2, \ldots, x_M$ を得る．(M=12000).

図2に同時測定した指尖脈波と MV の波形を示す．本システムでは基本的な解析として，測定した信号の自己相関，相互相関，時間方向の相互情報量，および相関次元[2]を評価している．そしてそれらを元に，力学系の再構成に必要な埋め込み次元および時間遅れを決定する．図2に示した指尖脈波と MV の相関次元を計算した例を図3に示す．

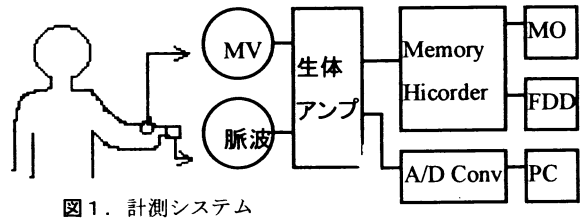


図1．計測システム

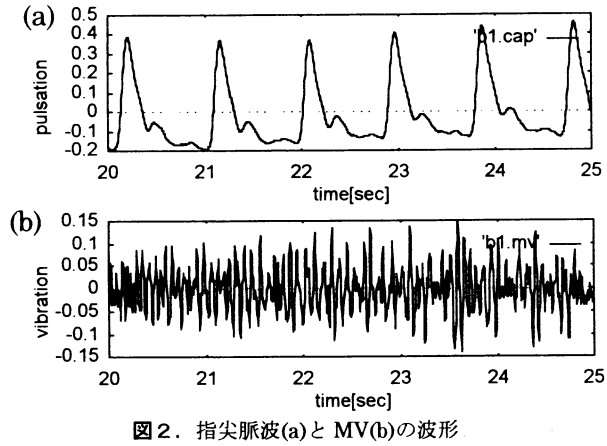


図2．指尖脈波(a)と MV(b)の波形

相関次元は，次のような2体相関関数の積分，

$$C(r)=\frac{1}{N^2}\sum_{i\neq j}H\left(r-\left|\vec{x}_i-\vec{x}_j\right|\right),$$

$$\text{where}\quad H(z)=\begin{cases}1 & (z\geq 0)\\ 0 & (z<0)\end{cases} \qquad (1)$$

が r に関して

$$C(r)\sim r^{\nu} \qquad (2)$$

のように依存するとき，ν で与えられる(Grassberger-Procacia 法[4]). 時系列データから相関次元を計算する場合は，埋め込みにより相空間軌道を再構成した上で，上記の方法を用いる．図3においては，グラフの傾きが相関次元に対応し，指尖脈波については，3～4次元程度の次元への収束がみられる．MV については，5次元までの埋め込みでは，次元の収束はみられない．これは，ここで測定した MV が非常に高次元の力学によるものであるか，ノイズ成分が強いことを示唆する．

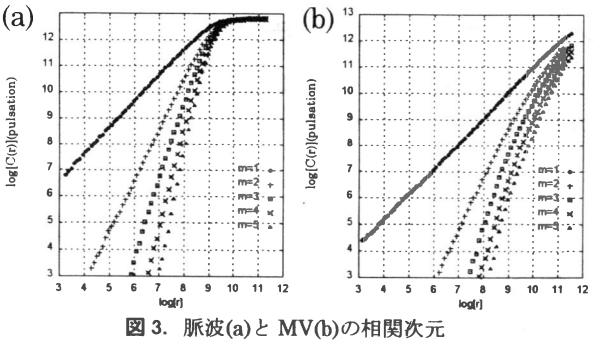


図 3. 脈波(a)と MV(b)の相関次元

3. ニューラルネットワークによる動力学の学習

時系列データからその力学構造を抽出する方法は，埋め込みを始めとして数多く提案されている．本論では，ニューラルネットワークを用い，微差分方程式として力学構造の抽出を試みる．ネットワーク構造および学習則は，**Tokuda** らによって提案された方法[5]を用いた．これは，ニューラルネットワークの非線形近似能力を利用し，観測された信号を再現する動力学を学習によって再構成するものである．

対象となる時間パターンは測定した 1 次元時系列データで，これを相空間に埋め込んだベクトル $\mathbf{X}(t) \equiv \{x(t), x(t-\tau), \ldots, x(t-(N-1)\tau)\}$ から，時刻 t での微分 $dx(t)/dt$ への関数を学習する．ここで，τ は時間遅れ，N は埋め込み次元である．

ネットワークは以下の式で表わされる[5].

$$G(\mathbf{X}(t)) \equiv \sum_{k=1}^{K} wa_k \phi(S_k(t)) \qquad (3.\text{a})$$

$$\text{where } S_k(t) \equiv \sum_{n=1}^{N} wb_{kn} x(t-(n-1)\tau), \qquad (3.\text{b})$$

$$\phi(\xi) = \frac{-2\xi}{(1+\xi^2)} \quad (\xi \in R^1) \qquad (3.\text{c})$$

ここで **wa**，**wb** は結合の重み行列，K は隠れ層のユニット数，S_k は k 番目の隠れ層ユニットの出力である．バックプロパゲーションを用いて，

$$dx(t)/dt \cong G(\mathbf{X}(t)) \qquad (4)$$

となるように学習を行う．

4. 実験結果

図 4 に，指尖脈波のデータについて，力学構造を抽出した例を示す．図 4(a)は，学習のために与えた時系列データ $x(t)$ と $dx(t)/dt$ の関係を図示したものであり，図 4(b)は，学習によって得られたネットワークに $x(t)$ を入力し，$G(\mathbf{X}(t))$ を計算した結果である．両者を比較すると，巨視的にはアトラクタの構造が比較的よく再現されていることが分かる．

次に，以下のようにネットワークと生体信号の結合系を構成する．

$$\mathbf{y}(t+\Delta t) = (1-\varepsilon)(\mathbf{y}(t) + \Delta t \gamma G(\mathbf{Y}(t))) + \varepsilon x(t) \qquad (7)$$

ここで，$\mathbf{y}(t)$ は結合系の状態で，$\mathbf{Y}(t) \equiv \{y(t), y(t-\tau), \ldots, y(t-(N-1)\tau)\}$．$x(t)$ を外力として入力する．$\varepsilon = 0$ の時，(7. a)式は微差分方程式の **Euler** 法による数値積分に対応し，$d\mathbf{y}(t)/dt = \gamma G(\mathbf{Y}(t))$ となる．

図 4(b)に示したネットワークについて，$\varepsilon = 0$ の場合，$\mathbf{y}(t)$ は固定点に収束してしまい，発振現象は見られなかった．これは，学習がアトラクタの外の構造を再現できていないことに起因する．次に $\varepsilon = 0.005$，$\gamma = 4.5$ として，微少強制外力をかけた場合の軌道を図 4(c)に示す．この時，

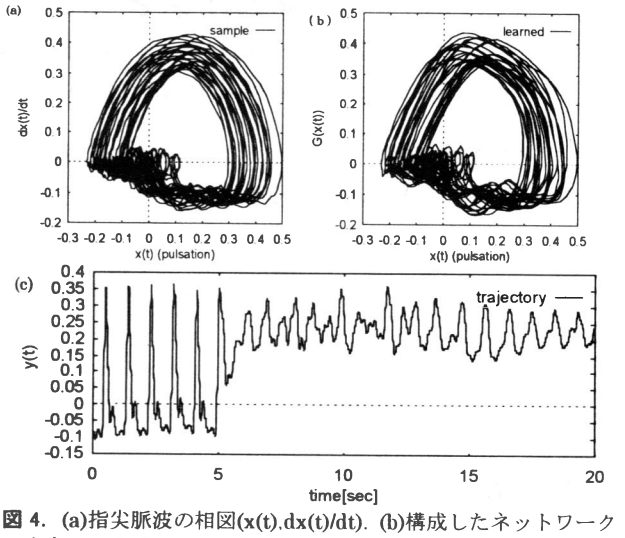


図 4. (a)指尖脈波の相図(x(t),dx(t)/dt). (b)構成したネットワークの出力(x(t),G(X(t)). (c) ネットワークと指尖脈波の結合系の動作(5sec 以降). ここで, $\varepsilon = 0.005$, $\gamma = 4.5$. 初期関数は, 5sec までの脈波データを与えた.

入力信号には学習に用いたデータを使用した．図 4 (c)では，1/100 程度の外力でも発振が起きることが分かる．この発振は γ の値によって，発散する場合もある．

5. おわりに

生体微少振動および指尖容積脈波の同時測定解析システムを構築し，相関次元解析によって求めたアトラクターの次元をもとに，指尖脈派の時系列データについてニューラルネットワークを用いた力学構造の再構成を行った．再構成した系と生体信号との結合系を構成し，微少な入力のもとでも発振が起きることを確認した．この結合系のふるまいのなかにどのように入力信号の構造が反映しているのかは今後の課題として残されている．

参考文献

[1]田原孝：臨床におけるカオスの応用，バイオメカニズム学会誌，Vol. 19, No. 2, 1105-116, 1995.

[2] I. Tsuda, T. Tahara, H. Iwanaga : Chaotic pulsation in human capillary vassels and its dependence on mental and physical conditions, Int, J. Bifurcaiton and Chaos, Vol. 2, No. 2, 313-324, 1992.

[3]児玉泰輝，合原一幸，今田俊明，小谷誠：脳磁図データの相関次元解析，医用電子と生体工学，Vol. 31, No. 4, 339-345, 1993.

[4]佐野雅己：カオスの構造とフラクタル，高安秀樹編著，フラクタル科学第 3 章，朝倉書店，1987.

[5] I. Tokuda, Y. Hirai, R. Tokunaga : Back-Propagation Learning of an Infinite-Dimensional Dynamical Sy-stem, Proceedings of 1993 IJCNN, 2271-2275, 1993.

[6] H. Rohracher : Shwinguen im menshlichen Orga-nismus, Anz. d. Wissench., 3, 230, 1946.

連絡先

〒060　札幌市北区北 13 条西 8 丁目
北海道大学大学院 工学研究科 システム情報工学専攻
渡部 弘隆
TEL　011-706-7224　FAX　011-706-7105
E-mail　watanabe@complex.hokudai.ac.jp

FRA5-1

炭火のフラクタル次元解析に基づく加熱制御法

A Heating Control Method Based on Fractal Dimension Analysis of Charcoal Temperature

甲田 哲也†, 原　由美子†, 近藤 信二†, 九津見 洋‡, 野村 博義‡
Tetsuya Kouda, Yumiko Hara, Shinji Kondo, Hiroshi Kutsumi, Hiroyoshi Nomura

† 松下電器産業株式会社　電化研究所
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. Home Appliance Research Laboratory
‡ 松下電器産業株式会社　中央研究所
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. Central Research Laboratories

Charcoal is used for cooking such as roast meat and roast fish willingly. It is said that the food cooked by the charcoal is tastier than the food cooked by gas or electricity. The relation between the heating by the charcoal and the taste is not clarified sufficiently. However, we think that temperature fluctuation generated from the charcoal is one of important factors that make food tasty. In this paper, the temperature fluctuation in the charcoal is analyzed using a fractal dimension and a power spectrum, and a control method of a heater to imitate the charcoal fluctuation is proposed based on the results of the analysis.

1. はじめに

炭火による調理は，焼き魚や焼き肉などの料理に好んで用いられている．これは，炭火が食品の内部にまでよく火を通し，ガスや電気による調理に比べておいしく調理できるといわているためである．

炭火による調理と食品のおいしさとの関係は，現在でも十分な解明がなされていない．しかし，その関係の説明のひとつとして，炭火の発生する熱量の不規則なゆらぎにより，食品内部にまで火がよく通り，食品全体が均一に加熱されるという考え方がある．

本論文では，この炭火の発生する熱量のゆらぎに着目し，炭火加熱の特徴を明らかにする．具体的には，燃焼中の炭の内部温度をセンサで検出し，得られた温度変化に関する時系列データからフラクタル次元や周波数特性の解析を行うことにより，ゆらぎの特徴を求める．

さらに，電気による通常の加熱調理器で，炭火のようなゆらぎを持つ加熱制御を実現する方法として，Fractional Brownian Motion に基づく制御手法を示す．

2. 炭火の内部温度の検出

炭の発生する熱量のゆらぎを解析するために，炭の温度変化を検出した．実験では，日本の代表的な炭のひとつである備長炭を用い，図1 のようにして燃焼中の炭の内部温度を測定した．図2 は，着火してから十分に時間が経過した後の，定常時の内部温度の測定結果を示したものである．なお，温度計測のサンプルタイムは 0.23 秒とした．

図2 より，定常時においても炭の温度は一定温度に収束せず，安定していないことがわかる．なお，図2 のグラフが太く

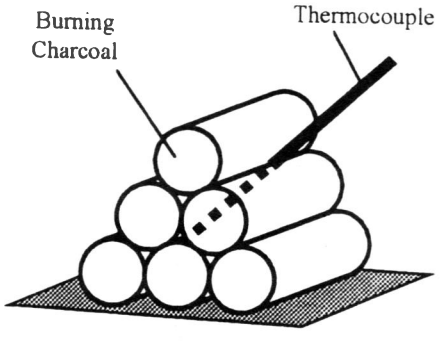


図 1: 燃焼中の備長炭の温度変化の検出

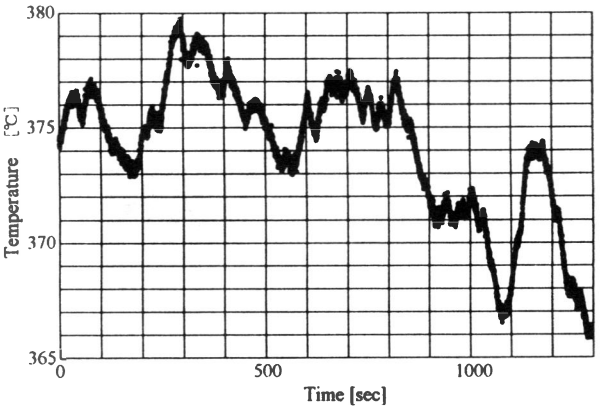


図 2: 温度変化

見えるのは，時系列データに高い周波数のノイズが多く含まれているためである．本論文では，このノイズ成分を考慮せず，主に0.2Hz 以下の比較的ゆっくりとした温度変化を対象として解析を行う．

3. 時系列温度変化の解析

備長炭の温度変化に含まれるゆらぎのカオス的な特徴 [1, 2] を明確にするために，図2 の時系列データからフラクタル次元 [2] と周波数特性を求める．

3.1. フラクタル次元

フラクタル次元は，対象システムの自己相似的な特徴や挙動の複雑さを定量的に評価するもので，自然界に存在するゆらぎの解析などによく利用されている．

図2 の時系列データに対するフラクタル次元を，T. Higuchi により提案された方法 [3] により求める．この方法で求めたフラクタル次元値 D は $[1,2]$ の範囲の値をとり，対象システムの自己相似性や複雑さが大きいほど値は大きくなる．例えば，システムの挙動が周期的あるいは単調でなめらかに変化する場合は $D=1$ となり，ランダムノイズのように最大限に乱雑な場合は $D=2$ となる．このフラクタル次元 D の計算方法を以下に簡単に示す．

時系列データ $x(1), x(2), ..., x(N)$ を以下のように表す．

$$X_k^m \quad : \quad x(m), x(m+k), x(m+2k), \cdots \\ \cdots, x(m+ik), \cdots, x(m+Tk) \qquad (1)$$

ただし，m は初期時刻，k はサンプルタイム，N はデータ数，

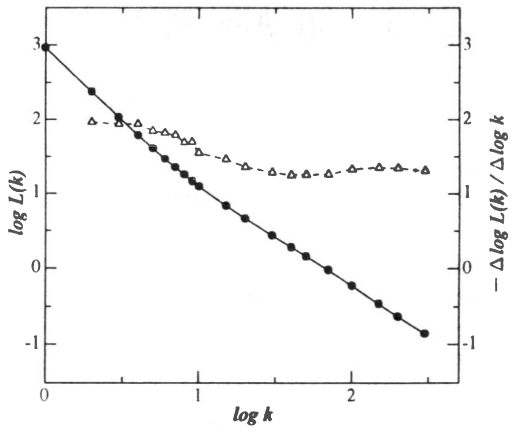


図 3: フラクタル次元

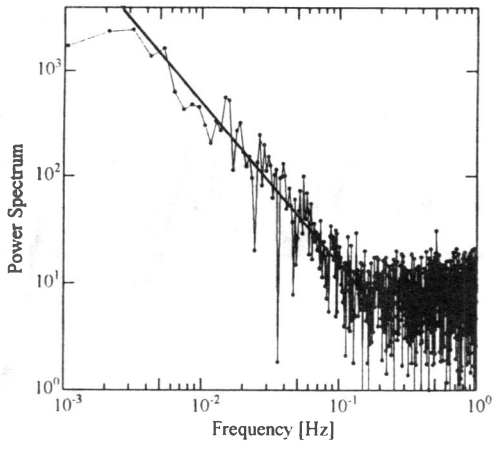


図 4: パワースペクトラム

T は $(N-m)/k$ を超えない整数である．このとき，X_k^m の長さ $L_m(k)$ を以下のように表す．

$$L_m(k) = \frac{N-1}{Tk^2} \sum_{i=1}^{N} |x(m+ik) - x(m+(i-1)k)| \qquad (2)$$

m についての $L_m(k)$ の平均値 $L(k)$ が，"$\log L(k) = -D \log k +$ 定数 " という関係を持つとき，この式の D が対象システムのフラクタル次元を示すことが知られている [3]．

図2 に示した時系列データ ($N = 5800$) から，(2) 式を用いて $L(k)$ を計算した．この計算結果を，両対数のグラフに●印と実線でプロットしたものを 図3 に示す．また，このグラフの局所的な傾き $-\Delta \log L(k)/\Delta \log k$ を図中に△印と破線で示す．この場合，この局所的傾きの値がフラクタル次元 D に対応する．

図3 より，k の値が小さい部分では $D \approx 2$ であるが，k の値の大きい部分では $D = 1.3$ にほぼ収束していることがわかる．k の小さい領域で次元値が 2 に近い値になっている理由は，時系列データに高い周波数のノイズが多く含まれてためである．したがって，この実験で用いた備長炭の温度変化のフラクタル次元値は 1.3 となると考える．

3.2. 周波数特性

図2 の時系列データに対しFFTを適用して，周波数 f に対するパワースペクトラム密度 P を計算した．この計算結果を図4 に示す．図4 から，0.2Hz 以下の周波数の低い部分のグラフは，$\log P = -\alpha \cdot \log f + \beta$ （ただし，α, β は定数）の線形関係に近似可能であると考えられる．このことより，備長炭の温度変化は $P \propto 1/f^{\alpha}$ といった "$1/f$ゆらぎ" の関係になっていると考える．この場合の α の値は 約1.5 である．

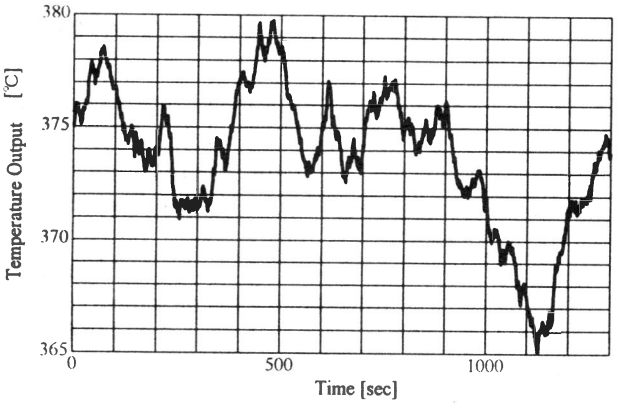


図 5: Fractional Brownian Motion

4. 擬似炭火信号の発生

前節の解析で得たゆらぎの特徴を利用してヒータを制御することにより，炭火のような加熱を通常の加熱調理器に行わせることを考える．

任意のフラクタル次元値を持つ信号を発生させる方法として，Fractional Brownian Motion[4] が知られている．これはランダムフラクタルの一種であり，発生した信号のパワースペクトラム密度は $1/f^{\alpha}$ に比例する特性を持つ [4]．

前節で求めた炭火のフラクタル次元の値を Fractional Brownian Motion のアルゴリズムに入力することにより，炭火の温度変化に近いパターンの信号が出力できると考える． 図5 に Fractional Brownian Motion によって発生させた信号を示す．この信号のフラクタル次元は 1.3 に設定した．

Fractional Browninan Motion により生成された疑似炭火信号の有効性を調べるため，食品の数学モデルを作成し，加熱調理のシミュレーション実験を行った．具体的には，一定温度の熱源により加熱した場合と，疑似炭火信号にしたがって熱源の温度を変化させて加熱した場合をシミュレーション実験により比較した．この実験より，疑似炭火信号による加熱は，一定温度加熱と比較して，より良好な加熱効率を持つ可能性があることがわかった．

5. おわりに

本論文では，燃焼中の備長炭の内部温度の変化を解析した．その結果，炭火の温度ゆらぎは，1.3程度の次元値を持つフラクタル構造や，$1/f^{\alpha}$に比例する周波数特性を持つことがわかった．また，これらの解析結果を用いて，通常の電気による加熱調理器に炭火のような加熱をさせる制御方法として，Fractional Brownian Motion を用いる方法を示した．

参考文献

[1] 合原： カオス –カオス理論の基礎と応用–, サイエンス社 (1990)

[2] T. Parker, L. Chua : Practical numerical algorithms for chaotic systems, Springer-Verlag New York (1989)

[3] T. Higuchi : Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory, Physica D, Vol. 31, pp. 277-283 (1988)

[4] H. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe : Chaos and fractals –New frontiers of science–, Springer-Verlag New York (1992)

問い合わせ先：〒561 大阪府 豊中市 日出町 2丁目 2－8
松下電器産業(株)電化研究所　甲田 哲也
TEL:06-332-8754, FAX:06-332-7940

FRA5-2

時系列変動の連続性評価に基づくシステム状態診断
System Diagnosis by Degrees of Visible Determinism in Observational Time Series

○宮野 尚哉*, 五百旗頭 正, 村田 昌司, 谷村 隆義
○T. Miyano*, T. Iokibe, S. Murata, and T. Tanimura

*住友金属工業株式会社 未来技術研究所, 株式会社明電舎システム技術部
*Sumitomo Metal Industries, Ltd., Meidensha Corporation

Abstract

Degrees of visible determinism in observational time series are estimated in terms of parallelism of nearby trajectories generated from the time series in phase space. Acoustic time series observed for a mechanical system under operation and time series of diffracted X-ray intensity along a crystal growth axis observed for a silicon crystal are taken as examples. The estimatation is shown to be useful for system diagnosis such as mechanical signature analysis and characterization of quality in crystalline materials.

1 序論

時系列のスペクトル解析は、計測データからシステムやプラントの内部状態を診断するの用いられる標準的な手法の一つである。信号の重要な特徴が規則的な変動として現れると期待される状況では、この解析法は有効である。特有の周波数をもつ規則的変動はパワースペクトル上で鋭いピークとして検出され、信号のエネルギー密度はピーク高さで定量化される。たいていの計測データに含まれている測定ノイズのような不規則な変動成分は、パワースペクトル上で連続スペクトルを形成するが、特徴の無い外部ノイズとして無視されることが多い。実際、不規則な変動の特徴を連続スペクトル上で的確に捕らえることは容易ではない。従って、状態変動の重要な特徴が不規則変動として現れる場合には、スペクトル解析は適切な信号解析方法とは言えない。非線形システムのカオス的変動や確率的線形システムが示す乱雑な変動がそのような場合に相当する。本研究は、計測データに含まれている不規則な変動成分が材料の品質やシステムの故障を反映する重要な特徴となる場合があることを明らかにする。このような状況では、スペクトル解析に替わって、乱雑さの程度、換言すれば、時系列の連続性を定量化する時系列解析手法 [1, 2] がシステムの状態診断に有効であることを示す。

2 時系列解析方法

不規則な時系列を変動の乱雑さという観点から特徴付けることを考える。時系列が決定論的ならば変動に連続性がある。変動がカオス的ならば、ある時刻とその近未来の挙動の間に連続性が見られる。ランダムノイズにはそのような連続性は無い。つまり、時系列の乱雑さを時間発展における連続性、即ち、時系列がどの程度決定論的に見えるかという観点から定量化できる。この目的のために、本研究ではKaplanとGlassによって考案され [1]、Waylandらによって改良された時系列解析方法 [2] を用いる。その概要は以下のとおり。N 個のデータ点からなる時系列 $\{x(t)\}_{t=1}^{N}$ が与えられたとする。$x(t), x(t-\Delta t), \cdots, x(t-(D-1)\Delta t)$ を D 個の独立変数のように見て、時系列の時間発展の様子を D 次元空間で再構成された軌道で表現する [3, 4]。D は埋め込み次元、Δt は適当な時差である。時系列から再構成された N 個の埋め込みベクトル $\boldsymbol{x}(t) = (x(t), x(t-\Delta t), \cdots, x(t-(D-1)\Delta t))$ から M 個のベクトル $\boldsymbol{x}_0(t)$ を無作為に選択する。それらの各々について（ユークリッド距離の意味で）K 近接ベクトルを $\boldsymbol{x}_k(t_i)$ $(i = 1, \cdots, M; k = 0, 1, \cdots, K)$ とする。$\boldsymbol{x}_k(t_i)$ を $T\Delta t$ だけ時間推進し、$\boldsymbol{x}_k(t_i + T\Delta t)$ を求める。$\boldsymbol{v}_k(t_i) = \boldsymbol{x}_k(t_i + T\Delta t) - \boldsymbol{x}_k(t_i)$ と決める。適当な時間スケール $T\Delta t$ で時間発展を眺めれば、決定論的な時系列から生成された $\boldsymbol{v}_k(t_i)$ の方向はそろっているはずである。方向の分散を次式で定義する E_{trans}（translation error）で評価する。

$$E_{trans} = \frac{1}{K+1} \sum_{k=0}^{K} \frac{|\boldsymbol{v}_k(t_i) - < \boldsymbol{v}(t_i) >|^2}{|< \boldsymbol{v}(t_i) >|^2} \quad (1)$$

$$< \boldsymbol{v}(t_i) >= \frac{1}{K+1}\sum_{k=0}^{K} \boldsymbol{v}_k(t_i) \qquad (2)$$

時系列の決定論的側面が強くなるにつれて、E_{trans}は0に近づく。決定論的側面がまったく見えない白色ノイズでは、Dに関係なく$E_{trans} \approx 1$となる。測定ノイズのような外部ノイズはE_{trans}を増加させる効果をもつ[5]。それ故、E_{trans}を比較すると、時系列に含まれている不規則成分における決定論的側面、即ち、不規則成分の乱雑さを効率よく評価することができる。

3 機械部品検査への応用

第一の応用例は機械部品の音響ノイズである[6]。図1(a)および(b)は、それぞれ、表面に傷のある機械部品（不良品）と傷の無い正常な機械部品（良品）から成るシステムについて運転中に計測された音響ノイズのパワースペクトルを示す。

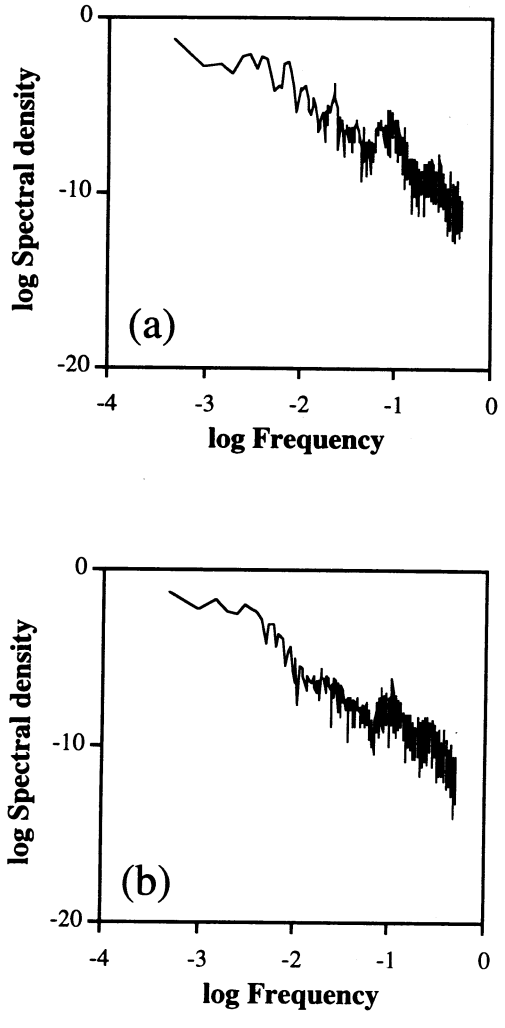


図 1. 機械部品の音響時系列のパワースペクトル: (a) 不良品, (b) 良品

各音響時系列は8192点のデータ点からなる。スペクトルの特徴の差異に基づいて良品と不良品とを識別することは非常に難しい。機械部品表面の傷はシステム動作時に部品間の摩擦を助長し、音響時系列のランダム成分を増強すると推測される。これを検証するために、良品、不良品の音響時系列にWaylandらのアルゴリズムを適用した（$M = 500, T = 5, K = 4, \Delta t = 1$）。$E_{trans}$の推定誤差を緩和するために$M = 500$個の$E_{trans}$のメディアン（中間値）を求めた[2]。結果を図2に示す。

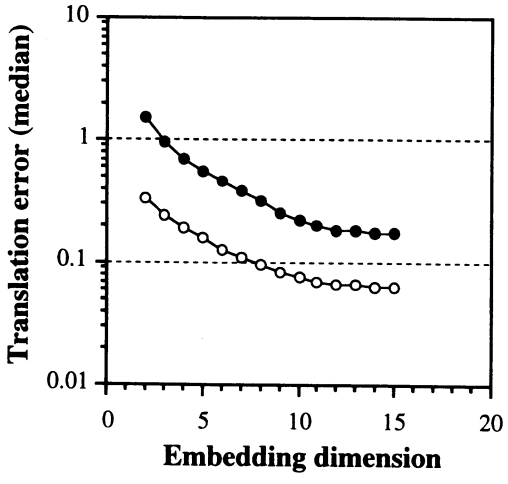


図 2. 音響時系列のWaylandテスト結果（●:不良品, ○:良品）

E_{trans}を比較すると、不良品の音響時系列は、良品に比べて変動に連続性が見られず乱雑さが顕著であり、時系列に含まれているランダムノイズ成分が確かに増強されていることがわかる。機械部品の品質は、スペクトル解析では捕えることが困難であった音響時系列における乱雑さの相違として現れている。良品、不良品の差異は$D = 3$で明瞭に現れているから、例えば、$D = 3$と設定しておくと実用的な計算時間でE_{trans}を推定することが可能である。

4 結晶品質評価への応用

第二の応用例は、チョクラルスキー法と呼ばれる単結晶育成方法で製造された単結晶シリコン材料の品質検査である[7]。この結晶育成法の概要を以下に述べる。回転する石英るつぼ内で加熱、溶融した原料シリコン融液上に、種結晶と呼ばれるシリコン単結晶を適当な結晶面方位で置く。種結晶を適当な速度で回転しつつ上方に引き上げると所望の直径の単結晶インゴットが成長する。原料融液の熱対流と強制対流による流動や結晶育成時の熱環境は、結晶成長速度を複雑に変動させ、育成され

た結晶の品質に影響を及ぼす。結晶成長の均一性は、X線トポグラフ法を用いると評価することができる。結晶成長軸を含む面で結晶を切断し、切断面にX線を照射する。特定の回折方向のX線強度変化を結晶成長軸方向に走査しながら観測すると、成長縞とよばれるトポグラフ像が得られる。X線トポグラフ像は結晶成長時における成長速度の揺らぎを反映している。トポグラフ像について、結晶直径上で結晶中心から所望の距離だけ離れた位置にある結晶成長軸に沿って散乱X線強度をプロットすると、成長縞を時系列に変換できる[7]。こうして得られた成長縞時系列の乱雑さは結晶品質の均一性の指標となる。ある条件下で育成されたシリコン結晶（結晶径= 6 インチ）について、結晶の高温加熱前後で観測された結晶中心部の成長縞時系列（データ点数 = 512）のパワースペクトルを図3に示す。

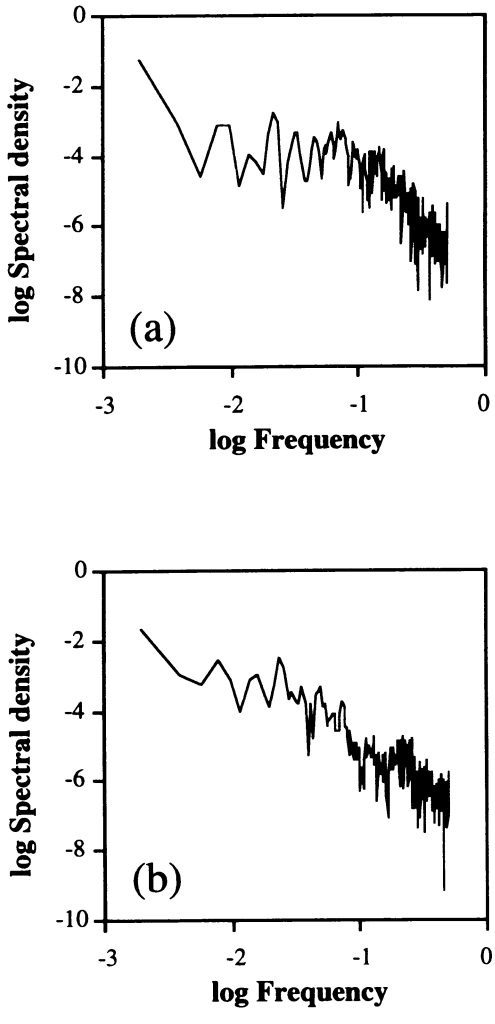


図 3. 成長縞時系列のパワースペクトル: (a) 結晶加熱前, (b) 結晶加熱後

パワースペクトルの特徴から結晶加熱による影響を捕えることは非常に難しい。図4は成長縞時系列に対するWaylandテスト結果である（$M = 150, K = 4, T = 5, \Delta t = 1$）。パワースペクトル解析とは対照的に、結晶の高温加熱によって結晶中心部の成長縞時系列の乱雑さに大きな変化が生じていることが認められる。「良い結晶とは成長縞の構造が結晶加熱により変化しない結晶である」という仮定が許されるならば、成長縞の乱雑さの程度は結晶品質を評価する有効な尺度となり得るであろう。

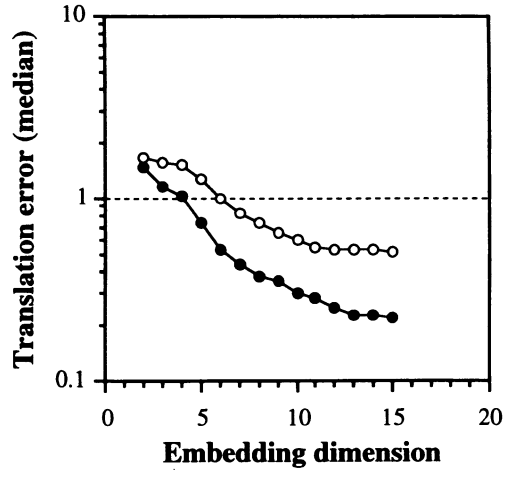


図 4. シリコン結晶成長縞時系列のWaylandテスト結果（●:加熱後, ○:加熱前）

5 結論

時間発展における決定論的側面、あるいは、乱雑さが時系列を分類する特徴となる場合があることを示した。このような場合には、近年、時系列のカオス性や非線形性を発見するために研究が進められている時系列解析手法が有用である。本研究は、故障診断や品質管理ための一つの新しい方向を示唆していると言えるかも知れない。

謝辞

住友シチックス株式会社、神田 忠 氏、宝来 正隆 氏にはデータの御提供と多くの助言をいただきました。著者らは深く感謝致します。また、住友金属工業株式会社、森田 洋 氏、新谷 昭 氏にはデータ処理と討論に参加していただきました。著者らはこれら諸氏にも感謝致します。

参考文献

[1] D. T. Kaplan and L. Glass, *Physica* D **64**, 431 (1993).

[2] R. Wayland, D. Bromley, D. Pickett, and A. Passamante, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 580 (1993).

[3] F. Takens: *Lect. Note in Mathematics* **898** (Springer–Verlag, 1981).

[4] T. Sauer, J. A. Yorke, and M. Casdagli, *J. Stat. Phys.* **65**, 579 (1991).

[5] T. Miyano, *Int. J. Bifurcation and Chaos*, **6**, 2031 (1996).

[6] T. Miyano, T. Oasa, T. Iokibe, S. Murata, and T. Tanimura, *Proceedings of the First International Conference on Conventional and Knowledge-Based Intelligent Electronics Systmes*, in print.

[7] T. Miyano, H. Morita, A. Shintani, T. Kanda, and M. Hourai, *J. Phys. Phys.* **76**, 2681 (1994).

連絡先: 〒 660 兵庫県尼崎市扶桑町 1–8　住友金属工業（株）未来技術研究所 エレクトロニクス基盤研究部 デバイス技術室

E-mail: miyano@dev.amaken.sumikin.co.jp

FRA5-3

時系列の決定論的性質と確率過程的性質の識別のための軌道平行測度法

Trajectory Parallel Measure Method for Discriminating between Determinism and Stochastic Process Property in Time Series

○藤本 泰成, 五百旗頭 正, 谷村 隆義
Yasunari Fujimoto, Tadashi Iokibe, Takayoshi Tanimura
株式会社明電舎
Meidensha Corporation

Abstract : There is a method of extracting some characteristic frequency by FFT(Fast Fourier Transformation) to solve observed data. But chaotic time series has few distinguishable characteristics in frequency component. In this paper, we propose the method based on the chaotic theorem that distinguish between the characteristic of determinism and stochastic process. And we present the result of the application of this method to the chaotic data and white noise, and we also present its usefulness.

1. はじめに

実世界から得られる時系列データは、本来のダイナミクス以外に何らかの要因により影響を受けている場合が多い。その影響が決定論によるものか、非線形・確率過程によるものかは定かではない。

一見不規則に見える時系列データが、実は決定論に基づいたカオスであるという事例が発表されている。近年では、Takens の埋め込み理論[1]により、解析できなかったデータが実はカオスであるとの報告が増えてきている。得られた時系列がランダムノイズか決定論的なカオスかどうかを判定する方法として、最近では、位相空間に埋め込まれている軌道の複雑さを統計的に求める Kaplan の粗視化軌跡平均法[2]などが提案されている。しかし Kaplan アルゴリズムは埋め込まれた位相空間を上手に分割する必要があり、実際多様な時系列を扱う時には十分な準備が必要と思われる。

そこで私たちは、軌道平行測度法(Trajectory Parallel Measure Method (TPM 法))を提案する。この手法の着目点は Kaplan と同様に位相空間の軌道の平行度を統計的に求めることであるが、位相空間をハイパーキューブで分割することは不要である。その代わりに近傍空間内の軌道ベクトルで同一方向性を調べる。

本稿では、軌道平行測度法について説明し、その有用性を示すため、代表的な決定論的カオス時系列であるローレンツカオスとホワイトノイズのそれぞれの時系列データに本手法を適用する。

2. 軌道平行測度法(Trajectory Parallel Measure Method)

n 次元状態空間に再構成した時系列の任意のデータベクトルと、その近傍空間内でのデータベクトルのトラジェクトリに対する正接単位ベクトルの方向は、理想的な決定論に基づく時系列であればほぼ同一方向であるが、確率過程系の場合ではランダムとなる。この性質を利用して、決定論に基づく時系列と、確率過程に基づく時系列の分離・識別を行う。以下に具体的手法を示す。

再構成した軌道の任意のベクトル **Xi** = (y(i), y(i-τ), ..., y(i-(n-1)τ))を選び、そしてユークリッド距離において **Xi** に近い m 個の近傍ベクトル **Xj** : (j=1,2,3,....,m)を選択する。次にデータベクトル **Xi** と近傍ベクトル **Xj** の軌道に対するそれぞれの正接単位ベクトル **Ti** と **Tj** を導出する(Fig. 1)。

正接単位ベクトルの導出は時系列から理想的に求めることは困難である。そのため、選択した点 **Xi** とその前後の点 **Xi-1**, **Xi+1** の 3 点を通る超球を想定し、そして **Xi** における超球の接線として近似的な正接単位ベクトル **Ti** を導出することにする。同様に、近傍の正接単位ベクトル **Tj** を求める。こうして求められた正接単位ベクトル **Ti** を基準としたときに、近傍ベクトルの正接単位ベクトル **Tj** との方向のばらつきを式 (1)により求める。

$$\gamma_i = \frac{1}{4m} \times \sum_j^m \left\| \mathbf{Ti} - \mathbf{Tj} \right\|^2 \qquad (1)$$

この処理をアトラクタ全体からランダムに k 個サンプリングした局所近傍空間について行う。次にそのアトラクタ全体の軌道の状況を統計的に判定するため、平均を式(2)により求める。

$$\Gamma = \frac{1}{k} \sum_i^k \gamma_i \qquad (2)$$

以上のことから、Γの値が 0 に近いほど近傍空間のベクトルが統計的に同じ方向にあるということになる。つまり、決定論的な位相空間であると言える。逆に、結果が 0.5 に近いほど近傍空間の軌道ベクトルが各々直交であり、結果が 1 に近いほど各々の軌道ベクトルが反対の向きであることを示している。

この手法の特徴は、再構成された軌道の状態を統計的に測ることが出来る。また、埋め込み設定(次元数・遅れ)を除くと、適当な近傍数とサンプル数を設定するだけのチューニングの簡便さにある。

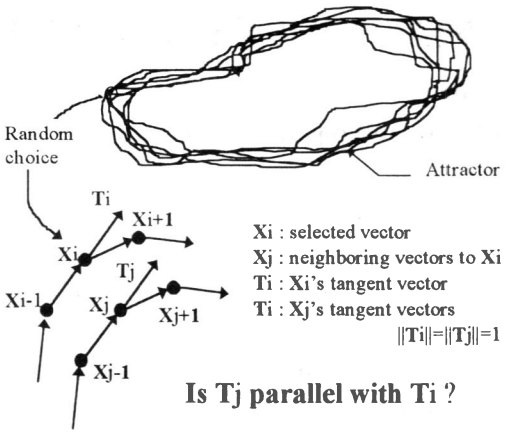


Fig. 1. 軌道平行測度概念図

3. 適用例

決定論的カオス時系列として代表的なローレンツカオスと、ホワイトノイズの時系列データとを、それぞれ本手法で検証する。ローレンツカオスを発生させる数式は次の通りである。

$$dx(t)/dt = -10x(t) + 10y(t)$$
$$dy(t)/dt = 28x(t) - y(t) - z(t) \qquad (3)$$
$$dz(t)/dt = -2.6667z(t) + x(t)y(t)$$

(初期値: x(0) = 0, y(0) = 4, z(0) = 28)

上記の式により得られた $x(t)$と、MATLAB から生成したホワイトノイズの時系列データ(7000 個)を TPM 法で検証する。それぞれの時系列データをFig. 2, Fig. 3、そして埋込次元を 2 次元から 10 次元としたときの TPM 法による検証結果をFig. 4 に示す。

4. 考察

ローレンツカオスとホワイトノイズの時系列データに、TPM 法を適用した。その結果、ローレンツカオスとホワイトノイズとの軌道平行測度の違いが明確にあらわれた。ローレンツカオスの場合、統計的に、その軌道は近傍の軌道とほぼ平行である。ホワイトノイズの場合、明らかに軌道平行測度が大きい。ローレンツカオスの場合、状態空間の次元が低いほど軌道平行測度が大きいことから、低次元では元の状態空間で異なった部分が写像されて埋め込まれていることがわかる。

更に本手法では、ノイズとカオスの分離を目的とするならば、低次元で、且つ少ない標本数でも分離可能であり、計算時間を短くすることができる。

5. まとめ

提案する軌道平行測度法により、決定論的時系列と確率過程では明確な分離ができることを示し、本手法の有用性を示した。本手法の応用として、機器異常判別に有効と思われる。正常な機器から得られる時系列データが決定論的な時系列であれば、その機器に何らかの異常が生じたときは得られる時系列もランダムノイズを含んだデータになるはずである。この点に着目すると、本手法を適用した異常判別が可能となる。

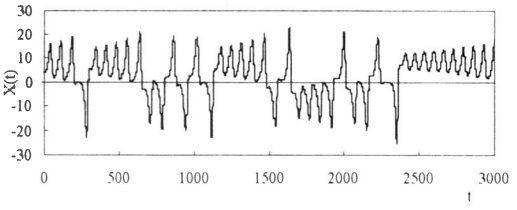


Fig. 2. 時系列データ(ローレンツカオス)

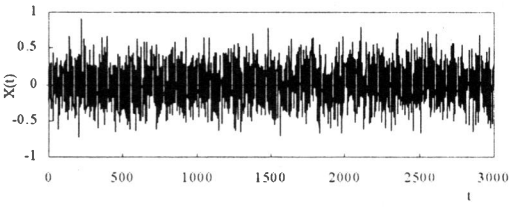


Fig. 3. 時系列データ(ホワイトノイズ)

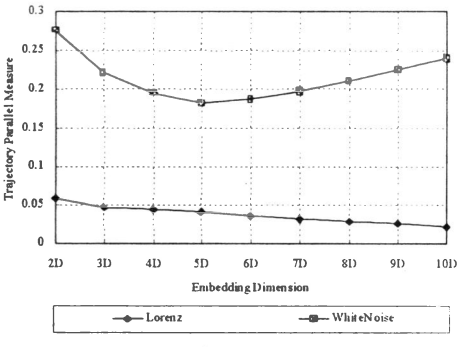


Fig. 4. ローレンツカオス・ホワイトノイズに本手法を適用した結果
(次元:2-10/遅れ:1/近傍数:4/標本数:400 試行数:20)

参考文献

[1] F.Takens: Detecting Strange Attractors in Turbulence: in Dynanical Systems and Turbulence, Warwick, 1980, eds. D. A. Rand and L. S. Young (Springer, Berlin, 1981)p.366.

[2] Daniel T Kaplan and Leon Glass: Coarse-grained embeddings of time series: random walks, Gaussian random processes, and deterministic chaos, Physica D 64 431-454 (1993)

問い合わせ先: 〒103 東京都中央区日本橋箱崎町 36-2
㈱明電舎 システム技術部 システム開発課
藤本 泰成
Tel) 03-5641-7505 Fax) 03-5641-9303
E-mail) fujimoto-ya@honsha.meidensha.co.jp

複合構造型リカレントニューラルネットワークに対するHybrid GAによる学習法

Learning Method for Complex Recurrent Neural Networks using Hybrid Genetic Algorithm

○高橋　理*　田崎　栄一郎

○Osamu Takahashi and Eiichiro Tazaki

桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科

Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract

Structure of Recurrent Neural Network that is used for learning time series data have two types, that is hopfield network and feedback connection network. Here, we propose two Complex Recurrent Neural Networks which are mixed structures of above two networks, where they have inner connections and feedback connections. To evaluate the characteristics, we apply them to the recognition of English characters and sin curves using Hybrid GA.

We have obtained effective results.

1　目的

リカレントニューラルネットワーク(RNN)[1]の学習では一般に、階層型ニューラルネットワーク[2]の学習と比較して記憶すべき情報量や、計算量が多くなる。さらに学習データの長さや、ネットワークの規模の増大にしたがってその量は急激に増加していく。計算機上でこのRNNを実現するには、メモリやディスクなどの資源の容量によって、学習データの長さやネットワークの規模に制約を受けることも考えられ、これらのことから少ないニューロン、並びにそれらの結合によって構成されるネットワークが望ましい。

この問題に対し、本研究では２つの新しい型のネットワーク構造と学習における学習パターンのネットワークへの入力方法を提案し、ここにハイブリッド遺伝的アルゴリズム[3]の学習法を導入することにより解決を図る。

提案したネットワークの構造ではニューロン間の結合が増えてしまい、そのままでは問題の解決には適さない。ここでは学習パターンの入力方法に着目して、学習パターンの部分的なパターンによって学習パターンの分類を行い、問題の解決を図ることを期待する。

提案した方法の有効性の検証のために、一般的なRNNと提案した２種類の複合構造型RNNを用いて、時系列化した英字パターンと三角関数の認識における学習の結果を比較検討する。

2　リカレントニューラルネットワーク

ニューラルネットワークの構造は、ネットワークの結合に関してフィードバック結合を持つタイプと、持たないタイプの２種類に分類できる。RNNはフィードバック結合を持つタイプのニューラルネットワークである。この種のニューラルネットワークは時系列データを学習可能とする。これはニューラルネットワークの時空間への一般化と成り得るからである。このフィードバック結合を持つネットワークの学習法として、勾配法[4]、通時的誤差逆伝播法(BPTT)[5]などがある。

一般に多く用いられている構造のRNNはHopfield型の相互結合を持つネットワークと、ネットワークの出力から入力へのフィードバック結合を持つネットワークの２種類である。これらのネットワークは周期波形、音声信号などの時系列データを学習データとして用いる場合、有効であると言われている。

提案した複合構造型RNNは一般的な構造のRNNを組み合わせたネットワークで出力層に相互結合を持ちかつ出力層から入力層へのフィードバック結合を持つ構造である。図１、図２に提案した複合構造型RNNを示す。

図１の構造のネットワークでは出力層においてニューロンを一巡する結合を持つ。さらに出力層か

* 現在、株式会社アイセス、東京都文京区水道２丁目５番２２号カキビル４Ｆ

ら入力層へのフィードバック結合を持つ構造となっている。

図２の構造のネットワークでは、ネットワークの出力と同数の出力層を持つ。それぞれの出力層はHopfield型ネットワークとしての内部結合を持つ。さらに出力層から入力層へのフィードバック結合を持つ構造となっている。

3　リカレントニューラルネットワークの学習

提案した構造のネットワークでは結合の数がこれまでに提案されている一般的なネットワークのそれと比較して増加してしまう。このため、提案した構造のRNNの学習においては、学習データの入力方法によって、情報量と計算量に差が生じることを明らかにし、このことを積極的に明らかに利用することによって、従来のRNNに比較しても十分に情報量、計算量の軽減を図ることが可能なことを示す。

まず学習パターンの全体を入力する前、つまり部分的なパターンでの認識を行う方法を用いる。この部分的なパターンによる学習パターンの分類が行えるならば、計算量と記憶量の軽減を期待できる。このために、部分的なパターンから全体のパターンへと学習に用いるパターンの長さを変化させる。学習パターンの分類を行える時点でネットワークの学習を終了する。

またRNNを文字パターンの認識に適用した場合、部分的または全体的に類似している文字が存在する。文字の分類を行う上で、これらの文字の分類は困難である。このため学習パターンのそれぞれが類似している場合にも、学習パターンの分類をより正確に、そしてより早く行える様に入力を行う順序を変える。ここでは文字パターンの学習について３種類の方法を用いた。

さらにこれらのネットワークの学習に局所解に停留することなく最適な解を早く探索するために、ハイブリッド遺伝的アルゴリズムを導入する。ここでハイブリッド遺伝的アルゴリズムとは一般に遺伝的アルゴリズムと他の学習アルゴリズムと組み合わすことにより互いの長所を活かした探索法であるが、本研究では遺伝的アルゴリズムと勾配法を組み合わせたものを用いている。

一般にニューラルネットワークの学習に対する遺伝的アルゴリズムは、ネットワークの結合重みを生物の１個体と仮定し、これらの個体の集合に淘汰、交叉、突然変異などの遺伝的オペレーターを適用することにより、次世代の個体群を形成するという、生物の進化の過程を模倣する学習アルゴリズムである。また本研究で用いた適合度関数ｆを式（１）に示す。ここでｎは個体番号、Y_iはネットワークの出力、Q_iは教師信号、αは正の定数、W_{ij}はｊ番

$$f(n)=\frac{1}{2}\int_0^{\infty}\{\sum_{i\in V}(Y_i(t)-Q_i)^2+\alpha\sum_{i\geq j}W_{ij}^2(t)\}dt \quad (1)$$

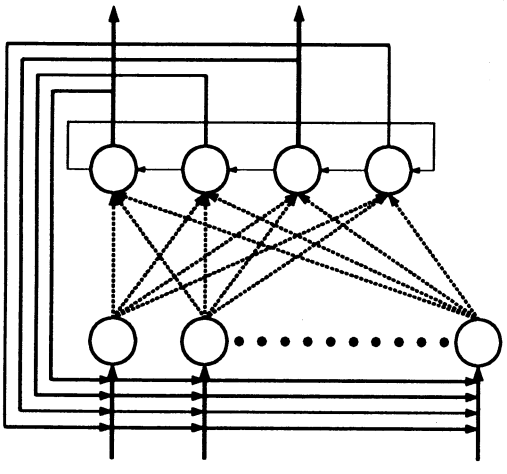


図１複合構造型リカレントニューラルネットワーク１

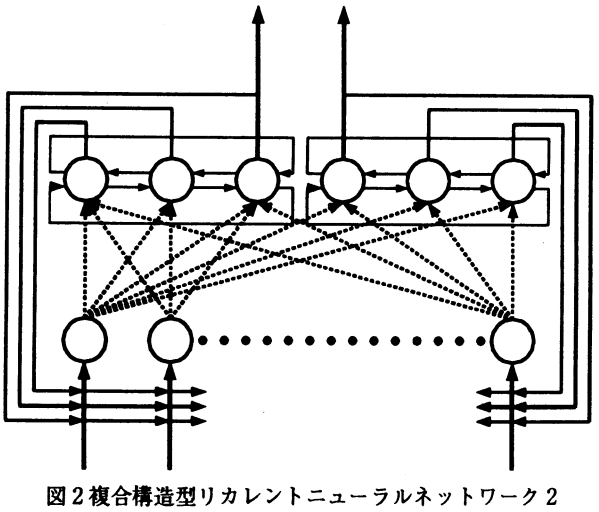


図２複合構造型リカレントニューラルネットワーク２

表１　実験に用いたネットワーク

1	複合構造型ＲＮＮ(ネットワーク1)
2	複合構造型ＲＮＮ(ネットワーク2)
3	ポップフィールド型ＲＮＮ

表２　学習データ

1	英字ＵＶＢＰ
2	英字ＵＶＹＨ
3	Sin関数

表３　データの入力方法

1	上から下へ横一列ずつ入力
2	下から上へ横一列ずつ入力
3	偶数番目のニューロンは上から下 奇数番目のニューロンは下から上

表４　個体数

1	１６個体
2	３０個体
3	５０個体
4	３０個体で学習を開始し 途中で２０個体追加

目のニューロンからｉ番目のニューロンへの結合を重みを表す。

4　例題による提案した方法の検証

提案したネットワークの有効性について、表１に示す３種類のネットワークと表２に示す３種類の学習パターンを用いて実験を行った。文字パターンは横１０縦１５のマトリクスに分割して、表３に示す３種類の方法をネットワークへの入力方法として用いた。

また、個体数の違いによる分類能力の差について比較するため、表４に示す４種類の個体数で学習を行った。表４の４では誤差の変動が小さくなるか、学習回数が５０００回に達した時にランダムに発生させた２０個体を個体群に追加する。

これらの学習パターン、入力方法を用いてネットワークの学習を行った結果の全体をを表５に示す。ここで学習結果とテストデータの左側の数字は全体のパターンによる学習の結果を表し、括弧内の数字は部分的なパターンによる学習の結果を表す。また”－”はその項目に該当するデータが無いことを示す。個体数が”BP”とは、勾配法のみによる学習を用いたことを示す。

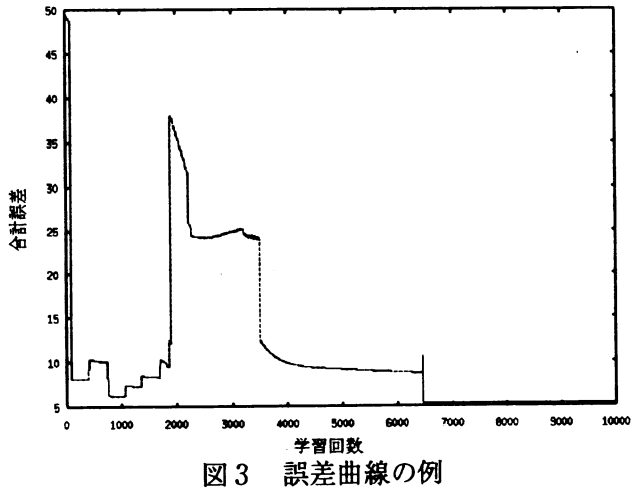


図３　誤差曲線の例

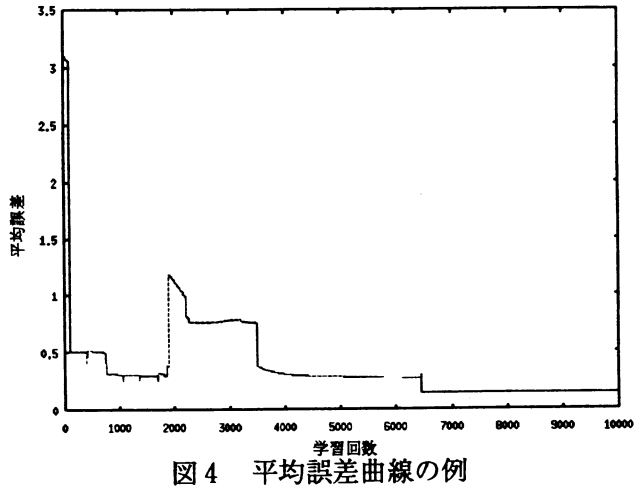


図４　平均誤差曲線の例

表５　学習の結果一覧

	ネットワーク	学習データ	入力方法	個体数	学習結果	テストデータ1	テストデータ2	テストデータ3
1	1	1	2	BP	1 (2)	－ (2)	－ (1)	－ (2)
2	1	1	1	３０	1 (1)	－ (－)	－ (－)	－ (－)
3	1	1	2	３０	3 (4)	3 (3)	1 (1)	3 (4)
4	1	1	3	３０	4 (4)	3 (3)	2 (4)	4 (4)
5	1	2	2	１６	2 (2)	2 (2)	1 (2)	－ (－)
6	1	2	2	３０	3 (4)	2 (2)	1 (1)	－ (－)
7	1	2	2	３０→５０	4 (4)	2 (3)	1 (1)	－ (－)
8	1	2	2	５０	2 (4)	2 (2)	1 (1)	－ (－)
9	1	3	－	３０	3 (－)	2 (－)	1 (－)	－ (－)
１０	2	1	1	３０	1 (1)	－ (－)	－ (－)	－ (－)
１１	2	1	2	３０	5 (5)	5 (5)	3 (3)	5 (5)
１２	2	1	3	３０	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
１３	3	1	1	３０	1 (1)	－ (－)	－ (－)	－ (－)
１４	3	1	2	３０	4 (4)	3 (3)	1 (1)	2 (2)
１５	3	1	3	３０	5 (5)	3 (3)	3 (3)	3 (3)

表6　評価基準

評価値	評価基準（文字パターン）	評価基準（三角関数）
5	4文字判別、しきい値±0.9	合計誤差が0.15以下
4	4文字判別、しきい値±0.75	合計誤差が0.15以下
3	3文字判別、しきい値±0.9	合計誤差が0.15以下
2	3文字判別、しきい値±0.75	合計誤差が0.15以下
1	2～5に満たない	2～5に満たない

ネットワークの出力値を評価するために、表6に示す評価基準を設定した。ここでしきい値とはネットワークの出力値を確定するための値を表す。

3種類のネットワークで、文字ＵＶＢＰの学習を行ったところ、入力方法2、3について4文字の認識を行うことができた。入力方法1では文字の半ばまで文字の区別がつかなかったため、文字の判別を行うことはできなかった。さらに文字パターンの全体を入力することなく、その部分パターンで文字の認識を行った結果、ネットワーク1はネットワーク2、3より良い結果を得た。

ネットワーク1において入力方法2を用いて、文字ＵＶＢＰ、文字ＵＶＹＨ、Sin関数の学習を行った。この結果、個体数にもよるが全ての文字について分類を行えた。Sin関数も十分小さい誤差で学習を行えた。

同じようにネットワーク1において文字ＵＶＹＨの学習について個体数を変えて学習を行った。この結果、途中から２０個体を追加した場合が最も良い結果を得た。

また文字パターンの学習の一例の誤差曲線を図3に示す。ここで誤差が大きくなる箇所があるがこれは文字パターンの学習では前述の部分的なパターンから学習を開始して、学習パターンを延長するという方法を用いたためである。この学習パターンの延長を行う時点で未学習の部分の誤差が増えるために誤差が大きくなる。

合計誤差では学習パターンの延長の際に誤差が増えてしまい、学習の進み具合が明確にならない。これは学習パターンの長さが長いならばその合計誤差の絶対値は大きくなるからである。このため学習パターンの各パターンのそれぞれの時刻における平均誤差を図4に示す。

5　結論

本研究では、学習に多くの計算量と記憶すべき情報量を必要とするRNNの学習について、その軽減を図るために新たな構造のネットワークとして複合構造型のRNNの2種類と、その学習法を提案した。

提案した構造のネットワークとポップフィールド型の出力層を持つネットワークを時系列化した文字パターンと三角関数の学習に適用し、その分類能力について比較を行った。この結果、提案した構造のネットワークは同等の分類能力を示した。

一方、文字パターンの入力途中において行われた文字の判別でも、良い結果を得ることができた。これにより計算量と情報量の軽減を図る事が可能と考えられるが、その詳細については今後の研究課題である。

ところが学習パターンとして文字パターンを用いる場合、その入力法によってその分類能力に差が生じることがあり、これより文字パターンの学習では、文字パターンの入力方法について考慮する必要性があり、この点におけるさらなる研究が急がれるところである。

参考文献

[1]Pineda FJ.,Generalization of back-propagation to recurrent neural networks,Phys. Rev. Lett.59,pp.2229-2232,1987
[2]W.S.McCulloch and W.Pitts,A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity,Nullet. Math. Biophysics 5,pp.115-133,1943
[3]T.Ichimura,T.Takano and E.Tazaki,Learning of Neural Networks Using Hybrid Genetic Algorithm,Proc. of the EUFIT'96,Vol.1,pp.526-530,1996
[4]M.Sato,Real Time Learning Algorithm for Recurrent Analog Neural Networks,Biol. Cybern. 62,pp.237-241,1990
[5]李 移勝,宮永 喜一,栃内 香次,構造化リカレントニューラルネットワークによる時系列の記憶と再生,電子情報通信学会論文誌,A Vol.J79,No.1,pp.29-37,1996

問合せ先

〒225 神奈川県横浜市青葉区鉄町1614
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
田崎 栄一郎
TEL 045-974-5070　FAX 045-978-1311
E-mail: tazaki@intlab.toin.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

ビルディングブロック仮説を用いたParallel Hybrid GAによるニューラルネットワークの学習

Learning Method of Neural Networks Using Parallel Hybrid GA Based on Building Block Hypothesis

○栗山 裕, 平野 奈穂美, 高橋 総子, 市村 匠,田崎 栄一郎
○Yutaka Kuriyama, Naomi Hirano, Fusako Takahashi, Takumi Ichimura and Eiichiro Tazaki

桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control and Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract:
GA search is one of popular methods in the learning of neural networks, however, the method is a heuristic random search based on a fitness function which estimates sum squared error. When the gene string is too long, it is not sufficient to find an optimal solution, since it can estimate only for overall network, but not make a detail investigation on the level of the gene structure. In this paper, we propose a estimating method of gene structure based on Building Block Hypothesis. The method assumes an appropriate schema in each generation and measures how the individuals in a population agree with the schema in its bits. Since both estimating procedures are employed in the proposed method, it enables to find solution for short iterations. Further, we apply the method to the Parallel Hybrid GA. It works a parallel search of Hybrid GA in two or more modules. To verify the validity of the proposed method, we develop a medical diagnostic system for the hepatobiliary disorders.

1．はじめに

ニューラルネットワークの重みの学習法は種々提案されているが、これらはバックプロパゲーション（ＢＰ）によるものがほとんどであった。しかるに、ＢＰ学習にはいくつかの問題点[1]があり、それらの１つとして極小値問題がとりあげられている。これは重みなどの初期値の設定に対する依存性が強く存在しているため、ネットワークが局所解に停留してしまうことがあり、大域的な最適値の発見に至りにくいというものである。

この問題を解決する方法として、遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）とＢＰが組み合わされた方法を最適値と思われる解まで繰り返し適用する探索法であるHybrid GA が提案されている。[2]ところがこの方法では個体数と最適解との間にある一般的な性質は解明されていない。一般に１集団の個体数が多いほどその多様性が維持されると考えられるが、逆に集団における個体の数とＧＡの探索時間との間にトレードオフを生じるといった問題がある。また事例などの複雑な教師データにより学習されるニューラルネットワークの重みを遺伝子により表現すると、非常に長い遺伝子構造を与えなければならなく、そのため長時間の学習を強いられることになる。

このような問題を解決するために、個体の評価に新たな指標を導入することを試みる。これはＧＡの個体の評価が適合度を求めるための評価関数をもとに行われているのに対し、ここに新たな評価基準として、スキーマに対しどの程度一致しているかをビルディングブロック仮説を用いて[3]、定義された評価値を組み込む方法である。この方法により、長い遺伝子構造をもつ個体であったとしても、全体的な評価としての適合度と部分的な評価としてのビルディングブロック仮説との２つの方法により、より良い個体をより早く探索可能となる。

さらに、これらの複数個の集団を並列的に動作させることにより、遺伝的浮動によって生じる多様性を維持しつつ解の探索が可能な Parallel Hybrid GA[4]の構造にビルディングブロックによる評価を導入した。

提案した方法の有効性の検証のため、肝胆道系疾患に対する生化学データを用いて学習を行った結果を報告する。

2．ビルディングブロック仮説に基づく評価関数

ニューラルネットワークの学習にＧＡを用いた場合、その集団に対する適合度として、２乗誤差の値による評価がある。ここではその個体である重みを用いたとき、入力に対し期待される出力値との差を表しているものであり、個体全体としての評価が行われている。

一方、ＧＡの動作には、ビルディングブロック仮説[5],[6]を用いる考えがある。この論文では、ビルディングブロック仮説に基づきそこに含まれるランドスケープの構造に着目した評価を取り入れることにより、解を探索する方法を提案する。

2．1ステッピングストーン

ビルディングブロック仮説は、ＧＡに関係する次の２つのランドスケープの特徴に基づいている。即ち、「短く、低い次元で高く適合するスキーマ」と「中間的なステッピングストーン」である。ここでステッピングストーンとは、低い次元のスキーマをもつ個体において、さらにより高い適合度のスキー

マが構成されるように合成される中間的な次元をもつ高い適合性をもつスキーマのことである。このようなスキーマの存在によりＧＡはよりよく動作するであろうという考えがビルディングブロック仮説である。

ところが、中間的なステッピングストーンがどれだけ高い適合性をもたなくてはならないか、またそれがどれだけ存在しなければならないかを考慮する必要がある。このため次のようなロイヤルロード関数を定義する。[3]

２．２ロイヤルロード関数

まず適当な染色体における遺伝子の配列をs_{opt}と定義する。ここでこの遺伝子を最適なストリングであると仮定する。さらにこの遺伝子を小さなビルディングブロックに分解する。これらのビルディングブロックはそれぞれ低い次元でのスキーマであると考えられるため、これらに適当な値を割り当てる。このようなs_{opt}とそれぞれの個体がその低い次元のスキーマにどれだけ一致しているかを測る。

例えば、図１ではs_{opt}をすべてビット‘１’により構成される遺伝子とし、４ビットごとのビルディングブロックを構成すると仮定する。ここではスキーマと一致している度合いをすべてのビットが一致している場合は４を、そうでない場合は０になるように与えられる。

ロイヤルロード関数$R(x)$は、これらの小さな次元のスキーマとの一致度について、すべてのビルディングブロックに関する総和を計算するものである。例えば、図１のようにs_1，s_2，s_3が与えられている場合には$R(S_1)=4$，$R(S_2)=4$と計算される。$R(S_3)$はs_1とs_2の合成と見ることができるので、$R(S_1)$と$R(S_2)$との和として、$R(S_3)=8$と計算される。

２．３ビルディングブロック仮説を用いた個体の増殖

ところがこのように仮定されたs_{opt}は、一般に最適であるとは言えない。そこで、これをＧＡによる遺伝的操作により動的可変な指標とする。即ち、次のような場合はs_{opt}を新たに仮定し直さなければならない。今、表１に示すような指標Ａ：s_Aと指標Ｂ：s_Bがあり、s_{opt}が指標Ａだったとする。このとき設定されたs_{opt}が誤っていたと考えられるので、s_{opt}を指標Ｂに切り替えるのが妥当と考えられる。このために、次の２つの状態を調べる。

ａ）ある個体の適合度の変化を測定し、より良く適合するように変化している。即ち、

$$f(x_i,t+1)-f(x_i,t)>E_d$$

が満足される場合である。ここで、x_iはi番目の個体、tは世代を表し、fは適合度を表す。またE_dは適合度が希望するように変化しているかを示すしきい値とする。

S_1　1111 **** **** ****　$R(S_1)=4$

S_2　**** 1111 **** ****　$R(S_2)=4$

S_3　1111 1111 **** ****　$R(S_3)=8$

S_{opt}　1111 1111 1111 1111　$R(S_{opt})=16$

図１．スキマタとロイヤルロード関数

表１ビルディングブロックによる指標

	指標Ａ	指標Ｂ
適合度（良い）	高いスキマタ	低いスキマタ
適合度（悪い）	低いスキマタ	高いスキマタ

ｂ）s_{opt}に対するロイヤルロード関数の値が、世代交代により小さくなっている。即ち、

$$R_{S_A}(x_i,t)-R_{S_A}(x_i,t+1)>R_d$$

が満足されるときである。ここで、R_{S_A}は指標Ａをs_{opt}としたときのロイヤルロード関数の値であり、R_dはその値が小さくなっていることに対するしきい値である。

このような個体が存在するとき、その個体を指標Ｂとして切り替える。

またこの操作の後、遺伝的操作を行うことでロイヤルロード関数の大小の順番が適合度のそれと一致しなくなる場合は、s_{opt}を指標Ａに戻す。

このような指標を用いたときの増殖の方法を次に述べる。まず集団を適合度の高い順に、P_{high}とP_{low}との割合で２つのグループに分け、さらにこのP_{low}のグループに属する適合度の低い個体の一部を、ビルディングブロック仮説に基づいたロイヤルロード関数の値が大きい個体と入れ替える。即ち、$P_{low}=P_{low1}+P_{low2}$とし、ここで、$P_{low1}$のグループが適合度の高い順にソートされた個体の集団であるのに対し、P_{low2}のグループはロイヤルロード関数の値の高い順にソートされた個体の集団とする。

これにより次世代の集団に対する増殖は、その遺伝子の構造にも着目することになり、適合度関数によるネットワーク全体の評価だけではなく、その構造にも着目した評価を行うことが可能となる。

３．Hybrid Genetic Algorithm

３．１　Hybrid GA

ＧＡの問題の１つとして、局所解が多数存在する多峰性の問題がある。特に、選択圧力が高い場合、集団の中で評価値の高い個体がその集団に対し急速に支配的になり、集団における多様性が進化の早い過程において失われてしまうことがある。この結果、局所解に陥ってしまうことがある。この解決方法として、探索途中において異なるアルゴリズム間で解の交換を許すことによって大域的な解の探索

が可能になるHybrid GAが提案されている。これはＧＡを含む複数のアルゴリズムを適用することにより、「できるだけ良い解を見つける」，「できるだけ早く解を見つける」という２つの要求を満足させようとするものである。

この論文で用いられているHybrid GAは、２つの方法を組み合わせたものである。まず大域的な探索をＧＡにより行い、ここで得られた解をもとにＢＰを用いることにより局所的な解を探索する。このように、ＧＡとＢＰの双方のアルゴリズムを繰り返し用いることにより、GAとBPによる学習のそれぞれの長所を活かした学習法となるため、最適解の探索を短時間で行うことが可能になると期待される。[2] ここでは、前実験により良い結果を示した組み合わせとして、GA1回に対してBP30回を行う方法を採用している。

３．２　Parallel Hybrid GA

本研究ではHybrid GAを並列的に動作させることにより、ニューラルネットワークにおける学習としてParallel Hybrid GAを提案する。これは複数の部分集団を並列的に動作させ、遺伝的浮動によって生じる多様性の保持を狙うものである。この部分集団がそれぞれ独立であるとするならば、これはＧＡをその部分集団の個数分だけ実行したものと同等のシステムとなる。

提案したアルゴリズムでは、予め適当な数の部分集団を設定し、各々の部分集団においてニューラルネットワークによるHybrid GAを用いた探索がそれぞれ独立して行われている。図２はネットワークにおいて動作するParallel Hybrid GAの学習の流れを示している。[3]

４．医療診断システムへの適用

提案された方法の検証のために、肝胆道系疾患に対する医療診断システムへの適用を試みる。

ここでは４疾患に対し性及び９項目の生化学検査データを教師データとして用いている。ここで行われた９項目の検査は、GOT(Glutamic Oxaloacetic Transaminase), GPT (Glutamic Pyruvic Transaminase), LDH(Lactate DeHydrase), GGT(Gamma Glutamyl Transpeptidase), BUN(Blood Urea Nitrogen), MCV(Mean Corpuscular Volume of red blood cell), MCH(Mean Corpuscular Hemoglobin), TBIL(Total BILirubin), CRTNN (CReaTiNiNe)であり、疾患はアルコール性肝障害，原発性肝癌，肝硬変，胆石の４種類である。

用いられたデータベースには５３６個のデータが存在しているが、ここからランダムに選び出された１０７個のデータを教師データとして用いる。

まずこのような事例に対しHybrid GAによる学習を履行した。前実験[2]により、この学習における個体数は50個体からなる集団が良い解を早く得ることができた。これに対し前実験よりも大幅に少ない１０個体から構成される集団に対し、ビルディングブロック仮説に基づく指標を導入することを試みた。図３はその誤差関数の状態を示しており、この方法により、少ない個体数でもより良い解を早く発見できることが示されている。

さらに、この方法を３．２節で述べたParallel Hybrid GAの学習アルゴリズムに導入し、LANに接続された３台のエンジニアリングワークステーションで並列計算を行った。図４は最も良い解を発見したモジュールの１つの誤差関数のグラフを示している。Parallel Hybrid GAの学習における計算は、モジュールの数が影響するが、ここでは３つのモジュールのParallel Hybrid GAを用いるため、図３における単純Hybrid GAと比較して、さらに早くよい解を探索可能としたことが読み取れる。ここで２つのグラフの比較のために、図３および図４の横軸で示されているCycleは、GA １回とBP ３０回の学習周期である。これはこの周期ごとに行われるParallel Hybrid GAの移住を考慮するためである。

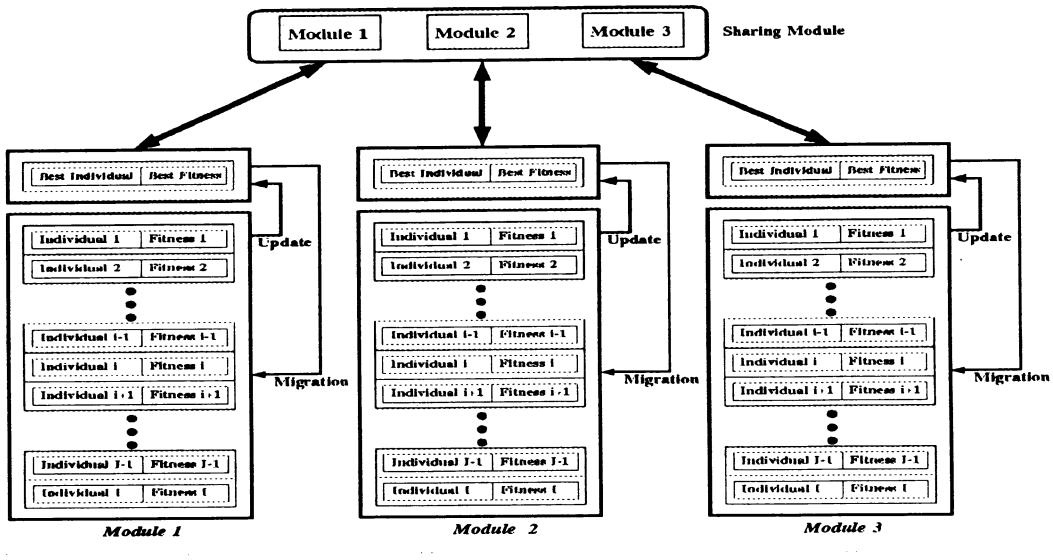


図２　３つの部分集団によるハイブリッド並列型ＧＡ

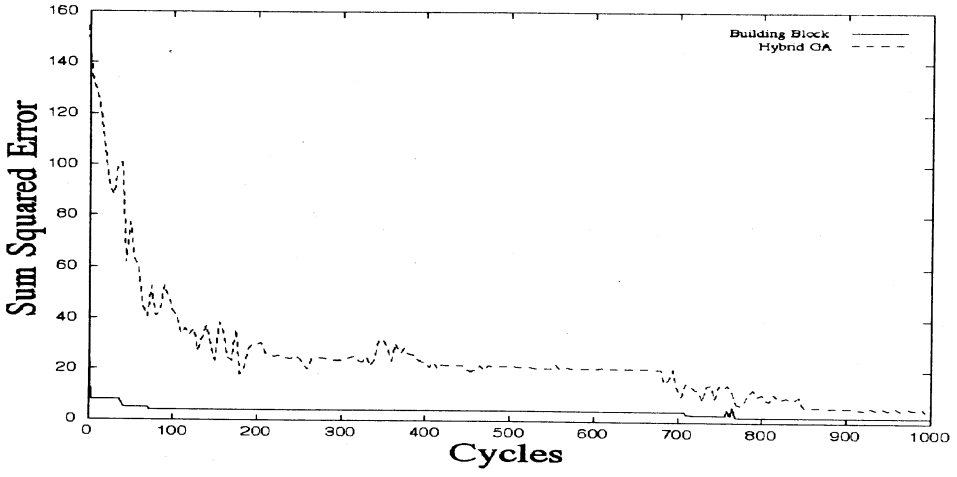


図３　Hybrid GA とビルディングブロック仮説に基づく評価関数の比較

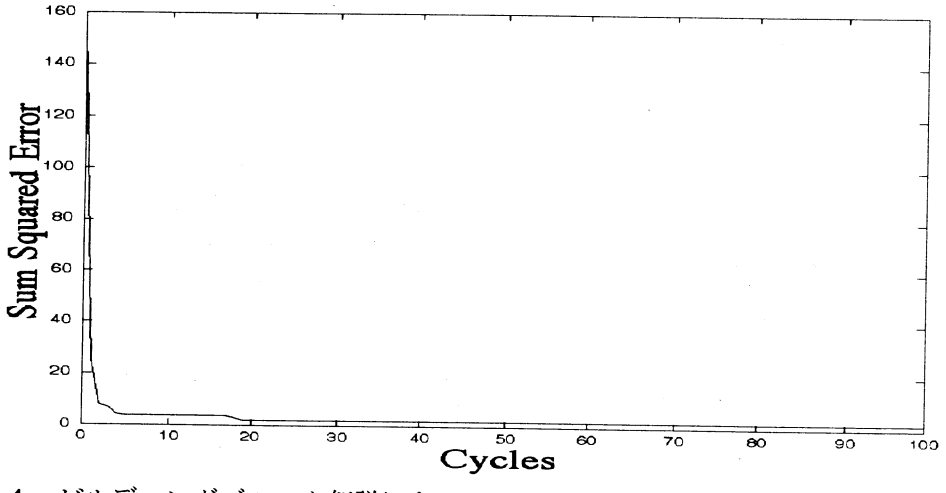


図４　ビルディングブロック仮説による Parallel Hybrid GA の１モジュールの誤差関数

５．おわりに

この論文では、ニューラルネットワークの GA による学習に対し、新しい指標を導入するために、その遺伝子の構造それ自体に着目し、ネットワーク全体の誤差を評価するために適合度関数以外にも、GA の探索能力を向上させる指標を導入した。即ち、ビルディングブロック仮説を用いて、スキマタへの一致度を評価するものである。ところが、この方法には部分的なスキマタを予め仮定する必要があるため、この仮定に誤りがあった場合には有効な手段であるとは言えない。これに対しここでは Hybrid GA を用いることにより、大域的かつ局所的な探索にも有効であり、仮定されたスキマタの補正を実行可能とした。さらに遺伝的多様性を維持することが可能な Parallel Hybrid GA に適用し有効な結果を得ることができた。しかるに、Parallel Hybrid GA における遺伝的多様性とモジュール数との関係は明確ではなく、この究明が急がれるところである。

参考文献

[1]Jiri Sima, "Back-propagatin is not Efficient", Neural Networks, Vol.9 No.6, pp.1017-1023(1996)

[2]T.Ichimura, T.Takano and E.Tazaki, "Learning of Neural Networks Using Hybrid Genetic Algorithm", Proc. of the 4th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT'96) , pp.526-529(1996)

[3]Stephanie Forrest and Melanie Mitchell, "Relative Building-Block Fitness and the Building-Block Hypothesis", Foundations of Genetic Algorithms, Vol.2, pp.109-126(1993)

[4]市村匠，高野猛，栗山裕，田崎栄一郎，"ハイブリッド並列型遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークの学習"，第１２回ファジィシステムシンポジウム，pp.103-106(1996)

[5]J.H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press(1975)

[6]D.E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison Wesley(1989)

連絡先：
〒２２５横浜市青葉区鉄町１６１４
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
田崎　栄一郎
Tel:045-974-5070; Fax:045-978-1311
E-mail:tazaki@intlab.toin.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRB1-3

階層型ニューラルネットワークの生成的学習における一考察

Some notes on Constructive Learning of Multi-layered Neural Network

石井 真樹　　林 陽一

Masaki Ishii　　Yoichi Hayashi

明治大学理工学部情報科学科

Dept. of Computer Science, Meiji University

Abstract: In general, it is difficult to determine the size of network needed to solve a particular problem on feedforward neural network before learning. To overcome this difficulty, this paper proposes a constructive learning method and a generation rule used to build the structure of the network by adding cells. This algorithm consists of two stages, learning stage and generation stage, and the middle-layer cells are constructed one by one as they are required. To show the effectiveness of the proposed algorithm, it is applied to some parity problems.

1 はじめに

階層型ニューラルネットワークの学習方法として誤差逆伝播 (backpropagation、以下 BP と略す) 学習法が有名であり、パターン認識をはじめ多くの分野に適用されている。しかしネットワークの構造、特に中間層に関しては与えられた学習データに対して必要とされる層数やセル数といった構造パラメータを事前に決定することは困難であり、設計者の試行錯誤によって決定されることとなっている。

ネットワーク構造の決定方法として、小さな構造から学習を開始し、セルや結合を逐次追加して適切な大きさの構造を獲得する生成的学習法 (constructive learning) や、それとは逆に学習に十分な大きさの構造から学習を開始し、徐々に不要なセルや結合を削除していく削除的学習法 (destructive learning) が提案されている [1]。

本論文では、前者の学習法の流れをくむもので、3 層の階層型ネットワークにおいて BP 法による重み修正に加えて、中間層セルの活性度 (activation)、相関度 (correlation) の 2 つの基準値を導入した学習法、およびセルの追加条件となる追加ルール (generation rule) を提案する。はじめは中間層のセルを 1 つ用意した状態で学習を開始し、ネットワーク全体で自乗誤差が減少するように学習を行なう学習過程と、生成ルールにしたがってセルを追加した後にネットワークの一部分を凍結して、追加セルと他の中間セルとの相関度が減少するように学習を行なう生成過程を繰り返していくことで、学習に必要なネットワークサイズを獲得することを目指す。

まず 2. にて、逐次生成型ネットワークの学習法ならびに中間層セルの生成ルールについて説明する。そして 3. にて提案した学習アルゴリズムの学習能力を検証するために、パリティ問題に適用した結果を示す。

2 逐次生成型ネットワーク

与えられた入出力パターンの学習を行なうと同時に、セルを逐次追加していきながら適したネットワーク構造を形成していくには、次の 2 つことが重要になってくると考えられる。

- どのような条件を満たしたときにセルを追加するべきなのか (追加ルール)。
- セルを追加したあと、どのように重みや閾値を修正していくべきなのか (学習方法)。

まず 2.1 にて重みや閾値の修正方法を、 2.2 でセルの追加する条件となる追加ルールを示す。そして 2.3 で全体的な学習の手順を説明する。

2.1 学習方法

学習にあたって不要なセルの追加をできるだけ回避するために、BP 学習法に加えて中間層の各セルの出力値に注目して次のような基準を導入する [4]。

- ある中間層セルにおいて、すべての学習パターンに対して類似した出力をしないようにする (セルの活性度を大きくする)。

・すべての学習パターンに対して、類似した出力をするような中間層セルが複数存在しないようにする(セル間の相関度を小さくする)。

次に活性度・相関度それぞれの評価関数と学習方法について説明する。

2.1.1 活性度

どの学習パターンに対しても同じ出力をするような中間層セルは、ネットワークに貢献している可能性が低いと考えられる。そこで、中間層セルの貢献の度合として全学習パターンに対する活性度 A を次のように定義する。ここで、P は学習パターンの個数、N は中間層のセル数、O_i^p は学習パターン p に対する i 番目の中間層セルの出力、$\overline{O}_i$ は i 番目の中間層セルの全学習パターンに対する平均出力を表す。

$$A = \frac{1}{N}\sum_{p}^{P}\sum_{i}^{N}\left(O_i^p - \overline{O}_i\right)^2 \qquad (2.1)$$

この活性度が学習によって大きくなるようにするために、入力層と中間層の間の重みを次のように修正する。ただし、O_j^p は学習パターン p における j 番目の入力層セルの出力とする。

$$\Delta w_{ji}^A = +\sum_{p}^{P}\left(O_i^p - \overline{O}_i\right) O_i^p\left(1 - O_i^p\right) O_j^p \qquad (2.2)$$

2.1.2 相関度

どの学習パターンに対しても同じ出力をする(相関が強い)ような中間層セルが複数存在するような状況はできるだけ避けるべきである。そこで新しいセルは、既存のセルとの相関度が低い状態でネットワークに加えるようにする。学習パターン p に対して、追加セル a の出力と他の k 番目の中間層セルの出力の相関度 C_a を次のように定義する。

$$C_a = \sum_{p}^{P}\sum_{k\neq a}^{N-1}(O_a^p - \overline{O}_a)(O_k^p - \overline{O}_k) \qquad (2.3)$$

この相関度が学習によって小さくなるようにするために、入力層の各セルと追加セルとの間の重みを次のように修正する。

$$\Delta w_{ji}^C = -\sum_{p}^{P}\sum_{k\neq a}^{N-1}\left(O_k^p - \overline{O}_k\right) O_a^p\left(1 - O_a^p\right) O_j^p \qquad (2.4)$$

2.2 生成ルール

セルを追加するタイミングを決定するにあたって、追加をある一定期間ごとに行うことにすると、必要となるセル数の増加とともに学習回数が増加してしまう。学習初期の段階では、セルをできるだけ早く追加するようなルールを付け加えることが望まれる。これに対処するために、学習の初期段階におけるセルの追加条件に活性度を用いる。

BP 法において中間層セル数が過少な場合、中間層セルの出力がどのパターンに対しても同じような値を出力をするような活性度の低い現象が見られる。そこで、活性度がある程度減少した場合にセルを追加するようにする。そのために、セルの追加後は活性度による修正量が BP 法による修正量を上回るように設定しておき、そして BP 法による修正量を徐々に大きくしていくようにする。また、BP 法における学習係数 α をセルを追加するごとに 0 にセットし、学習とともに増加させる。ただし α は最大値を設定して頭打ちする。こうすることで最初は活性度が上昇するが、しだいに BP 法による修正量が大きくなるためにセル数が過少な場合には活性度が減少するものと考えられる。そして、この活性度がある閾値以下にまで減少した場合にセルを追加するようにする。

もう 1 つの追加方法として、誤差の減少が小さい状況がある期間継続した場合にセルを追加するようにする。ただし、BP 法による学習係数 α を増加させている間は誤差の減少が小さい可能性があるため、α が最大値に達してからの期間とする。

生成ルールをまとめると次のようになる。

(1) 活性度 A が、セル追加以降の活性度の最大値の 50% まで減少した場合にセルを 1 つ追加する。

(2) 自乗誤差を E、セル追加以降の自乗誤差の最小値を E_{min} とするとき、誤差減少率 R_{err} を次のように定義する。

$$R_{err} = \frac{E_{min} - E}{E_{min}}$$

α が最大値に到達以降、この誤差減少率 R_{err} が 0.01% 以下の状態が T_{err} 回連続した場合にセルを 1 つ追加する。

2.3 学習の手順

逐次生成型ネットワークの学習の手順は、大きく分けると学習過程と生成過程の 2 つの過程から構成される。はじめに中間層のセルを 1 つ用意し、学習過程を繰り返す。もしセルの追加条件を満たす場合には生成過程に移行する。この学習過程と生成過程を繰り返すことでパターンの学習およびネットワーク構造を決定していく。

2.3.1 学習過程

学習過程では、与えられた学習パターンに対して出力の自乗誤差が減少するように、また中間層の活性度が増加するように学習が行なわれる。

図1のように、入力層と中間層の間の重み修正はBPによる修正量を $\Delta w'$ とすると (2.5) 式のようになる。また中間層と出力層の間の重みはBP法による学習のみを行なう。

$$\Delta w_{ji} = \alpha \Delta w'_{ji} + \beta \Delta w^{A}_{ji} \qquad (2.5)$$

BP法における学習係数 α はセルを追加するごとに0にセットし、学習とともに増加させる。α は最大値 α_{max} で頭打ちし、α_{max}/T_α ずつ増加させる。活性度による学習係数 β は一定値とする。そして、学習のたびに2.2の生成ルールの条件を満たすかどうかを判断し、条件を満たしている場合は生成過程に移行する。

2.3.2 生成過程

生成過程では、自乗誤差が減少するように学習するのではなく、追加セルの出力と既存のセルの出力の相関度が減少するように学習が行なわれる。

新しく追加されたセルと入出力層の各セルは全結合され、その重みの値は乱数により初期化される。さらに、図2のように追加したセルと入力層セルの間の重みを (2.4) 式にしたがって学習を行ない、それ以外は凍結する。ただし相関度の学習係数 γ は一定値とする。そして、相関度 C_a がある程度低下したらネットワークの凍結を解除し、学習過程に戻る。

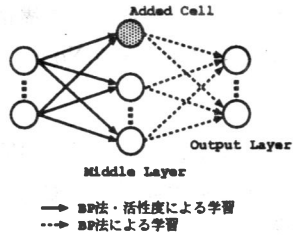


図 1: 学習過程

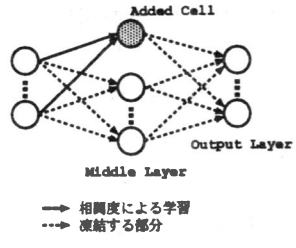


図 2: 生成過程

3 数値実験

本論文では、5ビットから7ビットのパリティ問題を用いることで、提案した学習アルゴリズムの学習能力を調べてみた。学習には各パリティ問題のすべてのデータを用いた。

各パラメータは、BP法の学習係数の最大値 α_{max} を0.5、活性度による学習係数 β を0.001、相関度による学習係数 γ を0.1、T_α を2000回、T_{err} を1000回とした。また、生成過程の終了条件を相関度 C_a が0.0以下になった場合、セル追加終了条件を自乗誤差が0.02以下になった場合、そして学習終了条件は自乗誤差が0.01以下になった場合とした。

表1-1から表1-3は、各学習パターンに対して4回ずつ試行を行った結果である。いずれも学習の初期の段階

表 1: パリティ問題

		試行番号			
		#1	#2	#3	#4
セル数	1	0	0	0	0
		8.039	8.102	8.331	8.210
	2	1999	2043	3312	2046
		8.228	8.205	6.930	8.201
	3	6657	6445	6995	6500
		1.813	1.816	1.817	1.815
	4	9657	9445	10595	9586
		0.943	0.925	1.118	0.924
	5		13929		
			0.569		
終了		16345	17707	14031	13906

表 1-1: 5 Bit Parity

		試行番号			
		#1	#2	#3	#4
セル数	1	0	0	0	0
		17.581	17.156	17.563	16.970
	2	1068	1067	1033	1047
		17.123	17.169	16.873	16.939
	3	2136	2095	2048	2087
		17.347	16.985	16.965	17.180
	4	6136	3104	3044	6090
		8.387	17.127	17.115	7.705
	5	9136	6329	6207	9090
		5.051	1.892	1.763	1.876
	6	12136	10047	9399	12090
		1.749	0.887	1.402	1.004
	7	15146		13289	
		1.570		0.570	
終了		19351	15686	17410	15817

表 1-2: 6 Bit Parity

		試行番号			
		#1	#2	#3	#4
セル数	1	0	0	0	0
		32.088	32.014	34.434	32.785
	2	570	574	577	581
		35.643	35.813	35.861	36.022
	3	1128	1124	1138	1148
		35.704	35.486	35.592	35.945
	4	1691	1674	1690	1711
		36.177	35.936	35.876	36.303
	5	2243	2224	4690	2272
		36.366	36.470	6.262	36.307
	6	6075	2778	7690	5272
		7.709	36.949	1.789	10.330
	7	9075	3369	10690	8272
		1.752	37.056	1.635	1.799
	8	13758	10562		11491
		0.737	6.095		1.396
	9		13562		
			3.890		
	10		18952		
			0.857		
終了		16238	24196	13367	13999

表 1-3: 7 Bit Parity

各学習パターンに対して4回ずつ試行を行った結果。表の数字は、上段がセルを追加したときの学習回数、下段がセルを追加する直前の自乗誤差、一番下の行は学習が終了したときの学習回数を表している。

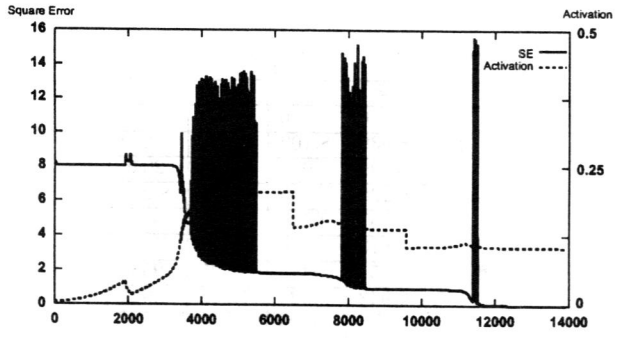


図 3-1: 5 Bit Parity

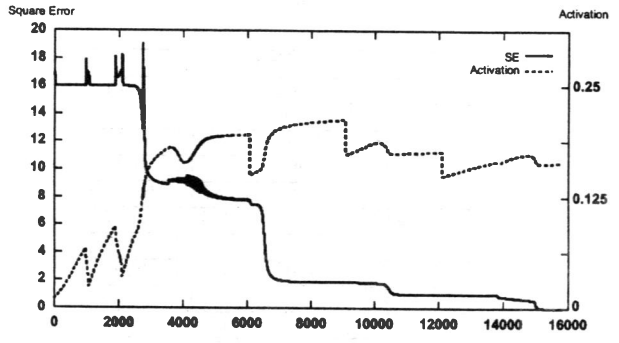


図 3-2: 6 Bit Parity

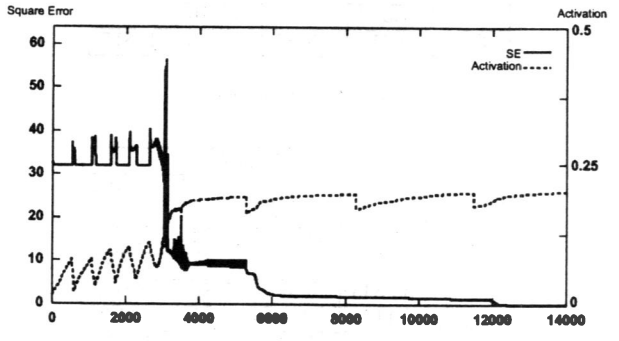


図 3-3: 7 Bit Parity

図 3: パリティ問題

各学習パターンにおける自乗誤差と活性度の変化の様子。グラフの横軸は学習回数、左縦軸の目盛は自乗誤差、右縦軸の目盛は活性度をそれぞれ表している。

ではルール (1) による早めのセルの追加が行なわれており、そのあとはルール (2) によるセルの追加が行なわれていて 2 つのルールがネットワークの構造決定にうまく機能しているものと思われる。また追加ルール (1) によって、規模の大きいデータを学習するほどが追加が早くなっており、セル数の増加にともなう学習回数の増加がある程度回避できている。しかし、7 ビットパリティ問題を学習したときに必要以上のセルの追加が行なわれてしまうことがあり、今後の課題である。図 3-1 から 図 3-3 のグラフは、各学習パターンの 4 回目の試行における自乗誤差と活性度の変化の様子を表している。

また、この実験とは別に 5 ビットから 8 ビットのパリティ問題をそれぞれ 50 回ずつ試行を行ない、得られたネットワークの中間層のセル数を調べた。セル数の平均はそれぞれ、5 ビットパリティで 4.6 個、6 ビットパリティで 6.9 個、7 ビットパリティで 8.9 個、8 ビットパリティで 12.6 個という結果を得た。

4 おわりに

今回、階層型ネットワークにおいて学習を行うとともに、ネットワークの構造を動的に構築する学習アルゴリズムを提案し、その学習能力を示した。しかし、さらに大規模な学習パターンに対する適応性や学習の収束性に関して問題点があり、これからの研究課題である。

参考文献

[1] 石川: “ネットワーク学習アルゴリズムの最近の話題”、計測と制御、 Vol.30 No.4 285/290 (1991)

[2] S. I. Gallant: “Three Constructive Algorithms for Network Learning”, The 8th Annual Conference of the Cognitive Science Society, 652/660 (1986)

[3] 石川: “忘却を用いたコネクショニストモデルの構造学習アルゴリズム”、人工知能学会誌 Vol.5 No.5 595/603 (1990)

[4] 押野、尾島、山本: “逆誤差伝播学習法における中間層ユニットの逐次削除法”、電子情報通信学会論文誌 D-II No.7 1414/1424 (1993)

連絡先

〒 214-71
川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科知能科学研究室
林 陽一
hayashiy@cs.meiji.ac.jp
TEL: 044-934-7475
FAX: 044-934-7912

M－アポトーシスとフィードバック誤差学習による随意運動の脳内形成モデル

A Model of Voluntary Movement Formation in Brain with M-Apotosis and Feedback Error Learning

○岸川信二　三好哲也　市橋秀友　本多克宏(大阪府立大学)

○ S.Kishikawa, T.Miyoshi, H.Ichihashi and K.Honda(Osaka Prefecture University)

ABSTRACT

In this paper we assume that information processing for voluntary movement is performed at two parts in the brain, and one is formed through one's birth and the other is formed through training and learning after the birth. We propose a learning model of voluntary movement formation in brain which consists of two recurrent RBF networks. They are formed by using M-Apotosis and the feedback-error-learning respectively.

Keywords: Feedback Error Learning, Apotosis, Voluntary Movement, Recurrent RBF networks

1 はじめに

動物の中には生まれてすぐ歩き出したり飛ぶことができるものが多くあり，ヒトの随意運動も学習のみによって獲得されるとは考えにくい．したがってヒトの運動能力には，先天的に備えている部分と後天的に学習によって獲得される部分とがあると考えられる．

本研究では前者として，小規模な相互結合型RBFネットワークを，ある運動に必要な近似的なトルク時系列を生成するサブモデルとして用いる．近似的なトルク時系列が遺伝子情報などから既知であると仮定し，それをファジイ if-then ルールとして与える．そして相互結合型のRBFネットワークが提案のミンコフスキーノルムを用いるM-アポトーシスによってプルーニングされ，その構造が明確化される．後者を生成するためには階層型・再帰型RBFネットワーク[2]に対するフィードバック誤差学習[1, 2]を用いる．これらの二つのモデルにより運動パターンの記憶メカニズムを模倣する脳内モデルを構築する．

2 M-アポトーシスによる構造明確化学習

N個のサブモデルがそれぞれフィードバック結合や自己ループを含む任意の結合を持つ完全相互結合型リカレントネットワークの構造明確化を考える．ネットワーク全体のモデルを常微分方程式

$$\frac{d\boldsymbol{x}}{dt} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}), \quad \boldsymbol{x}(t_0) = \boldsymbol{x}_0 \tag{1}$$

とする．ただし，$\boldsymbol{g}(\in R^N)$はRBFネットワーク，$\boldsymbol{x}(\in R^N)$はサブモデルの状態変数ベクトル，$\boldsymbol{w}$，$\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$はRBFの未知パラメータを表すベクトルである．出力$\boldsymbol{y}(\in R^M, M \leq N)$は，ベクトル$\boldsymbol{x}$の要素の一部で，$\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{y}^T, x_{M+1}, \cdots, x_N)^T$である．未知パラメータを決定するための評価関数$E$を

$$E = E_1 + \eta E_2 \tag{2}$$

$$E_1 = \int_{t_0}^{t_f} L(\boldsymbol{y})\, dt \tag{3}$$

$$L(\boldsymbol{y}) = \frac{1}{2}(\boldsymbol{y} - \boldsymbol{y}^*)^T \cdot (\boldsymbol{y} - \boldsymbol{y}^*) \tag{4}$$

$$E_2 = -\frac{A}{s} \sum_{j=1}^{N} \sum_{r=1}^{N} \int_{t_0}^{t_f} \left(1 - \frac{1}{A}\left|\frac{\partial g_r}{\partial x_j}\right|\right)^s dt \tag{5}$$

$$A = \max_{r,j} \left|\frac{\partial g_r}{\partial x_j}\right| \tag{6}$$

とする．学習則は勾配法により，

$$c_i^{NEW} = c_i^{OLD} - \lambda\left(\frac{\partial E_1}{\partial c_i} + \eta \frac{\partial E_3}{\partial c_i}\right) \tag{7}$$

表 1: $s, \eta, \left|\partial g_r/\partial x_j\right|$ および評価関数E_1

s	η	$\frac{\partial g_1}{\partial x_1}$	$\frac{\partial g_1}{\partial x_2}$	$\frac{\partial g_2}{\partial x_1}$	$\frac{\partial g_2}{\partial x_2}$	E_1
−	0.0	0.24	0.74	0.46	0.39	0.006
1.0	0.0005	0.12	0.59	0.39	0.21	0.024
5.0	0.0005	0.08	0.75	0.49	0.26	0.010

とする．ただし，t_0, t_fは初期時刻および終端時刻，$c_i \in \{w_k^r, a_{jk}^r, b_{jk}^r \mid j, r = 1, \cdots, N, k = 1, \cdots, K\}$は未知パラメータで，$\lambda$は正の学習係数である．$\partial E_1/\partial c_i$は随伴方程式により求める[3]．

E_2はM-アポトーシスによる構造明確化のための項，すなわち各サブモデルで出力に影響しない不要な入力変数を削除するための項であり，石川[4]によるニューラルネットワークの忘却機能付き学習や構造明確化学習を統一的に表したものである．各データ点における各入力変数に関する偏微分値の絶対値の和が小さい入力変数を削除する．まず$s = 1.0$として各入力変数に関する偏微分値の絶対値をなるべく小さくしながらモデルの学習を行う．続いてsを大きくして学習を行う．sが大きい場合は，

$$\lim_{s \to \infty} 1 - \left\{\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}(1 - v_m)^s\right\}^{\frac{1}{s}} = \min_m v_m \tag{8}$$

であることから，提案の評価関数E_2は，

$$E_2 = \min_{r,j} \left|\frac{\partial g_r}{\partial x_j}\right| \tag{9}$$

となるので，傾きの絶対値の小さなもので誤差のあまり増大しないものだけをさらに小さくしながらモデルの学習を行うことになり，削除すべき入力変数を明確化する効果がある．$\left|\partial g_r/\partial x_j\right|$の平均値がしきい値$\theta$よりも小さくなった入力変数を削除し，そのモデルを用いて再度学習を行うことにより，簡潔な構造のネットワークを得ることができる．

初期値を(x_1, x_2)=(1.0,0.0)，刻みを0.05として常微分方程式

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \tag{10}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -x_1 - 0.5\, x_2 - x_1^2 \tag{11}$$

から得られた201個のデータ(x_1, x_2)を教師データ(y_1^*, y_2^*)として提案の手法により学習を行った．$s = 1.0$として5000回の学習を行った後，$s = 5.0$としてさらに5000回の学習を行った．学習係数$\lambda = 0.005$, $\eta = 0.0005$とした．$s, \eta, |\partial g_r/\partial x_j|$および評価関数$E_1$の値を表1に示す．表1より第1サブモデルの第1変数を削除すべきことが分かる．

3 随意運動形成のモデル

本研究で提案する随意運動形成モデルを図1に示す．上肢のモデルとして垂直3リンクマニピュレータの運動方程式を用いる．図1におけるI_0は随意運動を想起するトリガー入力である．先天的に形成されたネットワークの出力およびトリガー入力I_0が与えられたときの後天的に形成されるネットワークの出力をそれぞれ第lリンクに対するフィードフォワードトルク$T_{l1}(t)$および$T_{l2}(t)$とする．また体性感覚などから生じるフィードバックトルクを$T_{lf}(t)$とすると，時間tにおける3リンクマニピュレータの第lリンクへの入力トルク$T_l(t)$は

$$T_l(t) = T_{lf}(t) + T_{l1}(t) + T_{l2}(t) \quad (12)$$

$$T_{lf}(t) = K_p \cdot (\theta_{ld}(t-1) - \theta_l(t-1)) + K_d \cdot (\dot{\theta}_{ld}(t-1) - \dot{\theta}_l(t-1)) \quad (13)$$

となる．ただし，K_p, K_dはフィードバック制御におけるゲイン，θ_{ld},$\dot{\theta}_{ld}$は理想軌道，θ_l,$\dot{\theta}_l$はマニピュレータの状態を表す．

後天的な機構として用いる階層型・再帰型RBFネットワーク[2]はH層からなり各層はM個のサブモデルで構成されているとする．各層のサブモデルの出力を$\boldsymbol{y}_h \in R^M$ $(h = 1 \sim H)$とする．ただし$\boldsymbol{y}_h$はM個の要素からなるベクトルである．最終層（第H層）の出力$\boldsymbol{y}_H$が入力となる第1層のモデルは

$$\frac{d\boldsymbol{y}_1}{dt} = \boldsymbol{g}_1(\boldsymbol{y}_H, I_0) \quad (14)$$

のような常微分方程式で表される．また第h層$(h = 2 \sim H)$はフィードフォワードネットワークとして

$$\boldsymbol{y}_h = \boldsymbol{g}_h(\boldsymbol{y}_{h-1}) \quad (15)$$

とする．本研究では2層$(H = 2)$のモデルを用いた．階層型・再帰型RBFネットワークの最上層の出力$\boldsymbol{y}_H$がフィードフォワードトルク$T_{l2}(t)$としてマニピュレータに与えられる．式(14)，(15)における$\boldsymbol{g}_h(\in R^2)$は，2変数のガウス基底を用いるRBFネットワークである．ただし，第1層ではトリガー入力I_0が加わるので3変数のガウス基底を用いた．階層型・再帰型RBFネットワークに対するフィードバック誤差学習[2]を用いて未知パラメータ$\boldsymbol{w}$を求める．未知パラメータを決定するための評価関数Eをネットワークの出力$\boldsymbol{y}_H$と理想トルク$\boldsymbol{y}^*$との2乗誤差

$$E = \int_{t_0}^{t_f} \frac{1}{2}(\boldsymbol{y}_H - \boldsymbol{y}^*)^T(\boldsymbol{y}_H - \boldsymbol{y}^*)\,dt \quad (16)$$

とする．ただし，t_0，t_f，は学習で考慮すべき初期時刻および終端時刻である．更新則を

$$\boldsymbol{w}^{NEW} = \boldsymbol{w}^{OLD} - \lambda \frac{\partial E}{\partial \boldsymbol{w}} \quad (17)$$

とする．フィードバック誤差学習ではy^*(理想トルク)は未知であるのでフィードバックトルクT_fを誤差信号として階層型・再帰型RBFネットワークへ与える．

運動計測装置によって計測された上肢の随意運動を提案法で再現する数値シミュレーションを示す．先天的な情報から形成されるネットワークを2つのユニットを持つ相互結合型のリカレント型RBFネットワークで表し，提案のM-アポトーシスによる構造明確化学習を行った．学習後に得られたネットワークからの出力$T_{l1}(t)$を運動に必要な近似的なトルクとする．フィードバック誤差学習により階層型・再帰型RBFネットワークに随意運動を獲得した．図2にフィードバック誤差学習前後のマニピュレータの軌跡を示す．図2(a)がフィードバック誤差学習前で(b)が学習後である．フィードバックゲインK_p, K_dはそれぞれ5.0,0.1とした．学習前(M-アポトーシス適用後)でも腕を上げる動作はできているが非常

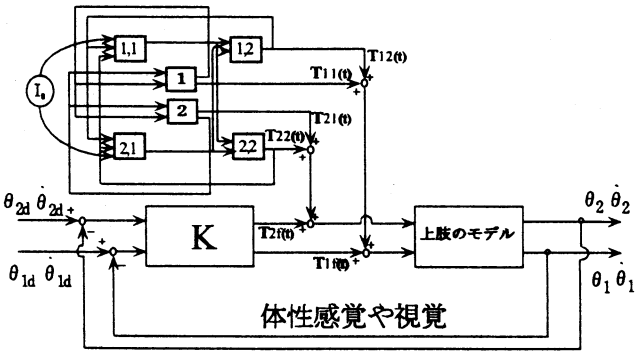
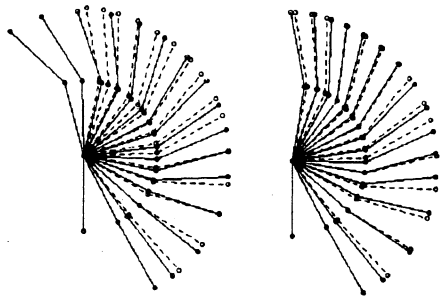


図 1: 随意運動の脳内形成モデル



(a)学習前　　(b)学習後

図 2: 上肢運動の学習結果

に精度が悪い．学習後はほぼ理想軌道に追従している．

4 おわりに

本研究では随意運動の遂行に関わる脳の概念モデルを提案した．脳の神経回路網が形成されるときにもアポトーシスがあることから，遺伝的情報から形成されるとした小規模な相互結合型ネットワークをひとつのサブモデルとして用いた．ミンコススキーノルムを用いるM-アポトーシスによりネットワークがプルーニングされその構造が明確化される．上肢のモデルを用いたフィードバック誤差学習のシミュレーション実験では訓練によって生得的な運動から，理想に近い運動に移行していく過程を模擬することができた．

参考文献

[1] M.Kawato, K.Furukawa and R.Suzuki: Biological Cybernetics, Vol.57, pp.169-185(1987)

[2] 三好，市橋，西門，長坂: 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.273-274(1996)

[3] T. Miyoshi, H. Ichihashi, S. Okamoto and T. Hayakawa: Proc. of IEEE-ICNN'95, Australia, pp. 588-593 (1995)

[4] 石川: 人工知能学会誌, Vol.5, No.5,pp.595-603(1990)

[問い合わせ先]　〒593 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学工学部経営工学科　三好 哲也
TEL:0722-52-1161　FAX:0722-59-3340
E-mail: miyoshi@ie.osakafu-u.ac.jp

FRB2-1

想起過程に初期パターン依存性を持たせた動的連想メモリ

The Associative Memory with Dependence of Dynamical Association on an Initial Pattern

下野 雅芳, * 神酒 勤, * 山川 烈
Masayoshi Shimono, *Tsutomu Miki, *Takeshi Yamakawa
九州工業大学大学院
* 九州工業大学情報工学部制御システム工学科, ファジィシステム研究所
Graduate scholl of Kyushu Institute of Technology
*Department of Control Engineering and Science, & Fuzzy Logic Systems Institute (FLSI)

A novel non-equilibrium network is proposed for a frequent association of stored patterns. The dynamics of proposed model is designed to realize followings. (i) The state of the network is converged to a stored pattern while it is not close to any stored patterns. (ii) When the state is enough close to a stored pattern at a time step k, the state is forced to keep away at the next time step $k+1$. Then, the frequency of associating stored pattern increase. Moreover, a system for selforganization is introduced into the proposed network. As the result, the proposed model associates some patterns closing to the initial one.

1 はじめに

近年, 動的な振舞いをもつ非平衡系ネットワークに関する研究が盛んに行なわれている [1]-[6]. これらのモデルは, 動的パターン想起 [1], 最適解探索問題 [2] などに応用されている. しかし, 従来モデルによる動的パターン想起は,

問題 1 ネットワークの状態が常に活性化されるため, 記銘されたパターンが頻度良く想起されない.

問題 2 与えられた初期状態に関係なく, すべての記銘パターンが想起される.

という問題をかかえている.

本研究では, 記銘パターンを頻繁に想起する規則を相互結合型ネットワークに導入することで問題 1 の改善を, また, 初期状態から遠い記銘パターンを消去する自己組織化アルゴリズムを用いることにより問題 2 の改善を試みる.

2 相互結合型ネットワークの内部値

一般的な相互結合型ネットワークは以下の式で表される.

$$x_{k+1}^{(i)} = \mathrm{sgn}(u_k^{(i)}) \tag{1}$$

$$u_k^{(i)} = \sum_{j=1}^{N} w_{ij} \cdot x_k^{(j)} \tag{2}$$

$$w_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{M} s_m^{(i)} \cdot s_m^{(j)} \tag{3}$$

$x_k^{(i)}$ は時刻 k における i 番目ユニットの出力, $\mathrm{sgn}(\cdot)$ は符合関数, $u_k^{(i)}$ は時刻 k における i 番目ユニットの入力の重み付き加算和である. 本研究では, この $u_k^{(i)}$ を "内部値" と呼ぶ. w_{ij} は j 番目のユニットから i 番目のユニットへの結合係数, $s_m^{(i)}$ は m 番目の記銘パターンにおける i 番目ビットの値, M と N はそれぞれ記銘パターンの総数とユニットの総数を表す.

ここで,100 ユニットで構成される相互結合型ネットワークを考え, 内部値 $u_k^{(i)}$ が有する特性について考察する. 式 (3) に従い, ランダムパターン $s_m = [s_m^{(1)} \cdots s_m^{(N)}]$ $(m = 1, 2, 3, 4;\ N = 100)$ をネットワークに記銘する. これらのパターンから, 任意のパターン s^* を無作為に決定する. この s^* とネットワーク状態との距離を表す指標として, 次式で定義される DC^* を導入する.

$$DC^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x^{(i)} \cdot s^{*(i)} \tag{4}$$

ただし, $x^{(i)}$ は i 番目のユニット出力, $s^{*(i)}$ は記銘パターンから無作為に選ばれたパターンの i 番目ビットの値である. また N はユニットの総数を表し, ここでは $N = 100$ である. ここで, 式 (4) の $x^{(i)}$ として, $s^{*(i)}$ にランダムノイズを加えたもの (各ビットの反転動作) が与えられる. $s^{*(i)}$ に加えらるノイズが多いとき, $x^{(i)} = s^{*(i)}$ を満たす i は少なくなり, DC^* は小さくなる. 逆に, 加えるノイズの量が少ないとき, DC^* は大きくなる. つまり, DC^* は与えられたパターンと記銘パターン s^* との距離を表す.

ここで, 任意の時刻におけるネットワークの内部値 $u^{(i)}$ と DC^* の関係を調べるために, 式 (2) の $x_k^{(i)}$ として, 式 (4) の $x^{(i)}$ を用いる. (これは, 式 (1) ~式 (3) で表されるネットワークにおいて, 時間的なフィードバックを考えない場合に相当する.) ネットワークの内部値 $u^{(i)}$ と DC^* の関係を図 1に示す.

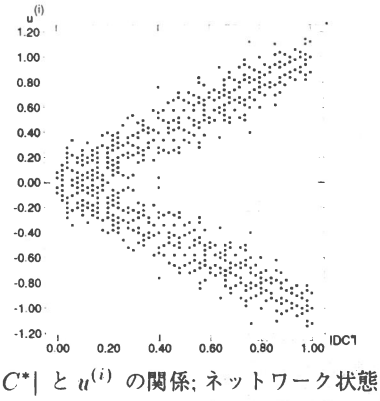


図 1: $|DC^*|$ と $u^{(i)}$ の関係; ネットワーク状態がある記銘パターンに似ているほど, 内部値の絶対値 $|u^{(i)}|$ は大きくなる.

図1は,相互結合型ネットワークの

- ネットワーク状態がある記銘パターンに似ているほど,内部値の絶対値 $|u^{(i)}|$ は大きくなる.

という関係を示している.この特性は,式(1)～式(3)で表される相互結合型ネットワークに共通する特性である.

3 特異な想起過程をもつ非平衡系相互結合型ネットワークの構築

2節で示した相互結合型ネットワークの内部値 $u^{(i)}$ と DC^* の関係をふまえ,非平衡系相互結合型ネットワークのダイナミクスに以下の規則を埋め込む.

規則1 想起パターンが記銘パターンに一致するとき,ネットワーク状態は活性化される.

規則2 想起パターンが記銘パターンに似ていないとき,ネットワーク状態は活性化されない.

非平衡系相互結合型ネットワークのダイナミクスは,各ユニット間の結合係数と,各ユニットの写像関数形状に依存する.本研究では,写像関数の形状を変えることにより,上記の規則を満足させることを考える.

3.1 極小解からの脱出

相互結合型ネットワークでは,各記銘パターンはネットワークエネルギーの極小値に対応している.よって,規則1は次のように書き換えることができる.

規則1' ネットワークエネルギーが極小(または最小)であるとき,ネットワークのエネルギーを増加させる.

そこで,この規則1'の実現を考える.

まず,ネットワーク状態の活性化手法について議論する.時刻 k における相互結合型ネットワークのエネルギー E_k は次式で与えられる.

$$E_k = -\sum_{i=1}^{N} x_{k+1}^{(i)} u_k^{(i)} \tag{5}$$

$i = l_1, l_2, \cdots, l_\zeta$ 番目のユニットに対し,関数(ここでは $f(\cdot)$ とする)を用いて出力を反転(符合を反転)させるとき,そのネットワークエネルギー $E_k^{l_1,l_2,\cdots,l_\zeta}$ は,

$$\begin{aligned} E_k^{l_1,l_2,\cdots,l_\zeta} = & -\sum_{i=1, i\neq l_1,l_2,\cdots,l_\zeta}^{n} x_{k+1}^{(i)} u_k^{(i)} \\ & -x_{k+1}^{(l_1)} f(u_k^{(l_1)}) - \cdots \\ & -x_{k+1}^{(l_\zeta)} f(u_k^{(l_\zeta)}) \end{aligned} \tag{6}$$

となる.時刻 k におけるネットワーク状態が定常である時, $x_{k+1}^{(i)} = \mathrm{sgn}(u_k^{(i)})$ $(i = 1, 2, \cdots, N)$ であるから, $x_{k+1}^{(i)} u_k^{(i)} > 0$ なる関係が成り立つ.従って,明らかに

$$E_k < E_k^{l_1,l_2,\cdots,l_\zeta} . \tag{7}$$

である.よって,関数 $f(\cdot)$ を用いてユニットの出力信号の符号を反転させることにより,ネットワークのエネルギーが増加することがわかる.

ネットワークエネルギーの活性化手法を知る一方で,規則1'を実現するためには,ネットワークエネルギーが極小(最小)解にあるか否かを知る必要がある.本研究では,これを知るために,図1に示した相互結合型ネットワークの内部値 $u^{(i)}$ と DC^* の関係を利用する.つまり,各ユニットの内部値 $u^{(i)}$ を観察することで,ネットワーク状態が極小(最小)解にあるか否かを判定する.先にも述べたように,相互結合型ネットワークでは,エネルギーの極小(最小)値は各記銘パターンに対応づけられる.したがって,ネットワーク状が極小(最小)解にあるとき,各ユニットの内部値の絶対値は大きな値をとる.

以上のことから,本研究では,規則1'を実現する条件として

条件a あるユニットの内部値が大きい場合,そのユニットの出力値は内部値と反対の符合を持つ.

という方法をとる.

3.2 極小解へのアプローチ

規則2を言い換えると,

規則2' ネットワーク状態がいずれの記銘パターンにも似ていないとき,ネットワークのエネルギーを小さくする.

となる.そこでまず,ネットワークエネルギーを小さくする手法について考える.時刻 k におけるネットワークエネルギー E_k と,時刻 $k-1$ におけるネットワークエネルギー E_{k-1} との差は, $w_{ij} = w_{ji}$ に着目すると,次式のように表せる.

$$\begin{aligned} E_k - E_{k-1} &= -{\sum_{i=1}^{N}}' (x_{k+1}^{(i)} - x_{k-1}^{(i)}) u_k^{(i)} \\ &= -{\sum_{i=1}^{N}}' (f(u_k^{(i)}) - f(u_{k-2}^{(i)})) u_k^{(i)} \end{aligned} \tag{8}$$

ここで, $f(\cdot)$ は各ユニット中の写像関数を,また, $\sum_{i=1}^{N}{}'$ は, $x_{k+1}^{(i)} \neq -x_{k-1}^{(i)}$ である i に関する加算を表す.式(8)から,規則2'を満足する必要条件として,次の式が導かれる.

$$\mathrm{sgn}(f(u_k^{(i)}) - f(u_{k-2}^{(i)})) = \mathrm{sgn}(u_k^{(i)}) \tag{9}$$

この式(9)が多くの i について成立すれば,ネットワークエネルギーは減少する.

計算機シミュレーションの結果,下記の条件bが満たされるとき,式(9)が満たされ,ネットワークエネルギーが極小解へ近付くことがわかった.

条件b 内部値の絶対値が小さい場合,その内部値は増幅して出力される.

3.3 非平衡系相互結合型ネットワークの構成

前述した,条件a,条件bを満たすように写像関数 $f(\cdot)$ を決定する.条件a, bは,図2に示される逆N型関数を写像関数とすることで満たされる.この逆N型写像関数を含む,非平衡系相互結合型ネットワークは以下の式で定義される.

$$x_{k+1}^{(i)} = f(u_k^{(i)}) \tag{10}$$

$$u_k^{(i)} = \sum_{j=1}^{n} w_{ij} \cdot x_k^{(j)} \tag{11}$$

$$w_{ij} = \frac{1}{N}\sum_{m=1}^{M} s_m^{(i)} \cdot s_m^{(j)} \qquad (12)$$

ただし,

$$f(u_k^{(i)}) = ((-1) \wedge g(u_k^{(i)})) \vee 1 \qquad (13)$$

$$g(u_k^{(i)}) = \begin{cases} m_1(u_k^{(i)} + \alpha) & (u_k < \frac{m_1\alpha}{m_0 - m_1}) \\ m_0 u_k^{(i)} & (u_k < |\frac{m_1\alpha}{m_1 - m_0}|) \\ m_1(u_k^{(i)} - \alpha) & (u_k > \frac{m_1\alpha}{m_1 - m_0}) \end{cases} \qquad (14)$$

式中で,$x_k^{(i)}$ は時刻 k における i 番目のユニット出力, $\mathrm{sgn}(\cdot)$ は符合関数, $u_k^{(i)}$ は時刻 k における i 番目ユニットの入力の内部値, w_{ij} は j 番目のユニットから i 番目のユニットへの結合係数, $s_m^{(i)}$ は m 番目の記銘パターンにおける i 番目ビットの値, M と N はそれぞれ記銘パターンの総数とユニットの総数, $m_0 > 0$, $m_1 < 0$ はそれぞれ $f(\cdot)$ の傾きを与える定数を, $\alpha > 0$ は関数と横軸との交点を表す (図 2).

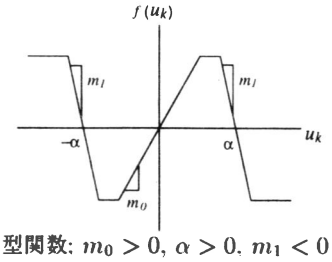


図 2: 逆 N 型関数: $m_0 > 0$, $\alpha > 0$, $m_1 < 0$ はそれぞれ $f(\cdot)$ の傾きを与える定数

3.4 提案モデルの振舞い

ここでは $\alpha = 1, m_0 = 2.0, m_1 = -3.0$ である写像関数を例にとり, 動的に振舞うネットワーク状態の様子を詳しく述べる. $\alpha = 1.0, m_0 = 2.0, m_1 = -3.0$ である写像関数 (図 2) を持つ 100 個の非平衡ユニットを用い, 式 (10) (14) に従って非平衡系相互結合型ニューラルネットワークを構成する. 初期状態として適当なパターンを与えると, ネットワークの状態はすべての記銘パターン間を動的に遍歴する (図 4). 提案した非平衡系相互結合型ニューラルネットワークは, 前述の規則 1, 規則 2 を満足していることが確認できる. なお, 記銘したパターンの裏パターン (ビット反転パターン) が図 4中に現れるが, これは Hebb 則を用いた記銘則では, 両者が記銘パターンとして取り扱われることに起因している. この遍歴過程において, 記銘パターンは頻繁に想起される.

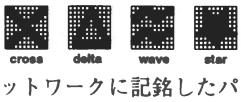


図 3: ネットワークに記銘したパターン

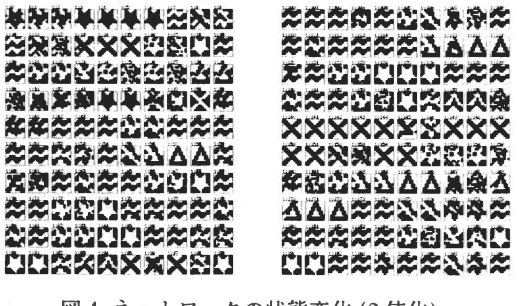


図 4: ネットワークの状態変化 (2 値化)

4 自己組織化アルゴリズムの導入

本研究で提案する自己組織化アルゴリズムは, 記銘パターンの静的想起と, 記銘パターンの削除とを組み合わせることで実現される. 以下では, まずこれら二つの事項について述べ, その後に自己組織化アルゴリズムについて述べる.

4.1 記銘パターンの静的な想起

式 (14) で記述される逆 N 型関数の形状は, パラメータ α の値で大きく変化する. α が大きくなるにつれて, 逆 N 型関数の形状ははシグモイド型関数のそれに似る. この場合, ネットワークの状態遷移の様子は静的となる.

100 個の非平衡ユニット ($\alpha = 2.0, m_0 = 2.0, m_1 = -3.0$) を用い, 式 (10) (14) に従ってネットワークを構成する. また, 図 5に示す 4 つのパターンを記銘する. 初期状態として, 適当なパターンを与えると, ネットワークは, 図 6に示すように, 静的な記銘パターン想起をおこなう. つまり, $\alpha = 2.0$ とすることで, 非平衡系であった提案モデルが平衡系モデルになる.

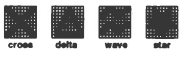
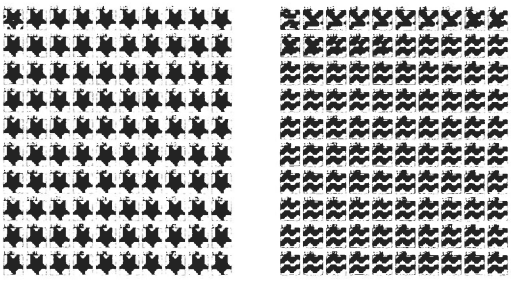


図 5: ネットワークに記銘したパターン



(a) (b)

図 6: 写像関数のパラメータが $\alpha = 2.0$, $m_0 = 2.0$, $m_1 = -3.0$ のときのネットワークの状態変化; (a): 記銘パターンに近い初期状態を与えた場合, (b): 記銘パターンから遠い初期状態を与えた場合.

4.2 記銘パターンの削除 – 記憶の削除 –

自己組織化アルゴリズム中で使用する記銘パターン (記憶) 削除について説明する. 提案した非平衡ニューラルネットワークにおいて, 各ユニット間の重み係数は, 式 (12) で定義されている. ここで, 記銘パターン中の任意のパターン $s^{(l)}$ ($l \in \{1, 2, \cdots, M\}$) を w_{ij} から削除することは,

$$w_{ij}^{\mathrm{new}} = w_{ij}^{\mathrm{old}} - \frac{1}{N} s_i^{(l)} \cdot s_j^{(l)} \qquad (15)$$

とした上, あらためて w_{ij}^{new} を w_{ij} におき直すことで実現できる.

4.3 自己組織化アルゴリズム

ある初期状態が与えられたとき, その近く (ハミング距離で近く) に存在する記銘パターン間のみを, ネットワーク状態が遍歴するように, 自己組織化機能を付加する. 本研究では, 自己組織化機能を実現するために, 先に述べた "提案した非平衡ニューラルネットワークによる記銘パターンの静的想起" と "記銘パターンの削除" を利用す

る. その自己組織化アルゴリズムは次のようなものである.

step1: 提案した非平衡ニューラルネットワークの状態をカオス的に遍歴させる ($\alpha = 1.0$).

step2: ネットワーク状態が与えられた初期状態から充分に遠い記銘パターン (与えられた初期状態に似ていない) の近傍に遷移したときに, 非平衡ニューラルネットワークを静的にする ($\alpha = 2.0$). つまり, ネットワーク状態を初期状態から充分に遠い記銘パターンに引き込ませる.

step3: 引き込まれたネットワーク状態を $\check{x} = [\check{x}^{(1)} \cdots \check{x}^{(N)}]$ として,

$$w_{ij}^{new} = w_{ij} - \frac{1}{N}\check{x}^{(i)} \cdot \check{x}^{(j)} \qquad (16)$$

により削除する.

step4: w_{ij}^{new} を w_{ij} として, 非平衡ニューラルネットワークに再びカオス的なパターン想起を行なわせる ($\alpha = 1.0$).

step1 から step4 を繰り返すことで, 初期状態の近傍にある記銘パターン群のみが, "記憶"として保存され, その結果, 提案した非平衡系相互結合型ニューラルネットワークの状態は, それらのパターン間でのみ遍歴することになる.

ここで問題となるのが, step2 におけるネットワーク状態の判定である. "ネットワーク状態が与えられた初期状態から充分に遠い"ということを判定するため, 次式で定義される方向余弦を利用する. ただし, 初期状態は $x_0 = [x_0^{(1)} \cdots x_0^{(N)}]$, 時刻 k でのネットワーク状態は $x_k = [x_k^{(1)} \cdots x_k^{(N)}]$ である.

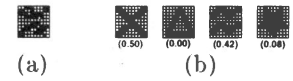
$$\check{DC} = \frac{1}{N}\sum_i x_0^{(i)} x_k^{(i)} \qquad (17)$$

この方向余弦の絶対値 $|\check{DC}|$ がある閾値 $\theta_{\check{DC}}$ (本研究では 0.2 とした) より小さい場合には, 時刻 k におけるネットワーク状態は初期状態から充分に遠いとみなす.

さらに, ネットワーク状態が"記銘パターンの近傍に遷移した"ということも判定する必要がある. この判定には, 非平衡系相互結合型ニューラルネットワークの時刻 k における内部状態 $u_k^{(i)}$ $(i = 1, 2, \cdots, N)$ を利用する. 記銘パターンは, Hebb 則により非平衡系相互結合型ニューラルネットワークへ記銘されている. そのため, 前述のように, 任意の記銘パターンに近付いたとき, ネットワークの内部状態 $u_k^{(i)}$ $(i = 1, 2, \cdots N)$ の平均値 $\hat{u}_k = \sum_i u_k^{(i)}/N$ は大きくなる (図 1参照). この $u_k^{(i)}$ の平均値 $\hat{u}_k$ がある閾値 θ_u (本研究では 0.8 とした) より大きい場合には, ネットワーク状態はある記銘パターンの近傍にあるとみなす.

4.4 パターン認識への応用

100 個の非平衡ユニットで構成された非平衡系相互結合型ニューラルネットワークに, 提案した自己組織化アルゴリズムを持たせる. この自己組織化する非平衡系相互結合型ニューラルネットワークに, 図 7中の記銘パターンの二つに似た (ハミング距離で近い) パターンを初期状態として与えると, ネットワーク状態変化は図 7のようになる. ネットワーク状態は初期状態に近い記銘パターン間を交互に遍歴する. この遍歴の様子は人間の想起によく似ている.



(a) (b)

図 7: (a) 初期パターンと (b) 記銘パターン
(括弧内は初期パターンとの方向余弦)

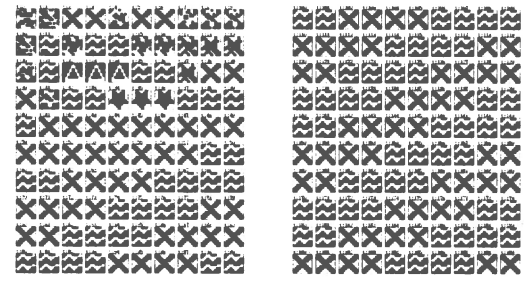


図 8: 自己組織化する非平衡系相互結合型ニューラルネットワークに記銘パターンのうちの二つのパターンに近いパターンを初期状態として与えたときのネットワークの状態変化 (二値化); 初期状態に近い記銘パターン間を交互に遍歴する.

5 おわりに

本研究のポイントは, 相互結合型ネットワークの内部値に着目し, "ネットワーク状態がある記銘パターンに似ているほど, 内部値の絶対値 $|u^{(i)}|$ は大きくなる"という特性を見い出した点にある. この特性を利用して, "ネットワーク状態が記銘パターンに似ているときにのみネットワークエネルギーが活性化される"非平衡系相互結合型ネットワークを提案した. また, 初期状態から遠い記銘パターンを消去する自己組織化アルゴリズムを導入し, 人間の思考によくあうパターン想起を実現した.

参考文献

[1] K.Aihara, T.Takabe, M.Toyoda, "Chaotic Neural Networks," Physics Letters, A, vol.144, no. 6.7(1990).

[2] L. Chen, K. Aihara, "Chaotic Simulated Annealing and Its Application to a Maintenance Scheduling Problem in a Power System," International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp.695-700(1993).

[3] K. Kaneko, "Clustering, Coding, Switching, Hierarchical Ordering, and Control in a Network of Chaotic Elements," Physica, D 41, pp.137-172(1990).

[4] I. Tsuda, "Dynamic Link of Memory -Chaotic Memory Map in Nonequilibrium Neural Networks," Neural Networks, vol.5, pp.313-326(1992).

[5] T. Miki, M. Shimono, T. Yamakawa, "A Chaos Hardware Unit Employing the Peak Point Modulation," Proceedings of the International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Las-Vegas, Nevada, U.S.A. December, 10-14, pp.25-30(1995).

[6] T. Yamakawa, M. Shimono, T. Miki, "Design Criteria for Robust Associative Memory Employing Nonequilibrium Network," Proceedings of the 4th International Conference on Soft Computing, Iizuka, Fukuoka, Japan. September 30 - October 5, pp.688-691(1996).

FRB2-2

自己組織化特徴マップによるファジィ識別システムの構成法(II)

Composition Method of Fuzzy Classification Systems Using Self-Organizing Feature Maps (II)

堀川 慎一
Shin-ichi Horikawa

沖電気工業株式会社 関西総合研究所
Kansai Laboratory, Oki Electric Industry Co., Ltd.

Abstract—This paper presents a new composition method of fuzzy classification systems based on fuzzy rules using self-organizing feature maps. In the new method, the learning of self-organizing feature map is done separately for each class and the recomposition of fuzzy rules is carried out as well as their simple division if necessary. The feasibility of the method is examined using Fisher's iris classification problem.

1 はじめに

近年、学習機能を持つファジィ識別システムに関する研究が種々なされている[1]-[10]。ファジィ識別システムは、パターン空間における対象パターンとその所属クラスとの関係をif-then型のファジィルールで記述したものであり、非線形な識別境界を容易に実現できるという優れた能力を持つ。また、未知パターンの識別はファジィ推論によって行われ、設計時には考慮されていなかった未知クラスに属するようなパターンを容易にリジェクトすることが可能である。

このようなファジィ識別システムの自動獲得について、石渕らは、ファジィルールの簡便な生成手順に基づく様々な手法を提案した[1]-[6]。しかし、これらの手法では、パターン空間のファジィ分割が基本的に格子状に行われるため、複雑な識別境界の実現には細かな部分領域に対応した数多くのファジィルールを要する。一方、馬野らは、自己組織化特徴マップ(Self-Organizing Feature Map: SOFM)[11]とファジィ・ニューラルネットワークを用いた手法を提案した[7]-[8]。これによれば、少ないファジィルールで対象パターンの分布を的確に捉えたファジィ識別システムを獲得できるが、SOFMとファジィ・ニューラルネットワークの学習に膨大な計算時間を必要とする。

筆者はこれまでに、SOFMによるファジィ識別システムの構成法を提案した[9]-[10]。この手法は、SOFMの学習後における荷重ベクトルをファジィ化することにより、直接的に識別処理のためのファジィルールを生成するものである。これらのファジィルールは対象とするクラスの重複度合から必要に応じて細分化が行われ、全体として比較的簡便に良好な性能を持つファジィ識別システムを獲得することが可能となっている。しかし、文献[7][8]の手法と同様に、入力次元数や学習用パターン数の増加に伴いSOFMの学習に多大な計算時間が必要となり、また、ファジィルールの細分化においては、単純な処理であるためにクラス間をうまく分離できない場合があるという問題があった。

本稿では、SOFMの学習をクラス別に行うことによって、より短い計算時間でファジィルールを生成することができるファジィ識別システムの新しい構成法を提案する。この手法を分割学習型と呼び、全クラスのパターンをまとめてSOFMに入力する文献[9][10]の手法を一括学習型と呼ぶ。本稿ではまた、単純な処理では細分化できなかったファジィルールについて、クラス間を可能な限り分離するため、その帰属パターンを基に新たなファジィルールを再生成する手法を併せて提案する。そして、本手法をパターン認識の例題として有名なFisherのアヤメ識別問題[12]へ適用し、その有効性の検証を行う。

2 SOFMによるファジィ識別システムの構成

本稿でSOFMにより生成するファジィ識別システムのファジィルールは、n次元パターン$\boldsymbol{x}=[x_1, x_2, \cdots, x_n]$に対する$m$クラス問題の場合次のように表される。

$$\begin{aligned} R^i &: \text{If } \boldsymbol{x} \text{ is } \boldsymbol{A}_i \\ &\quad \text{then } \boldsymbol{x} \text{ belongs to class 1 with } \tau_{i1} \\ &\quad \text{and } \boldsymbol{x} \text{ belongs to class 2 with } \tau_{i2} \\ &\qquad \vdots \\ &\quad \text{and } \boldsymbol{x} \text{ belongs to class } m \text{ with } \tau_{im} \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、R^iはi番目のファジィルールのラベル、$\boldsymbol{A}_i$は$\boldsymbol{x}$に対するファジィ変数、τ_{ic} $(1 \leq c \leq m)$は区間$[0,1]$の確定値で表される$\boldsymbol{x}$がクラスcに属する確信度である。$\boldsymbol{x}$のR^iに対する適合度に相当するメンバーシップ関数$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x})$の計算方法としては、本稿では以下の5種類を用いる。

算術平均型：

$$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{n} \sum_j \left\{ \max\left(1 - \frac{|x_j - a_{ij}|}{b_{ij}}, 0\right) \right\} \tag{2}$$

代数積型：

$$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x}) = \prod_j \left\{ \max\left(1 - \frac{|x_j - a_{ij}|}{b_{ij}}, 0\right) \right\} \tag{3}$$

min演算型：

$$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x}) = \min_j \left\{ \max\left(1 - \frac{|x_j - a_{ij}|}{b_{ij}}, 0\right) \right\} \tag{4}$$

超多面体型：

$$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x}) = \max\left(1 - \sum_j \frac{|x_j - a_{ij}|}{b_{ij}}, 0\right) \quad (5)$$

超楕円体型：

$$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x}) = \max\left\{1 - \sqrt{\sum_j \left(\frac{x_j - a_{ij}}{b_{ij}}\right)^2}, 0\right\} \quad (6)$$

ここで、a_{ij}, b_{ij}はそれぞれ$\boldsymbol{x}$の第j次元要素x_j ($1 \leq j \leq n$)における$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x})$の中心および広がりを定めるパラメータである。

(1)式のファジィルールによる未知パターン$\boldsymbol{x}$の識別は、各ファジィルールR^i毎に適合度$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x})$と確信度$\tau_{ic}$の積を求めた後、それが最大となるクラスに割り当てることによって行われる。すなわち、$\boldsymbol{x}$は

$$\boldsymbol{A}_I(\boldsymbol{x}) \cdot \tau_{IC} = \max_{i,c}\{\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x}) \cdot \tau_{ic}\} \quad (7)$$

なるクラスCに識別される。上式のIはこの識別結果を導くために用いられたファジィルールの番号である。なお、(7)式にて最大値をとるクラスが複数存在する場合には、$\boldsymbol{x}$を識別不能(リジェクト)とする。

以下、本稿で提案するSOFMによるファジィ識別システムの新しい構成法の説明のため、N個のn次元学習用パターンがそのクラス情報とともに与えられたとして、p番目の学習用パターンを$\boldsymbol{x}_p = [x_{p1}, x_{p2}, \cdots, x_{pn}]$ ($1 \leq p \leq N$)と表す。また、$\boldsymbol{x}_p$は、それぞれm種類のクラスのうちクラスc_p ($1 \leq c_p \leq m$)に分類されているとする。本手法では、以下に示す手順に従い(1)式で表されるファジィルールの生成を行う。この手順は、文献[9][10]のものと基本的に同様であるが、SOFMの学習とその結果に基づくメンバーシップ関数の生成がクラス別に行われる点、およびファジィルールの細分化に加えて再生成も考慮されている点が異なっている。

(a) **(SOFMの学習[13])**
与えられた学習用パターンからあるクラスc ($1 \leq c \leq m$)に属するパターン$\boldsymbol{x}_p$ ($c_p = c$)のみを抽出し、それらの各要素を$[0, 1]$に規格化する。

(b) $\boldsymbol{x}_p$の次元数に等しいn個の入力層ユニットを持つSOFMを構成する。このとき、競合層ユニットの配置は一次元・二次元のいずれでも構わないが、そのユニット数は抽出された$\boldsymbol{x}_p$の数を上限として適当に定める。

(c) $\boldsymbol{x}_p$に対しSOFMの学習を行う。これにより得られたi番目の荷重ベクトルを$\boldsymbol{w}_i = [w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{in}]$と表す。

(d) **(メンバーシップ関数の生成)**
SOFMの学習に用いられたパターン$\boldsymbol{x}_p$をそれぞれ最もユークリッド距離の小さい荷重ベクトル$\boldsymbol{w}_i$に帰属させ、各$\boldsymbol{w}_i$に帰属する$\boldsymbol{x}_p$の集合S_iを

$$S_i = \left\{\boldsymbol{x}_p \middle| ||\boldsymbol{x}_p - \boldsymbol{w}_i|| = \min_k ||\boldsymbol{x}_p - \boldsymbol{w}_k||\right\} \quad (8)$$

のように求める。ただし、上式の$||\cdot||$はベクトル間のユークリッド距離を表す。

(e) 帰属パターン集合S_iが空集合である$\boldsymbol{w}_i$をプルーニングする。

(f) 選択された$\boldsymbol{w}_i$毎にS_iに含まれる$\boldsymbol{x}_p$がすべて$\mu \in (0, 1)$以上の適合度をとるようなファジィ化を行い、メンバーシップ関数$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x})$を生成する。具体的には、(2)~(6)式のパラメータa_{ij}, b_{ij}を

$$a_{ij} = w_{ij} \quad (9)$$

$$b_{ij} = \frac{\max_{\boldsymbol{x}_p \in S_i} |x_{pj} - a_{ij}|}{\alpha} \quad (10)$$

とする。ただし、(10)式のαは、$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x})$の計算方法によってそれぞれ

$$\left.\begin{array}{ll} \text{算術平均型} & : \alpha = 1 - \mu \\ \text{代数積型} & : \alpha = 1 - \mu^{(1/n)} \\ \min\text{演算型} & : \alpha = 1 - \mu \\ \text{超多面体型} & : \alpha = \dfrac{1-\mu}{n} \\ \text{超楕円体型} & : \alpha = \dfrac{1-\mu}{\sqrt{n}} \end{array}\right\} \quad (11)$$

のように与えられる。

(g) $\boldsymbol{x}_p$の各要素を規格化前の値に戻すとともに、算出されたa_{ij}, b_{ij}の値をそれに対応するように変換する。

(h) 手順(a)~(g)をm種類すべてのクラスについて行い、生成されたメンバーシップ関数をまとめて番号を付け直す。以上により、各ファジィルールR^iのメンバーシップ関数$\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x})$が定められる。

(i) **(確信度の算出)**
全学習用パターン$\boldsymbol{x}_p$を対象として、各ファジィルールR^iに対しユークリッド距離の代わりに適合度を尺度として帰属パターン集合を求め直す。すなわち、

$$S_i' = \left\{\boldsymbol{x}_p \middle| \boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x}_p) = \max_k \boldsymbol{A}_k(\boldsymbol{x}_p)\right\} \quad (12)$$

なるS_i'がR^iの帰属パターン集合となる。

(j) S_i'が空集合であるR^iをプルーニングし、残ったファジィルールの番号をその帰属パターン集合とともに再度付け直す。

(k) 選択されたR^iの各クラスcに対する確信度τ_{ic}を

$$\tau_{ic} = \max_{\{\boldsymbol{x}_p | c_p = c, \boldsymbol{x}_p \in S_i'\}} \boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{x}_p) \quad (13)$$

のように、それぞれS_i'に含まれる$\boldsymbol{x}_p$のうちその所属クラスc_pがcに一致するものの適合度の最大値により定める。

(l) **(ファジィルールの細分化)**
ファジィルールR^i毎に、各クラスcに対して算出された確信度τ_{ic}の値を調べ、確信度がその最大値の$\beta \in (0, 1)$倍より大きな値をとるクラスの集合s_iを

$$s_i = \left\{c \middle| \tau_{ic} > \beta \cdot \max_k \tau_{ik}\right\} \quad (14)$$

と求める。

(m) s_iに複数のクラスが含まれるR^iを細分化の対象とし、R^iに代わりs_iの各要素と1対1に対応して新たに生成されるファジィルールをr^ℓとする。このr^ℓの形式は、(1)式で表されるR^iと同じである。

(n) (12)式により算出したR^iの適合度を尺度とする帰属パターン集合S_i'を基に、r^ℓにおけるメンバーシップ関数$A_\ell(x)$のパラメータ$a_{\ell j}, b_{\ell j}$をそれぞれ

$$a_{\ell j} = \frac{1}{2} \min_{\{x_p | c_p = c \text{ or } c_p \notin s_i, x_p \in S_i'\}} x_{pj} + \frac{1}{2} \max_{\{x_p | c_p = c \text{ or } c_p \notin s_i, x_p \in S_i'\}} x_{pj} \quad (15)$$

$$b_{\ell j} = \frac{\max_{\{x_p | c_p = c \text{ or } c_p \notin s_i, x_p \in S_i'\}} x_{pj} - a_{ij}}{\alpha} \quad (16)$$

のように定める。ここで、cはr^ℓに対応するクラスの番号を表し、(16)式のαは(10)式のものと同一である。

(o) r^ℓの各クラスcに対する確信度$\tau_{\ell c}$を手順(i)~(k)と同様にして定める。ただし、このとき用いられる学習用パターンはS_i'に含まれるもののみである。

(p) **(ファジィルールの再生成)**
細分化により生成されたファジィルールr^ℓにおける確信度の値を(14)式に従って再度調べ、いくつかのr^ℓのうち複数のクラスに対し相対的に無視できない確信度を持つものが一つでもあれば、細分化が実現されていないと判定して元のファジィルールR^iを再生成の対象とする。

(q) R^iの(12)式による帰属パターン集合S_i'を学習用パターンとして、文献[9][10]の手法によりR^iに代わるファジィルールr^ℓの再生成を行う。このとき、SOFMの競合層ユニット数は、R^iに対する(14)式のクラス集合s_iの要素数+1から始め、S_i'のパターン数を上限に細分化が完全に実現されるまで一つずつ増加させる。また、メンバーシップ関数の生成およびファジィルールの細分化を行う際のパラメータμ, βは、ともに上記手順と同一の値とする。

(r) 生成されたすべてのファジィルールにおいて、確信度をその総和が1となるように規格化する。以上により、ファジィ識別システムの構成が完了する。

3 アヤメ識別問題への適用

前節において提案したSOFMによるファジィ識別システムの新しい構成法の有効性を検証するため、本手法をパターン認識の例題としてよく用いられるFisherのアヤメ識別問題[12]へ適用した。この問題は、Sepal length, Sepal width, Petal length, Petal widthからなる4次元パターンをIris setosa, Iris versicolor, Iris virginicaの3クラスのうちいずれかに識別するものであり、各クラス50点ずつ合計150点のデータが与えられている。

本稿では、一括学習型と分割学習型とのSOFMの学習方法の違い、およびファジィルールの再生成処理の有無による識別性能の差異を正確に見極めるため、以下の手順を100回繰り返しその平均により各方式の評価を行った。

(a) 各クラス毎に50点のデータをランダムに等分割し、一方を学習用パターン、他方を評価用パターンとする。

(b) 学習用パターンによりファジィ識別システムを構成し、学習用パターンと評価用パターンに対する識別率を求める。

(c) 学習用パターンと評価用パターンを入れ換え、手順(b)と同一の操作を行う。

上記手順におけるSOFMの構成は、競合層ユニットの配置を一次元に限定し、そのユニット数を一括学習型の場合15、分割学習型の場合各クラス毎に5とした。これらの荷重ベクトルは、各要素を区間[0.4, 0.6]のランダムな値により初期化した後、学習率および近傍の初期値[13]をそれぞれ0.5、(競合層ユニット数−1)/2として各試行毎に3000回の学習を行った。これらの学習パラメータは、ファジィルールの再生成時においても同一の値を用いた。また、ファジィ識別システムを構成する際のパラメータは、前節の手順(f)におけるμを0.75、手順(l)におけるβを0.5に設定した。

表1は、本手法のアヤメ識別問題への適用結果を示す。(i)は一括学習型、(ii)は分割学習型の手法による結果である。表1では、細分化なしの場合にSOFMの学習方法による識別性能の差はほとんど見られないが、細分化あり・再生成なしの場合には、分割学習型の方が一括学習型に比べ平均してルール数が約1個少なく、識別率も特に学習用パターンに対してやや低い値となっている。しかし、再生成ありの場合には、逆に少ないファジィルールで同等の識別性能が実現されており、一括学習型においても若干ではあるが再生成処理の効果が認められる。また、SOFMの学習時間に関しては、一括学習型ではワークステーションにて全試行を合わせて約32分59秒を要したのに対し、分割学習型では約19分18秒に短縮されその有効性が示された。なお、再生成ありの場合に学習用パターンの識別率が100%になっていないのは、細分化後に一部のパターンについて帰属するファジィルールが変化してしまうことがあるためである。

表2は、文献[2]と文献[7]の手法をアヤメ識別問題へ適用した場合の結果を示す。表中の数値は本手法の適用時と同じ手順を20回繰り返した平均であり、各試行毎に文献[2]では10000回、文献[7]ではSOFMとファジィ・ニューラルネットワークにてそれぞれ3000回の学習を行っている。ただし、文献[7]で最終的に獲得されたファジィルールは、入力パターンにおける4次元の要素のうち半分しか用いていない。従って、本手法により構成したファジィ識別システムは、文献[7]に比べるとパラメータ数が多くなるものの、他手法と同等以上の識別性能を持ち得ることがわかる。

4 まとめ

本稿では、SOFMの学習をクラス別に行い、また、ファジィルールの細分化に加えて再生成も考慮した、SOFMによるファジィ識別システムの新しい構成法を

表1　本手法のアヤメ識別問題への適用結果

(i) 一括学習型

適合度演算	細分化なし			細分化あり・再生成なし			再生成あり		
	平均ルール数	平均識別率(%)		平均ルール数	平均識別率(%)		平均ルール数	平均識別率(%)	
		学習用	評価用		学習用	評価用		学習用	評価用
算術平均型	14.46	95.38	93.73	16.49	99.13	95.07	17.21	99.76	95.13
代数積型	14.47	95.29	93.65	16.52	99.15	94.83	17.24	99.83	94.91
min演算型	14.58	95.35	91.73	16.90	99.52	91.73	17.24	99.96	91.83
超多面体型	14.47	95.40	93.75	16.49	99.13	94.90	17.21	99.76	94.95
超楕円体型	14.51	95.59	93.68	16.66	99.55	94.50	17.08	99.92	94.51

(ii) 分割学習型

適合度演算	細分化なし			細分化あり・再生成なし			再生成あり		
	平均ルール数	平均識別率(%)		平均ルール数	平均識別率(%)		平均ルール数	平均識別率(%)	
		学習用	評価用		学習用	評価用		学習用	評価用
算術平均型	14.73	95.71	93.53	15.59	97.89	94.29	16.70	99.53	95.01
代数積型	14.75	95.93	93.78	15.60	98.03	94.30	16.70	99.56	94.92
min演算型	14.97	97.49	91.78	15.75	99.03	91.83	16.20	99.75	92.17
超多面体型	14.73	95.95	93.85	15.59	97.97	94.38	16.70	99.54	94.95
超楕円体型	14.89	96.85	94.19	15.59	98.87	94.60	16.36	99.69	94.73

表2　他手法のアヤメ識別問題への適用結果

手法	平均ルール数	平均識別率(%)
		評価用
野崎らの手法[2]	28.0	93.03
馬野らの手法[7]	6.95	94.43

提案し、その有効性をFisherのアヤメ識別問題により検証した。本手法では、メンバーシップ関数の生成についてもクラス別に行われるため、識別すべきクラスの追加や削除といった適応動作を容易に実現することが可能である。

参考文献

[1] 石渕, 野崎, 田中：“ファジィルールを用いたパターン識別”, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.1, pp.74–84, 1993.

[2] 野崎, 石渕, 田中：“ファジィ識別システムにおける忘却によるファジィif-thenルールの選択”, 日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.3, pp.585–602, 1994.

[3] 石渕, 村田, 田中：“遺伝的アルゴリズムによるファジィ識別システムの構築”, 日本ファジィ学会誌, Vol.7, No.5, pp.1022–1040, 1995.

[4] 石渕, 村田：“2目的GAによる言語的識別ルールの選択”, 日本ファジィ学会誌, Vol.7, No.5, pp.1041–1049, 1995.

[5] 石渕, 森澤, 中島：“ファジィ識別システムにおける投票計画”, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.205–206, 1996.

[6] 中島, 石渕：“多次元パターン識別問題のためのファジィ識別システムの構成”, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.821–822, 1996.

[7] 馬野, 福中, 鳩野, 田村：“忘却の概念を用いたファジィ・ニューラルネットワークによるファジィ・ルールの抽出”, 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.3, pp.409–416, 1996.

[8] 馬野, 篠原, 鳩野, 田村：“典型的ファジィルールと例外的ファジィルールの抽出 −忘却型学習によるファジィ・ニューラルネットワークを用いて−”, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.193–196, 1996.

[9] 堀川, 塚本：“自己組織化特徴マップによるファジィ識別システムの構成法”, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.193–196, 1996.

[10] 堀川：“自己組織化特徴マップを用いたファジィ識別システム”, 沖電気研究開発 第174号, Vol.64, No.2, 1997. (印刷中)

[11] T. Kohonen, 中谷・監訳：自己組織化と連想記憶, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1993.

[12] R. A. Fisher：“The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems”, Annals of Eugenics Lond., Vol.7, No.2, pp.179–188, 1936.

[13] J. E. Dayhoff, 桂井・訳：ニューラルネットワークアーキテクチャ入門, 森北出版, 1992.

連絡先

〒540 大阪市中央区城見1-2-27 クリスタルタワー
沖電気工業株式会社 関西総合研究所
堀川 慎一
TEL：06-949-5103
FAX：06-949-5108
E-mail：horikawa@kansai.oki.co.jp

FRB2-3

ベクトル量子化によるファジィモデルの生成的構築法

Creating Method of Fuzzy Modeling using Vector Quantization.

岸田 一也† 宮島 廣美† 前田 道治† 福元 伸也†

Kazuya KISHIDA Hiromi MIYAJIMA Michiharu MAEDA Shinya FUKUMOTO

†鹿児島大学 工学部

Faculty of Engineering, Kagoshima University.

Abstract: We proposed a fuzzy modeling using vector quantization. In initial step, input data are approximated by vector quantization, neural-gas network. Where input-output data are inputted according to their probability density. After that, we create fuzzy inference rules by the result, then fuzzy rules are tuned by descent method. By repeating above steps, we construct fuzzy inference rules reflecting input-output data. In order to demonstrate the validity of our method, some numerical examples are performed.

1 はじめに

近年, 自己組織化やベクトル量子化を用いて, ファジィ推論ルールを構築する方法が研究されている. 自己組織化やベクトル量子化は, 入力空間の特徴を表現し, さらに入力次元数の増化にも影響を受けにくい. これらをファジ推論ルールの構築に用いることは有効であると考えられる. 自己組織化やベクトル量子化を用いることにより, ファジィ推論ルールを入力データの存在する領域に分布させることができる. このとき, 入力データは一様な確率で与えられる [3-6]. しかしながら, ファジィ推論ルールの構築に自己組織化やベクトル量子化をもちいるとき, 入力空間のみならず出力空間をも考慮にいれる必要がある. 出力空間を考慮することにより, 入力空間にファジィルールをより最適に初期配置することができる. すなわち, 入力データが存在しかつ出力空間内での変化の激しい入力点に参照ベクトルを分布させられる.

本稿では, 出力の変化の度合を入力データの確率密度として表現する方法を提案する. 入出力空間の特徴をベクトル量子化により表現し, その結果をもとにファジィルールを生成する. そして, 簡単な数値シミュレーションにより本手法の有効性を示す.

2 デルタルールによるファジィルールチューニング法

2.1 ルールの形式とパラメータ調整法

システムへの入力を $x_1, x_2, \cdots, x_m$, 出力を yとしたとき, 簡略ファジィ推論を用いたファジィ推論ルール R^i は次のように記述できる.

$$R^i)\ \ if\ x_1\ is\ M_{i1}\ and\ x_2\ is\ M_{i2}\ \cdots\ x_m is M_{im}\ \ then\ \ y=\omega_i \qquad (1)$$

ここで, M_{ij}は前件部のメンバーシップ関数, ω_iは後件部実数値, i $(i=1,\cdots,n)$ はルール番号, j $(j=1,\cdots,m)$ は変数番号である.

ルールの適合度は次のように各メンバーシップ関数の適合度の代数積で算出する. μ_iはルール R^iの前件部の適合度を表す.

$$\mu_i = M_{i1}(x_1)\cdot M_{i2}(x_2)\cdots M_{im}(x_m) \qquad (2)$$

ここで, $M_{ij}(x_j)$ は中心値 c_{ij} と幅 b_{ij} の釣鐘型のメンバーシップ関数であり, 次式のように表される.

$$M_{ij}(x_j) = exp(\frac{-(x_j-c_{ij})^2}{b_{ij}}) \qquad (3)$$

このとき, 簡略ファジィ推論の結果 y^*は次式で与えられる.

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^{n}\mu_i\cdot\omega_i}{\sum_{i=1}^{n}\mu_i} \qquad (4)$$

次に, この推論ルールを最急降下法により調整する手法を述べる.

学習の指標として次式のような自乗誤差関数を用いる.

$$E=\frac{1}{2}(y^*-y^r)^2 \qquad (5)$$

ここで y^r は, 同定用出力データである.

デルタルールに従って (5) 式の値を最小にするように, ルールの前件部 (c_{ij}, b_{ij}), 後件部 (w_i) を次式により調整する.

$$c_{ij}(t+1) = c_{ij}(t) - K_c\cdot\frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^{n}\mu_i}\cdot(y^*-y^r)\cdot(\omega_i-y^*)\cdot\frac{2(x_j-c_{ij})}{b_{ij}} \qquad (6)$$

$$b_{ij}(t+1) = b_{ij}(t) - K_b \cdot \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_i} \cdot (y^* - y^r) \cdot (\omega_i - y^*) \cdot \frac{(x_j - c_{ij})^2}{b_{ij}^2} \quad (7)$$

$$\omega_i(t+1) = \omega_i(t) - K_\omega \cdot \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_i} \cdot (y^* - y^r) \quad (8)$$

ここで K_c, K_b, K_ω は学習係数, t は学習回数である.

2.2 チューニングアルゴリズム

デルタルールによる自動チューニング手法を用いて, 推論ルールを逐次的に学習する手順を次に述べる. ここで,Pはデータ数を表す.

[Step a1]
同定用データの番号 p を 1 にする.
[Step a2]
入出力データ $(x_1^p, \cdots, x_m^p, y^{rp})$ を与える.
[Step a3]
(2) ~ (4) 式を用いて, 入出力データ $x_1^p, \cdots, x_m^p, y^{rp}$ に対してファジィ推論を行い, 各推論ルールの適合度 μ_i と推論結果 y^{*p} を求める.
[Step a4]
推論結果 y^{*p}, 適合度 μ_i, 理想出力データ y^{rp} を用いて (8) 式により後件部の実数値 w_i を更新する.
[Step a5]
Step a3 と同様に, 再度ファジィ推論を行う.
[Step a6]
推論結果 y^{*p}, 適合度 μ_i, 理想出力データ y^{rp}, および Step a4 で更新した後件部の実数値 w_i を用いて, (6) 式および (7) 式により前件部のメンバーシップ関数の中心値 c_{ij}, 幅 b_{ij} を更新する.
$p = P$ ならば終了.
$p \neq P$ ならば $p = p + 1$ として Step a2' へ.

□

3 ベクトル量子化を用いたファジィ推論ルールの生成的構築法

ベクトル量子化を用いてファジィ推論ルールの初期配置を決定することにより, 入力次元の増加によるファジィ推論ルールの増加を抑制し, 入力データの存在する場所にファジィルールを構築できる. しかしながら, これまでの方法においては出力空間における変化が入力データに与えられていないので, ベクトル量子化により表現されるのは入力データの特徴のみである. 本研究では, 出力空間の出力の変化の度合を入力データの確率密度として与えることにより, ベクトル量子化により入出力空間を表現した参照ベクトルの配置をおこなう. その参照ベクトルの位置をファジィ推論ルールの初期中心位置として用い, ファジィ推論ルールを生成する. 最急降下法により生成されたファジィ推論ルールをチューニングする. 上記を繰り返すことによりファジィ推論ルールの構築を行なう手法を提案する. 3.1 節では, 今回用いるベクトル量子化の方法を紹介する. 3.2 節では, 入力データの確率密度の決定法を説明する. 3.3 節では, ファジィ推論ルールの生成的構築法を述べる.

3.1 ニューラルガスネットワーク

本稿では, ニューラルガスネットワークにより入力データの近似を行なう. ニューラルガスネットワークは, 優れた近似精度を持つアルゴリズムである. 以下に, ニューラルガスネットワークのアルゴリズムを示す. 詳細は, 文献 [8] を参照.

[Step b1] 初期化 :
初期参照ベクトル $\{ \boldsymbol{w}_1(0), \cdots, \boldsymbol{w}_i(0), \cdots, \boldsymbol{w}_L(0) \}$ を与える. T =(最大学習回数),τ =(学習回数).
[Step b2] 学習 :
(b2.1) 入力データ $\boldsymbol{v}$ を選択する.
(b2.2) 入力データと参照ベクトルの距離によりランク $(\boldsymbol{w}_{i0}, \boldsymbol{w}_{i1}, \cdots, \boldsymbol{w}_{iL})$ づけを行なう. ここで, $\boldsymbol{w}_{i0}$ は入力データに一番近い参照ベクトルを表す.
(b2.3) 次式に従ってすべての参照ベクトルを更新する.

$$\Delta w_i = \epsilon \cdot h_\lambda(k_i(v, w_i)) \cdot (v - w_i), \quad (9)$$

ここで, $k_i(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}_i)$ は入力 $\boldsymbol{v}$ と参照ベクトル $\boldsymbol{w}_i$ との関係に依存し, $k_i = 0$ に対して一定値になり, 増加する k_i に対しては 0 に減少する. $\tau \leftarrow \tau + 1$. $h_\lambda(k_i(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}_i)) = exp(-k_i(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}_i)/\lambda)$ また, $0 < \epsilon < 1$ を満たす.
[Step b3] 終了条件 :
もし $\tau = T$ なら終了, それ以外なら Step b2 へ.

□

3.2 確率密度の導出

ベクトル量子化を用いて, 入力空間を近似する. 入力データは, 確率密度を持っていてそれに従って入力される. 確率密度は, ある入力データ $\boldsymbol{x}_i$ に対して, 入力空間上で近いデータとの出力空間上の出力の差によって得られるため, 出力空間での変化のある入力データほど高い確率密度を得る. すなわち, 出力空間で変化の激しい領域の入力データほど出現頻度が高くなるため, 参照ベクトル (ファジィルール) はその領域に多く分布するこ

とになる. 以下に, 入力データの出現頻度を決定する確率密度の導出法について紹介する.

1. ある入力データ$\boldsymbol{x}_i$に対して, その近傍にある入出力データを入力空間での距離によりランクづけをする. ここで, i, jはデータ番号をあらわす.

$$x_{il} = \min_{l}\{\|x_i - x_j\|\}, \quad l = 1, \cdots, M. \tag{10}$$

ここで, min_lはl番目に小さい値を計算する. $\boldsymbol{x}_{iM}$は$\boldsymbol{x}_i$に対してM番目に近いデータを表す.

2. 次式により入力データ$\boldsymbol{x}_i$の出力空間における変化の度合を決定する.

$$D_{il} = \sqrt{(x_{il} - x_i)^2}\ , \tag{11}$$

$$H(x_i) = |\sum_{l=1}^{M} \frac{y_i - y_{il}}{D_{il}}|\ . \tag{12}$$

ここで, D_{il}は$\boldsymbol{x}_{il}$と$\boldsymbol{x}_i$の距離を表す.

次式により, 各入力データの確率密度が決定される.

$$p(x_i) = \frac{H(x_i)}{\sum_{j=1}^{P} H(x_j)} \tag{13}$$

3.3 ファジィ推論ルールの生成的構築法

本稿で提案するベクトル量子化を用いたファジィ推論ルールの生成的構築法を示す.

提案アルゴリズム

[STEP 1] 初期化 :
初期参照ベクトル数Lを決定する. 最大学習回数Tを決定する. 推論誤差の閾値$T1$, 推論誤差の変化率の閾値$T2$を決定する.
[STEP 2] 入力空間の近似 :
3.2節の確率密度を持つ入力データを近似する.
Step b1 ~ Step b3 を行なう.
[STEP 3] ファジィルールの生成 :
STEP 2で得られた参照ベクトルの位置を各ファジィ推論ルールの初期中心位置とする. ここで, 参照ベクトルと同じ数のファジィルールが生成される. 各ファジィ推論ルールの幅は入力空間において最も近いファジィルールとの距離によってそれぞれ決定される. ファジィルール間の距離が大きいほど幅は大きくなる. 後件部の実数値は, 各ファジィルールの中心値 (参照ベクトル) に最も近い入力データの出力値とする.
[STEP 4] 学習 :
Step a1 ~ Step a6 を行なう.
[STEP 5]
推論誤差$E(t)$と推論誤差の変化率$\Delta E(t)$を次式により求める.

$$E(t) = \frac{1}{P}\sum_{p=1}^{P}|y^{rp} - y^{p}| \tag{14}$$

$$\Delta E(t) = E(t) - E(t-1) \quad for\ \ t > 1 \tag{15}$$

[STEP 6]
$\Delta E(t) \leq T2$ ならば STEP 7 へ.
$\Delta E(t) > T2$ ならば STEP 4 へ.
[STEP 7] 終了条件 :
$\Delta E(t) > T1$ ならば 参照ベクトル数$(L \leftarrow L+1)$を1つ増やして, STEP 2 へ.
$E(t) \leq T1$ ならば終了.

□

4 数値シミュレーション

本手法の有効性を示すため, 既知の関数よりいくつかの入出力データをあらかじめ用意し, それをもとにその関数を同定するファジィ推論のシステムを構築する. ここでは次に示す3つの関数を用いた. すべての関数は2入力, 1出力とする.

$$(1)\ y = sin(\pi x_1^3) \times x_2$$

$$(2)\ y = \frac{sin(3\pi x_1^3) \times x_2 + 1.0}{2.0}$$

$$(3)\ y = \frac{sin(2\pi x_1^3) \times cos(\pi x_2) + 1.0}{2.0}$$

それぞれの関数の変数の定義域は [0,1] であり, 出力は [0,1] に正規化する. これを同定するにあたりP個の同定用入出力データ $(x_1^p, \cdots, x_m^p, y^{rp})$ を与える. 同定用データは, 各入力変数の定義域を13分割した196個のデータとする. 理想推論誤差T_1は3×10^{-3}, 推論誤差の変化率の閾値T_2は1.0×10^{-6}. 初期ルール数 (参照ベクトル数) は4とする.

実験結果を表1に表す. 推論誤差は, 評価用データに対する値である. 図2は参照ベクトル (ルールの初期中心位置) の分布の変化の様子を表す. (a) は初期ベクトル数による入力の近似を表す. (b) はルール構築途中のものである. (c) は, ルールが構築された時の参照ベクトル位置 (ルールの初期中心位置) を表している. (d) は構築されたルールの中心位置を表している. 図2から

表 1: 実験結果

関数	ルール数	学習回数	推論誤差
(1)	11	1099	0.00311
(2)	19	757	0.01743
(3)	17	362	0.00688

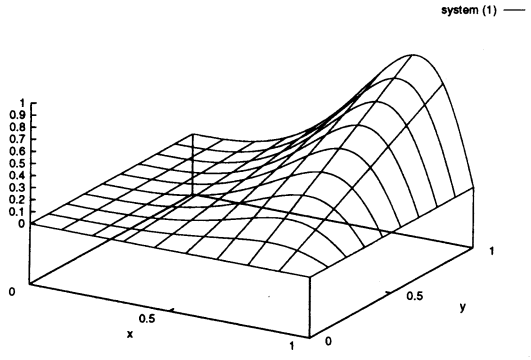
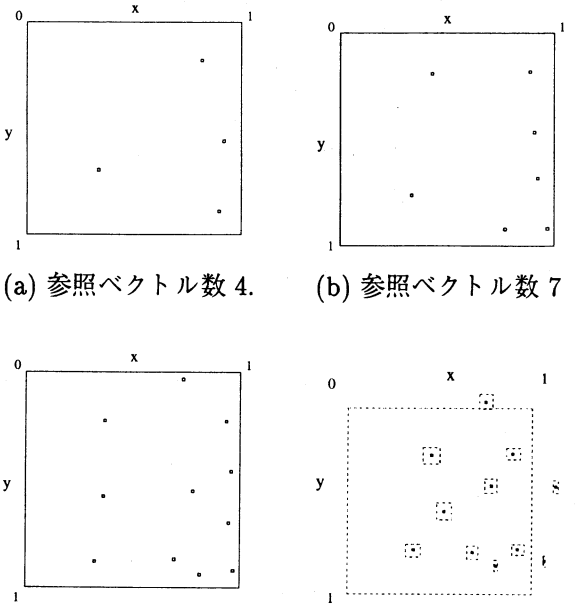


図 1: 関数 (1)



(a) 参照ベクトル数 4. (b) 参照ベクトル数 7

(c) 参照ベクトル数 13, 終了状態 (d) 構築されたファジィ, ルール

図 2: 関数 (1) の入力データに対する参照ベクトルの分布の変化と構築されたルールの中心位置

わかるように, ファジィ推論ルールの初期配置を入出力データより適当な位置に分布させることができる. すなわち, 出力空間の変化のある領域にルールの中心位置を分布させられる.

5 まとめ

本稿では, ベクトル量子化によるファジィも推論ルールの生成的構築法を提案した. 出力空間を考慮した確率密度を与えられた入力データをベクトル量子化を用いて近似することにより, 参照ベクトルの位置はファジィルールの適当な初期中心値となる. 本手法の有効性を数値シミュレーションにより示した.

参考文献

[1] H.Nomura, I.Hayashi and N.Wakami: "A Learning Method of Fuzzy Inference Rules by Descent Method ", FUZZ-IEEE/IFES'92,pp.203-210.

[2] H.Takagi, T.Kouda and Y.Kojima: "Neural-networks designed on Approximate Reasoning Architecture", Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems,Vol.3,No1,pp.133-141,1991.

[3] A.Ishihara, T.Takagi and S.Nakanishi: "Constitution of Fuzzy Inference by a Kohonen Network", Proceeding of 9th Fuzzy System Symposium,pp.425-428,1993.

[4] S.Horikawa and A.Tsukamoto: "Composition Method of Fuzzy Classification Systems Using Self-Organizing Feature Map", Proceeding of 12th Fuzzy System Symposium,pp.639-642,1996.

[5] M.Umano,T.Fukunaka,I.Hatono and H.Tamura: "Extraction of Fuzzy Rules Using Fuzzy Neural Network with Learning Vector Quantization and Backpropagation with Forgetting", Proceeding of 8th Fuzzy System Symposium,pp.815-818,1995.

[6] K.Kishida, H.Miyajima, S.Fukumoto and S.Murashima: "Some note of constructing fuzzy inference rule", Proceeding of 12th Fuzzy System Symposium,pp.645-648,1996.

[7] T.Nomura and T.Miyoshi: " An Adaptive Rule Extraction with the Fuzzy Self-Organizing Map and a Comparison with Other Methods", Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems,Vol.8,No.2, pp.347-357,1996.

[8] T.Martinetz, S.Berkvich and K.Schulten: "Neural-Gas Network for Vector Quantization and its Application to Time-Series Prediction", IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.4, No.4, pp558-569, 1993.

問い合わせ先 :
〒 890 鹿児島市郡元 1-21-40
鹿児島大学 工学研究科 システム情報工学専攻
岸田 一也
TEL 099-285-8422
FAX 099-285-8422
E-mail kazuya@ics.kagoshima-u.ac.jp

FRB2-4

ニューラルネットワークによる学習グループ構成問題の解法

Solution Method for Constructing Learning Groups by Neural Network

宮地 功
MIYAJI, Isao
岡山理科大学総合情報学部
Faculty of Informatics, Okayama University of Science

In this paper, we propose a approach for solving a learning group problem (LGP) by neural network. We need a learning group in order to do cooperative group pattern of teaching method in elementary school. The LGP is to partition pupils in a class into some groups so as to maximize the strength and number of selecting pupils in a group by using the matrix represeted friendship relation.

1．は じ め に

学校では，いじめが起こらないように，不登校になる児童が出ないように予防することが大切である．このような問題が起きるとパニックに襲われ，急場凌ぎの対処で精一杯ということになる．いじめを予防し，不登校児が生じないように，学級活動を本気ですることが必要である．そのためには，学級の人間関係を時々調べて，把握することが大切である．その知見から児童の指導方法を考える必要がある[2]．

学級の人間関係を把握するために，図1のような間隔尺度法による「友達調べマークシート」[4]によって，構成員全員による全員に対する選択する強さの度合r_{ij}とその理由が得られる[5]．r_{ij}は児童iが児童jを選択した強さを表す．そのr_{ij}から友達関係行列 $R=(r_{ij})$, $0 \leqq r_{ij} \leqq 1$, $r_{ii}=0$ $(i,j=1,2,\cdots,n)$を作る．この友達関係行列から，共同学習をする学習グループを適切に行い，お互いに親密な友達関係を作るきっかけが作れるように配慮することが重要である．児童をL組の学習グループに分ける問題LGPを考える．数学モデルとして問題LGPを0-1多目的整数計画問題[1, 11]として定式化した[6]．

友達関係行列Rを用いて，問題LGPは，制約条件(1)児童は唯一の学習グループに属する,および(2)学習グループを構成する男女の人数を与えられた数にするの下で，4目的(3)学習グループの選択強さの和,(4)学習グループの選択数の和,(5)学習グループの選択強さの最小値,および(6)学習グループの選択数の最小値を最大化する児童の組合せを求める問題である．

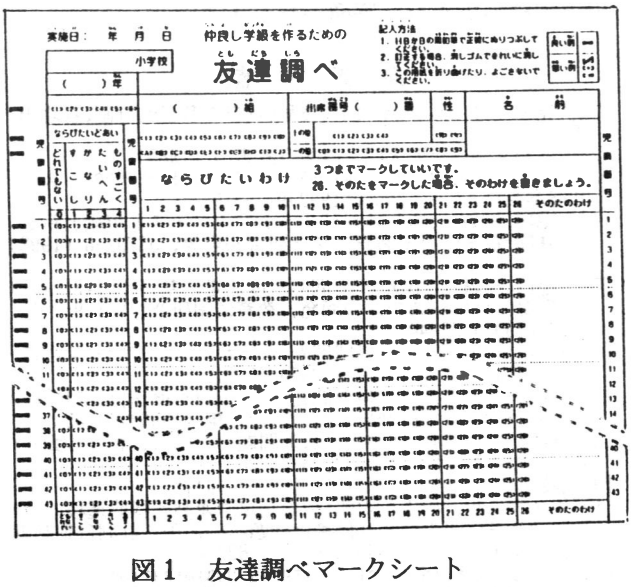


図1　友達調べマークシート

近似解を短時間に得る方法については，従来から研究が行われている．その1つとして，問題LGPのヒューリスティック解法を既に提案した[7]．近似解を得る1つの方法として人間の神経回路網を人工的に構成してコンピュータが不得意なパターン認識などの直感的な判断能力を高度化しようとするニューラルネットワークがある．ニューラルネットワークに対してエネルギーと呼ばれる量を定義し，その量が減少するようにして，最適化問題を解く試みがある[3, 8, 9, 10]．

本研究では，以下に問題LGPの定式化を示し，LGPをニューラル表現し，動作式を示し，学習グループ構成の近似最適解を導き出す解法を提案する．

2．学習グループ構成問題(LGP)

次のように記号を定義する．

$\{1,2,\cdots,n\}$：学級の児童の集合

n:学級の児童数,　　L:学習グループの数

x_{ik}：児童iがある学習グループkに 属するか属しないかを表す2値決定変数

M：学級内の男子の集合,　　W：学級内の女子の集合

b_{ij}：児童iが児童jを選択したかどうかを表す2値定数

$$b_{ij}=\begin{cases}1, & r_{ij}\geqq 0\\ 0, & r_{ij}\leqq 0\end{cases} \quad (i,j=1,2,\cdots,n)$$

c_{kM}：学習グループkを構成する男子の数

c_{kW}：学習グループkを構成する女子の数

c_k：学習グループkを構成する児童数$c_k=c_{kM}+c_{kW}$

学習グループ構成問題LGPは以下の制約式(5),(6),(7)の下で目的(1),(2),(3),(4)を達成する問題である．

$$\max \quad z_1=\sum_{k=1}^{L}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} r_{ij}x_{ik}x_{jk} \qquad (1)$$

$$\max \quad z_2=\sum_{k=1}^{L}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_{ik}x_{jk} \qquad (2)$$

$$\max \quad z_3=\min_{k=1}^{L}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} r_{ij}x_{ik}x_{jk} \qquad (3)$$

$$\max \quad z_4=\min_{k=1}^{L}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_{ik}x_{jk} \qquad (4)$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{k=1}^{L} x_{ik}=1,\ i=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

$$\left.\begin{aligned}\sum_{i\in M} x_{ik}&=c_{kM}\\ \sum_{i\in w} x_{ik}&=c_{kw}\end{aligned}\right\}\ k=1,2,\cdots,L \tag{6}$$

$$x_{ik}=0 \text{ or } 1,\ i=1,2,\cdots,n;k=1,2,\cdots,L \tag{7}$$

3．ニューロネットワークの構成法

3.1 問題LGPのニューラル表現

ここでは，本問題をニューロネットワークによって，表現する方法を考える．本問題では，目的関数に学習グループ内での選択強さの最小値と選択数の最小値，学級全体での選択強さの和と選択数の和がある．これら４つの目的関数の関係を考慮して，図2のようなL×n個のニューロンを用意する．児童ｉが学習グループに属していればニューロンの出力が１の値をとり，属していなければ０の値をとる．図2において，黒丸●はニューロンが発火していることを表し，その出力が１であることを示す．白丸○はニューロンが発火していなくて，出力が０であることを示す．友達関係行列の要素r_{ij}をニューロンiとjの結合の強さと考える．

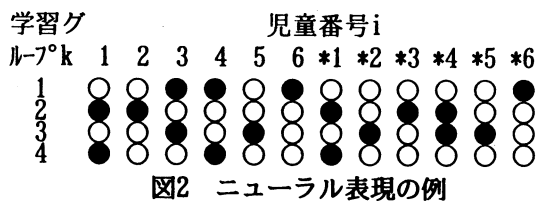


図2　ニューラル表現の例

3.2 問題LGPの動作式

動作式とは，ニューロンが問題解決を目指して動くようにするための式であり，各ニューロンの接続を決定する[8,9]．問題LGPの決定変数が0-1なので，MuCulloch-Pittsのモデル[8]を用いて，i列目k行目のニューロンの動作式を以下に導く．

目的関数として「学習グループの選択強さの和を最大化する」$f_1(k)$，「学習グループの選択数の和を最大化する」$f_2(k)$，「学習グループの選択強さの最小値を最大化する」$f_3(k)$，「学習グループの選択数の最小値を最大化する」$f_4(k)$の４つの項は次のように表せる．

$$f_1(k)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} r_{ij}x_{ik}x_{jk} \tag{9}$$

$$f_2(k)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_{ik}x_{jk} \tag{10}$$

$$f_3(k)=\min_{k=1}^{L}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} r_{ij}x_{ik}x_{jk} \tag{11}$$

$$f_4(k)=\min_{k=1}^{L}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_{ik}x_{jk} \tag{12}$$

ここで，x_{ik}とx_{jk}はニューロンの出力を表す．x_{ik}はk行目i列目のニューロンが発火しているかどうかを表し，学習グループkに児童iが所属しているかどうかを表す．

制約条件として「児童はいずれか唯一の学習グループに属する」$f_5(i)$，および「学習グループは指定された人数で構成する」$f_6(k)$の２つの項は，以下のような式で表せる．

$$f_5(i)=\left(\sum_{k=1}^{L} x_{ik}-1\right) \tag{13}$$

$$f_6(k)=\left(\sum_{i\in M}^{n} x_{ik}-c_{kM}\right)+\left(\sum_{i\in w}^{n} x_{ik}-c_{kw}\right) \tag{14}$$

ニューラルネットワークの状態が極小値に陥ったとき，そこから脱出するための制御を行うhill-climing項を次のように設定する．

$$h\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{L} x_{ik}-n\right)+h\left(\sum_{i=1}^{n} x_{ik}-c_k\right) \tag{15}$$

ここで，h(x)はh(x=0)=1であり，h(x≠0)=0である．(9)～(15)の式を用いて，目的関数と制約式を同じ式に表現して、最終的な動作式は次のようになる．

$$\frac{dU_{ik}}{dt}=-\alpha f_1(k)-\alpha f_2(k)-\beta f_3(k)-\beta f_4(k)+\gamma f_5(i)+\gamma f_6(k)-\delta h(f_7)-\delta h(f_8) \tag{16}$$

ここで，$\alpha,\beta,\gamma,\delta$は各関数の重みであり，ニューラルネッワークができるだけ速く平衡状態になるように決定する．また，$f_7=\Sigma^{n}_{i=1}\Sigma^{L}_{k=1}x_{ik}-n$，および$f_8=\Sigma^{n}_{i=1}x_{ik}-c_k$である．

4．問題の解法

本問題の解法を説明する．0.5の同確率で1か0の乱数を発生させ，これをL×n個のニューロンの初期状態とする．この初期状態から各ニューロンの入力値U_{ik}を動作式にしたがって変えていく．そのために，次の式を用いて，入力値の変化量$dU_{ik}(t)$を微少ずつ，段階的に変化させる．

$$U_{ik}(t+1)=U_{ik}(t)+dU_{ik}(t),\ \begin{matrix}i=1,2,\cdots,n;\\ k=1,2,\cdots,L\end{matrix} \tag{17}$$

この式の計算は数値計算の手法を用いて行う。この計算をニューラルネッワークが平衡状態になるまで繰り返す．すべてのニューロンに矛盾がなくなれば，次のようになる．

$$dU_{ik}(t)=0,\quad i=1,2,\cdots,n;\ k=1,2,\cdots,L \tag{18}$$

このときのニューロンの状態が学習グループの構成案の近似最適解となる．

謝辞：「友達調べ」データを提供して頂いた岡山市内の小学校の先生方に感謝いたします．

参　考　文　献

[1]伏見多美雄,福川忠昭,山口俊和:経営の多目的計画,森北出版（1987).
[2]河井芳文:ｿｼｵﾒﾄﾘｰ入門，みずうみ書房（1985).
[3]喜多一:Hopfield型ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄﾜｰｸとｼﾐｭﾚｰﾃｯﾄﾞｱﾆｰﾘﾝｸﾞ，人工知能学会誌，Vol.7,No.6(1992)970-979.
[4]宮地功,岸誠一:新しいソシオメトリックテスト用紙と新しい指標の提案，日本教育工学会研究報告集，JET92-6（1992）23-28.
[5]宮地功,岸誠一,小孫康平:間隔尺度測定に基づくｿｼｵﾒﾄﾘｯｸﾃｽﾄの提案と分析システムの開発，教育情報研究，Vol.9, No.2（1993）33-44.
[6]宮地功:学習グループ構成問題,日本ｵﾍﾟﾚｰｼｮﾝｽﾞﾘｻｰﾁ学会春季研究発表会ｱﾌﾞｽﾄﾗｸﾄ集（1995）20-21.
[7]宮地功:学習グループ構成問題のﾋｭｰﾘｽﾃｨｯｸ解法,日本ｵﾍﾟﾚｰｼｮﾝｽﾞﾘｻｰﾁ学会春季研究発表会ｱﾌﾞｽﾄﾗｸﾄ集（1996）64-65.
[8]武藤佳恭:ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄﾜｰｸの最適化問題への応用，ｵﾍﾟﾚｰｼｮﾝｽﾞ・ﾘｻｰﾁ，Vol.37, No.7（1992）324-330.
[9]武藤佳恭:ﾆｭｰﾗﾙｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞ（1996）ｺﾛﾅ社.
[10]和久津拓也，相吉英太郎:制約充足型連動式状態遷移ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄﾜｰｸとその組み合わせ最適化問題への応用，計測自動制御学会論文集，Vol.31, No.5（1995）622-630.
[11]Steuer, R.E.:Multiple Criteria Optimization (1986) John Wiley& Sons.

FRB3-1

知識ベースアプローチによるニューラルネットワークを用いたファジィルールの抽出並びに高血圧発症モデルへの適用

Knowledge Based Approach to Structure Level Adaptation of Neural Networks -Modeling of Occurrence of Hypertension-

○大場和宏 *1)，市村匠 *1)，田崎栄一郎 *1)，高橋英孝 *2)，吉田勝美 *2)

Kazuhiro Ooba,Takumi Ichimura,Eiichirou Tazaki,Hidetaka Takahasi and Katsumi Yoshida

*1)桐蔭横浜大学　工学部　制御システム工学科

Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

*2)聖マリアンナ医科大学　公衆衛生教室

Department of Public Health, St.Mrianna Unversity School of Medicine

Abstract:

In BP learning, the regularities of network appear on hidden neurons and it is possible to deduce the extraction of rules or knowledge from them. In many cases, however, there is no clear explanation on the relation between inputs and outputs because it is a black box. Since the structure are predetermined to learn only the relations between input and output characteristics of training data, it is difficult to extract explicit rules from such a network structure. To avoid such a problem, Towell et al. proposed a method in the focus on the cooperation prior knowledge in the network formulation. The method enables to introduce intermediate assumptions into its network structure and the network is trained on examples under the structure. Furthermore, we must reach the optimal network structure to extract fuzzy rules from the network. Then, the hidden neurons are generated/annihilated respectively based on Structure Level Adaptation which can grow a suitable configuration of network on the basis of the observation of change of connection weights and the output activity of hidden neurons during the training phase. Because it can construct an optimal network structure, we can expect to give a clear explanation on the relation between inputs and outputs. To verify the effectiveness of the proposed method, we develope a model of the occurrence of hypertension and extract fuzzy rules from the network, and hereby the obtained fuzzy rules are comparison with priori knowledge.

1. はじめに

ニューラルネットワークによる推論システムは既に試みられているが、通常のニューラルネットワークでは各層のニューロンが全て結合しているため中間仮説が設定された専門家の知識をそのままネットワークの構造上に反映させにくい。一般に中間仮説の設定は複数個の入力が与えられた結果として１つの情報を形成するように行なわれている。このような考えに対しＫＢＡＮＮ(Knowledge Based Artificial Neural Networks)が提案されている。[1]

これによりあらかじめ与えられた専門家の知識を前知識として中間層の数、各中間層のニューロンの数、また、それらの結合状態を決定でき、さらに、この構造を用いて教師データに対する学習を行うことが可能となる。このとき中間層ニューロンに対し中間仮説的なの意味付けを行なうことが可能であると考えられる。

ところが、この方法では学習中に重みの変化が大きく、安定しない状態のニューロンが存在することがある。これに対し、構造適応型ニューラルネットワークによる中間層ニューロン生成アルゴリズムを導入し、最適であると考えられるネットワーク構造を構築する。さらに、このネットワーク構造の変化により、専門家から与えられた知識も変化していることが当然考えられる。従って、このネットワーク構造からファジィルールの抽出を試み、[2] 専門家から与えられた知識との比較を行う。本論文では、高血圧発症モデルの構築をし、[3] さらに、構築されたネットワークからファジィルールの抽出を行い、提案した方法の有効性を検証する。

2．知識ベースに基づくニューラルネットワーク

この節では知識ベースに基づくニューラルネットワークの構築の手法として、ＫＢＡＮＮを用いた知識ベースによるニューラルネットワークのアルゴリズムについて示す。

STEP 1)

１つの前件部命題に対して、２種類の後件部命題がある場合、そのルールの階層構造を明確にできないため、図１のようにその後件部の全てのルールを２つのルールとして書き直す。

STEP 2)

知識ベースをニューラルネットワークに適用するために、表１のように対応付けする。これにより全ての結合が決定され、図２のように全ての結合重みとしきい値をもつネットワークが構築される。

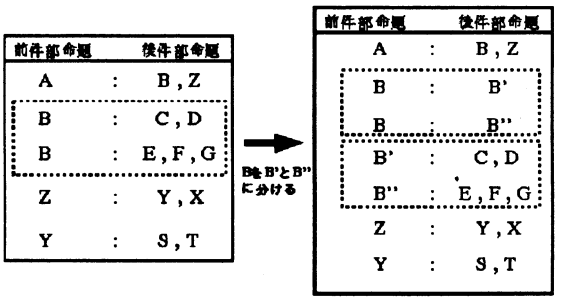


図1 ルールの書き直し

表1 知識ベースとニューラルネットワークの対応

知識ベース		ニューラルネットワーク
最終結果	⇔	出力ニューロン
入力データ	⇔	入力ニューロン
中間仮説	⇔	隠れニューロン
従属関係	⇔	重み付けされた結合

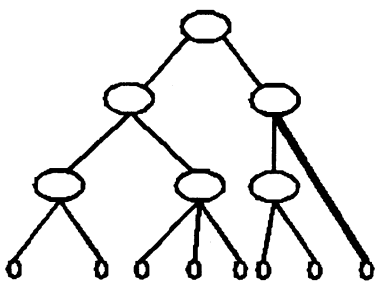


図2 ニューラルネットワークへの変換後のネットワーク

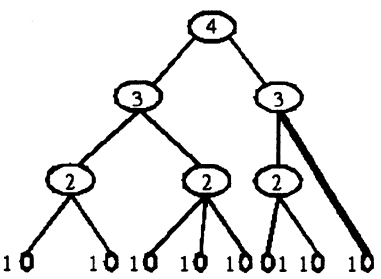


図3番号付けされたネットワーク

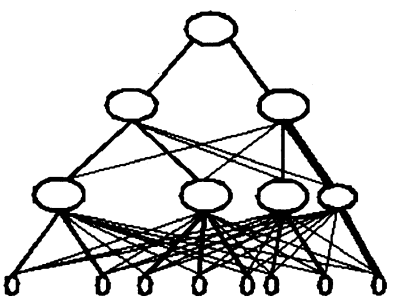


図4ニューロンの付加

STEP 3)

ネットワークにおいて，計算の順序を定めるために、図3のように入力ニューロンを最下位として定めたニューロンレベルによって各層のニューロンに番号をつける。

STEP 4)

図2のようにパスを持ち1つ上の層に直接結合していないパスがあれば、そのパスに対しニューロンを付加する。図4は、図2の太線で表されたパスにニューロンを付加したものを示している。

STEP 5)

初期値として重みとしきい値をランダムに与え、これをもとにバックプロパゲーション学習を行う。

このようなＫＢＡＮＮの学習においてニューロンが振動している状態がある。これは構造適応型ニューラルネットワークのニューロンが不足している状態と考えられるので、ここに、ニューロン生成アルゴリズムを導入する。

3．構造適応型ニューラルネットワーク

最適な隠れニューロン数を学習期間中に決定できる構造適応型ニューラルネットワークがある。[4] これは、ネットワークの学習期間中に観察される次のような動作に基づいてニューロンの生成／消去を行うアルゴリズムである。

ニューラルネットワークにおいて学習が行なわれている間、学習するためにニューロンが不十分である場合、長い学習期間の後でさえ重みベクトルは大きく発散してしまう。この場合、親の属性を継承するようなニューロンを新しく生成する。

ニューロン生成アルゴリズム

中間層のニューロンにおいて、学習時の重みの変分をニューロン生成の指標とする。その中間層ニューロン i の重みの変分は以下に定義されるような，Walking Distance (WD)と呼ばれる測度を用いる。

$$WD_i[n] = \sum_{m=1}^{n} Met(\vec{W}_i[m], \vec{W}_i[m-1]) \qquad (1)$$

ここで、Met はベクトル間の距離を表わし、最も容易に考えられるユークリッド距離、すなわち、

$$EuMet(\vec{X}, \vec{Y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2} \qquad (2)$$

と与える。ただし、Nは次式を満たすものである。

$$N = Max(Dim(\vec{X}), Dim(\vec{Y})) \qquad (3)$$

(1)のＷＤは、重みベクトルの変化の距離を表わしており、$WD_i[n]$は連続指標時間 n までにニューロン i に対し変化した距離の総和である。 $\vec{W}_i[m]$は任意の時間mでの重みベクトルの位置を表わす。これらにより、重みベクトルの変化を測ることができ、次式のように定義される。

$$Wd_i[n] = \gamma_W WD_j[n-1] + (1-\gamma_W)\,Met(\vec{W}_j[n], \vec{W}_j[n-1]) \quad (0 < \gamma_W < 1) \quad (4)$$

これらをもとに，中間層における WD の変化を観察し，

$$WD_i[n] > \theta_G \quad (5)$$

を満たしているとき，ニューロンの生成が行われる。ただし，θ_G は予め定められたパラメータである。

4．ファジィルールの抽出

3 節で求められたネットワーク構造は最適であると考えられる。ところが、ここで得られたネットワーク構造は予め与えられたものに対し変化している場合がある。このため、このネットワークにおける入出力関係を明確にするために、ファジィルールを抽出し、これと前知識を比較する必要がある。

まず、重みベクトルの大きさを[0,1]で構成される範囲に変換し、表 2 のように、その数値的真理値に一致する言語的真理値に変換する。これにより、各層の間にある結合を表わすファジィプロダクションルールとして次のような式を得る。

If X_i then Y_j (6)

ここで、X_i と Y_j は、それぞれファジィプロダクションルールの前件部と後件部を表わす。また、i は N-1 層のニューロンの番号であり、j は N 層のニューロンの番号である。

各層の間の結合の大きさの修正により、次式のように変換される。

If X_i then y_j is m true (7)

ここで、m は[0,1]に変換された数値的真理値に一致する言語的真理値を表わす修飾値として考えられる。さらに、図 5 に示すように、変化させることができ、次式のようになる。

If x_i is m true then Y_j (8)

ここで仮に結合の大きさがある値よりも小さいときシステムに影響がないとみなされ、前件部から消去される。次にファジィプロダクションルールの後件部は前件部と同様に構成することができる。ここで N 層と N+1 層の間にある結合を表すファジィプロダクションルールとして次のような式を与える。

If Y_j then Z_k (9)

Z_k はファジィルールの後件部に対する一致度を表し、k は N+1 層におけるニューロンの番号を表す。また、結合の大きさの値により次式のように変形できる。

If Y_i then z_k is n true (10)

ここで、n は m と同じような修飾子を表す。この結果、次式のようなファジィプロダクションルールを得ることができる。

If x_i is m true Then z_k is n true (11)

表 2 言語的真理値と数値的真理値

言語的真理値	数値的真理値
Very True	$0.925 < \tau(x) \leqq 1.000$
True	$0.775 < \tau(x) \leqq 0.925$
Rather True	$0.580 < \tau(x) \leqq 0.775$
Unknown	$0.420 < \tau(x) \leqq 0.580$
Rather False	$0.225 < \tau(x) \leqq 0.420$
False	$0.075 < \tau(x) \leqq 0.225$
Very False	$0.000 \leqq \tau(x) \leqq 0.075$

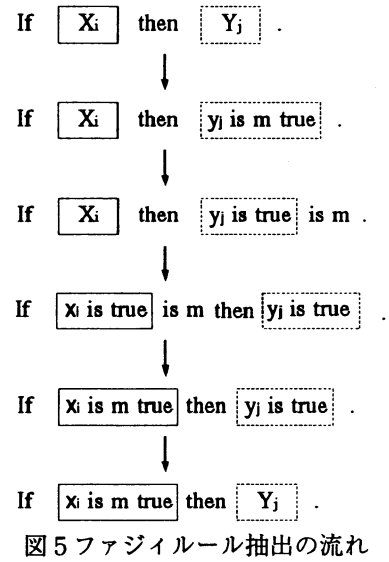


図 5 ファジィルール抽出の流れ

5．高血圧発症モデルからのファジィルールの抽出

高血圧発症モデルに対するデータが 1024 個あり、そこから発症したものを 100 個及び発症しなかったものを 100 個、それぞれランダムに抽出したものを教師データとして用いた。学習の結果、全てのデータに対し前向きの計算を行ったところ、全データに対し 95 %のデータが正確に推論された。ここで学習時において重みの変化が大きいニューロンがあり、図 6 のようにニューロンの属性を継承するように新しいニューロンを生成した。

このネットワークにおいて同じ条件のもとで学習を行なった結果、全データに対し 96.7 %のデータが正確に推論された。さらに、このニューロンが生成されたネットワーク構造に対し、表 2 で示される言語的真理値を用い，ファジィルールの抽出を行った。表 3 は新しいニューロンが生成されたことにより付加されたと考えられるルールであり，与えられた前知識での「体質」に対するファジィルールを意味している。これらの抽出されたファジィルールは専門医により矛盾のないルールであると判断された。

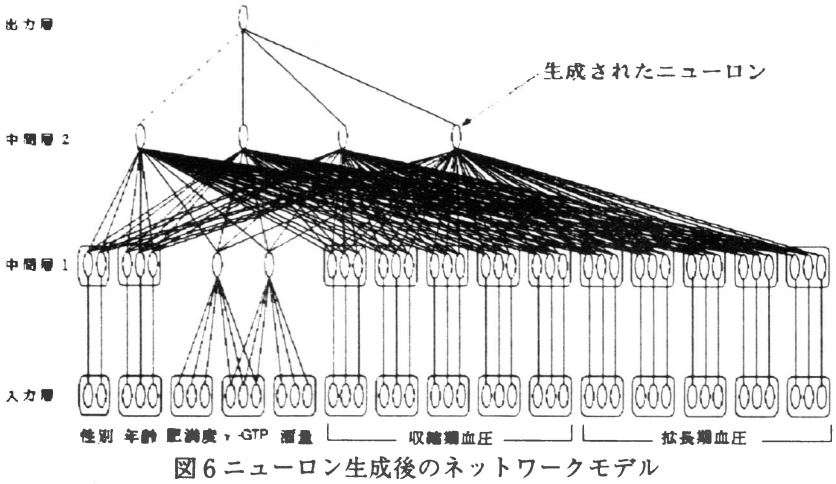


図6ニューロン生成後のネットワークモデル

表3ニューロン生成により新しく生じたファジィルール

中間仮説2	
the antecedent part	the consequent part
SBP(初回) is Rather True and SBP(2年目) is True and SBP(3年目) is Rather True and SBP(4年目) is Rather True and SBP(5年目) is Rather True and DBP(初回) is Rather True and DBP(2年目) is Rather True	体質 is True
性別 is 女 and 年齢 is Rather False and Fat dep is Rather False and Alcohol is Rather False and DBP(3年目) is Rather False and DBP(4年目) is False and DBP(5年目) is Rather False	体質 is False

6．結論

本研究において、与えられた知識の構造をネットワークに取り入れることにより中間仮説が設定されたデータを学習することができた。しかし、重みの変化が大きく安定しない中間層ニューロンが存在し、最適な構造であるとは考えにくい。ここで、構造適応型ニューラルネットワークによるニューロン生成アルゴリズムを適用させることにより、中間層のニューロンが増え、最適と考えられるネットワーク構造が得られた。

更に、このネットワークからファジィルール抽出を行った結果、抽出されたファジィルールは専門医により妥当なものであると判断された。これにより、ネットワーク内部の入出力関係に明確な解釈を与えることができたと言える。また、新しく生成されたニューロンが中間仮説的な意味を持つと判断され、構造の変化したネットワークから前知識の他にも新しい知識が発見することができた。

参考文献

[1]G.G.Towell and J.W.Shavlik,"Extracting Refined Rules from Knowedge - based Neural Networks" ,Machine Learning, vol.13,pp.71-101(1993)

[2]市村　匠，高野　猛，田崎　栄一郎，吉田　勝美，「構造適応型ニューラルネットワークを用いたファジィルールの抽出－肝胆道系疾患の診断への適用－」，第10回ファジィシステムシンポジウム論文集，pp.683-686(1994)

[3]市村　匠, 大場　和宏, 田崎　栄一郎, 高橋　英孝, 吉田　勝美，「知識ベースアプローチによるニューラルネットワークを用いた高血圧発症モデルの構築」，第16回医療情報学連合大会論文集，pp.244-245(1996)

[4]E.Tazaki and T.Ichimura,"Reasoning and Learning Mathod for Fuzzy Rules Using Structure Level Adaptation of Neural Networks",Proc. of 1993 Intl. Fuzzy Systems & Intelligent Controls Conference(IFSIC'),pp.213-222(1993)

連絡先

〒225
横浜市青葉区鉄町1614番地
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
田崎　栄一郎
TEL : 045 - 974 - 5070　　FAX : 045 - 978 - 1311
Email : tazaki@intlab.toin.ac.jp

適応的自己組織化ネットワークとその温度分散制御システムへの応用

An Adaptive Self Organization Network and It's Application to a Distributed Temperature Control System

山川 烈[1], ○中村 めぐみ[2], 内野 英治[1]

Takeshi Yamakawa, ○ Megumi Nakamura, Eiji Uchino

[1] 九州工業大学 情報工学部

[2] 沖電気工業株式会社

[1]Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

[2]Oki Electric Industry Co., Ltd.

Abstract: The temperature control of a wide open area is currently carried out locally by a PID control method without any information exchange. If the heat sources and the loads are distributed complicatedly and change dynamically, it is very difficult to get the desired temperature distribution by using the conventional PID method. Here we propose an adaptive self-organization network, an improvement over the Kohonen's self-organization network, which is applicable to this kind of complicated control problem. The application results to the experimental model are also given.

1 はじめに

現在, 広域空間の温度制御は局部的な場所毎に行なわれている. また, 制御対象に複雑な負荷分布と熱源分布が動的に加わる場合, 制御対象の入出力特性は動的に変化する. そのため従来のPID制御方式では, このように複雑なシステムの温度制御は非常に難しい. そこで本報告では, Kohonenの自己組織化ネットワーク[1]を改良した適応的自己組織化ネットワークを提案し, それを多入力多出力系の温度制御に応用した結果を報告する.

2 適応的自己組織化ネットワーク

任意の特徴空間を自律的に学習する(自己組織化する)ネットワークモデルがKohonenにより提案されている[1]. しかし, そのモデルでは, 時間変化する特徴空間を学習することができない. そこで, 本研究では時間変化する特徴空間を自律的に学習する適応的自己組織化ネットワークを提案する. 自己組織化ネットワークとは, 特徴空間の位相構造を反映した重みベクトル空間を形成するものである.

2.1 ネットワークの学習

提案モデルは図1に示すように入力層, 出力層の2層からなる. 入力層の第i行j列のユニット$(i=1,\cdots,n; j=1,\cdots,n)$には, 図2に示すような, 大きさ$\tau_{ij}$ $(-1<\tau_{ij}<1)$を持つベクトル$\mathbf{x}_{ij}$が入力される. 入力層の各ユニットから, 入力ベクトル$\mathbf{x}_{ij}$が結合重み$\mathbf{w}_{pq}$ $(p=1,\cdots,m; q=1,\cdots,m)$を介して出力層の第$p$行$q$列のユニットに入力される(図3).

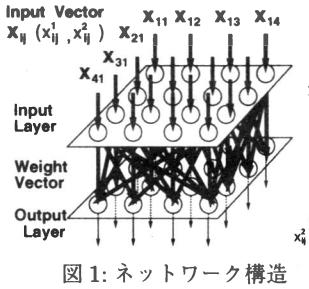


図1: ネットワーク構造

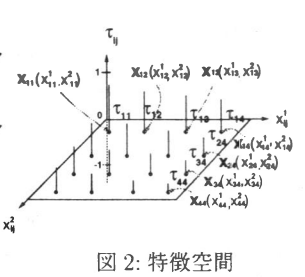


図2: 特徴空間

各入力ベクトル$\mathbf{x}_{ij}$に対して, 最大に反応するユニットcが式(1)により求められる.

$$c = \arg\min_{pq} \| \mathbf{x}_{ij} - \mathbf{w}_{pq} \| \qquad (1)$$

最大に反応するユニットcと, その近傍N_c内のユニットに対して式(2)により結合重みが更新される.

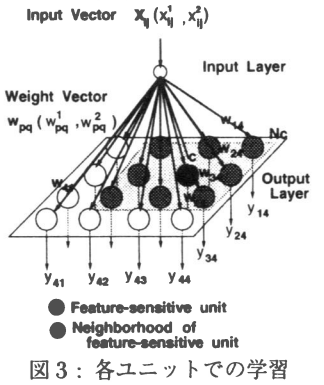


図3: 各ユニットでの学習

$$\mathbf{w}_{pq}^{new} = \mathbf{w}_{pq}^{old} + \alpha \cdot |\tau_{ij}| \cdot (\mathbf{x}_{|\tau_{ij}|=max} - \mathbf{w}_{pq}^{old}) + \beta(\mathbf{w}_{pq}^{initial} - \mathbf{w}_{pq}^{old}) \qquad (2)$$

ここで,

$\mathbf{w}_{pq}$: 近傍N_c内のユニットの結合重み

τ_{ij} : 入力ベクトルの強さ

α : 学習率 $(0<\alpha<1)$

β : ばね係数 $(\beta=1-\alpha)$

$\mathbf{w}_{pq}^{initial}$: $\mathbf{w}_{pq}$の初期状態の値

$\mathbf{x}_{|\tau_{ij}|=max}$: 入力層の第i行j列のユニットの近傍で$|\tau_{ij}|$が最大となる入力ベクトル$\mathbf{x}$

提案モデルが時間変化する特徴空間に適応できるのは次の理由からである.

- 学習率の固定
- 弾性項(弛緩項)の導入(式(2)右辺第3項).
- 最大反応ユニットとそのユニットの近傍に対する学習.
- 入力層の近傍で$|\tau_{ij}|$が大きいものに反応するような学習.

2.2 ネットワークによる自己組織化

本節では, Kohonenモデルとの比較を議論する. さて, Kohonenモデルでは“入力の強さ”という概念が考えられていないため単純に比較することはできない.

そこで，Kohonen モデルの学習式に“入力の強さ”を反映した式 $[K1]$, $[K2]$ を考え，この式により学習した結果と比較する．

$$[K1] \quad \mathbf{w}_{pq}^{new} = \mathbf{w}_{pq}^{old} + \alpha \cdot \tau_{ij} \cdot (\mathbf{x}_{ij} - \mathbf{w}_{pq}^{old})$$

$$[K2] \quad \mathbf{w}_{pq}^{new} = \mathbf{w}_{pq}^{old} + \alpha \cdot |\tau_{ij}| \cdot (\mathbf{x}_{ij} - \mathbf{w}_{pq}^{old})$$

結合重みベクトルで表される空間 $w_{pq}^1 - w_{pq}^2$ を自己組織化マップと呼ぶ．図4は自己組織化マップの初期状態である．シミュレーションでは，入力層のユニット数を 10×10 個，出力層のユニット数を 10 × 10 個，学習率 α を $0.8(\beta = 1 - \alpha)$ とした．

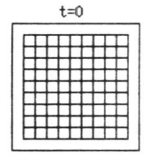


図4：自己組織化マップの初期状態

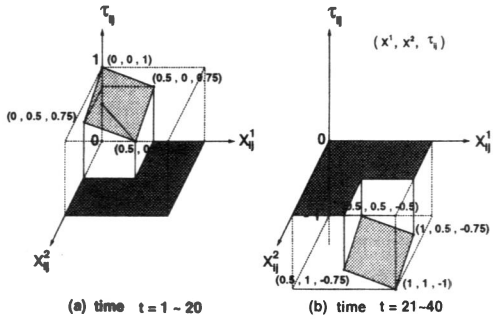


図5：特徴空間

図5の特徴空間は，入力ベクトル $\mathbf{x}_{ij}(x_{ij}^1, x_{ij}^2)$ とその大きさ τ_{ij} により張られた空間である．今，特徴空間が時刻 $t = 21$ で図5(a)から(b)へ変化するとして学習を行なう．学習により3次元の特徴空間が2次元の結合重みベクトル空間に位相保持写像（トポロジカルマッピング）される．図5の特徴空間内で τ_{ij} の大きい領域に結合重みベクトルが集まることで，ネットワーク内に特徴が取り込まれる．時刻 $t = 1 \sim 20$ では図5(a)の特徴空間を学習し，時刻 $t = 21 \sim 40$ では図5(b)の特徴空間を学習する．時刻 $t = 20$ と $t = 40$ の自己組織化マップ（トポロジカルマップ）を図6示す．

Kohonen のモデル $[K1]$ では，τ_{ij} が負になると発散し，モデル $[K2]$ では，過去の履歴を保存したままとなる（$t = 40$ の左上部で $t = 20$ の特徴が残っている）．このことから，Kohonen のモデルでは，特徴空間の変化に対応できていないことが分かる．一方，提案モデルでは変化に応じた自己組織化マップが形成されている．

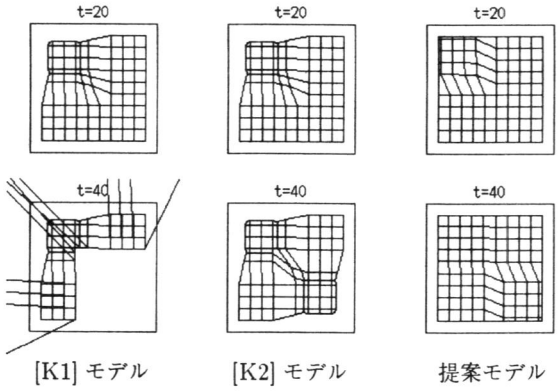


図6：自己組織化マップ（交点は結合重みベクトルを表し，線は結合重みベクトルの隣接関係を表す．）

3 実システムへの応用

図7に示す多入力多出力温度制御システムに対して，提案モデルを応用した．ネットワークにより制御対象の温度分布は自律的に学習され，学習によって形成された自己組織化マップを基にアクチュエータの操作量が決定される．

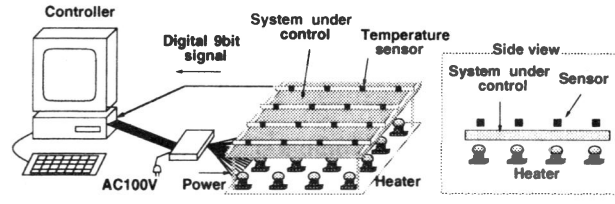


図7: システムの外観図 (16 入力 16 出力)

アルミ板（厚さ 0.6mm）を制御対象とした．制御対象の温度が均一に 30℃となった状態において，2℃の水が入った容器をアルミ板の適当な位置に置き，それを吸熱する負荷とした（時刻 t=0）．負荷を加えた付近のセンサ1と，負荷から少し離れた位置のセンサ2での過渡応答を，本手法による制御と PID 制御による1入力1出力の局所制御とで比較した（図8,9）．図の縦軸は温度誤差（目標温度 − センサ温度），横軸は制御回数（3秒毎に制御）である．ネットワークの学習率 α は 0.5 とした（$\beta = 1 - \alpha$）．センサの分解能は 0.5℃である．図より本手法の方がオバーシュートも抑えられ，オフセットも小さいことが分かる．図8で本手法にオフセットが残るのは，アクチュエータの発熱量が負荷の吸熱に比べて小さいためである．

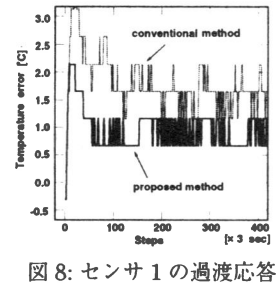


図8: センサ1の過渡応答

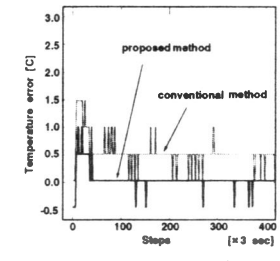


図9: センサ2の過渡応答

4 おわりに

本研究では，Kohonen の自己組織化ネットワークを改良した適応的自己組織化ネットワークを提案した．提案モデルでは，変化する特徴空間に適応した自己組織化マップが形成されることを確認した．また，提案モデルを実システムの多入力多出力温度制御系に応用した結果，PID 制御による1入力1出力の局所制御よりもオーバーシュート，オフセット共に抑えられていることを確認した．また，紙面の関係でふれなかったが，本手法が熱伝導率が高く，相互干渉の大きい制御対象に対して特に有効であることを確認している．

参考文献

[1] Teuvo Kohonen : "Self-Organization and Associative Memory", Springer-Verlag(1989).

[問い合わせ先]
山川 烈
〒820 福岡県飯塚市川津 680-4
九州工業大学 情報工学部 制御システム工学科
Phone: 0948-29-7712, Fax: 0948-29-7742
E-mail: yamakawa@ces.kyutech.ac.jp

FRB3-3

ニューラルネットを用いた負荷温度推定方式とその温度制御方式への応用

Load Temperature Inference System based on Neuralnets and Appliance to Temperature Control

甲斐　郁子　　原　由美子　　近藤　信二　　大森　秀樹
Ikuko KAI　Yumiko HARA　Sinji KONDOH　Hideki OOMORI

松下電器産業株式会社　電化・住設社　電化住設研究所　研究一部
MATUSHITA ELCTRIC INDUSTRIAL CO.,LTD.

Abstract

We developed new temperature control method which use load temperature inference system based on neural nets. We applied this method on induction heating cooking heater. We can get better control system of load temperature of IH-cooking heater.

1．まえがき

一般に調理器など熱機器の温度制御に於いて、調理物等の負荷温度を直接測定することは困難である。そこで温度センサにより間接的に温度測定を行うが、測定値と負荷温度の間には誤差が存在するという課題があった。本稿では、ニューラルネットワークを用いて測定値より制御対象の温度を推定することでこの誤差を低減する方式について述べる。

2．本論

ＩＨ調理器を例に取り、負荷温度推定方式とそれを応用した温度制御について説明する。

(1)伝熱モデル

ＩＨ調理器の熱伝達モデルを簡略化し、図１に示す熱伝達モデルを考える。負荷部、発熱体、センサ部それぞれの熱量バランスの式より負荷温度Ｔｗと温度センサによる測定値Ｔｓ及び電力Ｐの関係を求める。得られた式をさらに整理すると、式（１）に簡略化される。

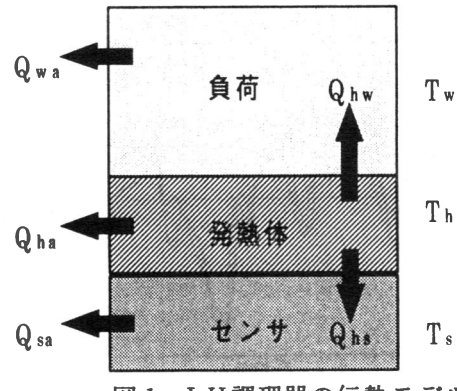


図１　ＩＨ調理器の伝熱モデル

$$Tw \fallingdotseq a\,Ts + b \cdot dTs/dt + c\,P \qquad \cdots (1)$$

ただし、ａ，ｂ，ｃは定数

式（１）より負荷温度Ｔｗは測定温度Ｔｓとその一次微分と電力量Ｐより推定できることがわかる。

Ｔｓ、ｄＴｓ／ｄｔ、Ｐの係数を算出することは困難を伴う。そこで、ニューラルネットワークを用いて式（１）を表現することで負荷温度推定部を構成し、その出力により温度制御を行うことを検討した。

(2)ニューラルネットワークの構成

本方式に使用したニューラルネットワークはシグモイド関数を使ったニューロンモデルを用いた典型的な階層型ニューラルネットであり、学習法則にはバックプロパゲーション法を用いた。

ネットワークの構成は、図2に示すように中間層一層、三入力一出力とした。

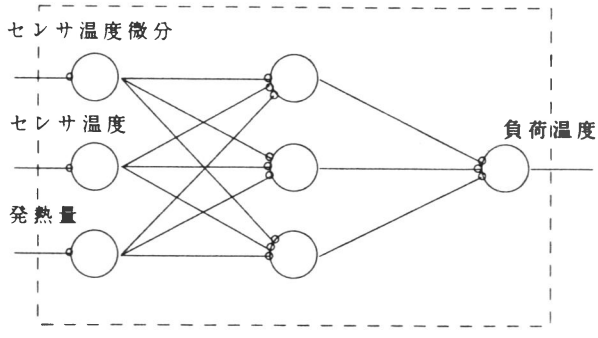
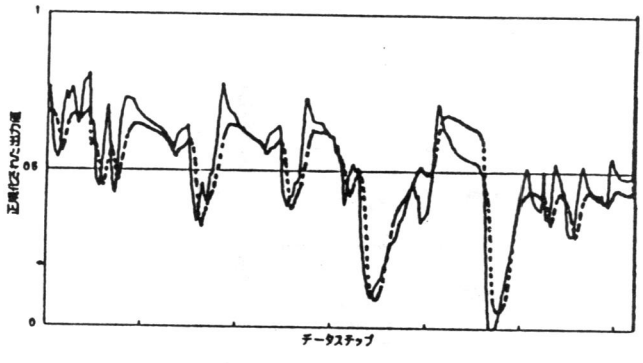


図2 ニューラルネットの構成

図3は学習結果の一例である。教師データに対する想起データの誤差は平均約6％、チェッキングデータに対する誤差は、平均約6％である。



—— 教師データ

…… 想起データ

図3ニューラルネットの学習結果

学習に用いる教師データとしては、負荷温度、負荷量を変化させて行った実験データを用いた。

このように学習させたニューラルネットを用いて負荷温度推定部を構成する。

(3)温度制御システムの構成例

図4にシステム構成の一例を示す。ＩＨ調理器の既存の温度センサからの情報を用いて、ニューラルネットワークにより構成される負荷温度推定部に於いて負荷温度の推定を行い、推定温度を基に電力を制御する。

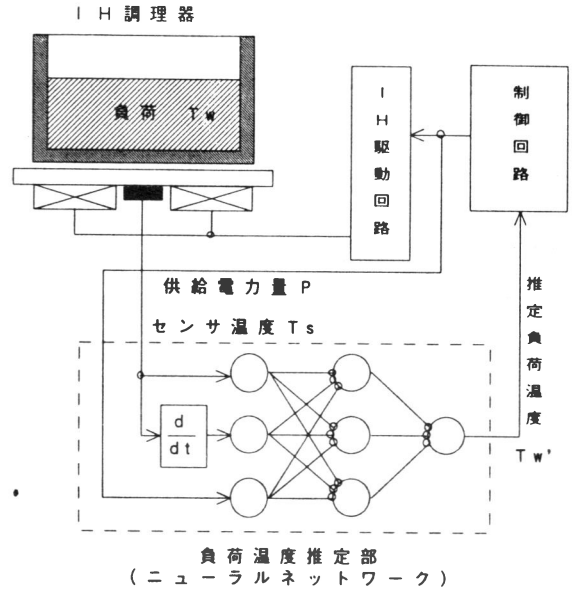


図4 システム構成

推定負荷温度による制御を行うことで、従来の温度センサの測定値をそのまま用いた制御方法よりも精度の高い負荷温度制御が可能になる。負荷追加実験（冷凍コロッケの揚げ物実験）の際の平均温度低下量が従来方式と比較して約６０％に低減できた。

3．まとめ

今回、ニューラルネットを用いた負荷温度推定による温度制御方式の開発を行った。熱伝達モデルをもとに入力パラメータを決定し、ニューラルネットの入力とした。従来の制御方式に対し負荷状態の変化に対する負荷温度の安定性を改善することが出来た。

問い合わせ先：
〒561 豊中市日出町２丁目２番８号
松下電器産業㈱ 電化･住設社
電化住設研究所 研究一部 電子第二研究室
甲斐 郁子 原 由美子
TEL:06-332-8754
FAX:06-332-7940

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRB4-1

DEAの理論と応用
Theory and Applications of DEA

上田　徹　Tohru UEDA
成蹊大学　Seikei University

This paper gives an outline of basic models of Data Envelopment Analysis (DEA) which attracts attention as a method which evaluates the efficiency of Decision Making Units (DMUs) and shows its applications in a variety of fields. Basic models involve CCR, BCC, the additive, the multiplicative and the minimum cost models. Applications are introduced, referring to Charnes, Cooper, Lewin and seiford:*Data Envelopment Analysis* (1994).

1　まえがき

近年，事業体の効率性を相対的に評価する手法として，DEA法（Data Envelopment Analysis）が注目されるようになってきている．DEA法は1978年にアメリカのテキサス大学のCharnes,Cooper,Rhodes[1]によって最初に提案されて以来，さまざまな角度から活発な研究活動が行なわれており，我が国でも論文などでしばしば紹介されるようになってきた．実践面でも，公共事業などを中心として事例研究が数多く報告されるようになっている（[2]の参考文献、[3]など）．

経営効率を評価する代表的な指標として収支率がしばしば用いられてきたが，収支率では収入と支出という2つの項目の比率だけに基づいた評価が行なわれることになり，それぞれの事業体の持つ特色や独自性などを反映した評価には不十分な場合がある．これに対し、DEA法では，例えば収入を更に細かく複数の項目に分けるなど，多数の項目を用いた相対的評価ができる．さらにDEA法では，効率的と考えられる事業体が形成する包絡線（envelopment：効率的フロンティア）が求められ，非効率的と評価された事業体は各項目をどれだけ改善すればこの包絡線に到達することができ，効率的になるかを知ることができる．すなわち，効率的となるための改善目標値を定量的に把握することができる．現在もDEA法の研究では分析目的に応じたさまざまなバリエーションが次々に提案されており，マネジメントサイエンスやオペレーションズ・リサーチの分野でのホットな研究領域であると言える．それと同時にまた応用研究や実務においてもこのような評価手法に対して熱い期待がかけられていることをうかがい知ることができる．

ここでは，DEAの基本モデルとそれらを使った応用モデルを紹介する．

2　DEAの基本モデル

例えば支出と収入の比である収支率は経営効率性を見る有力な手段であり，支出を収入を産み出すための入力，収入をその結果としての出力と見るとき，収入／支出（収支率の逆数）が大きい程，効率が良いと言える．しかし，入力や出力の数が増え，しかもそれらが必ずしも金額で計量できない場合には効率をどのように評価するか，適切な尺度を考えなければならない．また，すべての項目が金額で測れるとしても例えば入力個々の出力に与える影響は異なっており，単純に（出力の和）／（入力の和）で効率を測ることは適切でないことも多い．そのような場合に有効な方法としてDEA法がある．

2.1 CCRモデル

n個の事業体(DMU)に関するm個の入力データ$X=(x_{ij})\in R^{m\times n}$とs個の出力データ$Y=(y_{rj})\in R^{s\times n}$をもとに事業体DMU$J$ (=1,2,...,n)の効率性を測定するCCR (Charnes, Cooper and Rhodes)モデル[1]は次のように定式化される.

【分数計画問題CCR-IR (Input-oriented Ratio form】

$$\max D_J = \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rJ} / \sum_{i=1}^{m} v_i x_{iJ} \qquad (1)$$

$$\text{st.} \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} / \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} \le 1 \; ; \; u_r \ge 0 \; ; \; v_i \ge 0$$

【同値なLP問題CCR_D-I：入力 (Input) 指向】

$$\max \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rJ} \qquad (2)$$

$$\text{st.} \sum_{i=1}^{m} v_i x_{iJ} = 1$$

$$\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} \le \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} \; ; \; u_r \ge 0 \; ; \; v_i \ge 0$$

【同値なLP双対問題CCR_P-I：入力指向】

$$\min \theta_J \qquad (3)$$

$$\text{st.} \quad \theta_J x_{iJ} - \sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \ge 0$$

$$y_{rJ} - \sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} \le 0 \; ; \; \lambda_j \ge 0$$

式(1)または(2)はDMU$J(=1,2,...,n)$にとって最も有利なウェイトu_r, v_iを求めることを意味する。そのため1項目でも誰にも負けない項目があればその項目だけで評価すれば効率値を1にできるので一芸入試的評価も可能となる。

式(3)の制約は$\theta_J x_{iJ}$, y_{rJ}が効率的フロンティア（図1）の下側（生産可能領域）に包みこまれることを意味し、これがData Envelopment Analysis（方絡分析法）の由来となっている（すなわち、式(3)を主問題と捕らえている：CCR_P-Iのp）。

DMU$J(=1,2,...,n)$が効率的となるためには入力の余剰$\mathbf{s}_x=(s_{x1},s_{x2},...,s_{xm})$、出力の不足$\mathbf{s}_y=(s_{y1},s_{y2},...,s_{ys})$

$$s_{xi} = \theta_J x_{iJ} - \sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \; ; \; s_{yr} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} - y_{rJ} \qquad (4)$$

を解消しなければならない．ここで、

$$\theta_J = 1 \; ; \; \mathbf{s}_x = \mathbf{0} \; ; \; \mathbf{s}_y = \mathbf{0}$$

のとき、DMU Jは効率的といわれる.

式(2),(3)のLPは入力指向型のモデルと呼ばれる.出力指向型のCCR-Oモデルも同様に定式化できる.

CCRモデルでは、効率的フロンティアが座標軸の原点を通るので、原点を移動させれば効率値が変化する．すなわち、CCRモデルでは、データの原点移動（平行移動）に対して不変ではない.

2.2 BCCモデル

BCC_P-I モデルはモデルCCR_P-I に対して制約

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \qquad (5)$$

を追加したものである．また、CCR-IRに対しては$\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj}$を$(\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} + c)$で置き換えたモデルとなる.

CCRモデルでは式(1)の分数計画問題から分かるように分母分子を定数倍しても効率は変わらない.そこで規模の収穫が一定であるといわれるのに対

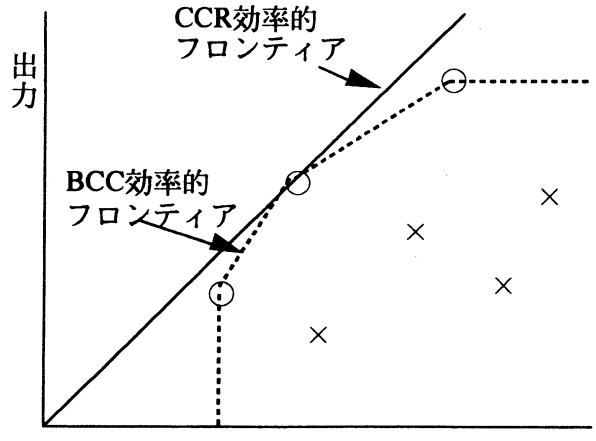


図1　効率的フロンティアの比較

し、BCCモデルは「最初、規模の収穫が増加し、一定レベルを経由して規模の収穫が減少する」という規模の収穫が可変のモデルである．このほか、規模の収穫が増加型や減少型のモデルもある．

BCCモデルではx軸の0点（y軸）がθ^*の測定の基準となり、y軸方向の平行移動に対しては不変(invariant)である．このことは$\mathbf{e}^T\boldsymbol{\lambda}=1$という制約（凸条件）がもたらす（詳しくはAli等([1])参照）．すなわち、出力データをどのように底上げ（下げ）しても最適解は不変である．BCCモデルは正、ゼロ、負の出力データを処理することが出来る．

2.3 加法モデル

基本的加法モデルは次のLPによって示される．

$$\max \left(\sum_{i=1}^{m} s_{xi} + \sum_{r=1}^{s} s_{yr}\right) \tag{6}$$

$$\text{st.} \sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} + s_{xi} = x_{iJ} \;;\; \sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} - s_{yr} = y_{rJ}$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \;;\; \lambda_j \geq 0 \;;\; s_{xi} \geq 0 \;;\; s_{yr} \geq 0$$

DMUJ は$\{\mathbf{s}_x = \mathbf{0} \;;\; \mathbf{s}_y = \mathbf{0}\}$のときのみ効率的である．このモデルは負の入出力も扱えるため主成分分析などで変換された入出力に対して有効である．目的関数自身は[0,1]に収まるとは限らず、いろいろな効率性の尺度が提案されている．

2.4 乗法モデル

Cobb-Douglas型の生産関数

$$y = e^{c_0} x_1^{c_1} \cdots x_m^{c_m} \quad \text{または}$$

$$\log y = c_0 + c_1 \log x_1 + \cdots + c_m \log x_m$$

に対応するDEAモデルとして、原データの対数をとった

$$\hat{X} = (\log x_{ij}) \in R^{m \times n}, \quad \hat{Y} = (\log y_{ij}) \in R^{s \times n}$$

を入出力データとした加法モデルを乗法モデルという．

2.5 コスト最小化（コスト効率モデル）

生産可能領域内で入力に関わるコストを最小とすることを目的とするモデルで，[4]では基本モデルとされていないが，効率性をいろいろな成分に分割していく際の基礎となるモデル（[4]の第7章など）であるので以下に示す．

$$\max \sum_{i=1}^{m} c_{iJ} x_{iJ} \tag{7}$$

$$\text{st.} \quad x_{iJ} - \sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \geq 0$$

$$y_{rJ} - \sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} \leq 0 \;;\; \lambda_j \geq 0$$

3 DEAの応用

文献[3]には600を越えるDEA関連論文が紹介されており、その過半が応用論文とのことである．そのすべてを紹介することはできないし、それぞれの価値も評価できない．そこで成書になっている[4]での応用例における入出力と利用モデルを紹介することとする．

表1 DEAの応用例 (1)

分野	入力	出力	モデル
航空業 6章	労働力 ・サービス ・営業 ・操縦 ・機内サービス ・保全 燃料、保全経費、地上設備、航空機、一般経費	収入 （乗客マイル）	統計的DEA (最尤推定)
病院 7章	労働力 ・正看護婦 ・管理業務 ・技術士 ・補助士 ・准看護婦	退院患者数 ・救急医療 ・集中治療 ・出産	コスト最小化モデル （技術、配分、規模などの成分に分割）

表2　DEAの応用例 (2)

分野	入力	出力	モデル
炭酸飲料 8章	制御可能 ・広告費 ・オンス／価格 制御不能 ・1／競争業者の広告費 ・平均気温 ・市場規模	販売量 購入家族数 購入回数 市場占有率	ウィンドー分析 ・競争考慮
医師 9章	入院日数 サービス 料金	退院患者数 ・軽症 ・重症	CCR_D-I
道路 10章	保守費用 資本費用 気候要因	規模要因 平均交通量 舗装格付け変化分 交通事故防止要因	高速道路 CCR_D-I ウェイト上下限あり
ビール 11章	醸造コスト ・材料費 ・労働費用 営業経費 樽生産能力	生産バレル数 売上高 自己資本利益率 総資本利益率	ウィンドー分析
健康 12章	移動距離 カバーしていない面積	一定値	メンタルヘルスセンター新設位置の決定 CCR_P-I
病院 13章	労働費用 非労働費用 （資本費用は含まず）	長期入院治療 （入院日数） 短期入院治療 （退院者数） 外来治療 （医師訪問回数）	Malmquist指標 （CCR_P-Oに類似）
乳加工 14章	生産労働時間 年末総資産	売上高 付加価値	経営形態比較 (共同組合vs私営) BCC_P-I

表3　DEAの応用例 (3)

分野	入力	出力	モデル
フェリー 15章	資本 積載可能台数 給与総額 燃料費 保全費	総運行距離 ×標準的積載台数	フェリー会社の効率比較 BCC CCR
高校 17章	教職員数 蔵書数 設備指数	授業履修者数 （数学、科学、職業教育、外国語） 課外活動参加者数 学校提供コース数 年間延授業時間数	BCC_P-I 入力、出力は別の2モデルあり
野球 19章	一定値	打者（打率、本塁打、打点） 投手（防御率、被安打率、四球／三振）	BCC-O 出力値 ：最良1 最悪0
農業 20章	生産コスト 農耕地面積 労働時間 減価償却費	一定値	感度分析 CCR 石炭業も分析

なお、[4]の第1章～第5章、第16章、第18章は応用を含まないので省略した.

参考文献

[1] A. Charnes, W. W. Cooper, E. Rhodes : Measuring Efficiency of Decision Making Units , *European Journal of Operations Research*, 2, pp.429-444, 1978.

[2] 刀根：経営効率性の測定と改善　－包絡分析法DEAによる－，1993，日科技連出版社，東京.

[3]L.M.Seiford, "Data Envelopment Analysis : The Evolution of the State of the Art (1978-1995)", *The Journal of Productivity Analysis*, 7, pp.99-137, 1996.

[4]A. Charnes, W. W. Cooper, A.Y.Lewin and L.M.Seiford, *Data Envelopment Analysis : Theory, Methodology and Applications*, KAP, 1994.

問合わせ先

〒180 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1

成蹊大学工学部経営工学科

上田　徹　E-mail : ueda@is.seikei.ac.jp

Tel.0422-37-3793　Fax.0422-37-3869

FRB5-1

三角型ファジィ数を用いたDEA

Data Envelopment Analysis Based on Triangular Fuzzy Numbers

上田　徹　上村　哲志

Tohru UEDA and Tetsushi KAMIMURA

成蹊大学

Seikei University

Data Envelopment Analysis (DEA) is a method which evaluates relatively the efficiency of Decision Making Units. It usually treats deterministic values as inputs and outputs. However, there are many cases where inputs or outputs have fuzziness or vagueness. In this paper, inputs and outputs are presented by triangular fuzzy numbers (T.F.N.s). Ordering of fuzzy numbers is done by comparison among removals of them. Especially the removal of T.F.N. is given in a simple form. Linear Programming (LP) formulation of DEA using removal is obtained easily. However, in fractional programming formulation of DEA it must be considered that division operations on T.F.N.s do not necessarily give a T.F.N. Quatients are caluculated rigorously by removals of them through alfa-cuts and compared with triangular approximation. As an example, efficiencies of 11 firms in the next year are evaluated by using their inputs and outputs in this year.

1.はじめに

企業体や事業体などの効率性を評価する手法として知られているDEA法では入出力データは明確に与えられている。一方、システム効率を評価しようとするとあいまいさを考慮する必要があり、将来の予測値での効率値の評価は難しい。よって、予測値を三角型ファジィ数の形で表現することによりあいまいさを取り込む。ここではある１１企業の従業員数、店舗数（入力）と売上高、利益（出力）のデータを用いて将来の予測値を決め、その効率値を評価することを検討する。また、各企業の入出力値の増減が同じ割合になってしまうと代表通常数の比較としては意味がなくなってしまうので、違う割合をかけ、効率評価をする。

2.DEAについて[1]

多入力多出力系の効率評価法としてDEA(Data Envelopment Analysis)がある。このDEAは、最も効率的な事業体(DMU:Decision Making Unit)を基準に各DMUを相対的に評価することを目的として考案されたものである。(Charnes et al.1978)

ここで、

n:DMU数　　j:DMUの番号(j=1,.....,n)

m:入力項目数　　i:入力項目の番号(i=1,.....,m)

k:出力項目数　　r:出力項目の番号(r=1,.....,k)

X_{ij}:DMUjのi番目の入力値(i=1,.....,m;j=1,.....,n)

Y_{rj}:DMUjのr番目の出力値(r=1,.....,k;j=1,.....,n)

u_r:DMUjのr番目のウエイト

v_i:DMUjのi番目のウエイト

とすると、多入力多出力系の効率値は以下のようになる。

$$\sum_{r=1}^{k} u_r Y_{rj} \Big/ \sum_{i=1}^{m} v_i X_{ij}$$

ただし、全てのDMUの効率値は１以下となっている。また、ウエイトu_rとv_iは変数で自分にとって最も有利なウエイトとなっている。

CCRの場合の定式化は、

<FP>

max

$$p_a = \sum_{r=1}^{k} u_r Y_{ra} \Big/ \sum_{i=1}^{m} v_i X_{ia}$$

s.t.

$$\sum_{r=1}^{k} u_r Y_{rj} \Big/ \sum_{i=1}^{m} v_i X_{ij} \le 1 \qquad (j=1,.....,n)$$

$$u_r \ge 0 \qquad (r=1,.....,k)$$

$$v_i \ge 0 \qquad (i=1,.....,m)$$

<LP>

max

$$z_a = \sum_{r=1}^{k} u_r Y_{ra}$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^{m} v_i X_{ia} = 1$$

$$\sum_{r=1}^{k} u_r Y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_i X_{ij} \le 0 \qquad (j=1,.....,n)$$

$$u_r \ge 0 \qquad (r=1,.....,k)$$

$$v_i \ge 0 \qquad (i=1,.....,m)$$

のようになる。

3.方法

ファジィ数同士の比較には何らかの比較基準が必要である。ここでは「代表通常数の大きいものはファジィ数としても大きい」という基準を用いてウエイトを計算することにする。また、入力、出力は三角型ファジィ数$(x_{ij}^{(L)}, x_{ij}^{(M)}, x_{ij}^{(U)})$、$(y_{rj}^{(L)}, y_{rj}^{(M)}, y_{rj}^{(U)})$で表現される[2]。

LP問題として代表通常数で評価する場合には、

max

$$\sum_{r=1}^{k} u_r (y_{rJ}^{(L)} + 2y_{rJ}^{(M)} + y_{rJ}^{(U)})/4$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^{m} v_i (x_{ij}^{(L)} + 2x_{ij}^{(M)} + x_{ij}^{(U)})/4 \ge \sum_{r=1}^{k} u_r (y_{rj}^{(L)} + 2y_{rj}^{(M)} + y_{rj}^{(U)})/4 \quad \cdots (1)$$

$$\sum_{i=1}^{m} v_i (x_{iJ}^{(L)} + 2x_{iJ}^{(M)} + x_{iJ}^{(U)})/4 = 1$$

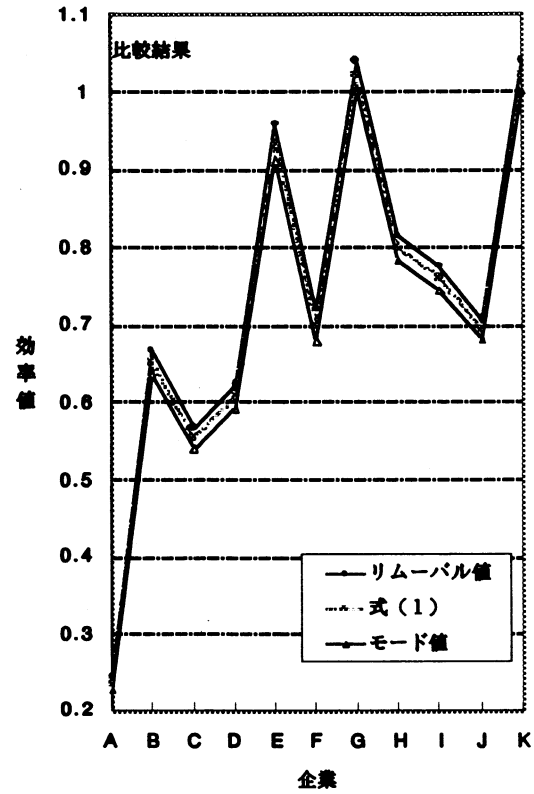
で、比較が可能になる。しかし分数計画法として

$$\max \quad \sum_{r=1}^{k} u_r \tilde{Y}_{rj} / \sum_{i=1}^{m} v_i \tilde{X}_{ij} \quad \cdots\cdots (2)$$

は三角型ファジィ数とならず、上記のような簡単な定式化はできない。そこで式（2）をリムーバル[2]の概念を用いて定量化し比較、評価をしていく。

4.検討結果

１１企業(A,...,K)の将来の効率を評価する。企業jの第i入出力として三角型ファジィ数$((1-r_1)x_{ij}; x_{ij}; (1+r_2)x_{ij})$,$(j$=A,B,...,K)を用いる。企業A,...,Fについてはr_1=0.2,r_2=0.1、企業G,...,Kについてはr_1=0.1,r_2=0.2として、式(1)よりu_r、v_iを求める。このようにして得られるLP問題の解がFP問題の解とどう異なるかを見るために、もとめたu_r、v_iを用いて式(2)を評価する。またファジィを考慮しないモード値$x_{ij}^{(M)}$、$y_{rj}^{(M)}$を用いた場合の評価結果も示す。



グラフ１

上記のようにリムーバル値とモード値のだいたい真ん中に代表通常数値があったので、三角型ファジィ数の代表通常数を使ってU、Vを決め、そのウエイトで計算していっても良いだろうということになった。

次にr_1=0.05としA,..,Fのr_2=0.1、G,..,Kのr_2=(0.15,0.2,0.25,0.5)として同様に効率値を評価してみた。その結果、増える割合を増加させていっても効率値に対してはあまり影響がないことがわかった。

<参考文献>

[1]刀根　薫:「経営効率性の測定と改善」日科技連、１９９３

[2]田中　英夫　監訳、松岡　浩　訳:「ファジィ数学モデル」オーム社、１９９２

<連絡先>

〒180　東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1
成蹊大学工学部経営工学科
上田　徹　　E-mail ueda@is.seikei.ac.jp
TEL 0422-37-3793　FAX 0422-37-3869

FRB5-2

重み制約付DEAについて
On DEA with Constraints for Weights

前田豊・高橋範光・田中英夫
Yutaka MAEDA, Norimitsu TAKAHASHI and Hideo TANAKA
大阪府立大学工学部
Dept. of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract: In this paper, we reformulated a LP problem in DEA to use normal weightswhose sum becomes one as a constraint by normalizing input-output data. By proposed mwthod, it is possible to analyze the weights getting efficiency of each Decision Making Unit and to represent opinions of experts as weights easily.

1. はじめに

いくつかの事業体から構成される企業における各事業体の相対的な効率性評価や企業を一つのDMU (Decision Making Unit)とみなしての属する業種内での各企業の相対的な効率性の位置づけが重要な課題なっている．このような背景から，生産関数を用いたDMUの効率性評価の研究が盛んになっており最近では，生産可能集合の制約を満たす効率性評価の手法としてDEA (Data Enveropment Analysis)[1]が注目されている．DEAは，多入力・多出力系のシステムの効率性を相対評価する手法であり，CCRモデルやBCCモデルが考案されている．これらのモデルでは，入出力項目の重みとして制約のない可変重みを用いることで客観的かつ多様性を活かした評価が可能となるが，現実的でない重みの値0の高頻度での出現や，各DMUに対する重みの間の大きな差異が好ましくないので，重みの存在領域を制限する領域限定法が考案されている．この領域限定法において重み制約は，相対的な重みの大きさに対して課せられている．小沢ら[2]は，区間AHP手法により求められる重みの相対的な比を領域限定法に取り込んだ．本研究では，総和が1となる正規な重みをDEAの領域限定法に取り込めるようにモデルの定式化を行い，複数の専門家から得られる重みをAHP手法[3]により求めてその上下限値により重み制約を表現する．

2. 包絡分析法（DEA）

DEAは事業体を入力と出力に変換する過程とみなして，その変換過程の効率性を測定するために開発された手法であり，多入出力系のシステムに対して可変重みによる仮想的入出力値から効率値を算出し事業体を相対評価する方法というである．すべての事業体は優れた事業体で構成される効率的フロンティアに包み込まれるためこの手法は包絡分析法と呼ばれる．

j番目の分析対象$DMU_j(j=1,..n)$の入力データを$x_{1j},...,x_{mj}$，出力データを$y_{1j},...,y_{sj}$とする．効率性の測定対象を$DMU_o(o \in \{1,...,n\})$とすると，DMU_oの効率値は入出力の重み$v_i(i=1,...,m)$，$u_k(k=1,...,s)$を変数とする次の分数計画問題の解として得られる．

$<FP_o>$

目的関数
$$\max \theta = \frac{\sum_{k=1}^{s} u_k y_{ko}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{io}}$$

制約条件式
$$\frac{\sum_{k=1}^{s} u_k y_{kj}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij}} \le 1 \quad (j=1,...,n)$$
$$v_i \ge 0 \ (i=1,...,m), \ u_k \ge 0 \ (k=1,...,s)$$

この問題は次の線形計画問題と同値である．

$<LP_o>$

目的関数
$$\max \theta = \sum_{k=1}^{s} u_k y_{ko}$$

制約条件式
$$\sum_{i=1}^{m} v_i x_{io} = 1$$
$$\sum_{k=1}^{s} u_k y_{kj} \le \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} \quad (j=1,...,n)$$
$$v_i \ge 0 \ (i=1,...,m), \ u_k \ge 0 \ (k=1,...,s)$$

領域限定法では，i番目とj番目の入力項目の相対的な比率がある上下限(u_{ij}, l_{ij})の範囲内の値となるように次の制約を与える．

$$l_{ij} \le \frac{v_j}{v_i} \le u_{ij} \quad i,j \in \{1,...,m\}$$

出力に関しても同様である．

$$L_{ij} \le \frac{u_j}{u_i} \le U_{ij} \quad i,j \in \{1,...,s\}$$

ここで，U_{ij}, L_{ij}はi番目とj番目の出力項目の相対的な比率の上下限値である．

3. 正規な重み制約付DEA

効率性の測定対象であるDMU_oの入出力データx_{io}，y_{ko}によりデータの正規化を行う．すなわち，

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{io}} \ (i=1,...,m; \ j=1,...,n)$$

$$\bar{y}_{kj} = \frac{y_{kj}}{y_{ko}} \ (k=1,...,s; \ j=1,...,n)$$

と変換し，この変換されたデータから効率値を求める計画問題を定式化すると次のようになる．

$<LP_o>$

目的関数 $\max \tilde{\theta} = \sum_{k=1}^{s} \tilde{u}_k$

制約条件式 $\sum_{i=1}^{m} \tilde{v}_i = 1$

$$\sum_{k=1}^{s} \tilde{u}_k y_{kj} \le \sum_{i=1}^{m} \tilde{v}_i \tilde{x}_{ij} \quad (j=1,...,n)$$

$$\tilde{v}_i \ge 0 \ (i=1,...,m), \ \tilde{u}_k \ge 0 \ (k=1,...,s)$$

線形計画問題$<LP_o>$と$<LP_\theta>$とが同じ効率値を導くことは容易に確認できる．

次に複数の専門家から入力項目間および出力項目間の重要度がAHP法により以下のように求められると仮定する．

$$I_r = \{I_1^r,...,I_m^r\}, O_r = \{O_1^r,...,O_s^r\} \ (r=1,...,t)$$

これらの重みベクトルの上下限値により$<LP_\theta>$の重み変数への制約を与える．すなわち，

$$\tilde{v}_i^* = \max_r \{I_i^r\}, \tilde{v}_{i*} = \min_r \{I_i^r\}$$

$$\tilde{u}_k^* = \max_r \{O_k^r\}, \tilde{u}_{k*} = \min_r \{O_k^r\}$$

を入出力変数の上下限値とすると，

$<LP_\theta>$

目的関数 $\max \tilde{\theta} = \sum_{k=1}^{s} \tilde{u}_k$

制約条件式 $\sum_{i=1}^{m} \tilde{v}_i = 1 \ ; \ \tilde{u}_k \ge 0 \ (k=1,...,s)$

$$\sum_{k=1}^{s} \tilde{u}_k y_{kj} \le \sum_{i=1}^{m} \tilde{v}_i \tilde{x}_{ij} \quad (j=1,...,n)$$

$$\tilde{v}_{i*} \le \tilde{v}_i \le \tilde{v}_i^* \ (i=1,...,m)$$

$$\tilde{u}_{k*} \le \frac{\tilde{u}_k}{\sum_{k=1}^{s} \tilde{u}_k} \le \tilde{u}_k^* \ (k=1,...,s)$$

が得られる．この問題により求めれる効用値は出力重み変数の和となる．意思決定者の意見の考慮と効用値を導く重みの解析が可能になる．

4. 数値例

文献[1]中で使用されている4入力2出力の東京区立23図書館のデータを用いて解析を行った．入出力項目間の重要度はAHP法により4人の専門家から表1，表2のように得られたと仮定する．この表から重みの上下限値が求められる．これらを制約として用いた場合の杉並区のデータの解析結果を表3に示す．データを正規化することにより効率値を与える重みの意味付，比較が容易になる．また，制約付の場合は，意思決定者の意見を反映した結果，効率的でなくなった．職員数のみを考慮するのではなく，入力項目全てを評価基準に用いている．

表1 入力項目間の重み

	床面積	蔵書数	職員	人口
I_i^1	0.131	0.551	0.044	0.274
I_i^2	0.216	0.090	0.042	0.652
I_i^3	0.094	0.451	0.406	0.049
I_i^4	0.131	0.274	0.551	0.044
$\tilde{v}_{i*}$	0.094	0.090	0.042	0.044
$\tilde{v}_i^*$	0.217	0.551	0.551	0.652

表2 出力項目間の重み

	登録者	貸出冊
O_k^1	0.125	0.875
O_k^2	0.167	0.833
O_k^3	0.750	0.250
O_k^4	0.833	0.167
$\tilde{u}_{k*}$	0.125	0.167
$\tilde{u}_k^*$	0.833	0.875

表3 杉並区の効率値

	$<LP_o>$	$<LP_\theta>$	重み制約付
v_1	0	0	0.094
v_2	0	0	0.091
v_3	9.71E-03	1	0.551
v_4	0	0	0.264
u_1	4.43E-06	0.374	0.116
u_2	2.72E-07	0.626	0.809
効率値	1	1	0.925

5. おわりに

本研究では，効率値の測定対象となるDMUの入出力項でデータを正規化することにより，正規重みを制約として導入できるように計画問題を定式化した．これにより，意思決定者や専門家の意見を表すことが容易になり，効率値を与える重みについての解析を行うことを可能にする．

参考文献

[1] 刀根 薫：経営効率性の測定と改善，日科技連(1993).

[2] 小沢 知裕，山口 俊和，福川 忠昭：”区間AHPを用いるDEAの改良型領域限定法”，オペレーションズ・リサーチ，Vol.38，No.9，pp.471-476 (1993).

[3] 刀根 薫：ゲーム感覚意思決定法，日科技連(1986).

[連絡先] 〒593 堺市学園町1-1 大阪府立大学工学部 経営工学科 田中英夫 TEL 0722-52-1161 E-Mail:tanaka@ie.osakafu-u.ac.jp

FRB5-3

Fuzzy DEA with Fuzzy Data

Peijun Guo Hideo Tanaka
Department of Industrial Engineering, Osaka Prefecture University, Gakuencho 1-1,
Sakai, Osaka 593, JAPAN
E-mail: guo@ie.osakafu-u.ac.jp
tanaka@ie.osakafu-u.ac.jp

Abstract: DEA(data envelopment analysis) is a non-parametric technique for measuring and evaluating the relative efficiencies of a set of decision making units (DMUs) with common inputs and outputs. A fundamental DEA model is formulated as a linear programming problem where the inputs and outputs are assumed to be crisp values. Based on the basic model of DEA, Fuzzy DEA model is proposed to deal with fuzzy input and output values. The existence of fuzziness in real evaluation problems makes fuzzy DEA more powerful.

1. Introduction

Data envelopment analysis (DEA) developed by Charnes et al [1~3] is a non-parametric technique for measuring and evaluating the relative efficiencies of a set of decision make units (DMU) with the common inputs and outputs. Examples of such units are branches of bank, city administration offices, libraries and hospitals.

In practice, some inputs and outputs of DMUs are often some linguistic variables, which can be characterized by fuzzy variables, not crisp ones because of the existence of fuzziness in real evaluating problems. In this paper, considering fuzzy inputs and outputs data, Fuzzy DEA model is proposed as an extension of DEA to fit fuzzy input and output data, and the corresponding efficiency measures are also defined as fuzzy numbers.

2. DEA model

A fundamental DEA is given as follows:

$$\begin{aligned} &\text{Max} && \mu^t \mathbf{y}_o \\ &\mu, \nu \\ &\text{S.T.} \\ & && \nu^t \mathbf{x}_o = 1, \\ & && \mu^t \mathbf{y}_j \le \nu^t \mathbf{x}_j, \ (j=1,....,n), \qquad (1) \\ & && \mu \ge 0, \\ & && \nu \ge 0, \end{aligned}$$

where $y_j=[y_{j1}, y_{j2}, \cdots, y_{jm}]$ and $x_j=[x_{j1}, x_{j2}, \cdots, x_{js}]$ are the given positive output and input vectors of the *j*th DMU, respectively; *m* and *s* are the numbers of outputs and inputs of every DMU, respectively; n is the number of DMUs; μ and ν are the positive coefficient vectors of y_j and x_j, respectively; index o indicates the evaluated DMU.

3. Fuzzy DEA model

Given the fuzzy input and output data, the fuzzy DEA model is given as,

$$\begin{aligned} &\underset{\mu,\nu}{\text{Max}} && \mu^t \mathbf{Y}_o \\ &\text{S.T.} \\ & && \nu^t \mathbf{X}_o \approx \tilde{1}, \\ & && \mu^t \mathbf{Y}_j \le \nu^t \mathbf{X}_j, \ (j=1,....,n), \qquad (2) \\ & && \mu \ge 0, \\ & && \nu \ge 0, \end{aligned}$$

where $\mathbf{X}_j$ and $\mathbf{Y}_j$ are an s-dimensional fuzzy input vector and an m-dimensional output vector of the *j*th DMU, respectively, which are defined by a triangular fuzzy vectors. $\mathbf{X}_j$ and $\mathbf{Y}_j$ and denoted by $(\mathbf{x}_j, \mathbf{c}_j)$ and $(\mathbf{y}_j, \mathbf{d}_j)$, respectively[4], where $\mathbf{x}_j$ and $\mathbf{y}_j$ are center vectors, $\mathbf{c}_j$ and $\mathbf{d}_j$ are spread vector vectors.

The formulation (2) shows that the model maximizes the weighted sum of the fuzzy outputs of the indicated DMU subject to the conditions that its weighted sum of the inputs is approximately unity, and the weighted sum of the outputs is approximately not more than that of the inputs with the same coefficient vector for every DMU.

Definition 1: Given a fuzzy goal Z=(z, w) characterized by a triangular membership function. It is assumed that Maximizing Z is defined as follows:

$$\text{Max} \quad z-(1-h)w, \qquad (3)$$

where $0 \le h \le 1$ is a value of fuzzy membership function.

Definition 2: Given two fuzzy variables $Z_1=(z_1, w_1)$ and $Z_2=(z_2, w_2)$ characterized by the triangular membership functions, the fuzzy inequality $Z_1 \le Z_2$ can be defined as follows:

$$\begin{aligned} &z_1-(1-h)w_1 \le z_2-(1-h)w_2 \\ &z_1+(1-h)w_1 \le z_2+(1-h)w_2 \end{aligned} \qquad (4)$$

Here, $\nu^t \mathbf{X}_o \approx \tilde{1}$ corresponding to $\nu^t \mathbf{x}_o = 1$ in (1) plays a role of normalized pseudo-input in Fuzzy DEA (2). It is assumed that the problem for finding ν^t such that $\nu^t \mathbf{X}_o \approx \tilde{1}$, i.e. $\tilde{z}=(\nu^t \mathbf{x}_o, \nu^t \mathbf{c}_o) \approx \tilde{1}=(1,e)$ can be converted into the optimization problem (5) that maximizes the spread of $\tilde{z}$ subject to $\tilde{z} \underset{h}{\subseteq} \tilde{1}$, where $Y \underset{h}{\subseteq} Z$ means $[Y]_h \subseteq [Z]_h$ with regard to h-level sets.

$$\begin{aligned} &\text{Max} && \nu^t \mathbf{c}_o \\ &\text{S.T.} && \nu^t \mathbf{x}_o - (1-h)\nu^t \mathbf{c}_o \ge 1-(1-h)e, \qquad (5) \\ & && \nu^t \mathbf{x}_o + (1-h)\nu^t \mathbf{c}_o \le 1+(1-h)e. \end{aligned}$$

In order to find the exclusive $\nu^t \mathbf{X}$ as normalized pseudo-input, an additional conditional (6) is added into (5).

$$\nu^t \mathbf{x} - (1-h)\nu^t \mathbf{c} = 1-(1-h)e. \qquad (6)$$

Then (5) is rewritten as

$$\text{Max} \quad \nu^t \mathbf{c}$$

$$\text{S.T.} \quad \nu^t \mathbf{x} - (1-h)\nu^t \mathbf{c} = 1-(1-h)e, \qquad (7\text{-}1)$$

$$\nu^t \mathbf{x} + (1-h)\nu^t \mathbf{c} \le 1+(1-h)e. \qquad (7\text{-}2)$$

(7) means that we want to find the largest spread of $\tilde{z}$ with the same left endpoint as fuzzy number $\tilde{1}$ in h-level set.

Using (3), (4) and (7), a crisp version of (2) is obtained as follows:

$$\underset{\mu,\nu}{\text{Max}} \quad \mu^t \mathbf{y}_o - (1-h)\mu^t \mathbf{d}_o + (1-h)\nu^t \mathbf{c}_o$$

$$\text{S.T.} \quad \nu^t \mathbf{x}_o - (1-h)\nu^t \mathbf{c}_o = 1-(1-h)e,$$

$$\nu^t \mathbf{x}_o + (1-h)\nu^t \mathbf{c}_o \le 1+(1-h)e,$$

$$\mu^t \mathbf{y}_j + (1-h)\mu^t \mathbf{d}_j \le \nu^t \mathbf{x}_j + (1-h)\nu^t \mathbf{c}_j, \qquad (8)$$

$$\mu^t \mathbf{y}_j - (1-h)\mu^t \mathbf{d}_j \le \nu^t \mathbf{x}_j - (1-h)\nu^t \mathbf{c}_j,$$

$$(j=1,...,n)$$

$$\mu \ge 0,$$

$$\nu \ge 0.$$

It is easy to understand that DEA (1) is the special case of model (8). In other words, when $\mathbf{c}_i = 0$, $\mathbf{d}_i = 0$ and e=0, Fuzzy DEA (8) becomes DEA (2). It means model (1) can evaluates the efficiencies of DMUs in more general mode, by which the crisp, fuzzy and hybrid inputs and outputs data can be handled.

The fuzzy efficiency of DMU is defined as follow:

Definition 4: Given the fuzzy input and output vectors, $\mathbf{X}_o=(\mathbf{x}_o,\mathbf{c}_o)$ and $\mathbf{Y}_0=(\mathbf{y}_o,\mathbf{d}_o)$, and the associated coefficient vectors ν^* and μ^* of the indicated DMU, the fuzzy efficiency of this DMU is defined as a L-R fuzzy number $\varepsilon = (w_L, \eta, w_r)$ as follows:

$$\eta = \frac{\mu^{t^*} \mathbf{y}_o}{\nu^{t^*} \mathbf{x}_o},$$

$$w_L = \eta - \frac{\mu^{t^*}(\mathbf{y}_o - \mathbf{d}_o(1-h))}{\nu^{t^*}(\mathbf{x}_o + \mathbf{c}_o(1-h))}, \qquad (9)$$

$$w_R = \frac{\mu^{t^*}(\mathbf{y}_o + \mathbf{d}_o(1-h))}{\nu^{t^*}(\mathbf{x}_o - \mathbf{c}_o(1-h))} - \eta,$$

where w_L, w_r and η are the left, right spreads and center value of the fuzzy efficiency ε, respectively.

Theorem 1: if $\text{Min}[c_1/x_1, c_2/x_2, \cdots\cdots, c_s/x_s] < e$, the optimization solution ν restricted by $\nu \ge 0$ can always exists in the optimization problem (7).

Prove: For the case of s=1, ν^T becomes a variable ν. From (7-1), we know

$$\nu = (1-(1-h)e)/(x-(1-h)c) > 0, \qquad (10)$$

we put (7-1) into (7-2), we know

$$c/x \le e. \qquad (11)$$

For the n-dimensional case, namely, s=n, let us assume

$$\text{Min}[c_1/x_1, c_2/x_2, \cdots\cdots, c_s/x_s] = c_k/x_k, \qquad (12)$$

where k indicates the kth is smallest one among the c_i/x_i (i=1,...n). let $\nu = [0,0,....,\nu_k,0,..0]$, $\nu_k = (1-(1-h)e)/(x_k-(1-h)c_k)$. It is easy to prove that this ν is satisfied with the constraint condition (7-1) and (7-2), and $\nu \ge 0$. As an extension of this theorem, the parameter e is recommended as

$$e \ge \underset{i=1,..,n}{\text{Max}}(\text{Min}[c_{i1}/x_{i1}, ..., c_{ij}/x_{ij}, ..., c_{is}/x_{is}]) \qquad (13)$$

Theorem 2: The center of the fuzzy efficiency of any DMU is not more than 1.

Prove: Suppose that μ^{t° and ν^{t° are obtained from (8) for an indicated DMU. Then the following inequalities are satisfied.

$$\mu^{t^\circ} \mathbf{y}_j + (1-h)\mu^{t^\circ} \mathbf{d}_j \le \nu^{t^\circ} \mathbf{x}_j + (1-h)\nu^{t^\circ} \mathbf{c}_j, \ (j=1,..,n) \qquad (14\text{-}1)$$

$$\mu^{t^\circ} \mathbf{y}_j - (1-h)\mu^{t^\circ} \mathbf{d}_j \le \nu^{t^\circ} \mathbf{x}_j - (1-h)\nu^{t^\circ} \mathbf{c}_j. \ (j=1,..,n) \qquad (14\text{-}2)$$

From the above inequalities, the following inequality holds.

$$\mu^{t^\circ} \mathbf{y}_j \le \nu^{t^\circ} \mathbf{x}_j, \ (j=1,.....,n) \qquad (14\text{-}3)$$

Then,

$$\eta = \frac{\mu^{t^\circ} \mathbf{y}_o}{\nu^{t^\circ} \mathbf{x}_o} \le 1. \qquad (15)$$

(15) means that evaluating the fuzzy efficiency of DMU by model (8) is similar to DEA (1).

4. Numerical Example

The fuzzy data from five supermarkets are illustrated in Table 1.

Table 1. Fuzzy data in five supermarkets

Names		A	B	C	D	E
Input	Areas	(2.0,0.5)	(3.0,0.5)	(3.0,0.6)	(5.0,1.0)	(5.0,0.5)
Output	Sales	(1.0,0.3)	(3.0,0.7)	(2.0,0.4)	(4.0,1.0)	(2.0,0.2)

The fuzzy efficiency of DMUs (A, B, C, D, E) with h=0.5 and e=0.25 obtained by (8) are as follows:

ε_A=(0.102,0.485,0.118), ε_B=(0.203,0.97,0.256),

ε_C=(0.101,0.647,0.115), ε_D=(0.159,0.776,0.194),

ε_E=(0.027,0.388,0.028).

5. Conclusion

In this paper, Fuzzy DEA model is proposed for evaluating the fuzzy efficiencies of DMUs with fuzzy data. It is straightforward that DEA is a special case of fuzzy DEA. Because of the inherent fuzziness in real evaluation problems, Fuzzy DEA is more powerful than DEA.

Reference

1. Charnes, A., et. al, Measuring the efficiency of decision making units, European Journal of Operational Research, 2, 429-444,1978.

2. Charnes, A., et. al, Short communication: measuring the efficiency of decision making units, European Journal of Operational Research, 3,339,1979.

3. Charnes, A., et. al, A structure for classifying and characterizing efficiency and inefficiency in data envelopment analysis, The Journal of Productivity Analysis, 2, 197-237, 1991.

4. Tanaka, H. et. al, Linear regression analysis with fuzzy model, IEEE Transaction on System Man and Cybernetic, 6, 1982.

FRC1-1

ウイルス進化型遺伝的アルゴリズムにおける進化的状態遷移

Evolutionary Transition on Virus-Evolutionary Genetic Algorithm

久保田直行　○荒川丈昌　福田敏男

Naoyuki Kubota, ○Takemasa Arakawa and Toshio Fukuda

名古屋大学工学研究科マイクロシステム工学専攻

Dept. of Micro System Engineering, Graduate School, Nagoya University

Abstract - This paper deals with virus-evolutionary genetic algorithm (VEGA) and its evolutionary transition. Various types of evolutionary optimization methods have been proposed and successfully applied to many optimization problems. However, it is difficult to determine coding method, genetic operators and selection scheme. In this paper, we discuss evolutionary transition concerning fitness improvement through numerical simulation of traveling salesman problem. The simulation results indicate that particular genetic operators give a population different potentialities of generating candidate solutions and that virus infection operators can generate effective schemata and propagate them to a population evolved with any genetic operators.

1．はじめに

近年，Evolutionary Computation[1]に関して，様々な手法が提案されている．その一つである遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm; GA）[1]は，多種多様な最適化問題に適用されるようになり，様々な改善手法や応用方法が提案されてきた．筆者らもまた，個体群中の有効なスキーマタ増加のために，ウイルス進化型遺伝的アルゴリズム（Virus Evolutionary GA；VEGA）[2]を提案し，TSPやファジィルール最適化等に適用してきた．一般に，このような確率的最適化手法は収束率，ベンチマークテストで得られた平均適応度等によって評価されてきた．これらの評価性能は，コード化設計，遺伝的操作，選択方法に依存し，特に，コード化と遺伝的操作には密接な関係があり，最適化を行う上で新しい探索空間を生成するのに重要である．一方，選択は，探索を行う上で，より最適解がありそうな探索空間に限定していく．従って，最適解を含む探索空間を生成するために，これらを独立に評価することは困難であり，それゆえ，最適な要素設計もまた，困難であると考えられる．

一方，GAの個体群の挙動を解析するために，マルコフ連鎖を用いた解析が適用されている．マルコフ解析は，GAの挙動を完全に解析することができるが，大規模な問題に対しては，物理的に記述することが困難である．そこで，Manderickは，遺伝的操作を用いたときの適応度のランドスケープに関して，相関係数を用いて検討を行った[3]．さらに，Fogelらは，特定の探索演算子を適用したときの親個体を改善する確率及びその期待値に関する検討を行った[4]．しかしながら，これらの数値実験は，ランダムに生成された個体群に適用されており，進化の過程を通した個体群にたいしては，行われていない．そこで，本研究では，ある特定の遺伝的操作を用いて個体群を進化させながら，進化の中間状態において遺伝的操作と適応度に関する評価を行う．

2．ウイルス進化論に基づく遺伝的アルゴリズム

ウイルス進化型遺伝的アルゴリズム（VEGA）は，ウイルス進化論を模倣しており，宿主個体群とウイルス個体群から構成されており，それぞれ，解集合，宿主個体群の部分的な遺伝子列の集合を表す（Fig.1）．ウイルス感染として，遺伝情報を宿主個体に書き込む逆転写（Fig.2(a)）と宿主個体から部分情報を取り出す導入（Fig.2(b)）がある．まず，ウイルスは，ランダムに宿主個体を選択し，逆転写を行う．ここでウイルスは，*fitvirus*と呼ばれるパラメータを持つものとし，逆転写することによって得られる宿主個体の適応度の変化量で表すこととする．ウイルスiの感染した宿主個体群をSとし，宿主個体をj（$j \in S$），逆転写する前とした後の宿主個体の適応度を$fithost_j$，$fithost_j'$とすると，$fitvirus_{i,j}$，$fitvirus_i$は，

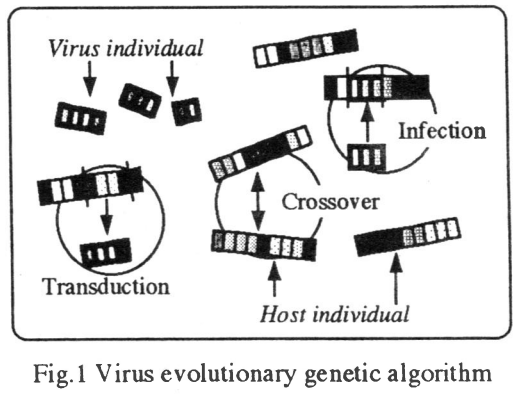


Fig.1 Virus evolutionary genetic algorithm

$$fitvirus_{i,j} = fithost_j^{l} - fithost_j \quad (1)$$

$$fitvirus_i = \sum_{j \in S} fitvirus_{i,j} \quad (2)$$

となる．また，各ウイルスに宿主への感染率を持ち，逆転写に成功すれば感染率を上げ，逆に失敗すれば感染率を下げる．このようにしてウイルスが遺伝子列を水平伝播し，個体の適応度が高くなるような遺伝子列を逆転写していく．また，各ウイルスは，生命力$life_{i,t}$を持ち，rを1世代ごとの生命力減衰率とすると，

$$life_{i,t+1} = r \times life_{i,t} + fitvirus_i \quad (3)$$

となる．生命力が0になれば，全く新しい宿主を選び，導入により新しい遺伝子列を生成する．もし，そうでなければ，そのウイルス個体は，導入操作により宿主個体から部分的に新しい部分列を取り入れて進化する．以下に，VEGAの仮想コードを示す．

```
begin
        Initialization
        repeat
                Selection
                Crossover
                Mutation
                Virus_infection
                Replacement
        until Termination_Condition = true
end.
```

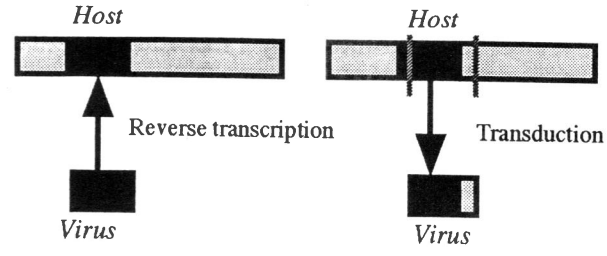
Initializationでは，ランダムに初期個体群を生成し，ウイルス個体は，宿主個体の部分列として生成される．ウイルスの個体長は，可変であることとし，宿主個体群の進化とともに，個体長が伸縮していくものとする．さらに，ウイルス感染によって生成された子個体は，全てのウイルス感染が終わったあと，その親個体の適応度と比較を行い，適応度が改善されていれば，子個体を入れ換えるものとする（Replacement）．

3．数値シミュレーション

マルコフ連鎖に基づくGAの個体群の挙動は，状態iからjへの状態遷移確率を用いた有限集合として記述できる．そこで，時間tにおける個体群を$p(t)$とすると，$p(t)$から$p(t+1)$への状態遷移は，

$$p(t+1) = s(g(p(t))) \quad (4)$$

となる（Fig.3）．ここで，$s(\cdot)$，$g(\cdot)$は，選択と遺伝的操作に関する状態遷移行列である．ここでは，この状態遷移を個体群の進化的遷移ということにする．遺伝的操作は，個体群全体によって表現された探索空間を探索し，一方，選択は，探索空間を限定する．このようにして，個体群の進化的遷移は，遺伝的操作と選択により決定される．しかしながら，大規模な状態遷移を全て記述することは，物理的に不可能であるので，ここでは，遺伝的操作によりいかに，性能を改善することができるのかということに着目する．一方，Manderickらは，適応度のランドスケープの解析を以下の相関係数を用いることにより行った．



(a) Reverse transcription　(b) Transduction

Fig.2 Virus infection operators

$$\rho(fit_p, fit_c) = \frac{C(fit_p, fit_c)}{\sigma(fit_p)\sigma(fit_c)} \quad (5)$$

ここで，fit_pとfit_cは，親個体とその親個体から生成された子個体の適応度を表し，$C(fit_p, fit_c)$は，親子個体間の共分散を表す．これは，親子間の適応度の変化に関する統計的解析を行ったものであるが，ここでは，選択や遺伝的操作に関しては，評価されていない．実際，ある特定の遺伝的操作と選択方法によって生成された個体群は，他の方法によって生成された個体群と異なる．すなわち，進化的状態遷移は，遺伝的操作によって異なる．従って，本稿では，異なる遺伝的操作を用いることにより進化させた平均適応度$Ave_fit(x)$をもつ個体群上で，遺伝的操作を行い，その親子間の改善度，改善確率等について検討する．以下にその手順を示す．

Step 1　初期化：ランダムに初期個体群p(0)を生成し，進化的フェーズx=0とする．

Step2　進化：ある遺伝的操作の集合Gを用いて，平均適応度$Ave_fit(x)$をもつ個体群p(x)を生成する．

Step3　評価：各遺伝的操作を用いて，個体群p(0)を10000回評価する．このとき，生成された子個体は，親個体と入れ換えないものとする．

Step4　x=x+1

Step5　go to Step2

このようにして，次第に進化していく個体群に対し，遺伝的操作がどのようにはたらくかを評価する．

本稿では，3次元巡回セールスマン問題に適用し，最小化問題として扱う．遺伝的操作の集合を以

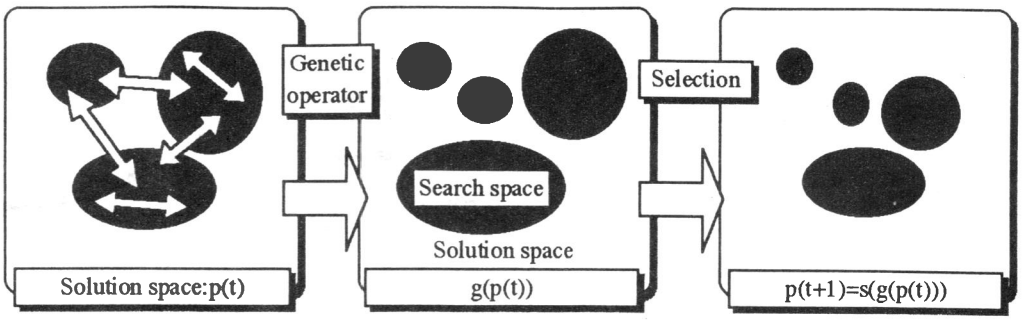


Fig.3 Evolutionary transition (p(t): population at time step t, g(•): intermediate transition matrix of genetic operators, s(•): intermediate transition matrix of selection operation)

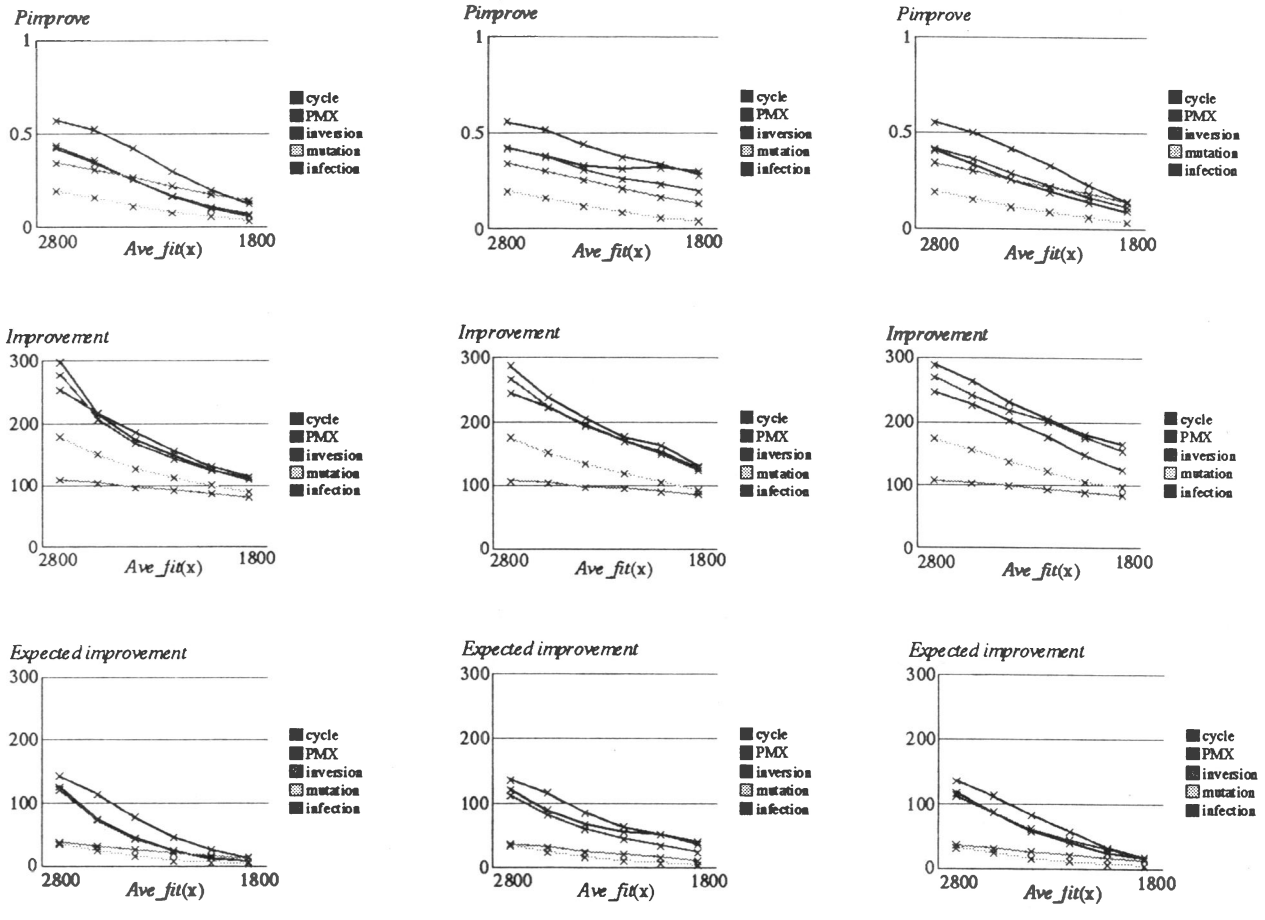


Fig.4 Simulation results against the population evolved by G_1

Fig.5 Simulation results against the Population evolved by G_2

Fig.6 Simulation results against the Population evolved by G_3

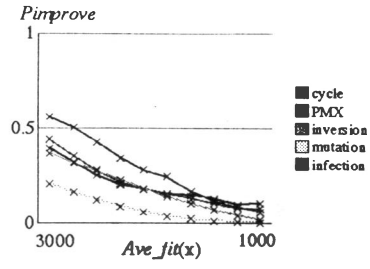
下のように設定する.

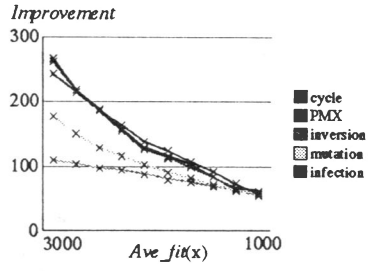
G_1: SSGA (inversion),
G_2: SSGA (cycle crossover+PMX+mutation)
G_3: VEGA (virus infection)

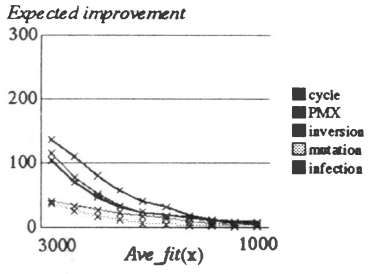
また, $Ave\_fit(x)$={2800, 2600, 2400, 2200, 2000, 1800}とする. シミュレーション結果をFig.4～6に示す. 結果から, まず, 改善確率に関して, ウイルス感染が最も高い確率を示しており, 改善度に関しても, ウイルス感染により進化させた個体群は, 高い改善度を示している. これは, ウイルスにより良好なスキーマを生成できていることから考えられる. また, 交叉により進化させた個体群の改善確率を見てみると（Fig.5）, 平均適応度が良くなっても比較的, 高い改善確率を示している. これは, 交叉は, 交叉にロバストな個体を生成することから考えられる. 次に, 以下の遺伝的操作の集合を用いて評価を行った（Fig.7～9）.

G_4: SSGA (inversion+exchanging mutation),
G_5: SSGA (G_4+cycle crossover+PMX)
G_6: VEGA (virus infection+cycle crossover+PMX)

ここで, $Ave\_fit(x)$={3000, 2600, ···, 1000}とする. ここでは, 基本的にメインとなる遺伝的操作の性質を受けつぐような結果を示しているが, 相関係数に関して, ウイルス感染により生成した個体群において







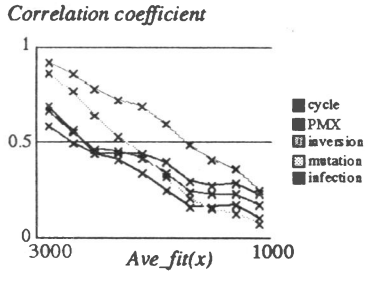
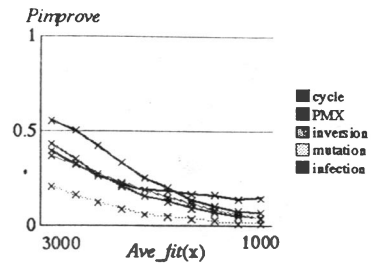
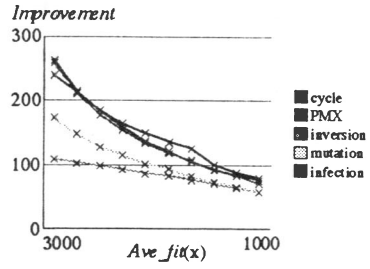
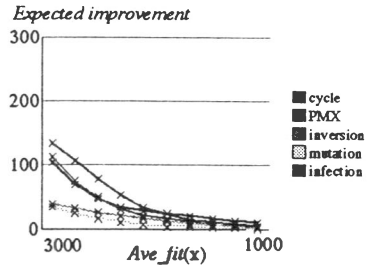


Fig.7 Simulation results against the population evolved by G_4







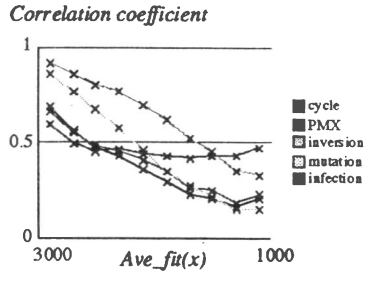
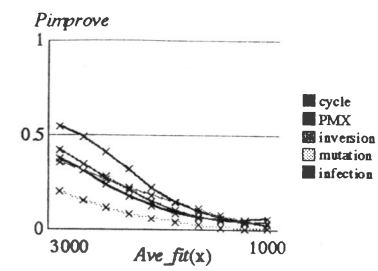
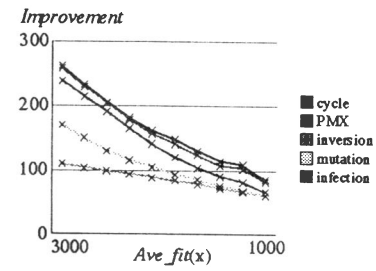
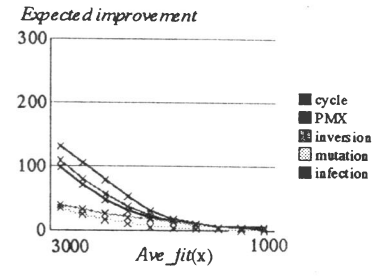


Fig.8 Simulation results against the Population evolved by G_5







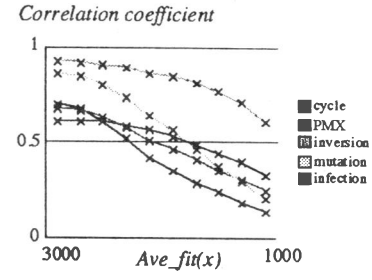


Fig.9 Simulation results against the Population evolved by G_6

逆位が非常に高い値を示している．これは，ウイルスにより生成された部分遺伝情報を逆位により反転させることにより，よくなる遺伝子列を含んでいることから考えられる．

4．おわりに

本稿では，ウイルス進化型遺伝的アルゴリズムにおいて進化的状態遷移について検討し，ウイルス感染が有効なウイルスを生成し，水平伝播できることを示した．また，交叉は，交叉に関してロバストであることを示した．今後の課題としては，さらに，数理的な解析が必要であると考えられる．

参考文献

1)D.B.Fogel, Evolutionary Computation, IEEE Press (1995).

2)N.Kubota, K.Shimojima, T.Fukuda, The Role of Virus Infection in A Virus-Evolutionary Genetic Algorithm, Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol.6, No.3, 415/429 (1996).

3)B.Manderick, P.Spiessens: How to Select Genetic Operators for Combinatorial Optimization Problems by Analyzing their Fitness Landscape, Computational Intelligence Imitating Life, IEEE Press, 170/181 (1994).

4)D.B.Fogel, A.Ghozeil: Using Fitness Distribution to Design More Effective Evolutionary Computation, The 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 11/19 (1996).

問い合わせ先
〒464-01　名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院　マイクロシステム工学専攻
荒川丈昌
Tel：(052)789-4481　Fax：(052)789-3909
E-mail：arakawa@robo.mein.nagoya-u.ac.jp

FRC1-2

An Immune System Derived Approach for Finding Firing Sequences of a Sub-class of Petri Nets

John Takuya Ootsuki
Yokohama Nat. Univ.
doubleo@sekiguchilab.dnj.ynu.ac.jp

Takashi Sekiguchi
Yokohama Nat. Univ.

Hiroyuki Mizutani
Toshiba Corp.

Abstract: The Immune System is a complex biological system with abilities as learning, memory and recognition, which is expected to have a large range of applications in engineering. The aim of this work to propose a new approach for finding firing sequences of a sub-class of Petri-nets derived from the Immune System mechanisms.

1. Introduction

The Immune System[4] is a complex biological system with abilities as learning, memory and recognition, which is expected to have a large range of applications in engineering as other biologically derived methods. The aim of this work is not to imitate the immune system, but based on its concepts and mechanisms, as the idiotype network, is to propose a new approach for finding firing sequences of a sub-class of Petri-nets defined as P1-nets.

Petri Net[1] is a well known tool for modeling and analysis of Discrete Event Systems, with mathematical and graphical capabilities. Determination of firing sequences of Petri Nets, sequence of events that leads the system state from a known initial state to a given final state, has been a challenging field due to its combinatorial characteristics[2]. This problem is directly related with other system properties as boundness and liveness. Conventionally, firing sequences are obtained by enumerative methods but these approaches may be used only in small models.

By this approach the solution is mounted from simple basic components, which selection process is derived from the Immune System mechanisms. The firing sequence problem is divided into several smaller problems, these smaller problems are solved locally and by interacting these sub-sets a valid firing sequence is obtained. Determination of firing sequences of large models with distributed characteristics and with high degree of freedom in its components is expected by applying this approach.

To confirm the validity of this approach simulations were carried out.

2. The Immune System

A complex biological system, fig.1, the immune system is responsible for identifying and eliminating foreign material. Both central nervous and immune system are very similar at the level of system behavior[9], a more symmetric interaction among elements characterizes the immune system.

Several types of cells compose the immune system[6], as macrophages, antibodies, several types of lymphocytes, the antigen itself and etc. Structurally B and T cells are similar, but functionally they differ substantially. Only B-cell can generate anti-bodies and interact with themselves, T-cells can kill, excite or suppress other cells. Selection of the most appropriate antibody implies in multiplying B-cells which produces antibodies that neutralizes the antigen. Macrophages "digest" the antigens opening its 3 dimensional structure, allowing that T-cells look inside the antigen structure, these T-cells excite B-cells which produces the antibodies that neutralizes the foreign material, antigen.

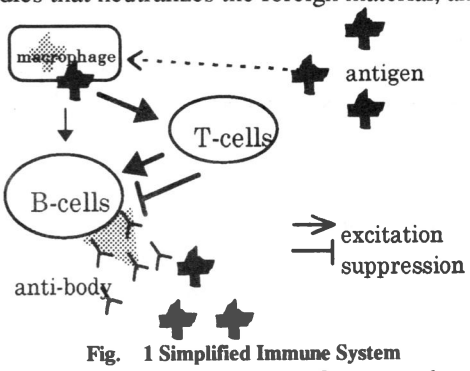


Fig. 1 Simplified Immune System

Response of the Immune System, that is the generation of proper antibodies to an antigen, is not limited to the excitement of a B-cell by an antigen, but all the immune system reacts for selecting the most appropriate antibody. The concept of a highly connected network, propagation of any stimulus through all lymphocyte cells populations, has been questioned lately [5][10][11]. This kind of highly integrated interaction does not allow the establishment of the association and specificity observed in the actual immune system, indicating that the immune systems is composed by functionally independent circuit sets integrated by shared circuit components. From this kind of organization, it is possible to conclude that it executes a distributed search for the most appropriated antibody. Mathematically formulated by Farmer[7], Jerne`s idiotype network, Immune responses are regulated by a idiotype(id)-anti-id recognition, considers only a simple part of all system, the B-cells idiotype network.

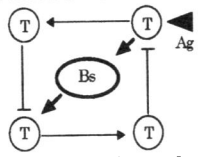


Fig. 2 Hezemberg's regulatory model

In recent works [5][10][11], interactions of the immune response regulatory model are organized into several discrete circuits which are excited by antigens. By Jerne`s idiotype network hypothesis, the interactions among B-cells are done by epitope-paratope interactions,

as T-cells have similar structure of B-cells, it is possible to conclude that they also excite T-cells. Due to its simplicity, Hezemberg model is base of our approach, fig. 2.

3. Petri Nets, Notations and Definitions

A well known tool for modeling of Discrete Event Systems (DES), capable of representing parallel and distributed systems, which allows mathematical and graphical treatment. By Petri Nets a DES can be easily modeled by simple graphical elements as:

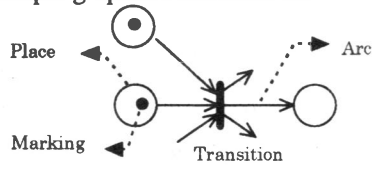


Fig. 3 Petri Nets Graphical representation

A Petri Net is a 5 tuple , *PN:(P,T,A⁺,A⁻,mₒ):*

P: finite, non empty set of places, representing the states that the system may assume.

T: finite, non empty set of transitions, representing the system events that may occur, with $P \cap T = \varnothing$

A^+ :set of output arcs, $A^+ \subseteq T \times P$.

A^- :set of input arcs, $A^- \subseteq P \times T$.

m_o: initial marking, $P \to N$, represents the system initial state.

Given an initial m_0 and a final m_d marking , a firing sequence σ is a sequence of transitions that leads the system state from m_0 to m_d, by firing σ, $m_0[\sigma > m_d, \sigma = \{t_1, t_2 \ldots, t_n\}$.

A strongly connected sub-net $SM^i(P^i,T^i,A^{i+},A^{i-},m_o^i)$ is an *SM-component* [3] of $PN(P,T,A^+,A^-,m_0)$. In a strongly connected State Machine, any transition have only one input and one output arc. A *PN* is said to be *SM-covered,* if there exists a set of *SM-components* SM^i such that $P = \bigcup P^i$, $T = \bigcup T_1$, $A^+ = \bigcup A^{i+}$ and $A^- = \bigcup A^{i-}$.

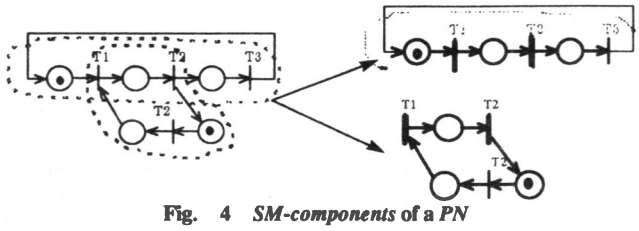


Fig. 4 *SM-components* of a *PN*

Given a Strongly Connected State Machine $SCSM(P,T,A^+,A^-,m_0)$, a pair of transitions (t_1,t_2), with $t_1 \neq t_2$ and $\{t_1,t_2\} \subseteq T$, and a initially marked place $p_0, M_0(p_0) = 1$, these elements are in a $Seq(t_1,t_2,m_0)$ relation for $\forall C_{p_0} | \{t_1,t_2\} \subseteq C_{p_0}$, if the pair of transitions (t_1,t_2) is located in C_{p_0} such that $C_{p_0} = \left(l_{p_0 t_1} \to t_1 \to l_{t_1 t_2} \to t_2 \to l_{t_2 p_0}\right)$ relation is kept.

A Petri Net $PN(P,T,A^+,A^-,m_0)$ is called a ***P1-net***, if it is *SM-covered* and if for two transitions $\{t_a,t_b\}, \forall \{t_a,t_b\} \subseteq Tb^{i,j}$ of any pair of *SM-components* $\{SM^i, SM^j\}, \forall \{SM^i, SM^j\} \subseteq PN$, the relations $Seq(t_a,t_b,m_0^i)$ and $Seq(t_a,t_b,m_0^j)$ are valid for both SM^i and SM^j.

It can be easily observed that a ***P1-net*** is also P-invariant covered, once the number of tokens is constant in each SM^z component for any event occurrence.

Basic-SM^z components, BMS^Z, are *SM*^{z}*-omponents* of a *P1-net*, with $Z = \{z | BMZ^z \in PN\}$, such that $PN = \bigcup_{z \in Z} BMS^z$ and $BMS^y \notin BMZ^z, \forall x,y$.

A transition of $t, t \in T^z$ can be classified as:

Border: input or output places of t belong to z and to another BMS^y, $y \in Z$ set .

Internal:input and output places of t are in BMS^y.

A local firing sequence $\sigma^z, m_0^z[\sigma^z > m_k^z$ is defined by associating a cost $g_x^z, x \in T^z$ to each transition x of BSM^z, and by identifying local markings $\{m_0^z, m_d^z\}$.

$$l^z\left[\sigma_k^z\right] = g_{\sigma_k^z} l^z\left[\sigma_{k-1}^z\right], \quad s^z\left[\sigma_k^z\right] = g_{\sigma_k^z} s^z\left[\sigma_{k+1}^z\right] \quad (1)$$

with $l^z[\sigma_{m_0}^z] = s^z[\sigma_{m_d}^z] \to R > 0$

The firing sequence $\sigma^z = \{t_1, t_2 \ldots t_n\}, t_n \in T^z$ of a BSM^z, maximize the function $l^t\left[\sigma_{m_d^z}^a\right]$ or $s^z\left[\sigma_{m_0^z}^a\right]$. Therefore a transition $t, t \in T^z$ belongs to σ^z, if :

$$\frac{s^z[t].l^z[t]}{g_t^z} = l^z[\sigma_{m_0}^z] l^z[\sigma_{m_d}^z] \Rightarrow t \in \sigma^z \quad (2)$$

A main path firing sequence $\psi^z, m_0^z[\psi^z > m_k^z$ is a local firing sequence $\sigma^z, m_0^z[\sigma^z > m_k^z$ which border transitions $t, \left(t \in Tb^z\right) \wedge \left(t \in \psi^z\right)$ are also elements of any other local firing sequences $t \in \sigma^y, \forall y \in Z$, i.e., $\psi^z \in \sigma$. A transition $t, t \in Tb^z$ may become part of a local firing sequence σ^z by increasing the gain g_x^z of serial transitions, fig. 7, and by decreasing the gain g_x^z of concurrent transitions, $x \in T^z$.

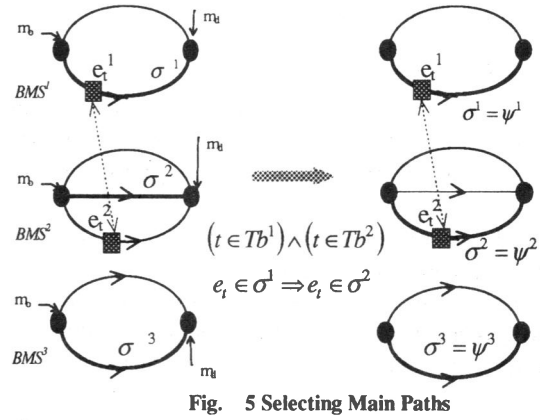


Fig. 5 Selecting Main Paths

It is assumed that a sub-marking may be achieved

only once in a local firing sequence.

4. Finding a Firing Sequence

Wei[14] and Hezemberg[13] presented a more ample model of the immune system , considering T-cells as major responsible for the immune response regulation. B-cells are organized in small groups and T-cell are responsible for selecting the most appropriated B-cells set, inside of each B-cells idiotype network a minor selection process is executed, this indicates a distributed selection process. By dividing the firing sequence problem into smaller problems, firing sequences are obtained by interacting these sets, by setting $g_t^z, t \in T$ of each BSM^z.

Biological concepts of cooperative and competitive interactions among elements [6] are used for deducing relations among elements.

4.1. Interaction elements and Relations

3 types of elements are defined, PB-cells, PT-cells and P-antigens, comparable in function to B-cells, T-cells and antigens respectively. PB-cells, e_t^z, represent transitions of a BSM^Z, each transition $t, t \in T^z$ defines an interaction element e_t^z, that is composed of an associated gain factor g_t^z the pair $\left\{l^z[t], s^z[t]\right\}$.

These elements are in idiotype loop like interaction, fig. 6, but interactions between a pair of PB-cells are not in mutual suppression-excitation form as in [11]. These elements are in mutual suppression or excitation, depending on their position in the model. Differing from Farmer[7], the objective here is to find a set of elements that best satisfies the firing sequence constraints, not to select a unique clone set.

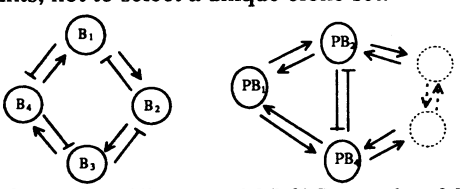


Fig. 6 Conventional idiotype model (left) Proposed model (right)

Mutual excitement occurs between a pair of PB-cells, when associated transitions are in serial relation, and in mutual suppression when the transitions are in concurrent relation, fig. 7.

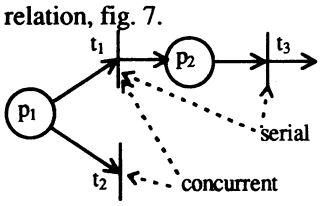


Fig. 7 Serial and Concurrent transitions

P-antigens react with e_t^z that belong to a local firing sequence, $t \in \sigma^z$. If a PB-cell e_t^z is excited by a P-antigen, the transition associated to this cells belongs to a local firing sequence, fig 8.

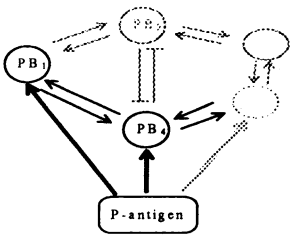


Fig. 8 P-antigen

Generally the fitness of an antibody to an antigen is determined by hamming distance. Here, the fitness level of a transition to a local firing sequences is given by:

$$\Omega\left[e_t^z\right] = Exp\left[\omega\left(\frac{s^z[t]l^z[t]}{g_t^z l^z\left[\sigma_{m_0}^z\right]} - l^z\left[\sigma_{m_d}^z\right]\right)^2\right] \quad (3)$$

$w \to R >> 0$ is a simulation constant.

Interactions among different PB-cells sub-sets are done trough PT-cells, which are responsible for selecting the most appropriate local firing systems for composing the main path firing sequences, fig. 9.

In Jerne's idiotype network, interactions among B-cells are done by epitope-paratope interactions, as T-cells have almost the same structure of B-cells, so B-cells can also excite T-cells model, making it equivalent to the model of [11].

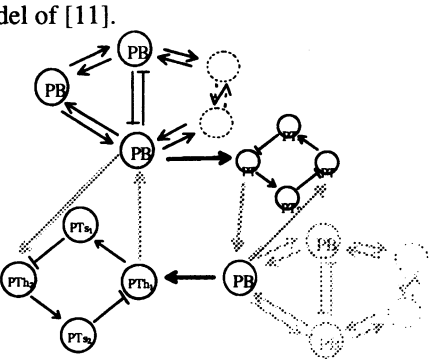


Fig. 9 Interaction between PB-cells groups

The response time among different *BSM*s is considered to be very small in relation to the interaction response time in the PB-cells sub-sets. Also biological concepts of cooperative and competitive relations are used for deducing the dynamic behavior of the system.

4.2. System Dynamics

An excitement and suppression limiting function is used for avoiding over excitation or suppression of $g_t^z, t \in T^z$, similar to the sigmoid function used in [8] :

$$f\left[g_t^z\right] = g_t^z\left(1 - e^{-\omega(S - l^z[t])^2}\right)\left(1 - e^{-\omega(\lim 0 - g_t^z)^2}\right) \quad (4)$$

Dynamics of PB-cells population of a BSM^z can be described by the following equation set. Selection of the most active elements by the *Max[{x}]* operator, for obtaining the maximum value of a x set, is based on the concept of competitive interaction. Serial and concurrent influence from other elements is represented as follows:

$SER^z[t]$= set of serial trans. of t in BSM^z (5)

$CONC^z[t]$= set of concurrent trans. of t in BSM^z (6)

$$Pos\left[e_t^z\right] = f\left[Max\left[\left\{g_x^z \middle| x \in \left\{SER^z[t]\right\}\right\}\right]\right] \quad (7)$$

$$Neg\left[e_t^z\right] = f\left[Max\left[\left\{g_x^z \middle| x \in \left\{CONC^z[t]\right\}\right\}\right]\right] \quad (8)$$

Resulting that for the dynamics of an internal transition PB-cell, $e_t^z, t \in Ti^z$:

$$\dot{g}_t^z = g_t^z\left(\Omega\left[e_t^z\right]\left(C_3\left(1-g_t^z\right)+C_6\right)+ C_4 Pos\left[e_t^z\right]\left(1-\Omega\left[e_t^z\right]\right)-C_5 Neg\left[e_t^z\right]-C_6\right) \quad (9)$$

The first term of (9) represents the influence from P-antigens, the second from serial elements , the third from concurrent elements and the last term is the natural decreasing factor. The influence from the first and second terms are limited by artificial zeros at 1, for avoiding the system instability.

Excitation from PT-cells on a $e_t^z, t \in Tb^z$ is:

$$\dot{Bg}_t^z = g_t^z\left(C_1 - C_2\Omega\left[e_t^z\right]\right)\left(f\left[Max\left[\left\{g_t^x\Omega\left[e_t^x\right]\middle|\left(t \in T^x\right)\wedge\left(x \neq z\right), x \in Z\right\}\right]\right]\right) \quad (10)$$

Resulting in the following differential equation for border transitions, PB-cells, $e_t^z, t \in Tb^z$:

$$\dot{g}_t^z = Ig_t^z + Bg_t^z \qquad t \in Tb^z \quad (11)$$

From these differential equations , it is possible to observe that the search of firing sequences done is with priority to independent local firing sequences. The main path firing sequences are imposed by excitation from $\dot{B}\,g_t^z$, influence from shared elements.

5. Application Example

The following model was simulated, 26 places and 34 transitions:

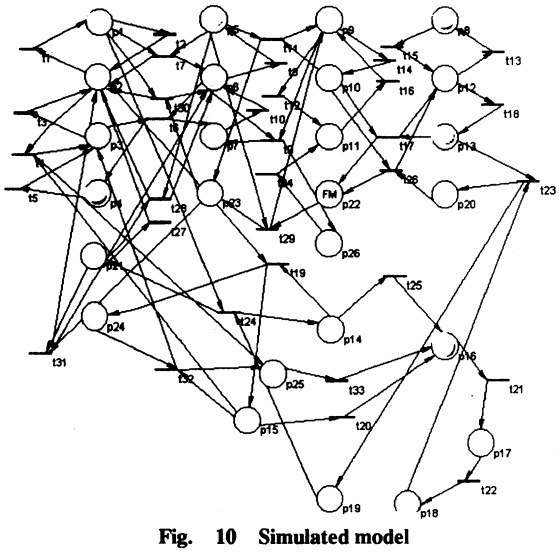
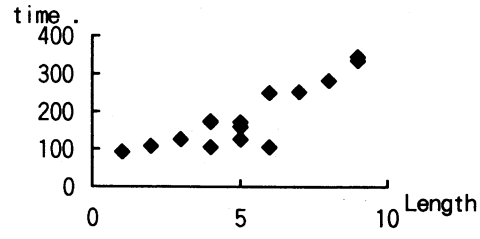


Fig. 10 Simulated model



Graph. 1 Time characteristics

The validity of this method is demonstrated by these simulations.

In graph 1, the relation firing sequence length per processing time is represented , it is possible to observe that in this approach the increase of the solution size does not increases drastically the processing time.

6. Conclusion

The objective of this work was not to imitate the immune system behavior, but to use basic concepts from the immune response mechanism for proposing a new approach for solving a simple combinatorial problem, finding firing sequences of *PI-nets*.

Determination of firing sequences of large models with distributed characteristics and with high degree of freedom in its components is expected by this approach, due to its distributed search mechanism characteristics. Further studies will be conducted on this topic.

References

1. James L. Peterson; "Petri Net Theory and the Modeling of Systems"; Prentice-Hall Inc., 1981, ISBN 0-13-661983-5
2. T. Watanabe, Y. Mizobata, K. Onaga; " Time Complexity of Legal Firing Sequence and Related Problems of Petri Nets", The Transactions of the IEICE, vol. E72, dec. 1989
3. D. Lee, S. Kumagai, S. Kodama; "Complete Structural Characterization of State Machine Allocable Nets"; IEICE Transactions, vol. E 74, no. 10; October 1991
4. N. K. Jerne; " The Immune System"; Science America; vol. 227, no.1; 1973
5. H. Atlan, I.R. Cohen; "Theories of Immune Networks"; Springer-Verlag; ISBN:3-540-51678-6; 1989
6. Kitano Hiroaki; "Genetic Algorithm"; Sangyoutosyo; ISBN 4-7828-5141-3;vol.2 ; 1995
7. J. D. Farmer, N. H. Packard, A. S. Perelson; " The Immune System, Adaptation, and Machine Learning"; Physica; vol. 22-D, pp187-204; 1986
8. A. Ishiguro, T. Kondo, Y. Watanabe, Y. Uchikawa; " A Reinforced Learning Method for Dynamic Behavior Arbitration of Autonomous Mobile Robots Based on the Immunologica Information Processing Machines"; Trans. of IEE-J, vol 117-C, no.1 ; 1997
9. G. W. Hoffmann; " A Neural Network Model Based on the Analogy with the Immune System"; Journal of Theoretical Biology; vol . 122, pp33-67; 1986
10. L. A. Herzenberg, S. J. Black, L. A . Herzenberg; "Regulatory circuits and antibody responses"; European Journal of Immunology, vol.10, pp. 1—11; 1980
11. Z. Wei, K. Nakano; " A Network Model of Regulation for Immune Responses"; Trans. of IEICE of Japan; vol. J74-D-11, no3, pp407-415; Mar. 1991

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

遺伝的プログラミングによるモジュール構造獲得

Module Acquisition with Genetic Programming

橋山智訓* 苗村高義** 大熊繁**
Tomonori HASHIYAMA Takayoshi NAEMURA Shigeru OKUMA
*名古屋産業科学研究所 **名古屋大学大学院工学研究科
*Nagoya Industrial and Science Research Institute
**Graduate School of Engineering, Nagoya University

Abstract : This Paper presents a new approach for module acquisition with genetic programming(GP) . GP shows its feasibility in finding solutions for complex tree structures. GP needs much computational cost. It is hard to find large scale structure in simple GP. Koza proposed the Automatic Defined Function (ADF) to generate useful modules automatically. With ADF approach, one of the solution can be found in shorter generations. The obtained modules are different in each trial and have tendency to get larger and larger with generations.

The proposed system has module generation and module evaluation. To evaluate the modules themselves, the results shows the compactness in structure.

1 はじめに

遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm: GA）は生物の進化過程を工学的に模擬したアルゴリズムで、組合せ最適化問題などに適用され、多くの成果を挙げている[1]。GAの特長はその取り扱い易さにある。評価関数は、連続性や微分可能性を必要とせず、設計者が自由に設定可能である。また、対象とする問題の染色体へのコーディングも設計者が自由に設計できる。一方で、GAの解探索性能は、評価関数およびコーディング法に大きく依存する。すなわち、GAの性能は設計者の問題に対する事前知識に大きく依存する。特に、対象とする問題が大規模でかつ複雑な系の場合、GAの染色体・評価関数の設計には工夫が必要となる。特に、階層化、モジュール化を考慮した設計により効率の良い解探索が可能となる。

遺伝的プログラミング（Genetic Programming : GP）は、Koza[2]により提案されたGAの拡張であり、染色体表現においてグラフ構造や木構造を表現できるようにしたものである。GPもGAと同様に、大規模でかつ複雑な問題を解くためには設計者の事前知識が重要となる。Koza[3]は大規模システムに対して、GPを有効に動作させる機構として、自動関数定義（Automatic Defined Function : ADF）を導入した。ADFはGPが対象とする問題の部分構造を自動的に生成する枠組みであり、解探索性能の向上が報告されている。しかしながらADFにおいては、生成された部分構造は安定せず、冗長表現が多いなどの問題がある。

本研究では、GPにおいて部分構造に対して強化学習的な評価を導入することにより、有効なモジュール生成を行うことを試みた。提案するシステムは、以下の３つの部分から構成される。

１：モジュール生成部（Standard GP）
２：モジュール保存部
３：解探索部（GP）

これら各部の相互作用を通じ、有効な部分構造を生成・保持しながら解探索を行う。

提案するシステムを、even-parity問題に適用し本システムの有用性を検証した。

2 遺伝的プログラミング

遺伝的プログラミング（GP）[2]は、遺伝的アルゴリズム（GA）に対して、木構造やグラフなどの構造的表現を扱えるように拡張したものである。GPの染色体表現として、木構造をLispのS表現を用いると、得られた解が構造を表現すると同時に、Lispのプログラムになるためプログラム自動生成がなされたことになる。

2．1 染色体表現

図１にGPの染色体構造を示す。GPの染色体構造は関数ノード（Function node）と終端ノード（Terminal node）からなる。関数ノードは設計者が事前に必要と思われる関数を設定する。終端ノードは変数、定数を入力するためのノードとなる。GAと同様、評価関数は設計者が自由に設定できる。

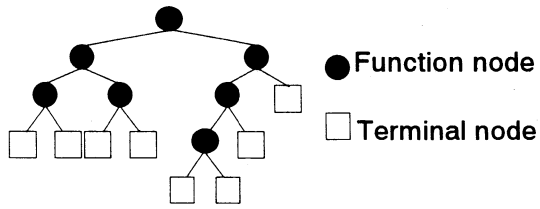


図１　GPの染色体構造

２．２　遺伝的演算

GPにおける遺伝的演算は各ノードに対して行われる。

２．２．１　突然変異

GPにおける突然変異の一例を図２に示す。図２では、関数ノードの関数が変更されているが、関数ノード←→終端ノード、終端ノード←→終端ノードの突然変異を行うこともある。

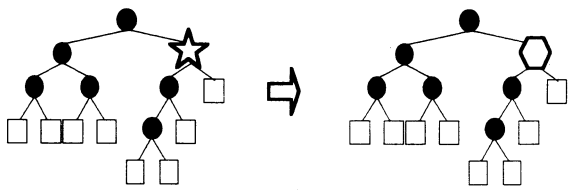


図２　突然変異

２．２．２　交叉

図３にGPにおける交叉の概略図を示す。確率的に選択された部分構造に対して交叉が行われる。

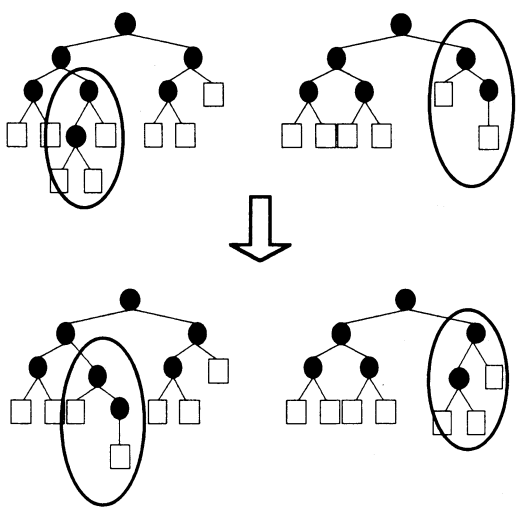


図３　交叉

２．２．３　選択・淘汰

ＧＰにおける選択・淘汰は、GAと同様、評価関数に従い、次世代へ引き継がれる。その詳細は省略する。

２．３　関数自動定義（Automatic Defined Function : ADF）

GPにおいて、必要とする関数ノードの種類は設計者が決定する。GAにおける染色体の設計と同様、関数ノードの設計がGPの探索性能を左右する。

Kozaはこの問題依存性を解決するために関数自動定義（Automatic Defined Function : ADF）を提案している[3]。ADFの基本構成を図４に示す。GP内に関数定義部を構成し、関数定義部により定義された関数ノードを用いることにより解探索を行う。

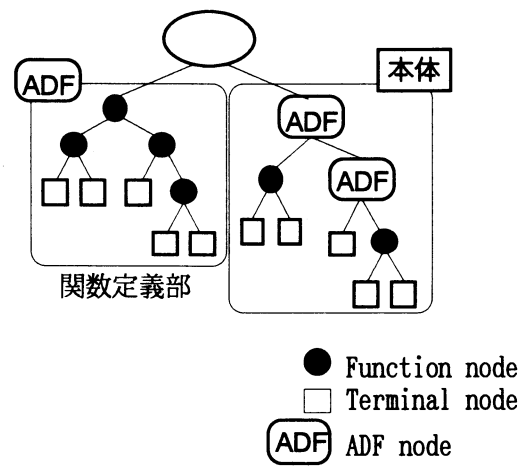


図４　関数自動定義（ADF）

ADFはGPの拡張であるため、容易に実現可能であり、解探索性能が改善されたことが報告されている[4][5]。しかしながら、ADFにおいて、解探索のたびに異なる関数が生成され、そのモジュールが本当に有用であるのかは判断ができない。また、世代を重ねるごとに、ADFモジュール部が肥大化する傾向もあり、結局ADFが問題すべてを解くモジュールとなる場合も多い。このように、ADFにおいては生成されたモジュールを評価する機構がないため、モジュール生成が効率的になされているとは言いがたい。

Angelineらは、GPにおけるモジュール獲得のため、Module Acquisition（MA）システムを提案している[4]。しかしながら、MAにおいて得られたモジュールは、GPの部分構造をランダムに抽出したにすぎず、探索性能は単純GPと変わらない。Hondaらは、ADFモジュールの再利用性を考慮したSharing-ADFGPシステム（COAST）を提案している[6]。Hondaらは、壁つたい問題のロボットナビゲーションに適用してその有用性を示している。しかしながら、ADFのみによる探索結果とほぼ同様の結果が得られているにとどまっている。

3　提案システム

本システムでは、ADFを用いず、単純GPの枠組みの中での有効モジュール生成について検討する。

図5に本システムの構成を示す。本システムは単純GPにより解探索を行い、その部分構造を抽出し（モジュール生成部）、保存する（モジュール保存部）。保存されたモジュールを関数ノードとして用いることで、解探索を行う（解探索部）。以下、本提案システムの概略を示す。

3．1　モジュール生成部

モジュール生成部は、基本ノードのみを用いた単純GPである。評価関数に従い解探索を行う。評価値の高い個体の中から、部分構造を抽出し、モジュール保存部のライブラリに登録する。

3．2　モジュール保存部

モジュール生成部により生成されたモジュールをライブラリに保存する。各モジュールには有用度が設定されている。解探索部により参照された回数およびその評価値により、有用度を更新する。有用度の低いモジュールはモジュール生成部により生成されたモジュールと交換される。

3．3　解探索部

モジュール保存部の関数ノードおよび基本ノードを用い通常のGPにより解探索を行う。

4　シミュレーション

4．1　問題設定

提案手法の有用性を示すために、Even-n-Parity問題を例にシミュレーションを行った。Even-n-Parity問題は、n個のBinary変数の1の数が偶数である場合に1を出力する問題である。この問題は論理関数で表現できるため、本シミュレーションにおいては、解探索の基本ノードをNANDとNOTのみに限定した。

表1にeven-4-parity問題における真理値表を示す。

表1 even-4-parity問題

X0	X1	X2	X3	Z
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

4．2　シミュレーション結果

図5、6にシミュレーション結果を示す。図5は横軸がGeneration、縦軸が解の生成確率である。単純GPだけでは解けない問題が、ADF, および本提案手法において解を見付けることが

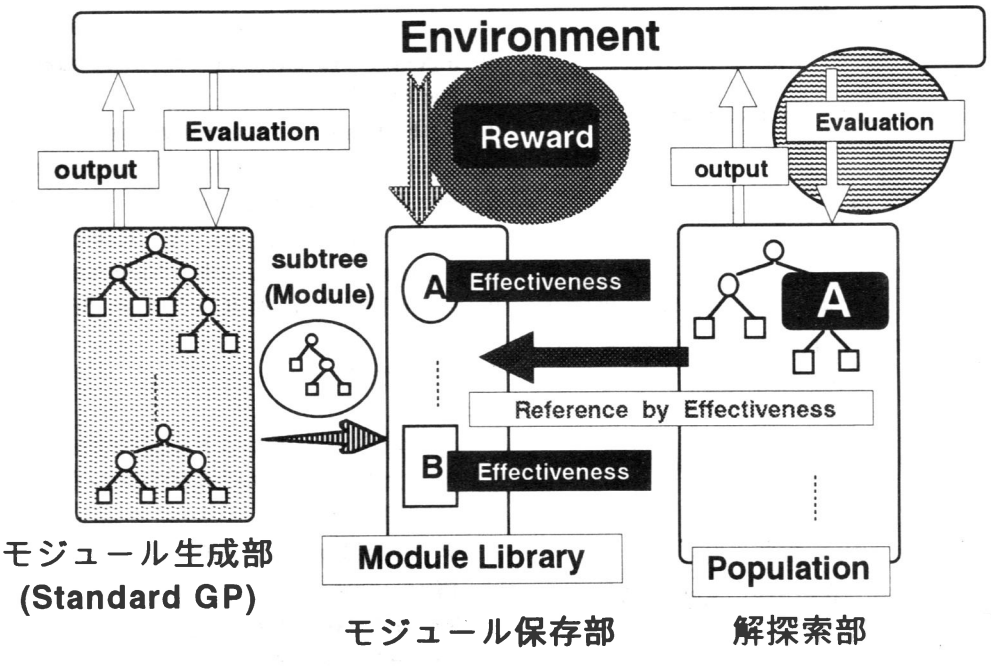


図4　提案システム

できることを示している。特に興味深いのは、提案手法においても、モジュール生成部では単純GPを用いているため、モジュール生成部においては解探索が終了していないと考えられる。しかしながら、単純GPにおいて生成された部分構造を関数ノードとして用いた本手法により解を探索することができた。すなわち、単純GPにおいて淘汰された個体の部分構造で、有用なものを本手法では有用活用できることを示している。

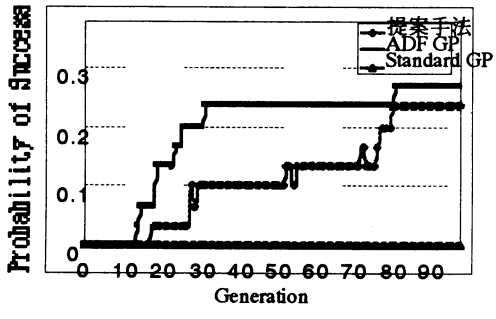


図5　解の生成確率

図6は、生成された解を構成する関数ノードの数の世代変化を示す。ADFが世代が増えるにつれ、ノード数も増加するのに対し、提案手法の方が、ほぼ一定の少ないノード数で解を生成していることがわかる。

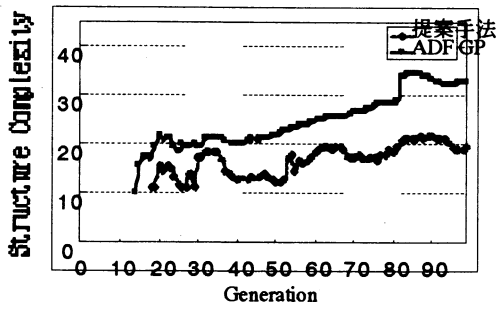


図6　解を構成するノード数

図7に獲得された代表的なモジュールを示す。Even-4-Parity問題がモジュール生成部により生成された、Even-2-parityモジュールを利用して解探索を行っていることがわかる。

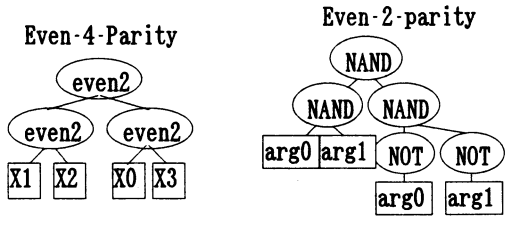


図7　獲得モジュール

生成されたモジュールのうち最も有用度の高かったモジュールの出現確率を表2に示す。even-4-parity問題においてeven-2-parity, odd-2-parityモジュールが高い確率で生成されていることがわかる。

表2 獲得モジュールの生成確率

module	生成確率
even2	0.375
odd2	0.125
その他	0.5

5　おわりに

本研究では、GPにおける大規模問題のための探索手法として、有効モジュールの獲得システムを提案した。

本手法ではモジュールの有効度を評価することでノード数を抑えた効果的な解探索を行っていることがわかる。

今後はより大規模な問題に対して本手法の有用性を検討する予定である。さらに、高次モジュールについても検討していきたい。

参考文献

[1]北野宏明編：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1992

[2] J. R. Koza, "Genetic Programming," The MIT Press, 1992

[3] J. R. Koza, "Genetic Programming II," The MIT Press, 1994

[4] P. J. Angeline, "Genetic Programming and Emergent Intelligence," Advances in Genetic Programming, pp. 75-97, The MIT Press, 1994

[5] K. E. Kinnear, "Alternatives in Automatic Function Definition ; A Comparison of Performance", Advances in Genetic Programming, pp. 119-141, The MIT Press, 1994

[6] N.. Hondo, H. Iba, Y. Kakazu, "Sharing and Refinement for Reusable Subroutines of Genetic Programming," Proc. of ICEC'96, pp. 565-570, 1996

問い合わせ先

〒463
名古屋市守山区大字下志段味字穴ヶ洞
サイエンスパーク研究開発センター
共同研究棟　3F
名古屋産業科学研究所
橋山　智訓
Tel: 052-739-1889
Fax:052-739-1889
email: *tom@nisri.moriyama.nagoya.jp*

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC1-4

FPGAを用いた進化的計算の高速化

A Study on Implementation of Evolutional Computation on FPGA

矢野 良和　　橋山 智訓　　大熊 繁
Yoshikazu Yano,　Tomonori Hashiyama,　Shigeru Okuma
名古屋大学
Nagoya University

Abstract: In this paper, we introduce a hardware implementation of evolutional computation algorithms into FPGA, a field programmable gate array logic. Evolutional algorithms show their feasibility insolving job-shop scheduling problem, NP Hard problem, and so on. These algorithms cost much to get optimum solutions. To overcome these difficulty, we have implemented them on FPGA. This proposed processor was written in Hardware Description Language. This processor can output an optimum solution about 50 times faster than that from software.

1. はじめに

近年、組み合わせ最適化問題などの大規模で複雑な問題に対する効率的な解探索法が求められている。遺伝的アルゴリズム[1]（GA: Genetic Algorithm）に代表される進化型計算は、比較的効率の良い解探索法として知られている。GAは複雑な組み合わせ最適化問題やＮＰ困難問題に対して、その有用性を様々な応用例により示してきた[2]-[4]。しかし、このアルゴリズムは繰り返し計算を多く必要とするため、最適解を得るまでに多大な計算時間を要するため、実時間処理を必要とするシステムへの適用はなされていない。

本稿では高速化を目的として、GA演算回路をハードウェア上で実現することを試みた。演算回路にはFPGA[5]（Field Programmable Gate Array）を利用し、その動作をハードウェア記述言語[6]（HDL：Hardware Description Language）にて記述した。

GAをハードウェアで実行することにより、探索時間を従来の汎用CPU上での、ソフトウェア実行よりも５０倍程度短縮させることができたので報告する。

2. ハードウェアシステム

2.1 FPGA

図１にFPGAの内部構造を示す。FPGAは、内部に論理回路とフリップフロップで構成されるブロックを数千個持ち、それらのブロック同士の結線情報や入出力バスへの結線情報を設計者が自由に書き換えることができる論理回路である。結線情報はEEPROMやSRAMと同様に蓄えられるため、何度でも書き換えることができる。

2.2 HDL

ハードウェア記述言語（HDL）はハードウェアの動作を記述するソフトウェアである。HDLを利用することで、より抽象度の高いレベルでハードウェアを設計することができ、設計期間の短縮や設計変更を容易にするといったメリットがある。HDLにはVHDL（VHSIC HDL）やVerilog-HDL、SFLなどがある。それぞれの言語が特徴を持つが、本研究ではVHDLを用

いた。

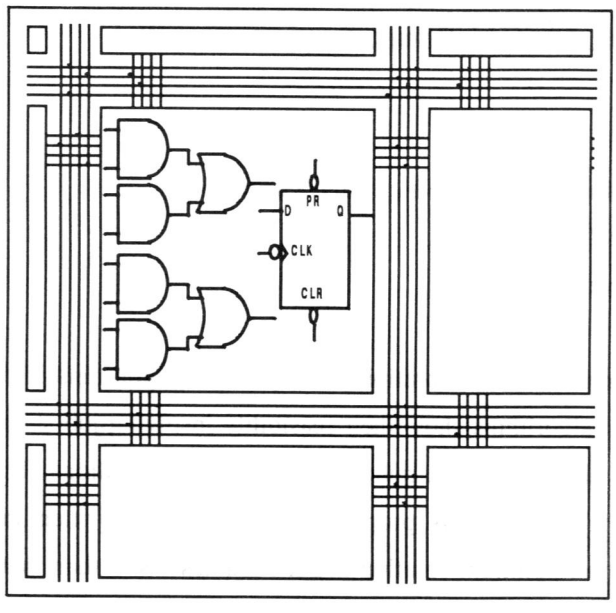


図 1　FPGA の内部構造

3. GA 演算回路

GA 演算回路を FPGA 上に構成した。概略図を図 2 に示す。また、この回路の仕様を表 1 にまとめる。

この回路では、評価→選択→交叉→突然変異（→評価）という遺伝的操作の繰り返し処理を実現している。それぞれのモジュールはすべて並列動作し、パイプライン動作をさせているため 1 クロックで新しい染色体を 1 つ作り上げることができる。以下に各モジュールの構成を示す。

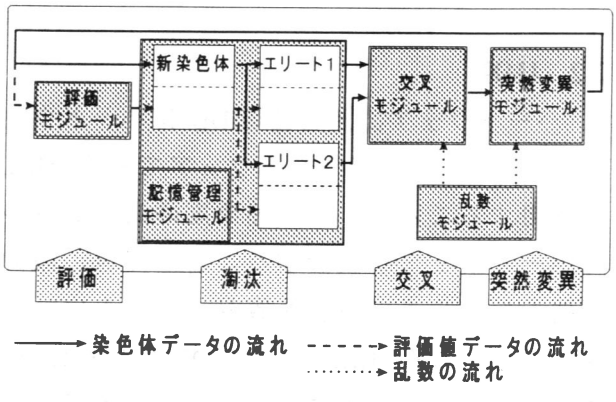


図 2　GA 演算回路の概略図

表 1　GA 演算回路の仕様

染色体長	16bit長
集団数	3（新染色体 1 エリート 2）
選択方法	エリート戦略
交叉	一様交叉
突然変異	一点及び多点での変異

3.1 評価モジュール

生成された染色体に対して評価関数を用いて、評価を行う。染色体データを入力し、その染色体の評価値を出力する。このモジュールだけはタイミング上、非同期のモジュールとなっている。

本研究では簡略化のため内部に評価モジュールを用いたが、演算回路に汎用性を持たせるには問題にあわせて評価関数を変えられるよう、外部に用意するのが理想となる。

3.2 記憶管理モジュール（新染色体,エリート 1,エリート 2）

このモジュールは、フリップフロップにより構成されている。生成された染色体データとその評価値を保持している。

染色体は合計 3 組保持される。新染色体データおよび 2 つのエリート染色体に対応する。新しく生成された染色体はこのエリートのどちらかと比較される。そして、新染色体がエリートよりも良い評価値の場合はそのエリートと新染色体のデータが交換される。

3.3 交叉モジュール

記憶管理モジュールに保持された２体のエリート染色体から新染色体を生成する。交叉モジュールはエリート２組と乱数を入力とし、一様交叉を行う。

3.4 突然変異モジュール

染色体データに対し、ある確率で突然変異を起こす。変異は乱数データにより生成したマスクデータをもとに該当するビットを反転させている。突然変異モジュールより出力された染色体は評価モジュールへ送られる。

以上 3.1 ～ 3.4 の動作を繰り返すことにより遺伝的アルゴリズムをハードウェア上で実現した。

3.5 乱数モジュール

GA 演算において操作では確率的な処理を行うので、乱数は重要な要素となる。本演算回路では乱数の生成にはオートマトンを利用している。図 3 に乱数生成法を示す。この乱数は簡略化されたもので、乱数としての性質は必ずしも良いものではなく、収束性能を劣化させている。

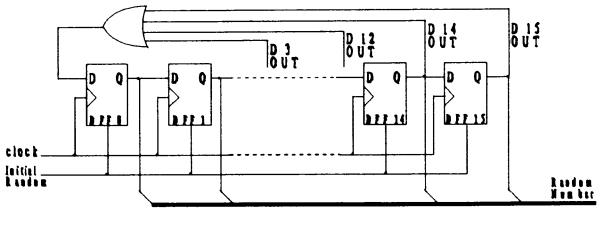


図 3　乱数生成

4. シミュレーション

4.1 問題設定

提案した演算回路の動作確認のため、簡単な探索問題により、実行速度の検証を行った。探索問題には 16 bit 定数値（0xD309）の探索を行った。その評価関数には

（評価値）＝（染色体）xor 0xD309

を用いた。

4.2 演算速度

様々な初期乱数で２０回試行したときの平均の収束時間を測定した。表 2 にハードウェアでの演算速度を示す。

表 2　ハードウェアでの演算時間

	16bit 版(D389)	8bit 版(56)
平均	6.85μs (170世代)	2.51μs (63世代)
最良	1.94μs	1.06μs
最悪	16.82μs	4.10μs

ただし、周波数は 25 MHz（T=40ns)である。また、最初にリセットパルスを 60ns 与えた。

我々が対象とする実システムのサンプリング時間は 1 ～ 10　ms オーダを仮定しているため、本演算回路は実時間で十分な解探索能力を持ち得る。

また、シミュレータより得られた各モジュールでの染色体データの遷移の様子の一部を図 4 に示す。

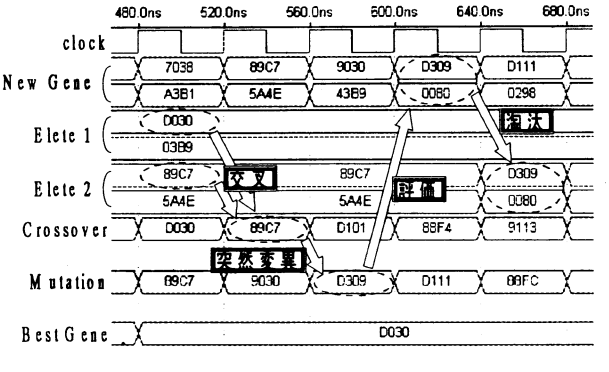


図 4　染色体データの遷移

このタイムチャートからもモジュールそ

れぞれがデータを正常に更新していることが確認できる。

この演算回路のシミュレーションにはAltera MAX+PLUS Ⅱ + VHDL モジュール を利用した。

4.3 回路の規模

染色体長が 8bit / 16bit の回路規模について考察する。それぞれの演算回路で使用した論理ブロック数は 8bit では 195 ブロック、16bit では 399 ブロックであることがシミュレータにより確認された。これより染色体長と回路規模がほぼ比例していることが判る。

4.4 ソフトウェアとの比較

本演算回路と同じ構成を持つ GA を、ソフトウェアにより実現した。すなわち２エリートと子染色体１の GA システムをソフトウェアで作成し、収束速度を測定した。ソフトウェアとハードウェアとの相違として、ソフトウェアでは乱数関数に rand()を用いている。ハードウェアとの比較を表 3 に示す。ソフトウェアによる演算は C 言語で記述し、PC/AT 互換機(Pentium 200 MHz)上で動作させた。

表3　ハードウェアとソフトウェアで実行した GA 演算の平均収束時間の比較

	16bit GA 回路	8bit GA 回路
Hardware	7μs(170)	3μs(63)
Software	370μs(139)	150μs(55)

収束時間(世代数)

この結果からハードウェアでの演算速度がソフトウェアよりも５０倍程度速いことがわかる。世代数においてはソフトウェアの方が少ない回数で収束している。これは乱数の有効性を示す指針となっている。

5. まとめと今後の課題

本研究では、生物進化を模擬した遺伝的アルゴリズムの高速実現をめざし、HDL, FPGA により動作を検証し、その速度における有用性を確認した。今後は遺伝子長の拡張、他の進化計算手法への適用を考慮してゆく予定である。

参考文献

[1] 北野宏明 編 : 遺伝的アルゴリズム
産業図書,1992

[2] 北野宏明 編 : 遺伝的アルゴリズム２
産業図書,1994

[3] 萩原将文 : ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム　産業図書,1994

[4] Michalewicz : Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs
Springer-Verlag,1992

[5] ALTERA 1996 Data Book
Altera Corporation, 1996

[6] Douglas L.Perry 著 メンター・グラフィックス・ジャパン株式会社 訳 今井正治 / 山田昭彦 監訳:VHDL
アスキー出版社,1996

問い合わせ先

〒 464-01 愛知県名古屋市千種区不老町
名古屋大学 工学部 大熊研究室
矢野 良和
Tel: 052-789-2777 Fax: 052-789-3140
E-mail : yoshi@okuma.nuee.naogya-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC2-1

笑いの程度の分析とその表現に関する一考察

A Study on Analysis of Degree of Laugh and Its Expression

伊達大輔*, 鬼沢武久**

Daisuke DATE ,Takehisa ONISAWA

* 筑波大学理工学研究科　Master's Program in Science and Engineering, University of Tsukuba

** 筑波大学構造工学系　Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba

Abstract - This paper constructs a model which reasons and expresses the degree of laugh from a funny story, and gives some remarks on the model. This model is based on the Kimura theory. The initial facial expressions (the face before listening a funny story), the degree of laugh and that of superiority laugh are estimated by the use of the fuzzy reasoning technique. Their degrees are expressed by facial expressions and linguistic terms.

1　はじめに

最近インターネットを始めとするマルチメディアが脚光を浴びている一方で、より人間に近い柔らかい思考を行うシステムの開発が求められている。現在の人間とコンピュータとの処理の流れは人間が命令を出し、コンピュータはそれに応じた動作をするという「感性の存在しない対話処理」が行われていると言える。そこで人間の感性に訴えるシステムを構築することが必要であると思われる。本論文では感性の中でも特に「笑い」に注目する。我々は笑うことで相手とのスムーズな対話を行うことが可能である [1]。そこで人間のように笑うシステムを導入することが、人間とコンピュータとのコミュニケーションの円滑化を図る一手段であると考えられる。しかし笑いのメカニズムの研究は、哲学や心理学などの分野において理論や仮説が多く提案されている [1]-[3] にもかかわらず、現在でも完全には解明されていない。そこで本論文では木村が提示した笑いの理論 [3]、及び曖昧さを扱うファジィ理論を用いて、ある話について笑いの程度を解析し、結果を表情と文章で出力するシステム [4]-[6] の概説と、より人間の感性にあう表現を行うシステムへ改良するための手段について考察する。

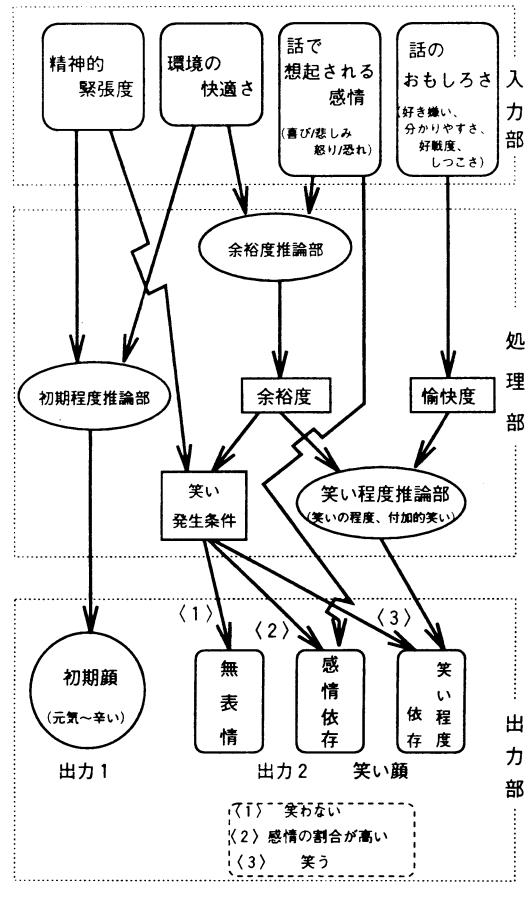


図1　モデルの概念図

2　モデルの構成

文献 [5][6] のモデルの概念図を図2に示す。このモデルは文献 [4] のモデルを改良したものであり、大きく分けて入力部、処理部、出力部の3つに分類される。

入力部は、環境の快適さ、精神的緊張度 (気持ちの状態)、話のおもしろさ (好き嫌い、分かりやすさ、好戦度、しつこさ)、話を聞いたことにより想起される感情 (喜び、悲しみ、怒り、恐れ) の4つを入力する部分から成り、それぞれの程度はファジィ集合で示される。

処理部では始めに環境の快適さ、及び精神的緊張度からおもしろい話を聞く前の顔の様子 (初期顔程度) とそれを説明する文章をファジィ推論により、「非常に辛い」「辛い」「少し辛い」「普通です」「少し元気です」「元気です」「非常に元気である」の7段階評価のうちの1つを推論 (初期程度推論部) する。次に環境の快適さ、及び想起される感情から余裕度の程度を推論する (余裕度推論部)。また、話のおもしろさから愉快度の程度を求める。ここで用いる各評価言語は、

増山、勝見 [7] により漫才、CM、落語及びそれらの平均のおもしろさ (本研究ではこれを「笑い話」とする) を主成分分析して求められた 6 つの独立変数から 4 つを選び出したものである。重回帰分析の式を基に作成したそれぞれの演目に対する笑い話関数を (1)-(4) 式に示す。

$$\text{漫才}: 0.65x_1 - 0.59x_2 + 0.47x_3 + 0.60x_4 \quad (1)$$

$$\text{CM}: 0.59x_1 + 0.31x_2 + 0.01x_3 + 0.21x_4 \quad (2)$$

$$\text{落語}: 0.77x_1 + 0.21x_2 - 0.29x_3 + 0.10x_4 \quad (3)$$

$$\text{笑い話}: 0.60x_1 + 0.24x_2 + 0.10x_3 + 0.02x_4 \quad (4)$$

x_1: 好き嫌い　(好き、嫌い)
x_2: 分かりやすさ　(分かりやすい、分かりにくい)
x_3: 好戦度　(攻撃的、平和的)
x_4: しつこさ　(あっさり、しつこい)

なお、愉快度の計算には各評価言語について選択されたファジィ集合について拡張原理を用いたファジィ加算を行っている。こうして求まる余裕度と愉快度から笑いの程度を推論する (笑い程度推論部)。笑い程度推論部では笑いの程度 (無表情、微笑み、笑い、大笑い) と付加的笑いの程度 (寛大さ、嘲笑) について推論する。ここで付加的笑いとは笑い話を聞いた人間自身が優位に立ち、さらに相手が自分を下回っているという優越理論に基づく好意的 (寛大な笑い)、または否定的な笑い (嘲笑)[2] である。以上の推論結果は笑いの発生に関する考察 [3] に基づく条件により笑わない、感情の割合が高い、笑うの 3 つに分類される。

出力部では初期顔を初期程度推論の結果に基づいて出力する (出力 1)。また笑い顔の出力 (出力 2) については、笑い発生条件による分類に従い、それぞれの程度に対応する顔の表情と文章を出力する。初期顔、及び笑い顔の例を図 2 に示す。なお、それぞれの顔は、顔と感情に関する文献 [8] から選択したものである。

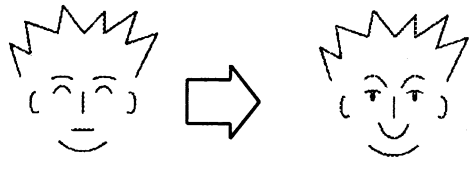


図 2　初期顔、笑い顔の例

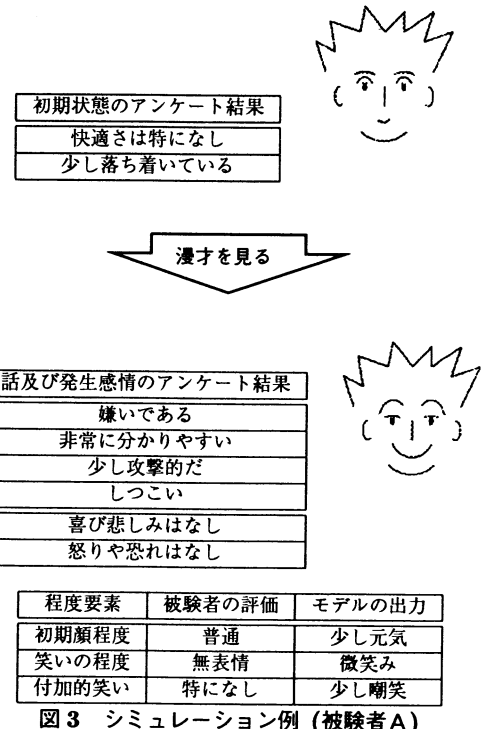
3　モデルの評価

モデルの評価のためにアンケート調査を行った。サンプルとして用意した演目の概略を表 1 に示す。

表 1　アンケート用演目概要

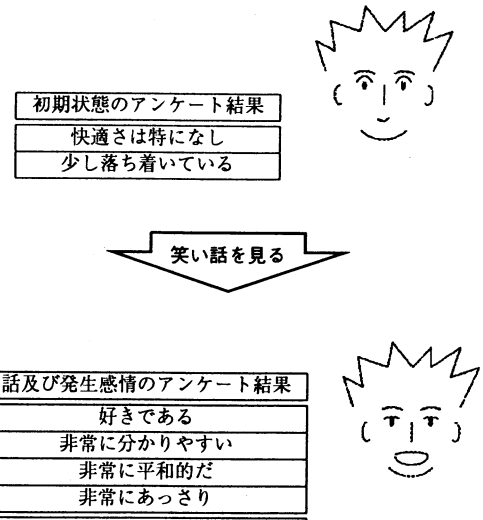
演目種類	内容
漫才	相方との相性に関する話題 (宮川大介・花子)
CM	DC CARD (空港に行くタクシーの中)
笑い話	草に扮して最近の言葉や流行を語り合う話

表 1 のサンプルを被験者 12 名 (男性 5 名、女性 7 名、平均年齢 26 歳) に見せ、快適さ、緊張度、話の愉快さ、話によって生じる感情をアンケートする。そのデータを基にした被験者 A(男性:23 歳) について漫才を見たときのシミュレーション例を図 3 に、被験者 B(女性:20 歳) について笑い話を見たときのシミュレーション例を図 4 に示す。



程度要素	被験者の評価	モデルの出力
初期顔程度	普通	少し元気
笑いの程度	無表情	微笑み
付加的笑い	特になし	少し嘲笑

図 3　シミュレーション例 (被験者 A)
漫才についての評価



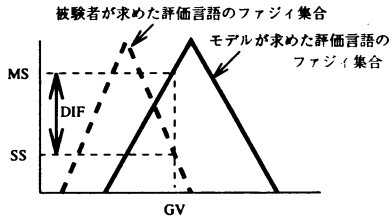
程度要素	被験者の評価	モデルの出力
初期顔程度	普通	少し元気
笑いの程度	笑い	笑い
付加的笑い	特になし	特になし

図 4　シミュレーション例 (被験者 B)
笑い話についての評価

図3,4では、初期状態入力とそれに対するモデルの初期顔、話の評価の入力とそれに基づいてモデルが出力した笑い顔、最後に被験者とモデルの評価の違いを示す表の順に示している。

モデルの評価のために、初期顔、笑い、付加的笑いの各程度についてモデルが推論した値(クリスプ値)を用いて求めたファジィ集合と被験者の入力した言語に対するファジィ集合におけるグレード値を求め、図5に示すように両者の差(DIFと表記する)を求める。次にDIFの値の大きさにより(5)式を用いてシミュレーション結果を一致数、近似数、不一致数と分類し初期顔、笑い、付加的笑いそれぞれの程度について集計する。評価方法を図5に、評価結果を表2に示す。

$$\begin{cases} 0 \leq DIF \leq 0.25 & : \text{一致数} \\ 0.25 < DIF \leq 0.5 & : \text{近似数} \\ 0.5 < DIF & : \text{不一致数} \end{cases} \quad (5)$$



MS: モデルが求めたファジィ集合によるグレード
SS: 被験者が求めたファジィ集合によるグレード
GV: 推論によって求まった値

図5　モデルの評価方法

表2　モデルの評価

程度要素	一致数	近似数	不一致数
初期顔程度	21	2	13
笑いの程度	16	4	16
付加的笑い	20	2	14

4　評価結果の考察

初期顔程度は比較的良い結果が出ている。不一致の原因のほとんどは被験者よりモデルがより楽観的に状態を推定していることにある(例えばモデルが「元気である」と推定しても被験者は「少し辛い」と評価することがあった)。この理由の1つとして、今回評価言語に加えなかった「疲労」について多くの被験者が感じていたことが考えられる。この結果から「疲労」という要素も初期程度決定に関わりが深い、と考えられる。

笑いの程度は近似数を含めてほぼ60％の割合で一致していることが分かる。このことから余裕度と愉快度という2つの程度から笑いの程度を推定する本モデルの有効性が確認されたと言える。不一致になる理由として、初期程度と同様に被験者が感じている「疲労」の要素が関わっている(話を聞いても疲労感が解消されない)と考えられる。実際データを分析したところ、多くの場合についてモデルは被験者より程度の大きい笑いを選択している。

付加的笑いは、笑いの程度よりも良い評価結果となっている。しかしデータを分析したところ以下のような傾向が見られる。(1)被験者はほとんど「付加的笑いは無い」もしくは「(少し)寛大である」だけを選択しており、嘲笑はほとんど選ばれなかった。(2)被験者が嘲笑を選択したときはほぼ不一致になっている。この結果は「寛大さ」の評価と言って良く、寛大な笑いについてはモデルの有効性が確認されたと言える。しかし嘲笑については各個人間で考えの違いが生じている、もしくはあまり理解されていない傾向も見られているため、別の評価方法を考える必要がある。

以上の考察から、初期顔程度、及び笑いの程度を決定する要素に疲労度を取り入れること、付加的笑いについてはより判断のしやすい表現の設定や評価方法の改善が必要であると考えられる。

5　モデルの改良

現在、以下のような機能を本モデルに加えることを考えている。

1. 各程度のファジィ集合を個人別に変更する
2. 表情の変化に動きを持たせる
3. 初期顔、笑いの程度に疲労の要素を取り入れる

まず改良1.であるが、本モデルでは笑いの程度を除いて左右対称なファジィ集合を各程度のファジィ集合として設定し、すべての被験者に対して同じファジィ集合を用いて推論を行っている。しかし、各個人において「非常に」や「少し」といった副詞に感じる程度の評価は異なることも考えられる。そこでモデルで使用している副詞の評価を被験者に事前に尋ね、その評価に応じて各程度のファジィ集合を変更しモデルに推論を行わせることを考えている。

次に2.の改良の理由を以下に述べる。本モデルは推論結果に応じてあらかじめ用意された表情の画像データを選択するという方法を取っているが、この方法だ

と表情の変化が唐突であり見る側にしてみれば不自然さを感じる。そこで眉、瞳、目、口の座標を記述したファイルを作成し、そのファイルを用いて表情を描くシステム (表情作成システム) を作成した。このシステムのインターフェイスを図6に示す。

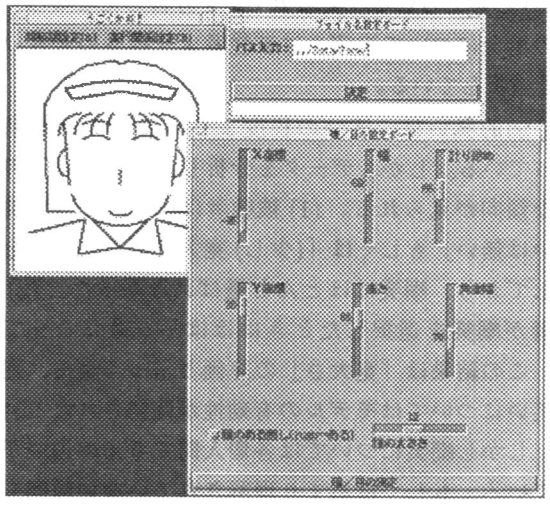


図6　表情作成システムのインターフェイス

このシステムを用いることで任意の表情を作成でき、また座標の値を変化させて再描画することで疑似的に動画像のような環境を実現できる。

3. の改良点は、考察でも述べたように本システムの改良には欠かせない内容である。しかし笑いと疲労との関係については解明されていない部分も多く、簡単に実装することは困難である。笑いの程度に応じて疲労の表情に与える影響が変化する [4] ようにルールを設定することが考えられるが、この部分については今後の課題になると思われる。

以上の改良点以外にも、付加的笑いの程度の推論や話を聞いたことにより想起される感情の設定の見直しなどが挙げられる。

6　おわりに

本論文ではファジィ理論を用いて笑いを分析し、おもしろい話を聞いた人間の表情を出力するモデルを構築した。入力には環境の快適さ、精神的緊張度、話の愉快さ、そして話から想起される感情を用いた。出力としては (1) 話を聞く前の顔の表情と文章、(2) 余裕度、愉快度、感情の程度のファジィ集合から笑いの発生条件を考察し、笑いの程度、付加的笑いの推論を行い、話を聞いた後の顔の表情と文章、を考えた。サンプルを用いたアンケートによるシミュレーション結果から、初期顔の程度および笑いの程度に関して本モデルの有効性が確認された。付加的笑いについては評価方法の改善などを進める必要性があり、現在モデルの改良を進めている。本モデルでは1回のおもしろい話に対する評価のみを行うことが出来るが、実際の笑いには話がある前の感情や状況が関係し、その後の感情にも影響を及ぼすはずである。将来的には連続した笑いや状況にも対応できるようなモデルに改良していくことを考えている。

参考文献

[1] 梅原猛 : 笑いの構造 - 感情分析の試み -, 角川書店 (1972)

[2] マルセル・パニョル (鈴木力衛訳) : 笑いについて, 岩波書店 (1953)

[3] 木村洋二 : 笑いの社会学, 世界思想社 (1983)

[4] 伊達大輔, 鬼沢武久 : 笑いの分析と顔によるその表現, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.215-218 (1996)

[5] 伊達大輔, 鬼沢武久 : 顔表情による笑いの程度の表現, 日本人間工学会第26回関東支部大会講演集, pp.98-99 (1996)

[6] 伊達大輔, 鬼沢武久 : ファジィ理論の笑いの分析への応用, 電気学会システム・制御研究会資料, SC-97-1 ～ 7, pp.29-33 (1997)

[7] 増山英太郎, 勝見雅彦 : お笑い演目のイメージ比較 - 落語、漫才、CMについて -, 日本人間工学会誌, Vol.28, No.1, pp.37-45 (1992)

[8] 北崎幸子, 鬼沢武久 : 顔の表情と感情の推論モデル, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.49-52 (1996)

問い合わせ先

〒305 つくば市天王台 1-1-1
筑波大学構造工学系／工学システム学類 鬼沢研究室
伊達 大輔
TEL:0298-53-6188,FAX:0298-53-6471
E-mail:date@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC2-2

二重マッピングモデルとその製品デザイン支援ツールへの応用

A Dual Mapping Model and Its Application to a Design Support Tool

北島 宗雄
Muneo Kitajima

生命工学工業技術研究所
National Institute of Bioscience and Human-Technology

金 燉漢
Don-han Kim

筑波大学大学院芸術学研究科
Graduate School of Art and Design University of Tsukuba

Abstract One of the major problems in designing interactive systems is that the users do not perceive a designed system as the designers intended. For example, the designers have constructed a system in an effort to embody a set of given top-level design concept, such as 'heavy and deep' and 'simple'. However, the users might conceive the designed system as 'sober' and 'practical.' The designers want to identify the design elements that cause the mismatching, and replace them with the ones that might reduce the degree of mismatching. This paper proposes a cognitive model, *a dual mapping model*, that simulates uncertain evaluation processes in kansei by designers and those by users. There are two mapping processes in the model: the designers' mapping process, that transforms a set of top-level design concept onto an idea sketch, and the users' mapping process, that converts the design sketch to impression words. Based on the dual mapping model, this paper proposes a tool for designers that supports their activities for enhancing the idea sketch so that users impressions to it should converge to the given top-level design concept.

1. はじめに

一般的な製品デザインのプロセスにおいては、図1に示したように、まず、ターゲットとなるユーザ層が決定され(企画)、製品仕様とデザインコンセプトが決定される(概念化)。デザインコンセプトには“機能コンセプト”と“造形コンセプト”が含まれるが、次の、スタイリングのステージでは、造形コンセプトを表現するためのアイデアスケッチやレンダリングが行われ、造形デザインがほぼ完成する。さらに下流のステージでは、機能コンセプトも含めて、クレーモデリングの制作(モデリング)、プロトタイプの制作(フィニッシング)が行われる。ここでは機能デザインが大きなウェイトを占める。そして、プロトタイプに対するユーザの評価や専門家パネルの評価を参考にして再デザインが行われ、最終的なデザインが完成される。

さて、いわゆる“感性指向製品”においては造形デザインの役割が機能デザインの役割よりも大きい。したがって、従来のようにプロトタイプの制作の終了を待って製品デザインの評価を行うのではなく、造形デザインがアイデアスケッチという形で表現されるスタイリングのステージで評価を行って、その分析結果を再デザインに反映させることができる。

例えば、企画により定義された造形コンセプトに基づいてアイデアを発展させて制作したスケッチをユーザに評価してもらい、そのスケッチによって表現されていると考えられる造形コンセプトを明らかにする。デザイナーはそれが企画された造形コンセプトと一致することを希望しているが、それに反する結果が得られれば、評価の内容を検討し再デザインを行う。このように、評価をデザインプロセスの上流、スタイリングのステージ、で行うことにより、より効率的なデザインが可能となる。

さて、筆者ら[2]は、スタイリングのステージにおけるデザイナーのアクティビティを支援するツールの構成に関する研究を進めている。図1に示したように、デザイナーはそのツールを利用してアイデアスケッチに関する評価、並びに、その結果を利用した再デザイン、アイデアスケッチの改良を行う。支援ツールに最も必要とされるのは、企画により定義された造形コンセプトと、ユーザがアイデアスケッチから引き出す造形コンセプトとの違いを、デザイ

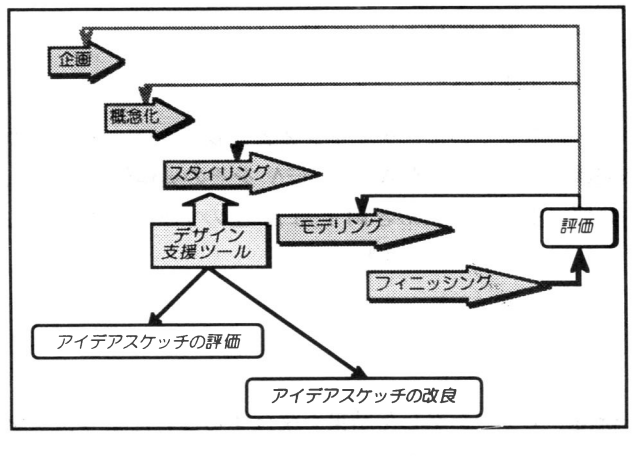


図1. デザインの一般的な流れ。

ナーがアイデアスケッチの改良に利用できるような形式で表現し提供することである。本論文では、デザイナーが企画された造形コンセプトをアイデアスケッチに移し換えるプロセス、並びに、ユーザがアイデアスケッチから造形コンセプトを引き出すプロセス、これらの二重のマッピングプロセスをファジィ論的に定式化し、デザイン支援ツールにおいて利用可能な表現を提案する。また、現在、開発中の支援ツールについて概略を説明する。

2. 二重マッピングモデル

Norman[5]は、デザイナーが想定した仮想的なユーザがシステムに対して持つであろうシステムイメージと、ユーザが実際に持つシステムイメージが必ずしも一致しないことを、システムとユーザの間のインタフェースにおける大きな問題の一つとして指摘している。図2は、同様の関係をシステムイメージを造形コンセプトに、システムをアイデアスケッチに置き換えて示したものである。図2の右側はデザイナーが造形コンセプトをアイデアスケッチにマッピングするプロセス、左側はユーザがアイデアスケッチを造形コンセプトにマッピングするプロセスを示している。ここでは、これを“二重マッピングモデル”と呼び、以下の節で、そのファジィ論的定式化について述べる。

2.1. デザイナーのマッピングプロセス

図2の右側はデザイナーのマッピングプロセスを示している。まず、造形コンセプト $C_{designer}$ が与えられると、それは形容詞を用いてより詳細な表現に“分解”され、さらに、それぞれの形容詞はそれに適合するデザイン要素へと“マッピング”される。そして、そのデザイン要素を“統合”するものとしてアイデアスケッチの候補がいくつか構成され、その中のひとつが“選択”される。これらのプロセスは、ファジィ集合を用いて以下のように定式化される。

分解：Ω を M 個の形容詞 w_i を要素として持つ集合とすると、造形コンセプト $C_{designer}$ は Ω 上のファジィ集合として、メンバーシップ関数、

(1)..... $\mu_C(w_i); i = 1,2,\cdots,M$

により定義される。

マッピング：いま、デザイン要素の総数を N、デザイン要素 j の全体集合を Δ_j、$d_j \in \Delta_j$ をその具体例とすると、分解に用いられた形容詞 w_i は Δ_j 上のファジィ集合として、メンバーシップ関数、

(2)..... $\mu_{w_i}(d_j); j = 1,2,\cdots,N$

により定義される。

統合：マッピングした結果を統合することにより、ファジィ集合である形容詞 w_i は $\Delta_1 \times \Delta_2 \times \cdots \times \Delta_N$ 上のファジィ集合として、メンバーシップ関数、

(3)..... $\mu_{w_i}(d_1, d_2, \cdots, d_N) \equiv \square\left(\mu_{w_i}(d_1), \cdots, \mu_{w_i}(d_N)\right)$

により定義される。ここで、$\square$ は、メンバーシップ関数を統合する数値演算子である。なお、デザイナーのマッピング、及び統合のプロセスの定式化は北島[3]に準じている。

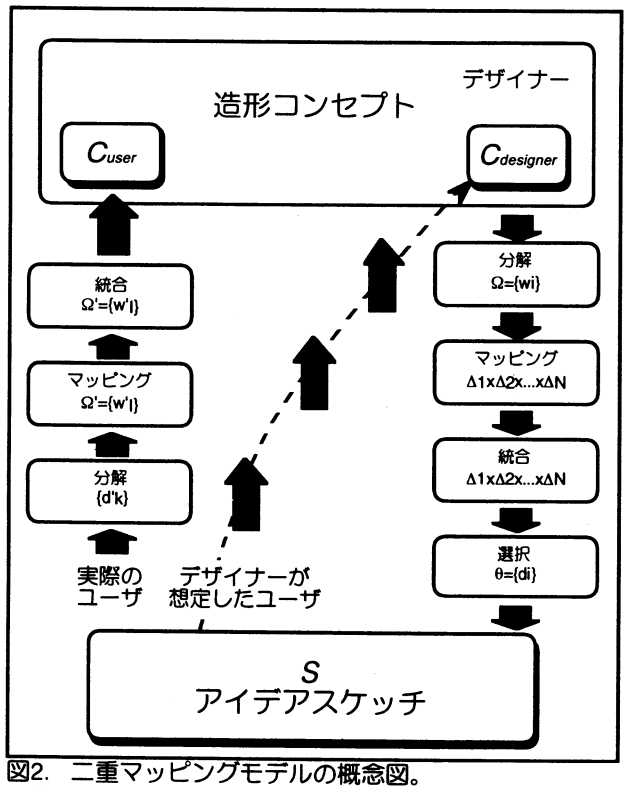


図2. 二重マッピングモデルの概念図。

選択：いま、$\Delta_1 \times \Delta_2 \times \cdots \times \Delta_N$ 上で定義される全アイデアスケッチの集合を Θ とすると、$d_j \in \Delta_j$ の組み合わせとして表現される具体的なアイデアスケッチ $\theta \in \Theta$ は、デザイナーが造形コンセプトに適合するものとして選択する具体例を表している。その選択のプロセスは、既に定義した、分解、マッピング、統合の表現を用いて、次のように記述される。

デザイナーは、$\theta \equiv \{d_j\}$ として、

(4)..... $\mu_{w_i}(\theta) = \mu_C(w_i); i = 1,2,\cdots,M$

(5)..... $\mu_{w_i}(\theta) \equiv \mu_{w_i}(d_1, d_2, \cdots, d_N)$

を満たすようなものを選択する。

即ち、アイデアスケッチ θ と形容詞 w_i との適合度を示す $\mu_{w_i}(\theta)$ が、造形コンセプト $C_{designer}$ と形容詞 w_i との適合度を示す $\mu_C(w_i)$ と一致するように θ の選択が行われる。

2.2. ユーザのマッピングプロセス

図2の左側はユーザのマッピングプロセスを示している。まず、具体的なアイデアスケッチ S が与えられると、それはデザイン要素に“分解”される。それぞれのデザイン要

素は感性形容詞に“マッピング”され、最終的に造形コンセプトC_{user}へと“統合”される。デザイナーのマッピングプロセスと比較すると、以下に述べるように詳細レベルにおいて違いがある。これは、マッピングの背景にある知識の違いを反映している。

分解：具体的なアイデアスケッチをSとすると、ユーザはそれをK個のデザイン要素の具体例、

(6)..... $d'_k; k = 1,2,\cdots,K$

に分解する。この分解は必ずしもデザイナーのものと一致する必要はない。また、デザイナーのマッピングプロセスではデザイン要素の全体集合Δ_jを考え、その上でのファジィ集合を定義したが、ユーザに対してはそのようなものを仮定しない。ユーザがデザイン要素の全体集合を定義できるとは考えられないからである。

マッピング：Ω'をL個の形容詞w'_lを要素として持つ集合とすると、各々のデザイン要素の具体例はΩ'上のファジィ集合として、メンバーシップ関数、

(7)..... $\mu_{d'_k}(w'_l); l = 1,2,\cdots,L$

により定義される。ここでも、ユーザの持っている形容詞の集合Ω'は必ずしもデザイナーの持っている形容詞の集合Ωと一致している必要はない。

統合：$\mu_{d'_k}(w'_l)$をΩ'上で統合すると、アイデアスケッチSはΩ'上のファジィ集合として、メンバーシップ関数、

(8)-------- $\mu_S(w'_l) \equiv \square\left(\mu_{d'_1}(w'_l), \mu_{d'_2}(w'_l), \cdots, \mu_{d'_K}(w'_l)\right)$

により定義される。$\mu_S(w'_l)$によりC_{user}が表現されている。

3. 製品デザイン支援ツールへの応用

製品デザイン支援ツールの目的は、デザイナーの持っていた造形コンセプト$C_{designer}$とユーザの抱いた造形コンセプトC_{user}の間に生じたギャップを計測し、アイデアスケッチθを改良するのに有用な情報をデザイナーに提供することである。以下に、二重マッピングモデルに基づいてこれらがいかにして達成されるかを説明し、支援ツールの概略を述べる。

3.1. ギャップの定義

デザイナーがアイデアスケッチによって表現した造形コンセプトと、ユーザの抱いた造形コンセプトの間のギャップは、(1)式と(8)式の違いとして、適当な関数gを用いて、

(9)..... $Gap(C,\Omega;S,\Omega') \equiv g\left(\mu_C(w_i), \mu_S(w'_l)\right)$

のように表される。特に、デザイナーの持つ形容詞の集合Ωとユーザの持つ形容詞の集合Ω'が一致している場合には、村上[4]の提案している2つのファジィ集合の類似度を表現する式を変形して、

(10)... $$Gap(C,\Omega;S,\Omega) = 1 - \frac{\|C \cap S\|}{\|C \cup S\|} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{M} \min\left(\mu_C(w_i), \mu_S(w_i)\right)}{\sum_{i=1}^{M} \max\left(\mu_C(w_i), \mu_S(w_i)\right)}$$

により、ギャップを計算することができる。

3.2. ギャップの解消

(10)式で計算されるギャップが無視できない場合には、それを解消することが必要である。ギャップの原因となっている形容詞w_gが同定できれば、(4)式を満足するような代替案$\tilde{\theta}$により原案θを置き換えて、アイデアスケッチの改善を図ることができる。さらに、(2)式で定義されるメンバーシップ関数や、(3)式で表現されるデザイナーの統合プロセスが分かっていれば、(4) 式を満足する代替案の範囲を個々のデザイン要素のレベルで示すことによって、デザイナーのアクティビティに対して、よりよい支援を提供することができる。これらの場合には、アイデアスケッチに対する評価の結果がスタイリングのステージにフィードバックされるので、効率よく造形デザインの改善が行えることになる。

しかしながら、ΩとΩ'が大きく異なっている場合や、ΩとΩ'が一致していてもその原因が同定できないような場合には、ここで述べたギャップ解消のストラテジーは有効に働かない。このような場合は、スタイリングのステージ内での改良では問題を解消できない可能性があり、従って、再デザインをより上流から行わなければならないかもしれない。

4. デザイン支援ツール

以下に、現在インプリメントを進めているツールを簡単に紹介する。これは[1]に用いられたツールを発展させたものである。

4.1. マッピングプロセスの計測

図3、図4は台となる集合や、その上で定義されるメンバーシップ関数を計測するためのインタフェースである。例えば、図4を用いて造形コンセプト$C_{designer}$を定義する形容詞の集合Ω、アイデアスケッチSを定義する形容詞の集合Ω'の計測が行われる。

ユーザは、左のウィンドウに呈示されるアイデアスケッチSを参照しながら右のウィンドウに呈示される形容詞のリストから適切な形容詞を選択する。選択された形容詞は中央のウィンドウに移される。アイデアスケッチSと個々の形容詞の適合度の評定は図 4に示したインタフェースで行われる。

デザイナーの場合には、左のウィンドウに造形コンセプト$C_{designer}$が呈示される点を除けばユーザの場合と全く同

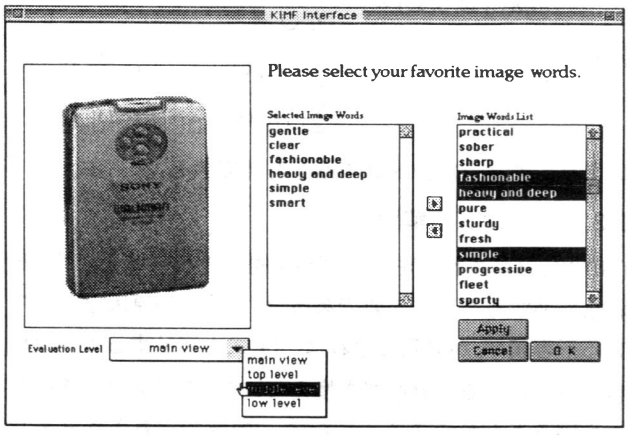


図3. ギャップの計測のためのインタフェース。Ω、Ω′の計測。

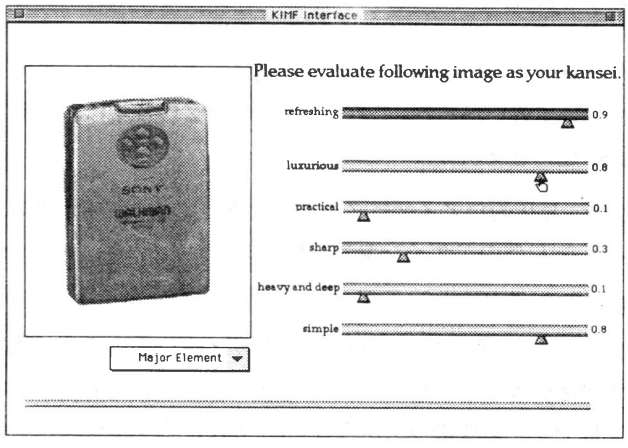


図4. ギャップの計測のためのインタフェース。各種メンバーシップ関数の計測。

じである。また、(2)式、(3)式で定義されるメンバーシップ関数も同様のインタフェースを用いて計測することができる。ただし、この場合には、デザイン要素の全体集合を予め定義しておくことが必要である。

4.2. 計測結果のフィードバック

図5は、(10)式を適用して計算されるギャップ、並びに、メンバーシップ関数の詳細をフィードバックするインタフェースである。表の最上行にはデザイナーから得られたファジィ集合 $C_{designer}$ ((1)式参照) が、次の行にはユーザから得られたファジィ集合 S ((8)式参照) が表示される。また、差の大きいところを強調表示したり、さらに詳細な情報を知りたい場合には、(2)式、(3)式の内容を視覚表示することもできる。

5. むすびと今後の課題

デザイナーが造形コンセプトをアイデアスケッチにマッピングするプロセスと、ユーザがアイデアスケッチを造形コンセプトにマッピングするプロセスのモデルとして、二重マッピングモデルを提案し、そのファジィ論的定式化を行った。マッピングの過程で現れる表現を利用することにより、デザイナーとユーザの間のギャップを定量化できることを示した。また、それら表現の計測と、ギャップ解消のストラテジーの提供を行うためのデザイン支援ツールについて述べた。

今後は、このツールのインプリメントを行い、実際の製品設計に適用すると同時に、ツールの評価を行い、ツールが提供する計測のための環境や、フィードバックのための環境を改良していきたい。また、ツールとしてより有用なものとするためには、フィードバック情報ばかりでなく、改善策の提供も含んだ支援が望ましいと考えている。そのような方向への展開の可能性を探っていきたい。

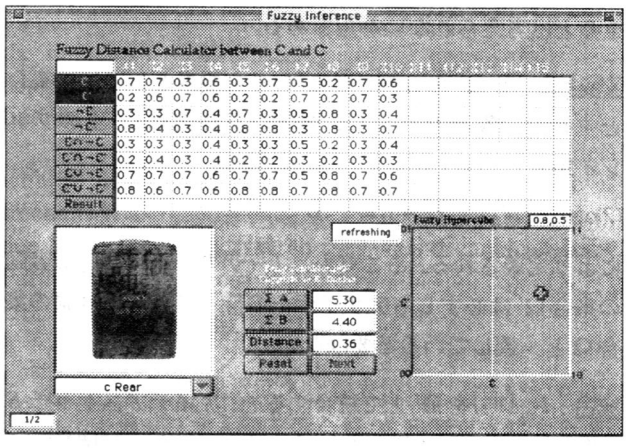


図5. アイデアスケッチの改良のためのインタフェース。計測結果のフィードバック。

6. 参考文献

[1] 金 燉漢、原田 昭、松田 紀之: プロトタイプ理論に基づく双方向的イメージ評価. 筑波大学芸術学研究報告, 1997.

[2] Kitajima, M. and Kim, D.: A design support system based on uncertain evaluation process in kansei. In M. Nagamachi (Ed.), *Kansei Engineering I*. Kaibundo. pp. 104-112, 1997.

[3] 北島 宗雄: 嗜好のファジィモデル. *日本ファジィ学会誌*. **Vol.3**, No.3, pp.570-582, 1991.

[4] 村上 譲司: 嗜好評価モデルの構築. *日本ファジィ学会誌*. **Vol.5**, No.6, pp.1383-1392, 1993.

[5] Norman, D.A.: Cognitive engineering. In D. A. Norman & S. W. Draper (Eds.), User centered system design: New perspectives on human-computer interaction. Hillsdale, NJ: Erlbaum Associates. 1986.

連絡先
住所：305 茨城県つくば市東１～１
所属：生命工学工業技術研究所人間情報部心理情報研究室
Email：kitajima@nibh.go.jp
WWW:http://www.aist.go.jp/NIBH/~b0544/

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC2-3

同時的複数対象認知に関するアニメーション刺激提示効果

Concurrent Multi-Cognition of Young Girl-Old Woman Type Ambiguous Figures

奥田裕紀

Hiroki Okuda

(金城短期大学)

Kinjo College

Abstract: Many researchers have mentioned that only one aspect of a ambiguous figure can be seen at any given instance. Recently, this hypothesis are challenged by experimental results. Okuda (1996) showed that 30% of all subjects reported that faces and a vase were seen concurrently when exposed to typical Rubin's profile-vase type figure (the monochrome opposite profiles). To investigate this hypothesis further, subjects were exposed to a series of another type ambiguous figure (young girl-old woman type figure) with an animation stimulus and asked to rate ability to recognize two aspects of the figure simultaneously on a scale (0-1). 20% of all subjects reported that a young girl and an old woman were seen concurrently when exposed to the original figure (their concurrent recognition estimation value was 0.8 or more). This result strengthens the possibility of concurrent multi-cognition of ambiguous stimuli.

I はじめに

1. 多義的刺激認知に関する“仮説”

これまで、たとえ多義図形であっても、どの瞬間においても一つのものにしか見えず、異なった認知が、時間的に交代するとの“仮説”は、認知研究分野における“常識”になっていた。実際、数多くの研究者が、この仮説を肯定する意見を表明してきている(Atteneave, 1971)。

しかし、多義的刺激の認知に関する実験の多くでは、複数の認知が同時的に成立していることを報告することが、物理的に不可能であったり、教示等によって制限されていた。従って、現実には、多義的刺激について、一般の被験者が、同時に複数のものが“見える”と判断・報告するか否かに関する実験的な研究は、十分には行われていなかったのである。

2. 多義的刺激の認知に関する再検討

Okuda (1996) は、一般に“ルビンのツボ”として知られているprofile-vase typeの刺激について、複数のものが同時に認知されたという報告(同時的複数対象認知報告)が得られるか否かを、実験的に検討した。この実験では、隣接した顔とツボが明確に認知されるカラー図形から，単純なシルエット図形に変化していく図形系列が提示された。そして、各被験者が、各刺激に対して複数のものを認知したと報告（記述）した場合には、それらを同時に認知した程度の評定を、無段階スケール (0~1) 上に求めた。

その結果、30%もの被験者が、典型的なprofile-vase typeの刺激に対しても、明確に

顔とツボが同時に見えると報告した（これらの被験者の同時認知評定値は、0.8以上であった)。すなわち、profile-vase typeの刺激については、同時的複数対象認知報告を行う被験者が、かなり存在することが示されたのである。

3. 本研究の目的

しかし、profile-vase type刺激以外の多義的刺激について、同時的複数対象認知が得られるか否かは、問題として残されていた。そこで、本研究では、他の多義的刺激についても、同時的複数対象認知報告が得られるか否かを検討することとした。多くの多義的刺激について、同時的複数対象認知報告が得られれば、同時的複数対象認知の存在を考慮することなく構成されていた、従来の認知モデルの修正の必要性が、いっそう高まるであろう。

4. 領域共通性による多義的刺激の分類

ここでは、多義的刺激を、各刺激に対する異なる認知対象に含まれる、(2次元平面上の）領域の共通性を基準として、以下のA～Cに分類する。このような分類を行うのは、異なる認知対象に含まれる共通領域の多少が、同時的複数対象認知の可能性と関連することが考えられたからである。

A. 輪郭共通刺激 (異なる認知の対象領域が、(一部の）輪郭を共有するのみであるもの 例：ルビンのツボ)
B. 一部領域除外刺激（異なる認知に含まれる領域が、一部を除いて重複するもの，例：妻と義母)
C. 領域共通刺激 (2次元平面上では、異なる認知の対象領域は完全に重なり、輪郭線も共通であるもの，例：ネッカー立体)

5. Bグループ刺激の同時的複数対象認知

本研究では、Bグループに分類される多義的刺激の中でも、一般に良く知られている“妻と義母”について、同時的複数対象認知報告の可能性を検討することとした (図1参照)。Aグループ以外の刺激については、Okuda (1996) の実験と類似した刺激系列を作成することはできないが、予備的な検討により、アニメーション刺激を提示し、刺激を3次元的に認知することを促進することによって、同時的複数対象認知報告が得られる可能性が考えられた。そこで、グラフィック・ソフトを用いて、アニメーション刺激を作製し、提示することとした。

II 方 法

1. 被験者

被験者は、短大生12名であった。

2. 刺激

図形刺激には、原図（コピー）と、原図をカラー化したものを用いた。アニメーション刺激は、3次元図形描画用ソフト (Strata Studio Pro) を用いて作製した。刺激図形作成に用いたコンピューターは、Macintosh 8500等であった。刺激提示は、原図（コピー)、カラー刺激、アニメーション刺激、カラー刺激、原図の順で行った。

3. 評定方法

評定方法は、記述対象評定法 (各被験者が認知したものを、数・内容等を制限せず、個別に記述させ、各認知対象の認知度の評定を求める方法) を、若干変形したものであった。1つの刺激について、2つ以上のものを記述した場合には、各刺激についての記述・評定の最後に、それらが“同時に見える”程度についても、無段階スケール (0～1) 上に評定を求めた (同時認知評定値とする)。また、決して2つ以上のものが“同時に見えなければならない”のではないことを強調し

た。

III 結果と考察

1. 同時的複数対象認知報告

被験者に対しては、あくまで、自分に見えたように評定すればよいことを、十分説明しておいた。それにもかかわらず、本実験の結果、図2に示したように、アニメーション刺激提示後に提示した、妻と義母の原図刺激に対して、同時的複数対象認知報告（同時認知評定値が、0.8以上）が得られた。この結果は、Bグループの多義的刺激についても、同時的複数対象認知が報告されることがあることを示し、多様な多義的刺激に関して、同時的複数対象認知が成立するとの考えを支持するものである。

2. 同時的複数対象認知報告の意味

同時的複数対象認知が報告されるのは、以下のような場合が考えられる。

(A) 複数の知覚成立に必要な情報処理過程が、同時的・並立的に完結し、各々に対応する神経ネットワークが、同時に活性化する。

(B) 複数の知覚成立に必要な情報処理は、まず継時的になされるが、各々の知覚成立後、両方の知覚成立に必要な、神経ネットワークの一部または全てが、同時に再活性化される。

(C) 2つの対象を、同時に知覚することはできない（2つの対象の知覚に対応する神経ネットワークは、同時には活性化できない）が、2つの対象が知覚された記憶から、同時に知覚できると判断される。

従来の多くの認知モデルでは、(C) 以外の可能性は否定されるであろう。しかし、既存のモデルで説明はできないから、現象が否定されるというのでは、本末転倒である。本研究は、従来のモデル構成の前提となっていたことが、必ずしも確固たる事実ではなかったことを示したものであり、モデルの再検討が求められよう。

3. 同時に見えることのあいまいさ

アニメーション刺激提示後に、原図刺激に対して、妻と義母が同時には見えないと、明確に報告した者（同時認知評定値が、0.2以下）は、わずか8%しかいなかった。また、実験後、複数の被験者から、刺激が“同時に見える”か否かを判断することは、必ずしも容易なことではないことが報告された。すなわち、多義的刺激認知に関して予備的知識を持たない被験者の多くにとって、妻と義母が、同時に“見える”のか“見えない”のかは、ファジィなことであった。

認知科学の研究者にとっても、“同時に見える（知覚される）”とは何を意味するのかは、必ずしも明確ではない。観察者の凝視点を固定した場合、周辺視野にある刺激の形態は弁別できないとされる。従って、中心視野からはみ出す刺激全体の形態を、同時に知覚することはできないとする考えがある。

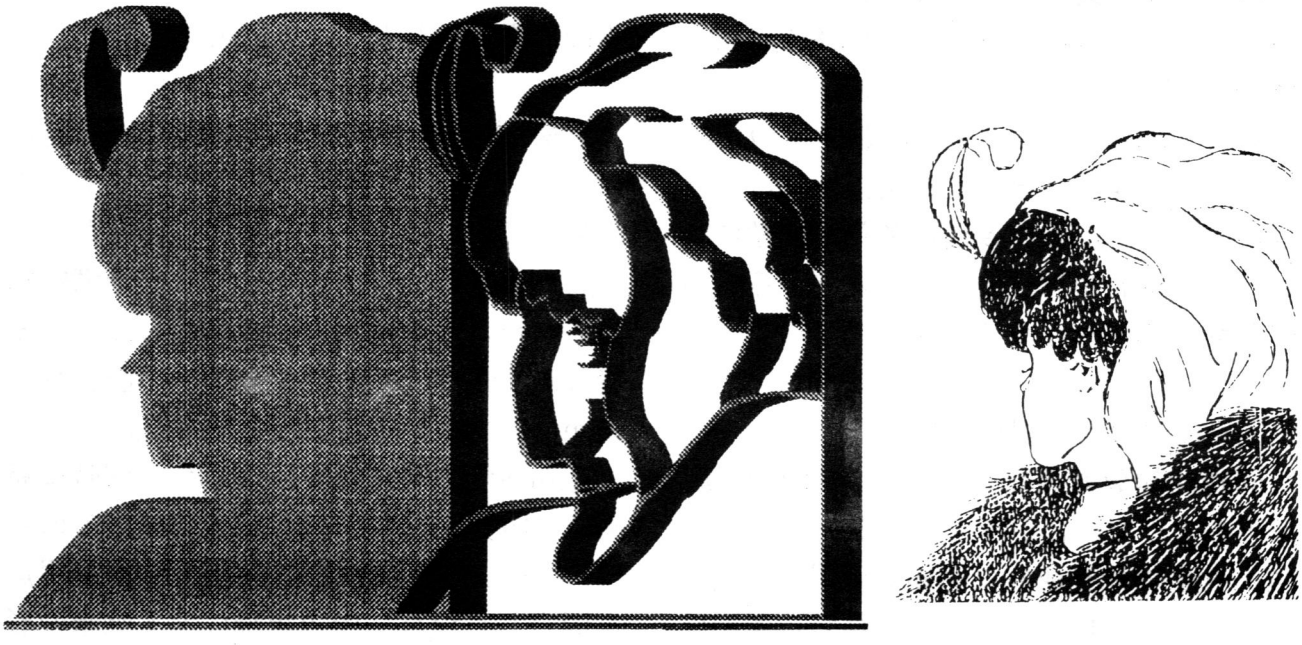
一方、刺激の形態を知覚するためには、眼球を動かしてスキャンし、継時的に得られた情報を統合することが、重要であるとする考えがある。例えば、他者と間近で話をする時、その人の顔全体をスキャンし、どんな容貌・表情であるか認知できた時、その人の顔が見えたのだと考えることもできる。

4. 新たな提示刺激とCグループの問題

本実験において、Bグループの多義的刺激についても、同時的複数対象認知報告（評定値0.8以上）が得られたといっても、その数は必ずしも多くはなかった。また、同時認知基準は、被験者間・被験者内で必ずしも統一していないことが示唆された。

このことは、多義的刺激に関する同時的複数対象認知を明確に否定できないことを示すものである。なぜなら、多くの被験者は、特定の刺激に関して、“2つ以上のものが同時に見えない”と、確信を持って判断できなかったと考えられるからである。

しかし、今後、被験者がどのような基準で、同時的認知評価を行っているのかに関する検討が求められよう。また、より多くの同時的複数対象認知報告を得られる提示条件を明らかにする必要もあろう。さらに、Cグループの刺激に関しても、同時的複数対象認知報告が得られるか否かについては、今後の検討課題である。



(a)　　(b)

図1　アニメーション刺激の一画面の模式図（a）と，妻と義母刺激（b）

アニメーション刺激は、カラーで、妻（若い女性）のシルエット（赤色）と、義母（高齢の女性）の線画（青色）を立体化して平行に並べたものであった。被験者に対して、妻と義母が、別々の立体であることを印象づけるように、2つの立体は、回転したり、別々に移動したりした。

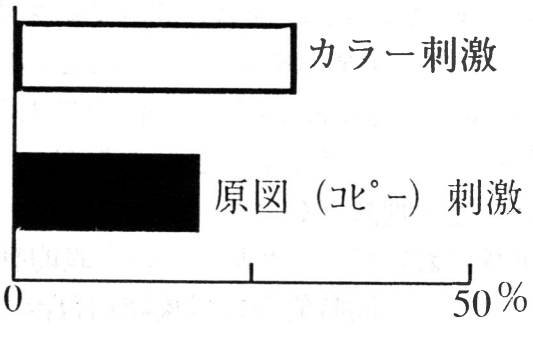


図2　同時的複数対象認知報告率

アニメーション提示後の原図刺激と、カラー刺激に対する同時的複数対象認知報告率（同時認知評定値0.8以上）を示した。

IV 参考文献

Attneave, F. (1971) Multistability in perception. *Scientific American*, 225, 62-71.

Okuda, H (1996) Concurrent multi-cognition of profile-vase type ambiguous figures. 12th Fuzzy System Symposium 53-56.

(問い合わせ先)
〒924 松任市笠間町1200 金城短期大学
奥田裕紀　TEL. 0762-76-4411

A CATEGORY LEARNING MODEL USING FUZZY RULES

K. Shiina,
Dept.of Educ.Psychol.,School of Education,
Waseda Univ.,Tokyo,Japan (shiina@mn.waseda.ac.jp)

FPN (Fuzzy Propositional Network) is a model of human categorization learning that is sensitive to the use of rules and propositional knowledge in human categorization : rules are represented by fuzzy propositions and categorization learning is accomplished by gradually tuning up the fuzzy truth values of the propositions by a back-propagation-based formula. Comparison of the experimental and simulation results revealed that there is a close match between rule-based human categorization learning and the performance of the fuzzy logical network .

Bridging the gap between symbolic and connectionist approaches.....

Various attempts have been made on this problem. The FPN (Fuzzy Propositional Network) proposed in this study assumes that units are doing a sort of logical operations (e.g., Massaro et al, 1990, Oden,1988) This is an old idea, but it has not been fully pursued in the psychological literature. In this study it is assumed that fuzzy logical calculus is used in categorization.

Categorization situation

Let C={C0,C1) be the set of categories to be learned by human subjects. Let an input pattern to the FPN be $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, where x_j might be either continuous or binary. The input pattern $\mathbf{x}$ is exclusively belonging to one of the categories in C. A categorizer observes a sequence of input patterns one by one and tries to answer a correct category label for the input pattern and then receives a corrective feedback.

Fuzzy propositional logic

Let p, q, r be propositions. In fuzzy logic, truth values of propositions are defined on the unit interval [0,1] where 0 stands for (absolute) false, 1 stands for (absolute) truth, and intermediate values stand for degree of truth. The function $v(\cdot)$ measures the truth values of propositions. The logical operations in fuzzy propositional logic used in this paper are as follows.

Fuzzy Conjunction: $v(p \wedge q) = v(p)v(q)$

Fuzzy Negation : $v(\neg p) = 1 - v(p)$

Fuzzy Disjunction :

$$v(p \vee q) = v(p) + v(q) - v(p)v(q)$$

When truth values are binary, the above operations become identical to those of classical propositional logic.

Architecture of the FPN (Fuzzy Propositional Network)

Essentially the FPN learns logical descriptions (concepts) of categories. The architecture of the FPN is explained with reference to Figure 1 where category exemplars are 3-dimensional vectors. After three dimensional pattern $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ is input, the first layer produces fuzzy truth values. The second layer performs logical operations on the truth values derived from the first layer. The third layer integrates the outputs from the first and the second layers. The last layer outputs truth value or response strength for the proposition :

"$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ is a member of Category CK".

The first layer. The truth value of the proposition : $v(p) = v($"x_j has Property j "$)$ is represented as the activation of unit a_j

$$a_j = f(\alpha_j(x_j + \theta_j)) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_j(x_j + \theta_j))}$$

where f is the sigmoid function. The parameters α_j and θ_j are changed during learning to represent appropriate truth values. The negation of the proposition :

$\neg p$ = "x does not have Property j " is defined as $1 - a_j$.

Because $1 - f(x) = f(-x)$,

$$v(\neg p) = 1 - a_j = f(-\alpha_j(x_j + \theta_j))$$

$$= \frac{1}{1 + \exp(\alpha_j(x_j + \theta_j))}$$

which means that

$$v(p) + v(\neg p) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_j(x_j + \theta_j))} + \frac{1}{1 + \exp(\alpha_j(x_j + \theta_j))} = 1$$

Hence Fuzzy negation will always be satisfied.

The nature of a ***property*** can be anything. It follows that if Dimension *i* has square or circle as its *value,* being square will receive high activation and being circle will receive low activation (or vice versa). If Dimension *i* represents length, being long and short will produce high and low activations (or vice versa) respectively, and intermediate length will produce medium activation.

The second layer. This layer, which computes fuzzy propositional calculus, characterizes the FPN. The fuzzy conjunctions of propositions are computed by the product rule. Therefore if

p = "x_i has Property i "

q = "x_j has Property j "

r = "x_k has Property k "

then the truth value of the conjunction :

$p \wedge q$ =" x_i has Property i "*and*" x_j has Property j "

becomes

$v(p \wedge q) = a_i a_j$

and the truth value of the triple conjunction :

"x_i has Property i "*and* "x_j has Property j " *and* "x_k has Property k" becomes

$v(p \wedge q \wedge r) = a_i a_j a_k$.

Likewise, the truth value of the conjunction :

$\neg p \wedge \neg q$="x_i does not have Property i "*and* "x_j does not have Property j "

becomes

$v(\neg p \wedge \neg q) = (1 - a_i)(1 - a_j)$

The third layer . The outputs of the first and second layers are integrated in this layer. The activation of internal category unit K, I_K , is determined by

$$I_K = \sum_j \omega_{Kj} a_j + \sum_{j>i} \xi_{Kij} a_i a_j + \sum_{j>i} \zeta_{Kij} (1-a_i)(1-a_j) + \sum_{j>i,k>i,k>j} \psi_{Kijk} a_i a_j a_k + \tau_K$$

where ω_{Kj} , ξ_{Kij} , ζ_{Kij} , ψ_{Kijk} are weights and τ_K is a bias term. If one wishes to use higher order conjunctions, the above expression can be expanded in a similar way. In the first and second layers, disjunctions are not explicitly represented. But fuzzy disjunction taking the form of $a_i + a_j - a_i a_j$, I_K has the potential for expressing fuzzy disjunctions as well.

The fourth layer. This layer computes $o_K^{OUT}(\mathbf{x})$ that stands for the truth value or response strength for the proposition : "$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ is a member of Category Ck ". The response strength is defined as

$o_1^{OUT}(\mathbf{x}) = f(I_1)$,

$o_0^{OUT}(\mathbf{x}) = f(I_0)$.

It is assumed that the response conditional probability is:

$$P(Category\ 1|x) = \frac{o_1^{OUT}(\mathbf{x})}{o_1^{OUT}(\mathbf{x}) + o_0^{OUT}(\mathbf{x})}$$

The learning of the FPN

The error backpropagation algorithm is used to train the FPN : the parameter are modulated by gradient descent method. Define loss function E as

$$E = \frac{1}{2} \sum_K \{t_K - o_K^{OUT}(\mathbf{x})\}^2$$

where t_K is a teacher value. In the current example,

$t_1 = 1, t_0 = 0,$ if $\mathbf{x} \in C1$

$t_1 = 0, t_1 = 1,$ if $\mathbf{x} \in C0$.

The partial derivatives with respect to parameters in the model are calculated and used to change the parameters. The set of parameters to be adjusted were as follows.

α_j : the slope of activation function

θ_j : the location of activation function

ω_{Kj} : the weight for simple proposition

ξ_{Kij} :the weight for conjunction

ζ_{Kij} :the weight for conjunction of negative propositions

ψ_{Kijk} :the weight for triple conjunction

τ_K :bias term (constant).

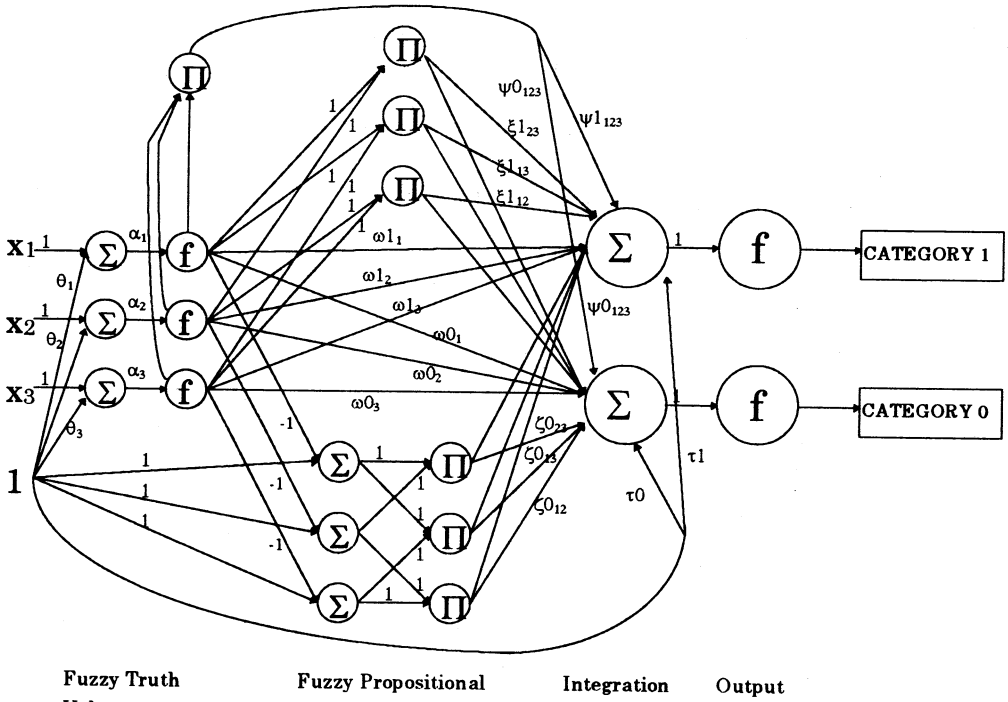


Figure 1 THE FPN USED IN SIMULATION .

f = Sigmoid function,Σ= Simple addition unit, and Π=Multiplication (Conjunction) unit

Simulation : Shepard, Hovland and Jenkins (1961) structures

The category structures of Shepard et al (1961) that were replicated by Nosofsky et al (1994) and Nosofsky and Palmeri (1996) are shown in Figure 2. These category structures were used to train the FPN. In these studies, results of human categorization experiments are reported that will be used for the present evaluation of the FPN.

Procedure. Sixty-four random stimulus sequences were first generated. The FPN was trained on the basis of those sequences changing teacher values according to structure type. The initial values for weights and biases were set at 0 expect that θ was fixed at .5 and was not modulated. The 64 learning curves for each category type were averaged and the averaged error rates were regarded as predicted values for each category type. The learning rate parameters that minimized the sum of squared deviations between predicted and actual error rates (borrowed from Nosofsky et al (1994)) across 6 structures were :

$\lambda_\alpha = 32.45, \lambda_\omega = .014, \lambda_\xi = \lambda_\zeta = \lambda_\psi = 21.33, \lambda_\tau = 4.48$

Results. Figure 3(a) depicts the resulted learning curves for each category type and Figure 3(b) shows human data (Nosofsky et al ,1994). It seems that the FPN did reasonable job in that it was able to capture major trend of human data. However, the ordering of learning rates is somewhat different.

Detailed analysis of the behavior of the FPN. The main purpose of the FPN was to extract rules and propositions. As such, inspection of learned weights is indispensable to know exactly what the network has learned. In Figure 4, the weights after the FPN have learned TYPE 1 and TYPE 2 structures are presented.

In Figure 4(a), the outputs from the conjunction units are multiplied by approximately the same magnitude of weights. Therefore in the third integration units, the unit for category 1 , for example, calculates

$\{a_1a_2 + a_1a_3 - a_2a_3 - (1-a_1)(1-a_2) - (1-a_1)(1-a_3) + (1-a_2)(1-a_3)\} \times \text{constant} = \{2a_1 - 1\} \times \text{constant}.$

Because only Dimension X_1 is relevant in Type 1 structure, the FPN can correctly produce outputs. In Figure 4(b), heavy weights are imposed upon the units in the conjunction layer that calculate a_1a_2 and $(1-a_1)(1-a_2)$. This is sufficient to extract a relevant composite feature from the XOR structure in Type 2.

Prospects. Although further study is indeed needed , the current result could be evaluated as a step toward reconciliation between connectionist and symbolic approaches.

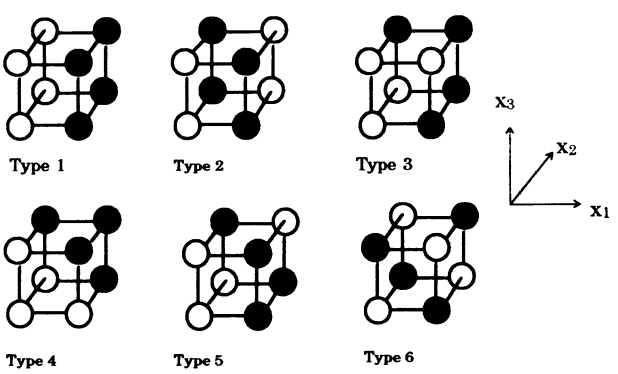


Figure 2 Six category structure used in Nosofsky et al (1994). White circles are exemplars of Category 1 and Black ones are those of Category 0.

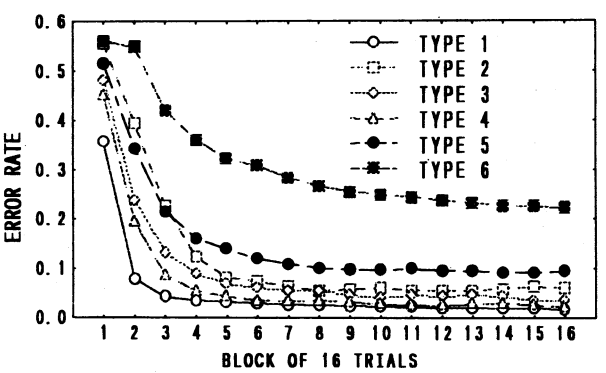


Figure 3(a) FPN

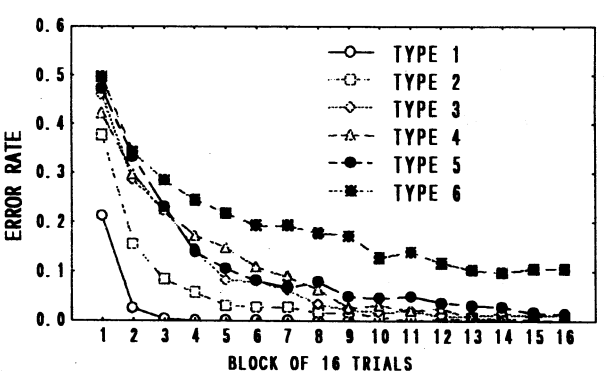
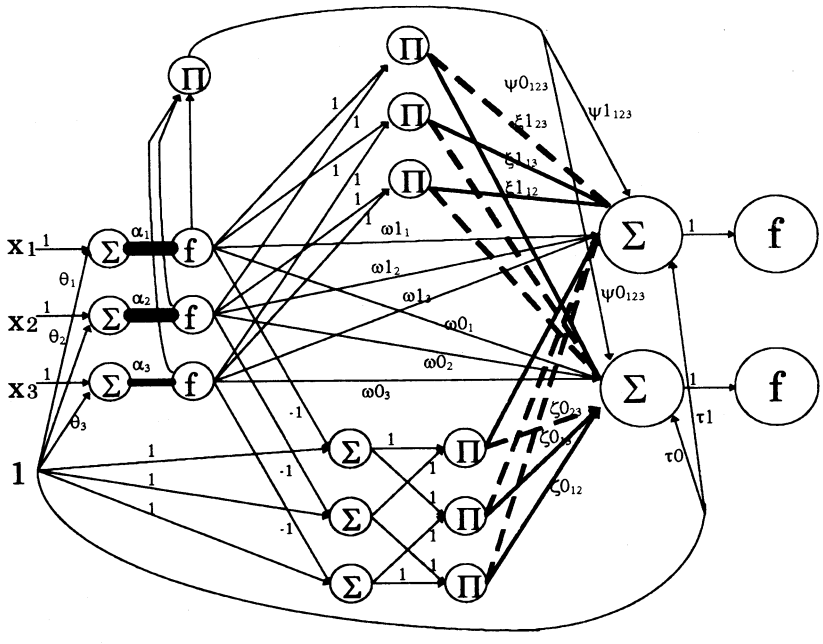
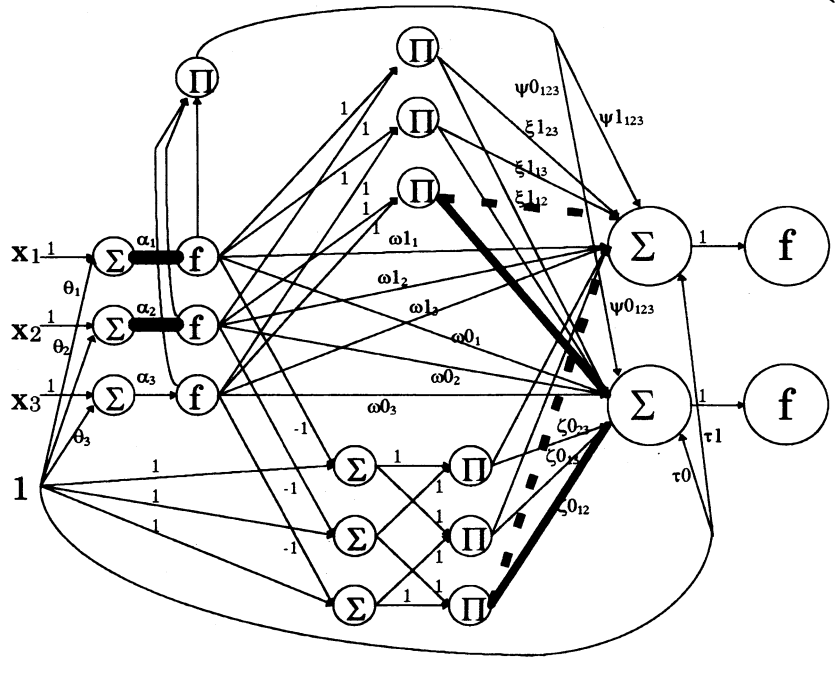


Figure 3(b) Human data



(a) The FPN after learning of Type 1



(b) The FPN after learning of Type 2

Figure 4 Bold lines denote large weights. Dashed lines stand for negative weights.

References Massaro and Friedman,(1990) Psychological Review, 97 ; Nosofsky et al (1994) Memory & Cognition, 22. ; Nosofsky and Palmeri (1996) Psychonomic Bulletin & Review, 3. ; Oden,(1988), IEEE international conference on Neural Network, 1 ; Shepard et al, (1961) Psychological monographs,75.

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC3-1

ファジィシステムモデルに基づく 無意味ランダム音響刺激に対する心理的応答予測

A method for predicting psychological response to fluctuating random noise based on fuzzy system model

山口 静馬 ○佐伯 徹郎 加藤 裕一 老松 建成
Shizuma Yamaguchi Tetsuro Saeki Yuichi Kato Kensei Oimatsu
山口大学 島根大学 海上保安大学校
Yamaguchi University Shimane University Maritime Safety Academy

Abstract

In the psychological noise evaluation, the fuzziness caused by the human subjective judgment for the acoustical stimulus is inevitably obscure. From the above viewpoints, by introducing the memory type fuzzy system model, a new systematical method for estimating and/or predicting the psychological response is proposed, in the case when the sound pressure level of noise stimulus being changed momentarily. The validity of the proposed method is confirmed experimentally by applying it to the actual observed data.

1 はじめに

人間が物理的刺激としての騒音にさらされると、これに対する心理的印象 (例えば騒々しいといった印象) が生じた後に、その程度に応じて具体的対処の仕方を考えることは、我々が日常よく体験していることである。一般に騒音問題は、騒音刺激に対する心理的応答が生じて初めて発生するのであり、騒音暴露そのものが直接短絡的に問題となるのではない。従って原因としての物理的音響刺激と結果としての心理的応答との関係を定量的に把握することが騒音対策上第一義的に重要となる。

これを定量化する場合、(物理的な入出力関係を持つ) 通常の物理システムの計測とは異なり、(物理的入力—心理的出力といった) 主観量の出現する非決定的あいまいシステムを取り扱うことになる。しかしこれを計測・記述・評価するための客観的測度 (表現のための尺度) を見出すことは極めて困難である (言語表現に頼れば直ちにあいまい性が混入する)。また、上記の非決定的あいまいシステムを規定するための条件 (例えば、人間の置かれている時間的・空間的条件・肉体的・精神的条件など) が多種多様であるため、条件を正確に設定してこれらすべてとの具体的関連のもとに物理的入力—心理的出力の因果関係を精度よく論ずることは不可能に近い。

主観量の出現するシステムをモデル化しようとする場合、この非決定的あいまい性の原因を分析的に究明しようとする立場から離れ、内在する非因果的主観性・複雑性を分析的な解析手法では対処困難なソフト領域であると当初から認めて (音響刺激に対する心理的応答 (主観性の存在により、時には、励振→応答といった因果率さえ成立しない場合もあろう) はもともとファジィ事象であるとの立場に立ち)、ファジィシステムとして取り扱うのが合理的なひとつの接近法である。騒音に対する人間の主観的印象には本来不可避的な "あいまい性" が含まれているとするのである。このとき、客観的な物理的騒音刺激とそれに対する主観的な心理的応答との関係を定量的に把握するためには、この "あいまい性" を表現する何等らかの方法論を導入することが必要となる。

このような観点から、我々はこれまで、ファジィ理論におけるいわゆるメンバシップ関数を導入して騒音に対する心理的評価の一手法を提案してきた[1)2)]。具体的には、変動騒音から受ける心理的印象 (ファジィ事象: $F=F1$(非常に静か)、$F2$(かなり静か)、$F3$(やや静か)、$F4$(どちらとも言えない)、$F5$(やや騒々しい)、$F6$(かなり騒々しい)、$F7$(非常に騒々しい)) の各メンバシップ関数を設定した後、任意分布形変動騒音に対する上記各印象の出現時間率を推定した。

本報告では、次の2つの側面を系統的に取り扱う一手法としてメモリー形ファジィシステムモデル[3]を導入して、無意味ランダム音響刺激に対する心理的応答を予測するための方法を考察している。

(1) 先にも述べたように、音響刺激に対する人間の心理的応答は非決定的ファジィ事象であり、主観的判断に基づく不可避的な“あいまい性”が付随する。
(2) 音響刺激に対する人間の心理的応答は、さらされている音響刺激の現時点における値のみではなく、過去の時点における音響刺激の状態にも依存して変化する。

すなわち、

(1) 音響刺激として白色雑音から作成した帯域制限不規則変動音を採り上げ、これに対する心理的印象のメンバシップ関数を現時点における音響刺激と1時点過去における音響刺激とのレベル差に着目してまず設定している。
(2) 設定したメンバシップ関数群を用いて、任意のレベル差で変動している騒音にさらされた場合の心理的応答を、各心理的印象の出現時間率の形で予測している。

得られた理論的推定結果と心理実験による実測データとの比較を行なったところ、両者のほぼよい一致が認められた。

2 メモリー形ファジィシステムモデルの導入

ランダム音響刺激に曝された場合の心理的応答予測の基盤として、非ファジィ入力としての音響レベル値 L_t とファジィ出力としての心理的応答 F_t との間を関連付ける物理的入力—心理的出力系のファジィシステムモデルを設定する。これは通常の物理システムモデルとは異なり、同一の入力値に対して同じ出力が常に計測されるとは限らない、再現性のない非画一的なあいまい性を本質的に含んでいる。我々はこれまで、これに対してゼロメモリー形ファジィシステムモデルを想定し、音響刺激の様々なレベル値に対する心理的応答のメンバシップ関数を次のように設定して予測の基盤として用いていた[1)2)]。

$$\mu_{Fi}(L_t \mid L_t) \tag{1}$$

しかしランダム音響刺激に対する心理的応答は、曝されている現時点での音響刺激のみでなく、過去の時点における音響刺激の値にも依存しているものと思われる。このような観点から、本報告では、従来の研究をさらに発展させたメモリー形ファジィシステムモデルを導入し、次式のようなメンバシップ関数を用いることによって心理的応答を予測することを考える。

$$\mu_{Fi}(L_t \mid L_t, L_{t-1}, \cdots) \tag{2}$$

たたし、本手法の適用可能性のみを検討するために1時点過去の音響刺激の状態までを考慮することに限定し、さらに、時点 $t, t-1$ における各レベル値 L_t と L_{t-1} の差$\Delta L(= L_t - L_{t-1})$ に着目して次式のように単純化した。

$$\mu_{Fi}(L_t \mid \Delta L) \quad (\Delta L = L_t - L_{t-1}) \tag{3}$$

3 心理実験の概要

物理的音響刺激とこれに対する心理的応答との関係を調べるために、種々の変動音を用いて室内心理実験を行なった。実験内容についての概要を以下に示す。

[A] 被験者

I 聴力正常な、40〜50才代の男性2名、20才代の女性2名の計4名。
II 聴力正常な、20才代の男女学生の計9名。

[B] 音響刺激

I 白色雑音を一様分布に従うランダム変数によって5秒ごとに増幅・減衰した後、これを中心周波数 f_{cK} $(K = 1, 2, ..., 8;\ f_{c1} = 63,\ f_{c2} = 125, ...,\ f_{c8} = 8000$ (Hz)) のオクターブ・バンドパスフィルターに通した帯域制限不規則変動音。
II 白色雑音を一様分布に従うランダム変数によって5秒ごとに増幅・減衰した後、これを帯域幅 [45, 11200] (Hz) のバンドパスフィルターに通した帯域制限不規則変動音。

[C] 測定法

難波らのカテゴリー連続判断法[4]にならって、“騒々しさ”に関する7つのカテゴリー化された心理的印象 Fi $(i = 1, 2, ..., 7)$ を事前に設定しておき、曝されている音響刺激に対して5秒ごとにその時点で受けた心理的印象 Fi $(i = 1, 2, ..., 7)$ を記録した。また、その時点の音圧レベル値も同時に記録した。5秒間隔で5分間連続して判断し、この

操作を 1 種類の刺激系列に対して 5 回繰り返した。なお、この実験を実施する前に、被験者が判断や操作に戸惑うことのないようあらかじめ練習した。

音響刺激に対する心理的応答がレベル差 ΔL にどのように依存しているかをまず調べるため、心理実験による実測データを統計処理したものが **Fig.1** である。すなわち、時刻 t での音響刺激のレベル値が 65(dB) を示す場合に限定し、レベル差 ΔL によってどのように心理的応答が変化するかを示している。ΔL が大となるにしたがって、レベル値が上がったときは騒々しいと評価され、レベル値が下がったときは静かだと評価されるようになることから、心理的応答は現在の時点だけではなく過去の時点の音響刺激にも依存していることが明確に読み取れる。すなわちメモリー効果の存在が認められた。この事実は日常生活の場で経験している傾向を裏付けるものである。換言すれば、これは日頃感じている漠然とした感覚的傾向を数量化した結果の一種であると言うこともできよう。

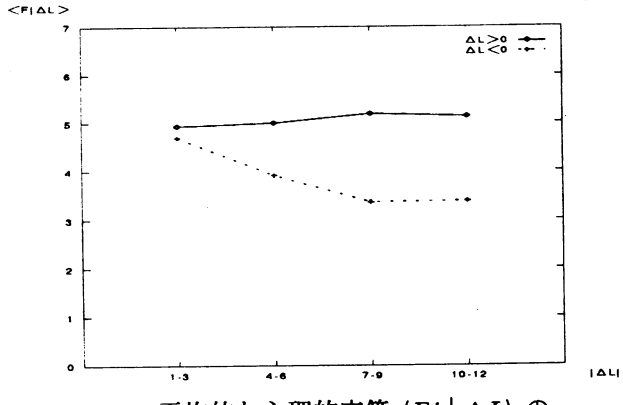


Fig.1 平均的な心理的応答 $\langle Fi \mid \Delta L \rangle$ の ΔL による変化

4 心理的応答の予測

人間がレベル差 ΔL 変化するような不規則変動音にさらされた場合の心理的応答の予測について考察する。

心理実験の前半における実測データを用いて心理的印象 Fi に関するメンバシップ関数 $\mu_{Fi}(L \mid \Delta L)$ $(\Delta L = L_t - L_{t-1})$ $(i = 1,2,...,7)$ を設定した。**Fig.2** はその一例として、$\Delta L = [7,9]$ の場合を示したものである。**Fig.3** は、同じ心理的印象 Fi $(i = 2,4,6)$ に対し、そのメンバシップ関数の形状が ΔL にどのように依存しているかを調べたものである。刺激音のレベル値が上がったときのメンバシップ関数は下がったときと比較して若干レベル値 L の低レベルの方向に位置している。これは同じ刺激音のレベル値のときでも刺激音のレベル値が上がったときの方が下がったときよりも騒々しいと感じる傾向にあることを意味している。

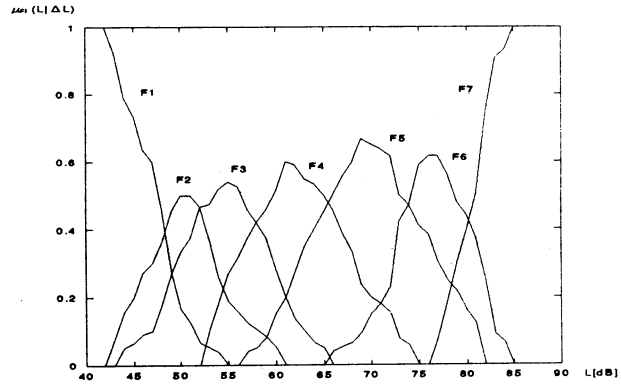


Fig.2 メンバシップ関数 $\mu_{Fi}(L \mid \Delta L)$ $(\Delta L = [7,9])$

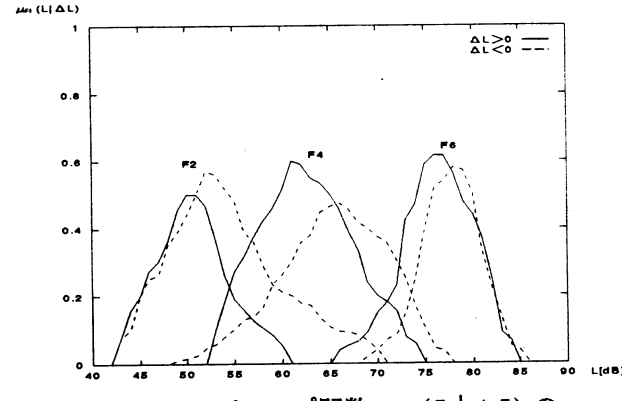


Fig.3 メンバシップ関数 $\mu_{Fi}(L \mid \Delta L)$ の ΔL に対する依存性 $(\Delta L = [7,9],[-9,-7], F = F2,F4,F6))$

不規則変動騒音に対するひとつの自然な評価値として、ファジィ事象 Fi $(i = 1,2,...,7)$ が出現する時間率の組が採用できる[1)2)]。これは、レベル差が ΔL であるときのメンバシップ関数と条件付レベル分布を用いて、次のようにファジィ確率積分によって求められる。

$$P(Fi \mid \Delta L) = \int \mu_{Fi}(L \mid \Delta L) p(L \mid \Delta L) dL \quad (i = 1,2,...,7) \tag{4}$$

Fig.4 は、$\Delta L = [7,9]$ の場合の条件付レベル分布を示したものである。算定した予測値と、心理実験の後半の実測データから直接 Fi $(i = 1,2,...,7)$ の相対度数を求めた実測値を比較したものを **Fig.5** に示す。

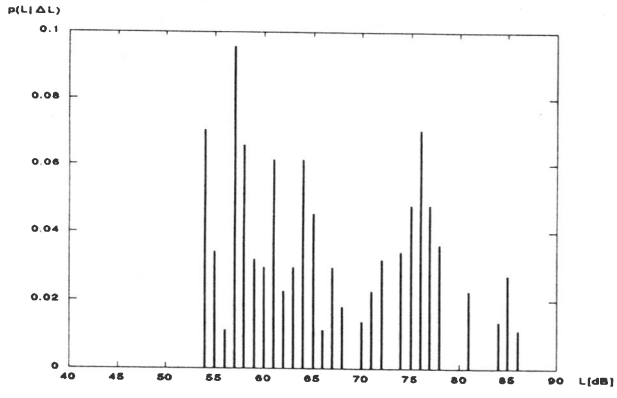


Fig.4 刺激音の条件付レベル分布 $p(L \mid \Delta L)$ $(\Delta L = [7,9])$

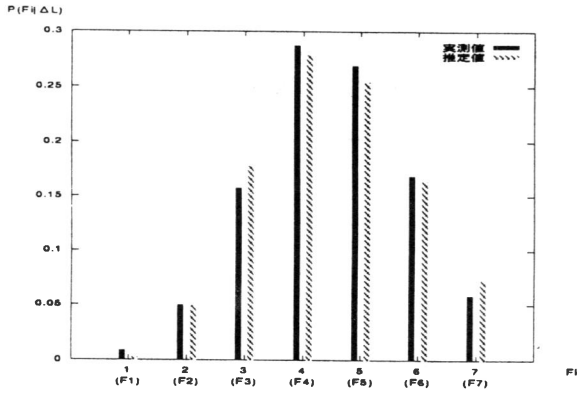


Fig.5 ファジィ確率 $P(Fi \mid \Delta L)$ に対する予測値と実測値の比較 $(\Delta L = [7,9])$

各心理的応答の条件付ファジィ確率の組で刺激音に対する心理的印象をきめ細かく表現することはひとつの方法であるが、順序尺度 Fi $(i = 1,2,...,7)$ を距離尺度 $Fi = i$ として扱って次のように平均的な心理的印象としてマクロ的に把握するのも一方法である。

$$\langle F \mid \Delta L \rangle = \sum_{i=1}^{7} i \cdot P(i \mid \Delta L) \qquad (5)$$

理論的予測値と心理実験による実測値との比較を示したものが **Table1** である。

Table1 平均的な心理的印象 $\langle F \mid \Delta L \rangle$ に対する予測値と実測値の比較 $(\Delta L = [7,9], [-9,-7])$

	$7 \leq \Delta L \leq 9$	$-9 \leq \Delta L \leq -7$
実測値	4.50	3.50
推定値	4.52	3.58

実測値と予測値との間での良い一致性を示している。

5 おわりに

音響刺激に対する心理的応答におけるメモリー効果の存在を確認したうえで、過去の音響刺激の状態を考慮したメモリー型ファジィシステムモデルによる音響刺激に対する心理的応答の予測手法を提案し、本手法の有効性を検討した。

今後の課題として、本報告では 1 時点過去の直前の音響刺激まで着目しているが、どの程度さかのぼった音響刺激が心理的印象に影響しているかといった、心理的応答系がもつメモリー効果のより詳細な検討することがあげられる。

謝辞

本研究に多大の援助を頂いた藤田哲雄・中村公人の両氏に深謝の意を表する。

参考文献

1) 加藤, 山口: 日本音響学会誌, 47, 5, pp.305–309 (1991).
2) 山口, 佐伯, 老松, 加藤: 日本ファジィ学会誌, 7, pp.883–894 (1995).
3) 水本雅晴: ファジィ理論とその応用, サイエンス社, (1991).
4) 難波, 桑野, 中村: 日本音響学会誌, 34, pp.29-34 (1978).

連絡先

〒755
山口県宇部市常盤台 2557
山口大学工学部知能情報システム工学科

山 口 静 馬

TEL 0836-35-9481
FAX 0836-29-0053
Email yamaguch@csse.yamaguchi-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC3-2

音声信号へ寄せる関心の度合が外来雑音に対する心理的評価に及ぼす影響
The effect of interest in audio signal on psychological response to external noise

○山口 静馬　佐伯 徹郎　老松 建成　加藤 裕一
Shizuma Yamaguchi　Tetsuro Saeki　Kensei Oimatsu　Yuichi Kato
山口大学　海上保安大学校　島根大学
Yamaguchi University　Maritime Safety Academy　Shimane University

Abstract

A method for estimating and/or predicting the human psychological response to the external noise in the case of listening to the audio signal is proposed by using the fuzzy sets theory. Concretely, when the persons listening to an audio signal are exposed to the external noise, the effect of the interest in audio signal on psychological response to external noise is first discussed in the form of the membership function. Next, a method for evaluating the psychological response is proposed by using the concept of the fuzzy probability. Finally, the validity of the evaluation method is experimentally confirmed by applying it to the observed data.

1 緒言

情報伝達の最も基本的な手段の一つとして音声信号の直接的伝達が挙げられるが、その際には周囲の環境音場が重要な役割を果たすことになる。音声信号を聴取する現実の場においては、無意味ランダム雑音や有意味音声雑音など様々な外来雑音が存在するのが常である。聴取者が外来雑音に悩まされることなく、音声信号の聴取に専念できる快適な音環境を実現して住環境や生活環境の質的向上を図ることは重要である。音声信号と外来雑音との関係についてはこれまで多くの研究者によって考察されその成果が蓄積されている[1)-3)]。これらの研究は、例えばマスクング効果や明瞭度特性などのように、音声の知覚と理解といった立場からの、どちらかと言えば、音声信号の方に考察の力点が置かれているものが多いように思われる。

講演会場や教室などにおける音声信号の音量調節や外来雑音に対する遮音対策等を考える場合、聴衆が外来雑音に対してどのような心理的判断を下すかといった、心理的評価の対象を聴取すべき音声信号ではなく外来雑音の方に関心を寄せることも重要である。更に、外来雑音に対する聴衆の心理的応答はあくまで人間の主観的判断に基づいており、感覚的応答に対する言語表現そのもののあいまいさや、人間の主観的判断に不可避的に付随するあいまいさを考慮することは基本的に重要である。このような観点から、我々はこれまで、講演や放送などの音声信号聴取の精神活動をしている人間に対し、外来雑音がどのような心理的影響を与えるかをファジィ理論を用いて考察してきた[4)-7)]。しかしこれらの研究においては、音声信号に対して聴衆が特に関心を寄せるか否かの内容的な質的側面は配慮していなかった。本研究はこの点に考察の焦点を置いたものである。具体的には、音声信号としてその内容に興味が有るものと無いものの２種類を採用し、外来雑音として無意味ランダム雑音と有意味音声雑音の２種類を採り上げて、各場合における聴取者の雑音に対する心理的応答がどのように変わるのかをメンバシップ関数の形でまず考察している。次いで、予め設定した上記のメンバシップ関数を用いて、各場合における聴取者が雑音に対してどのような心理的判断を下すかを推定し、推定値と心理実験による実測データとの比較を行っている。その結果、両者のほぼ良い一致が見られた。

2 心理実験の概要

聴取者にとって興味の有る音声信号や興味の無い音声信号を聴いている時、外部から侵入してきた無意味ラン

ダム雑音や有意味音声雑音に対してどのような心理的応答を示すかを調べるため、及び、外来雑音に対する心理的応答の理論的推定結果と心理実験の実測データとの比較を行うため室内心理実験を実施した。その概要を次に示す。

［A］実験場所

山口大学工学部簡易無響室。縦: 4.6(m) × 横: 4.5(m) × 高: 2.6(m) の容積をもち、暗騒音レベルは約３２～３７ (dB) の範囲である。

［B］実施時期・時間

１１月上旬の午前９時～午後４時の時間帯である。

［C］被験者

聴力正常な男子学生６名および女子学生２名の計８名である。

［D］提示音

(1) 音声信号

A．聴取者に興味の有る男性の講演（講演時間：６７分）

B．聴取者に興味の無い男性の講演（講演時間：８０分）

講演内容に興味が有るものと無いものを選定するため、予め講演者と講演題目のみを被験者に示してアンケート調査を行った。そしてその結果に基づいて市販のテープのどれを採用するかを決定した。実験者は音声信号として採用したこれら２種類の市販のテープを再生し、拍手・効果音・音楽等の音声以外の部分を削除して作成し直したテープを用いた。作成し直した上記２種類の音声信号の最初の５分間についてのパワースペクトルを求めた。オーバオール値を基準値とした相対的なスペクトル形状を図１に示す。２つの音声信号のパワースペクトル形状には顕著な差異が認められない。このことから被験者の判断において音声信号のパワースペクトル形状の差異に起因して影響される部分は少ないものと思われる。

(2) 外来雑音

a．無意味ランダム雑音

白色雑音を用いてパワースペクトル形状が次に示す有意味音声雑音のそれとほぼ等しくなるように作成した。そしてこれを一様分布に従う統計的に独立なランダム変数によって増幅・減衰（継続時間：１０秒）したものを用いた。

b．有意味音声雑音（男性の講演）

音声信号として用いたものとは異なる別の男性の講演テープを再生し、一様分布に従う統計的に独立なランダム変数によって増幅・減衰（継続時間：１０秒）したものを用いた（講演時間：６０分）。

２種類の外来雑音のパワースペクトル形状を図２に示す。

［E］心理的応答の測定法

図３に心理実験の状況を示す。スピーカから音声信号と雑音を同時に放射した。スピーカから 2.7(m) 離れた位置に４名の被験者が座り４名が同時に心理実験に参加した。８名の被験者を２グループに分けて実験を行った。外来雑音に対する心理的評価尺度としては様々なものが考えられるが、これまでの研究と同様[4)-7)]、降旗らが提案している七つのカテゴリー化した次の評価尺度[8)]を採用した。

$F1$: 全く気にならない　$F2$: 気にならない
$F3$: あまり気にならない　$F4$: 少しうるさい
$F5$: うるさい　$F6$: かなりうるさい
$F7$: 非常にうるさい

被験者は音声信号と雑音を同時に聴き、雑音に対する上記の心理的評価 Fi $(i = 1, 2, ..., 7)$ を１０秒ごとに判断して押しボタンによってその結果を計算機内に入力した。また、その時の音声信号と雑音の音圧レベルも同時に計算機内に入力した（心理実験の具体的やり方については文献 4) – 7) と同様である）。１０秒間隔で５分間連続して記録し、被験者が疲労することのないように十分休憩を取りながら、この操作を１種類の実験につき８回繰り返した（従って先に示した提示音のテープは約４０分余の部分を使用していることになる）。

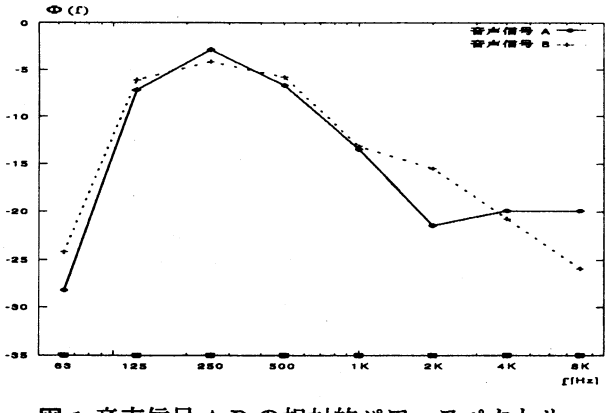


図 1 音声信号 A,B の相対的パワースペクトル

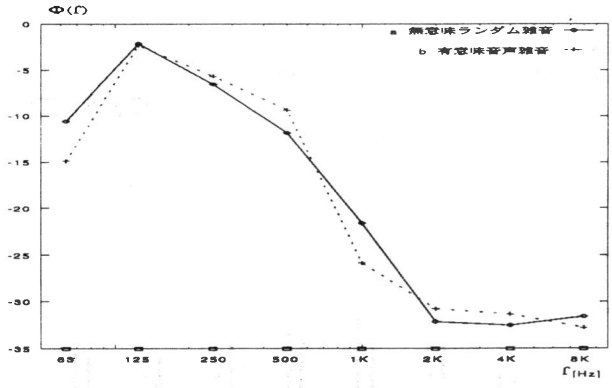


図 2 外来雑音 a,b の相対的パワースペクトル

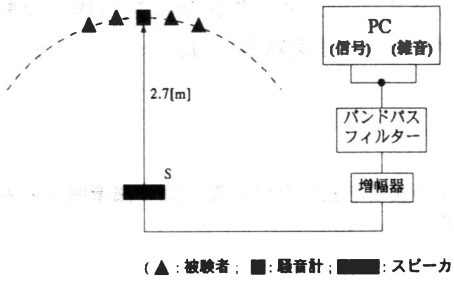


図 3 実験状況

3 外来雑音に対する心理的印象のメンバシップ関数

先にも述べたように、心理実験では１０秒間隔で５分間連続して判断し、この操作を１種類の実験につき８回繰り返した。この中の前半４回分の実測データを用いて、音声信号と外来雑音の各組み合わせごとに（４種類の組み合わせ）心理的印象 Fi $(i = 1, 2, ..., 7)$ に関するメンバシップ関数を設定した（ＳＮ比を台としていることは文献 4) – 7) と同様である）。音声信号Ａと外来雑音ａの組み合わせの場合の結果を図４に示す。ここに、心理的判断結果として七つの評価尺度の中から必ず一つを選択するといった排他的回答法の心理実験のやり方と判断結果の性質から、次の二つの条件：

直交性[9]：

$$\sum_{i=1}^{7} \mu_{Fi}(L) = 1 \quad (\forall L \in D = [-30, 30]) \qquad (1)$$

凸性：

$$\mu_{Fi}(\lambda L_1 + (1-\lambda)L_2) \geq min(\mu_{Fi}(L_1), \mu_{Fi}(L_2))$$
$$(\forall L_1, L_2 \in D, \forall \lambda \in [0, 1]) \qquad (2)$$

を満足させている点には留意する必要がある。外来雑音を無意味ランダム雑音の場合に固定し、同じ心理的印象 Fi $(i = 1, 4, 7)$ に関するメンバシップ関数が、聴取すべき音声信号に興味が有る場合と無い場合によってどのように変化するかを調べたものが図５である。外来雑音を有意味音声雑音とした場合の結果を図６に示す。これらの図から次のことが言える。外来雑音が無意味ランダム雑音の場合は音声信号に興味を持つか否かに関係なく雑音に対する評価はある程度一定している。それに対して、外来雑音が意味のある音声雑音となると、それに対する評価は、音声信号に興味を持っているか否かによって大きく変わる傾向にあることが分かる。興味のある音声信号を聴取している場合には、他の人間の会話などの有意味音声雑音に対して厳しい評価を下すといった、日常生活で体験しているごく自然な傾向を読み取ることができる。

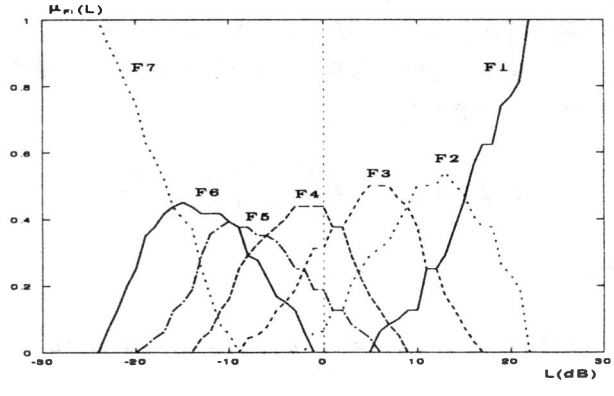


図 4 Fi $(i = 1, 2, ..., 7)$ に対するメンバシップ関数
(音声信号 A, 外来雑音 a の場合)

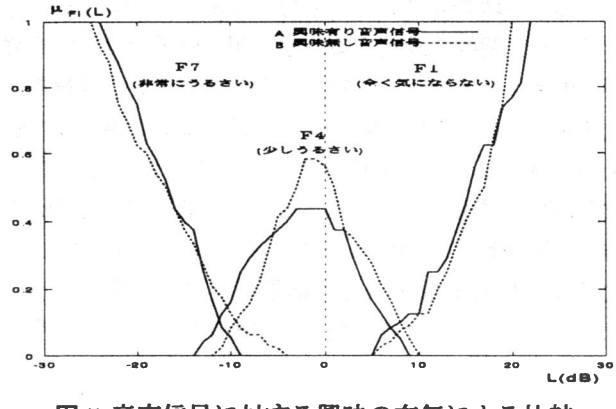


図 5 音声信号に対する興味の有無による比較
(無意味ランダム雑音の場合)

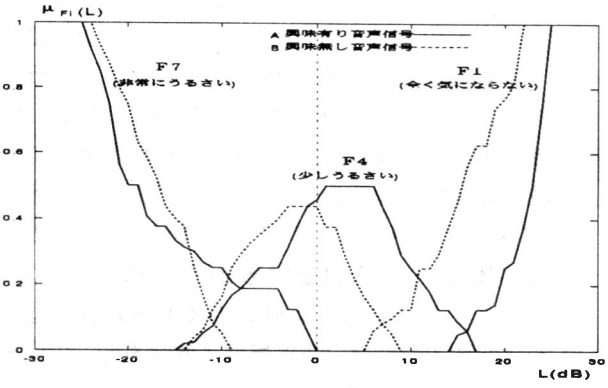


図 6 音声信号に対する興味の有無による比較
(有意味音声雑音の場合)

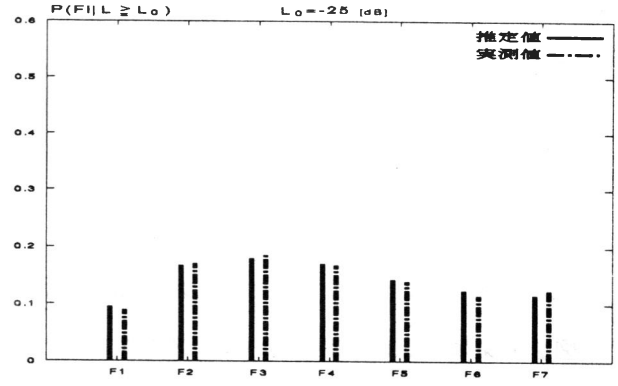


図 7 $P(Fi|L \geq L_0)$ に対する推定値と実測値の比較
(音声信号 A, 外来雑音 a, $L_0 = -25$)

4 心理的応答の予測

外来雑音に対する心理的評価法としてファジィ事象 Fi $(i = 1, 2, ..., 7)$ が出現する時間率の組を採用する。即ち、先に設定したメンバシップ関数とSN比に関する確率密度関数を用いて、SN比があるレベル値 L_0 以上を示した場合の心理的応答を、次の条件付ファジィ確率[10]を用いて評価する。

$$P(Fi|L \geq L_0) = \frac{P(Fi \cap (L \geq L_0))}{P(L \geq L_0)} \qquad (3)$$

但し

$$P(Fi \cap (L \geq L_0)) = \int_D \mu_{Fi \cap (L \geq L_0)}(L) p(L) dL$$

$$\mu_{Fi \cap (L \geq L_0)}(L) = min[\mu_{Fi}(L), \chi_{(L \geq L_0)}(L)]$$

$$\chi_{(L \geq L_0)}(L) = \begin{cases} 1 & (L \geq L_0) \\ 0 & (L < L_0) \end{cases} \qquad (4)$$

である。心理実験による8回分の実測データの中の（メンバシップ関数を設定するために用いた前半4回分を除く）後半4回分のデータを用いてSN比のレベル確率密度を求め、(3) 式から条件付ファジィ確率を推定した結果の一例として、音声信号A、外来雑音a、L_0 の値が -25 (dB) の場合を示したものが図7の推定値である。他方、心理実験の実測データから直接 Fi $(i = 1, 2, ..., 7)$ に関する相対度数を求めた結果が同図の実測値として示したものである（他の場合や詳細については当日発表する）。

謝辞

本研究に多大の援助を戴いた竹原龍一郎、濱邉明子の両氏に深謝の意を表する。

参考文献

1) 電子情報通信学会編：新版聴覚と音声、コロナ社 (1994).
2) 日本音響学会編：聴覚と音響心理、コロナ社 (1978).
3) 大串健吾訳：聴覚心理学概論、誠信書房 (1995).
4) 山口、老松、加藤、佐伯：“音声聴取時の外来雑音に対する心理的評価”、電子情報通信学会誌 A、J77-A、11、pp.1433-1442 (1994).
5) 山口、佐伯、老松：“ファジー理論に基づく音声聴取時の有色外来雑音に対する心理的評価手法”、電子情報通信学会誌 A、J79-A、4、pp.845-857 (1996).
6) 山口、佐伯、加藤：“ファジー理論による異種音声騒音に対する心理的評価反応の推定手法”、日本ファジィ学会誌（掲載決定済）(1997).
7) 山口、佐伯、加藤：“音声聴取時の異種音声雑音に対する心理的評価”、電子情報通信学会 信学技報 (1997.3).
8) 降旗、柳沢：“各種騒音源の心理的影響を共通に評価できる評価尺度の構成に関する検討”、日本音響学会誌、45、8、pp.577-582 (1989).
9) D.Dubois and H.Prade: “Fuzzy sets and systems: Theory and Applications”, Academic Press (1980).
10) 水本：ファジィ理論とその応用、サイエンス社 (1989).

連絡先

〒755
山口県宇部市常盤台 2557
山口大学工学部知能情報システム工学科
山 口 静 馬
TEL 0836-35-9481
FAX 0836-29-0053
Email yamaguch@csse.yamaguchi-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC3-3

ファジィシステムの性格診断

Diagnosis of a Fuzzy System Character

大谷 忍* 岡村 正和* 菊池 浩明*

Shinobu Ohtani, Masakazu Okamura, Hiroaki Kikuchi

ロナルド R. イェガー** 中西 祥八郎*

Ronald R.Yager, Shouhachirou Nakanishi

* 東海大学工学部

* Faculty of Engineering, Tokai University

** Machine Intelligence Institute, Iona College

Abstract:Fuzzy systems represented by a fuzzy composite relational equation depend on the composite operation. That is, it can be considerd that operation in the equation means a character of the system. This paper proposes Neanderthal Classfiar System(NCS). This method unify the more than combination of the composite operation and fuzzy relation that identified the fuzzy equation representing the system from the only input-output data by GA.

1 はじめに

従来の現代科学における要素還元主義的手法に対して、近年複雑系と呼ばれるシステムが注目を浴びている。そこでは構成要素の間に複雑な相互作用があり、その相互作用そのものに機能的価値がある。そして要素間ならびに環境との相互作用の結果として、系全体で複雑な様相 パターンが現れる。例えば、無数のタンパク質 脂肪 核酸が作用し合って細胞を形成し、何十億のニューロンが連結して脳を形成している。さらに、何百万の相互に依存した人間が、社会を形成しているといったようにこれらのどの場合も相互調整と一貫性を求めるエージェント群が個を超越し、ばらばらでは決して持ちえない生命 思考 目的といった集合的特質を獲得していく。このような複雑系では、従来のシステムのように入出力関係を明確に記述し、それに基づいて設計者があらかじめ最適な解を求めシステムに組み込むといった手法をとることが極めて難しい。従って同定問題の主目的は、必ずしも正確でなくても全体システムについて意味のある推定を行うことであると言える。この意味のある推定を行うためにファジィ推論は有効な手段であり、これまでに多くの手法が提案されてきた。これら従来のファジィ推論によるシステム同定は、推論に関する演算をあらかじめ設定した上でファジィ関係だけを同定するものがほとんどである。しかし、システムを説明するにはシステムを孤立した対象それ自身と考えるのではなく、環境との体系的因果を明らかにしなければならない。つまりファジィシステムについてより意味のある推定を行うということは、入力とファジィ関係を結びつける合成演算とその合成演算におけるファジィ関係を同定することだと言える。この場合システムの行動は合成演算に支配的なので、合成演算がシステムの性格を表していると考えられる。従って、合成演算の同定を行うことは一種の性格診断である。この性格診断を行うための方法として、分子系統学で系統樹作成に用いられている無荷重平均距離法による診断方法を提案し、その有効性について検証を行ってきた。そこで、今回はこの無加重平均距離法を改良した誤差最小型ＵＰＧＭＡを用いた診断結果の信頼性を検討すると共に、複数の状況下における性格を診断するための１つの指標として機能特性要素という概念を導入し、その診断方法を提案する。さらに、性格の構造と行動の関係についても考察を加えた。

2 ファジィ同定問題

これまで、ファジィ合成関係方程式の解法といえば、複雑な計算アルゴリズムを用いて極大解もしくは極小解を求めるものであったが、このような解法アプローチに比べて、ＧＡを用いることの利点は、まず解法のために複雑な計算アルゴリズムを使わずに、直接的に解を求めることが可能であることと、極大解もしくは極小解というその方程式において特徴的な解のみならず、解空間に存在する複数の解を求められることである。複数の入出力データを用いてシステムの同定を行う方法として、次の２つが考えられる。１つは、入出力データを一括して同定を行う方法で、もう１つは各入出力データに対して同定を行い、その後同定解を統合する方法である。前者の場合、入出力データ数が増えれば、各入出力データの制約から解空間が限定され、求めた同定解の信頼性は向上するが、ＧＡによる探索能力は低下する。しかし、どの程度の入出力データ数が必要かどうかというのは、システムに依存するので、一概には決定できない。従って、この方法を用いる際の問題は各システムにおける入出力データ数の設定にある。後者の場合、同定解は簡単に求めることができる。しかし、より多くの同定解が得られるので、それらの解を統合し、何らかの形でシステムの推定を行う必要がある。ただし、このどちらの方法も同定解が唯一に決定できるのか、それとも複数の解が存在するかを事前に知ることはほぼ不可能である。つまり、唯一に解を決定する一般的な方法は存在しない。従って、複数の同定解を用いてシステムの推定を行った方が現実的である。そこで本稿では複数の同定解を如何に統合し、システムの推定を行うかということに重点をあてて考えた。

3 系統発生分類法

今回提案する系統発生分類法(Neanderthal Classifier System:ＮＣＳ)の概念について説明する。本研究における同定解は、近似解でなく完全に入出力データを満たす解である。しかし、そのような完全に入出力データを満たす同定解が複数存在するというシステムの特性から、得られた同定解がシステムそのものであるかどうかは規定できない。つまり、得られた同定解は、システムそのものの場合もあるがそうでない場合もある。しかし、そのような同定解は、システムと何らかの類似性を持つか、断片的にシステムを記述している。そこで、これら同定解の類似性をもとに同定解を統合していくことによって、最終的に得られるシステムは、システム及び複数の同定解の共通システムであると考えられる。このシステムの先祖ともいうべき統合したシステムの特性を調べることは、システムの特性を調べることとなんら変わりはない。逆に、同定するシステムは、統合したシステムが分化して生じたものであるから、統合したシステムは、システムの本来あるべき姿であると考えることができる。

表 1: 同定結果

No	入出力データ	同定結果
1	$A=(0.6\,0.7\,0.6)$ $B=(0.6\,1.0\,1.0)$	ｍｉｎ＊激烈和 2 限界和＊ｍｉｎ 4 激烈和＊ｍｉｎ 1 限界積＊激烈和 2 ｍｉｎ＊限界和 2 代数和＊ｍｉｎ 4 激烈和＊代数積 3 限界積＊限界和 5 代数積＊激烈和 2 激烈積＊激烈和 2
2	$A=(0.2\,0.7\,0.9)$ $B=(0,5\,0.6\,0.4)$	ｍｉｎ＊代数和 1 限界積＊代数和 3 ｍｉｎ＊ｍａｘ 1 代数和＊限界積 1 代数積＊限界和 1 ｍａｘ＊ｍｉｎ 1 代数積＊代数和 4 ｍａｘ＊代数積 2 限界和＊限界積 2 ｍａｘ＊限界積 1
3	$A=(0.4\,0.8\,0.6)$ $B=(0.8\,0.7\,0.8)$	ｍｉｎ＊限界和 2 代数和＊代数積 4 ｍｉｎ＊代数和 3 限界積＊代数和 1 代数積＊限界和 2 代数和＊限界積 3 代数積＊代数和 1 ｍａｘ＊ｍｉｎ 1 限界積＊限界和 2 激烈積＊限界和 1

次に統合の方法について説明する。通常１つのシステムにおける同定解は、複数の合成演算と各合成演算に対して複数のファジィ関係が存在する。そこで、以下の２段階統合方式を用いて同定解を統合する。

(１段階) 各合成演算に対するファジィ関係の統合を行う。

(２段階) 合成演算と統合したファジィ関係をもとに合成演算の統合を行う。

特に本論文では便宜的に、個々の同定解を progeny 、第１段階で得たファジィ関係を Root、この Root と合成演算の集合を Ancestry、第２段階を経て最終的に統合したシステムを Ancestor System(ＡＳ)として区別することにする。そしてこのＡＳをもとにシステムの性格をタイプ別に分類する。

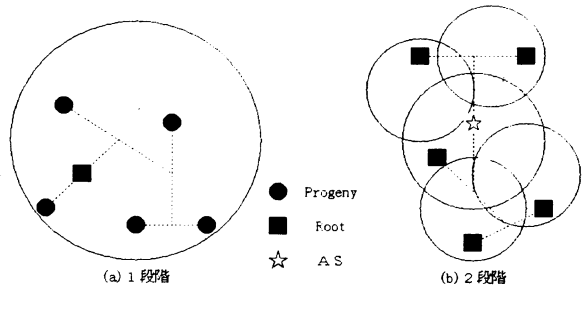


図 1: ２段階統合方式

4　誤差最小型ＵＰＧＭＡ

無荷重平均距離法(ＵＰＧＭＡ)は、分子系統学において提案されている系統樹作成法の中で、最も多用されている方法である。この方法を用いることにより、同定解を類似性という観点から統合することができる。そのアルゴリズムを次に示す。図１は２段階統合方式におけるＵＰＧＭＡの概念図である。

(手順１)ＯＴＵ(段階１ではファジィ関係、段階２ではAncestry)の対の間の距離を計算し、最短距離の２つのＯＴＵを複合する。

(手順２)複合して得たＯＴＵ(複合ＯＴＵ)と残りのＯＴＵから新たに対の間の距離を計算する。

(手順３)さらに最短距離にある２つのＯＴＵを複合し全てのＯＴＵが統合して１つの群となるまで繰り返す。

このとき最後に得られるのがRoot(段階１)とＡＳ(段階２)である。通常、複合ＯＴＵは、対象となる２個のＯＴＵの中点として計算される。しかし、この方法を今回のようなファジィシステムに適用するには以下の点で問題が生じる。

(1) [0,1]間の0.1刻みのような離散値を取り扱う場合、中点計算では収束せず、端数が生じる。

(2) Ancestry及びＡＳが、必ずしも入出力データを満たさない。

このような問題を解消するために、以下の方法を用いて複合ＯＴＵを計算する誤差最小型ＵＰＧＭＡを提案する。

(1)(最短格子間距離／２)を計算し、そこに位置する全てのＯＴＵを候補ＯＴＵとする。

(2)候補ＯＴＵの中で、出力誤差が最小のＯＴＵを複合ＯＴＵとして採用する。

この計算方法の特徴は、複数の候補の中から複合ＯＴＵを決定できることである。この手法はＧＡで得られた同定結果をもとに、それとは異なるファジィ関係と合成演算の組み合わせを見つけることができる。つまりＧＡによる同定解は、それほど多くなくても診断可能であり、さらに最終的に得られるＡＳが入出力データを満たすようにすることで、従来のＵＰＧＭＡによる診断より診断結果の信頼性は高くなると言える。

5　診断結果

表２のような診断カルテを用いて、ＡＳを分類する。表１の診断結果を表３に示す。出力と診断対象システムを比較すると、出力が必ずしも性格を反映しているわけではないことが分かる。これは出力のみからシステムの性格を知ることができないので、システムの性格を診断するには、システム同定を行う必要があることを示唆している。出力と診断対象システムを考慮した上で、診断結果の評価を行うと、ほぼ妥当な結果が得られており、ＮＳＣによる診断結果の信頼性は高いと言える。

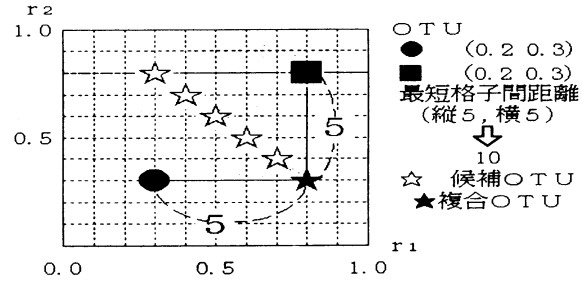


図 2: 誤差最小型ＵＰＧＭＡ

表 2: 診断カルテ(代数和＊限界積)

入力	ファジィ関係				
	小		中		大
悲観	悲観	悲観	悲観	悲観	悲観
	悲観	悲観	悲観	やや悲観	やや悲観
中庸	悲観	悲観	やや悲観	中庸	やや楽観
	悲観	やや悲観	中庸	楽観	楽観
楽観	悲観	やや悲観	やや楽観	楽観	楽観

6　機能特性要素

表１対する診断結果は、入出力データが１組であることから、この場合の性格診断は、ある特定の状況下におけるシステムの性格を診断したものであると言える。そこで、入出力データが複数設定した場合には、機能特定要素という概念を用いて診断を行う。機能特性要素とは、各状況下における診断結果を包括的に扱ったもので、状況の変化に対する、順応型自立型依存型の３種類に分類する。この際、自立型及び依存型に関しては、さらに悲観楽観中庸に分類するものとする。機能特性要素の診断方法は、図３のような各機能特性要素に関するグラフを用いて診断する。

表 3: 診断結果

入力	出力	システム	診断結果	評価
やや楽観	楽観	楽観	楽観	◎
中庸	中庸	中庸	中庸	◎
中庸	やや楽観	中庸	中庸	○

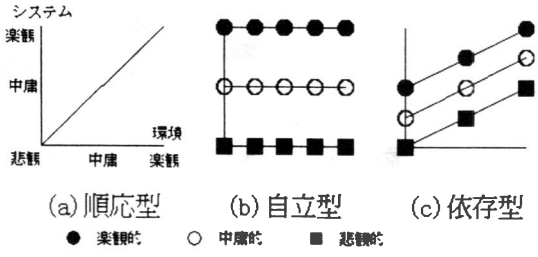


図 3: 機能特性要素

7 性格の構造

人間において思考の伴う行動には、何らかの形で性格が関与している。何らかの形でというのは、行動が必ずしも性格そのものを表しているわけではないからである。性格には行動に現れる部分と、現れない部分がある。行動になって現れる性格は、行動を観察することによって把握することができるが、行動に現れない性格を行動だけで判断するには無理がある。そういったことから、これまで性格を環境と行動との相互作用と考え、性格診断を行ってきた。しかし、性格診断を行う本来の目的が、ただ単に性格を知るためだけのものではなく、行動予測　挙動理解にあるとするならば、これまでの診断結果から行動がいかに生じるかを調べる必要がある。図 4 は、表 1 (3) の性格を診断するときに作成した系統樹から性格の構造を表したものである。この図を見ると構造がより分化している部分が行動となって現れていることがわかる。分化度が高いということは、それだけ性格が発達しているということなので、行動と性格の発達には密接な関係があることが窺える。従って、今後の性格診断の方向性としてこのような性格の構造を考慮した診断方法を考えていく必要があると言える。

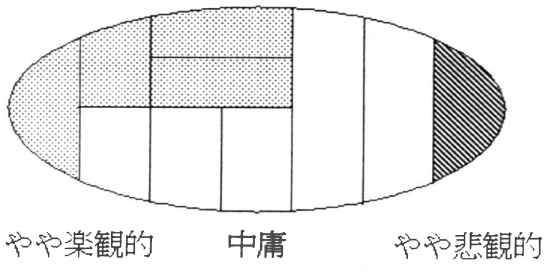


図 4: 性格の構造

8 おわりに

本稿では、ある入出力データを満たすファジィシステムの合成演算とファジィ関係の組み合わせからシステムの性格を診断する方法について説明した。特に複数の組み合わせを統合する際に誤差最小型ＵＰＧＭＡを用いることで、診断結果の信頼性が高いことを検証した。従来のＵＰＧＭＡに比べて誤差最小型ＵＰＧＭＡによる診断の結果に対する信頼性が高い理由として、中点群からよりよい複合ＯＴＵが得られることとＡＳがほぼ入出力データを満たすことに起因すると考えられる。その結果、診断を行うために必要な入出力データと同定解が、それほど多くなくても診断することが可能であることが分かった。ただし、ＧＡを用いて同定を行う時点で、解を制限する必要がある。つまり、診断に必要なのは数ではなく解の種類ということになる。この解を制限する条件をどうするかということは今後の課題である。特定の環境下における診断では、環境が変わったとき、対象システムと結果のシステムとの間にどれだけ誤差が生じるか調べる必要がある。また、複数の入出力データを用いる場合は、同定解と入出力データのバランスをとる必要がある。しかし、実際にそのようなバランスを考慮するのは難しいので、入出力データをランダムに作成するのではなく、ＧＡを用いて、入出力データを探索するといった方法を用いることも考えられる。このように、幾つかの課題はあるものの診断方法としては、信頼性の高い結果が得られたことから、診断を行うにはかなり有効な方法であると言える。

参考文献

[1] 大谷、菊池、イェガー、中西、 システムの性格診断」、第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp449-502,1996

[2] 大竹、大谷、上木、菊池、中西、 ＧＡによる知識構造の獲得」、第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp179-182,1995

[3] 長谷川、岸野、 分子系統学」、岩波書店、1996

連絡先
大谷忍
〒 259-12 神奈川県平塚市北金目 1117
東海大学工学部電気工学科中西研究室
TEL:0463-58-1211 Ext:4025

FRC4-1

人間との対戦を実現するファジィピンポンロボット

Fuzzy Ping-Pong Robot -Ping-Pong Robot VS Human-

田中　一男　　奥　大輔
Kazuo TANAKA　　Daisuke OKU

金沢大学工学部人間・機械工学科
Department of Human and Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University

Abstract: A fuzzy controlled ping-pong robot, which has an arm of X-Y plotter type and a hand with a ping-pong racket, has been developed. The experiment results demonstrate that the ping-pong robot can hit the ball with a 77% success rate. Moreover, the ping-pong robot is capable of playing ping-pong games with human.

1．緒言

近年、ロボットは様々な状況に対応したより高度な作業が求められている。高度な作業では、高速で正確な制御、視覚情報の積極的活用、自己調整あるいは学習的能力などが求められる。ピンポンロボットにおいて上記の要素は必要条件であり、人間とのピンポンラリーを実現する場合さらに多くのことが求められる。本研究は、球の軌道予測法やロボット機構の設計、ファジィ位相進み補償器によるロボットアームの制御、ハンド部による打ち返しのタイミングの自己調整を行うことにより、ロボットの打ち返し確率の向上を計り、人間とのピンポンラリーを行うことを目的としている。

2．実験システム

実験システムの構成を図1に示す。ロボットは、以下に記す3つの主なユニットにより構成されている。

2.1　センサユニット　　2台のCCDカメラと画像処理装置により球の三次元座標を得る。

2.2　コントロールユニット　　コンピュータ二台による並列処理をする。Computer1では、球の軌道予測とハンド部の制御を、Computer2ではComputer1の軌道予測結果をもとにファジィ位相進み補償を用いてアーム部の制御を行う。球軌道予測は、球速に比例した空気抵抗が球にかかるものとして運動方程式を立て、その近似解を解析的に解くことにより行う。

2.3　アクチュエータユニット　　ロボットアームとハンド部によって構成される。アームは、平面を移動するXYプロッタのような機構を用い、二台のサーボモータを動力源とする。ハンド部は、エアーシリンダによるラケットを押し出す機構を採用し、ステッピングモータを用いてラケットの左右方向の角度付けを行った。

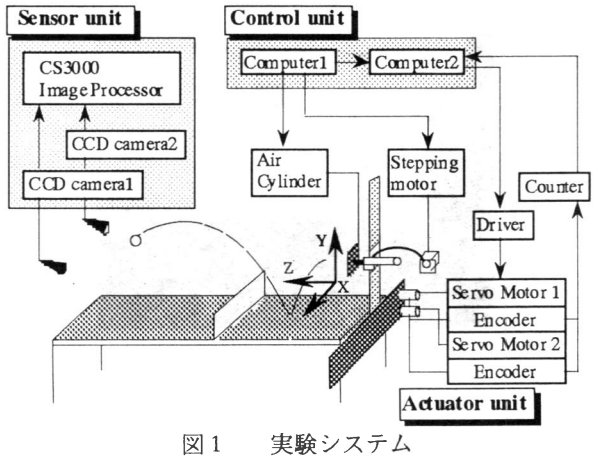


図1　　実験システム

3．ロボットアームのファジィ位相進み補償 [1,2,3]

ロボットアームでは、プーリとワイヤにより動力を伝えているため、非線形性が強く、そのモデル化も難しい。そこで、ロボットアームの制御にファジィ位相進み補償器[1,2,3]を用いる。ファジィ位相進み補償器は、以下の2つの規則からなる。

規則1　IF Φ is about " $-\pi$ or π "　THEN　$\dot{u}_1=\begin{bmatrix}a & b\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e\\ \dot{e}\end{bmatrix}$

規則2 IF Φ is about" $-\pi/2$ or $\pi/2$"　THEN $\dot{u}_2=\begin{bmatrix}a & b\end{bmatrix}T(\theta_c,\omega_{cG})\begin{bmatrix}e\\ \dot{e}\end{bmatrix}$

ここで、

$$\Phi=\tan^{-1}(\dot{e}/e),\quad T(\theta_c,\omega_{cG})=\begin{bmatrix}\cos(-\theta_c) & (-1/\omega_{cG})\cdot\sin(-\theta_c)\\ \omega_{cG}\cdot\sin(-\theta_c) & \cos(-\theta_c)\end{bmatrix}$$

変換行列Tを用いることによって、ゲイン交差角周波数ω_{cG}を変えずに位相をθ_cだけ進ませることができる。このファジィ位相進み補償器を用いることで、速応性と減衰性を共に満足する制御系を設計することができる。本研究においては、a,b,θ_c,ω_{cG}は、実験を通して決定した。

4．実験と考察

4.1　アーム応答実験　　PI制御器とファジィ位相進み補償器を用いてアーム（X軸）を制御したときの応答結果を図2に示す。ファジィ位相進み補償器では、速応性、減衰性共に非常に良好な結果が得られた。打ち返し動作においては、定常偏差なく短時間での目標位置への到達と目標位置付近での振動がないことが求められることから、非常に良い結果が得られたと思われる。PI制御器において定常偏差が残っているように見える。これは、摩擦等によって生じたものだと思われるが、時間をもっと広いレンジでみたとき定常偏差がなくなることを確認している。

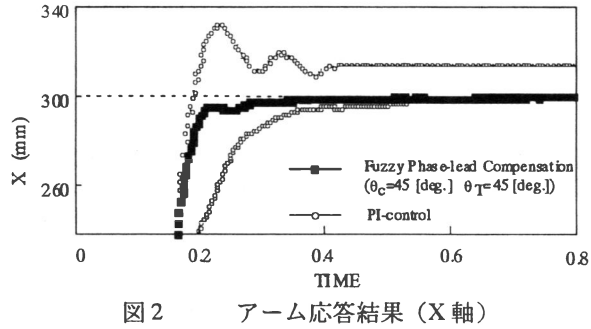


図2　　アーム応答結果（X軸）

4.2　打ち返し実験とタイミング学習　　人間が球を投げ入れ、ロボットに打ち返しをさせる実験を行った。そ

の時、打ち返し動作におけるタイミング合わせに自己調整の機能を持たせ、打ち返し確率の向上を計る。自己調整機能は、二分法を用いたもので球速と測定座標によって行った。

打ち返し成功確率を表1に示す。かっこ内の数字は，自己調整前の確率である。表1より打ち返す確率は約77%、移動完了確率は約100%に達している。これらは前回の報告 [4] よりも大幅な打ち返し確率の向上が達成できた。球軌道予測の正確性、予測と制御の並列処理、アームの効果的な制御等の相乗効果であると思われる。打ち返しの成功理由は、移動確率の向上、ハンド部にシリンダを用いたこと、ラケットに角度付け操作を行い、打角の調整をしたことによると思われる。自己調整機能に関しては、相手の台に入る確率が上昇したものの、全体的に際だった成果とはならなかった。理由としては、システム的に不確定要素が多くタイミング通りに打ち返しが行えなかったことが考えられる。

表1　打ち返し実験結果

年度	打ち返した		当たらなかった		移動未完了
	相手の台	その他	振りが早い、遅い		
前回の報告[4]	10	14	20	26	30
今回の実験結果	64 (56)	13 (19)	10 (10)	13 (15)	0 (0)

4.3　人間との対戦　　人間とのピンポンラリー実験を行った。実験の様子を図3（1～5）に示す。4.2と異なり球の回転や球速の増加、座標測定領域の縮小等の厳しい環境下において高度な連続動作が求められるが、人間とのピンポンラリーを行うことができた。このことから、本研究において構築したシステムの有効性を示すことができた。今後の課題としては、あらゆる球軌道に対応した打ち返し機構の開発、数回行われる予測においてどの結果が最良かを判断するシステムの設計、打ち返すタイミングの自己調整機能の構築などが、今後の課題である。

5、結言

本研究において以下のことを行った。

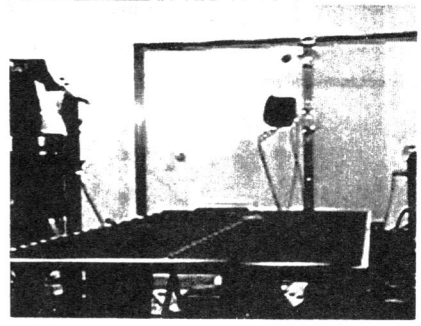
（1）球軌道予測方法の確立
（2）ファジィ位相進み補償器を用いたアーム部の制御
（3）システム及びハンド部の機構設計
（4）人間とのピンポンラリーの実現

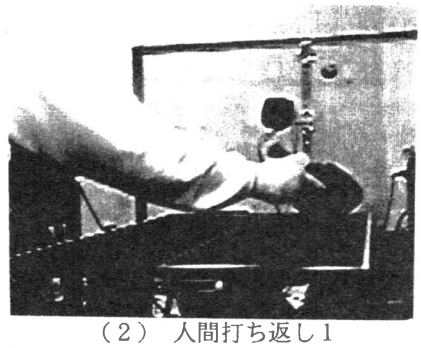
なお、本研究の一部は、マツダ財団の助成によって行われた。ここに感謝の意を表します。

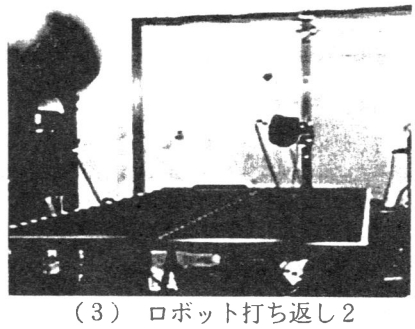
参考文献

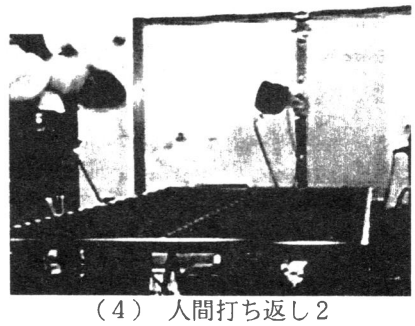
[1] 田中ほか，”ファジィ位相進み補償の効果について”，第10回ファジィシステムシンポジウム，pp.137-140 (1994)
[2] K.Tanaka and M.Sano,Analysis and Design of Fuzzy Controllers in Frequency Domain, Proceedings of IEEE Int. Conf. on IECON'93, Vol.2, pp.236-241 (1993)
[3] 田中，”アドバンストファジィ制御”，共立出版 (1994)
[4] 田中，神田，”3次元簡易Ping-Pongロボット”，第11回ファジィシステムシンポジウム，pp.607-610 (1995)

[問い合わせ先] 〒920　金沢市小立野2-40-20
金沢大学工学部人間機械工学科
田中一男
TEL&FAX　0762-34-4736
EMAIL　ktanaka@t.kanazawa-u.ac.jp


（1）　サーブをロボットが打ち返す1


（2）　人間打ち返し1


（3）　ロボット打ち返し2


（4）　人間打ち返し2

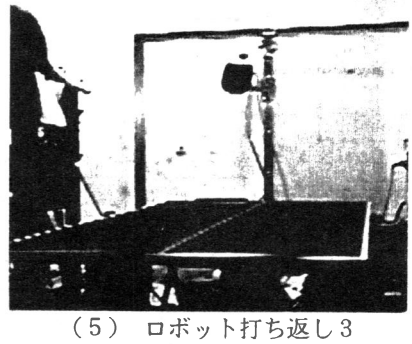

（5）　ロボット打ち返し3

図3　人間とのピンポンラリー

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC4-2

二足歩行ロボットのためのRNNの最適化

Optimization of Recurrent Neural Network for Biped Locomotion Robot

福田 敏男 , ○古俣 洋一郎 , 荒川 丈昌
Toshio FUKUDA, ○ Youitirou KOMATA, Takemasa ARAKAWA
名古屋大学 工学研究科 マイクロシステム工学専攻
Dept. of Micro System Enginnering Nagoya Univ.

abstract - Using the way that we make biped locomotion robot have force sensors at the sole, and make it get skill to keep body's balance, we make the robot walk. For getting the skill, we propose the way that we use recurrent neural networks learning with self-adaptive GA. And for the structure of RNN we show the part of the crossover in GA.

1 はじめに

人は常に足の裏にかかっている力の分布状態を感知し，歩くという行動をする．そこで，二足歩行ロボットの足の裏に圧力センサーを取り付け，足の裏の力情報を得ることにより，微妙なバランス操作の動きを獲得させ，不整地であっても歩行が可能となる制御手法を用いる．

二足歩行ロボットに関する研究は，従来からいろいろ行なわれている(1)(2)(3)．今まで，リズムを用いたものや，倒立振子の安定性を用いたものなどが提案されているが，我々は二足歩行ロボットの軌道生成にリカレントニューラルネットワーク（以下RNNと略す）を適用する．ここで，RNNを使う際，我々はRNNをどのように学習させるかを決定しなければならないが，二足歩行ロボットを未知の環境下で，歩行させるのに教師値となる軌道を知ることはできない．そのため，強制学習を用いることとする．さらに，RNNの学習には遺伝的アルゴリズム（以下GAと略す）を適用することとする．この手法は進化的ニューラルネットワークの研究として知られ，例として，誤差逆伝播法とGAとのハイブリッド・アルゴリズムや，ニューラルネットワークのための進化的プログラミング（以下，EPと略す）などが挙げられる．一般的にGAとEPは，進化的最適化手法であり，GAを適用する時には，コーディングについてや，交叉や突然変異をどうするか決定しなければならない．そして，RNNにあう交叉を決定することは困難であるが，交叉による解探索の有効性も見のがせない．一方のEPでは，コーディングに実数値，遺伝的操作として自己適応型突然変異を用いていて，GAと比較して，関数最適化においてはEPのほうが優れていると言える．そこで，我々は自己適応型突然変異を持つGAを適用する．また，GAにおける交叉をより効果的に行なうため，交叉をさせる個体同士を構造的に近い物を用いるようにした．さらに，RNNのユニットの数を可変にし，ユニットの数が，世代ごとで変化するようにし，RNNの学習と同時にユニット数の最適化も行ない，その有効性も示すこととした．

2 遺伝的アルゴリズムを用いたリカレントニューラルネットワークの学習

RNNは，時系列を容易に表現でき，時間の履歴が蓄えられる，という特徴を持つ．また，RNNのもつ凡化性により，代表的な値，この場合は，角度において学習させれば，その補間値となる中間の角度においても歩行ができる可能性がある．そのため，不整地における歩行を安定化させるためのコントローラとして，RNNが向いていると思われる．そのような特徴を利用して，足の裏からの出力値と，各関節のエンコーダから得られる関接角とを入力とし，各関接の角度と角速度の補償分を出力とするRNNを組み，学習を繰り返すことにより，各時間毎の入力信号によって，ロボットが安定な状態となるように出力をさせる．

本研究では，各ユニット間の実数値である重み係数からなるマトリックスを一つの個体とし，その個体間で，正規乱数を用いた自己適応型突然変異を用いたGAの操作を行ない，最適な重みマトリックスを学習させ，目標に対して最適な値を出力するRNNを学習によって得るようにした．また，GAにおける交叉をより効果的に行なうため，GAのある個体群における各個体の構造を互いに類似性の多いものを生成するようにした．それは，個体群の一個体だ

けをランダムに生成し，残りの個体はランダムに生成された個体に正規乱数をのせることにより，生成していく．これにより，その様に生成された個体群は互いに類似の多い構造を持つ物とすることができる．さらに，本研究では，RNN のユニット数の異なる 4 種類の個体を初期個体の生成において，各 1 個体づつ生成しておき，上の方法を用いて，各ユニット数を持つ個体の個体群を生成し，それらに対し同時に遺伝的操作を行なうことにより，ユニット数の最適化を含めた，RNN の構築を行なった．

3 歩行安定化学習のアルゴリズム

本研究では，平坦な地面で二足歩行可能なモデルを用い，それを坂等の不整地の際でも歩行が可能となるように，その補償分の関節角とその角速度を出力する RNN を生成する．ここで用いる RNN は非対照な相互結合をもつものとする．この制御のブロック線図を図. 1 に示す． また，その出力は，各関

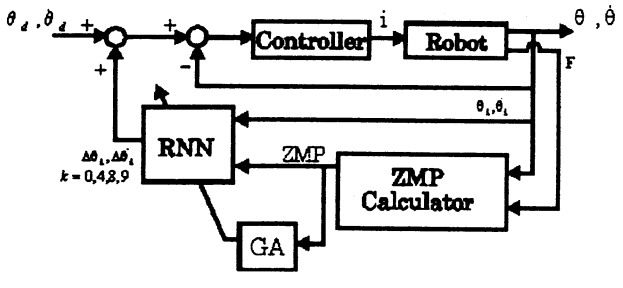


図 1. brock diagram of control

接が補償すべき角度と角速度を出力する．評価は各時間 dt ごとの ZMP の位置を使用する．つまり，足裏の圧力センサーの値より，各時間ごとに ZMP の位置を計算し，ZMP が足裏範囲外に出ると，歩行の動作を停止させる．その状態で，評価値として平地における ZMP の軌道との距離を用いて選択戦略としてエリート保存によって，子孫を次世代に残す．この場合，それぞれの個体の重み行列で，勾配や突然変移を行なわせ，次世代の重み行列とし，その重み行列を用いて，再度，時刻 $t = 0.0$ s より始め，一歩行動作を終了するまで，規定した世代数まで学習を続ける．

そのようにして得られた RNN の重みをを用いれば，平坦な地面を歩行するモデルでも，勾配のある地面での歩行が可能となる．

4 二足歩行ロボットのシミュレーション

4.1 シミュレーション方法 モデルは 13 リンクの 3 次元構造をもつもので，地面の勾配は歩行の進行方向に対して直角方向に 5° とし，1 歩行動作の時間を 4 s，サンプリングタイムを 0.05 s とした．また，初期個体のユニットの結合数は 625,1156,1764 とした．仮定として，1）斜面下方向の摩擦係数は十分大きく，ロボットの横滑べりは起こらない．2）歩行の進行方向におけるバランスはとれている．また，$\boldsymbol{M}()$ を慣性項，$\boldsymbol{C}()$ を遠心力項，$\boldsymbol{G}()$ を重力項として，次のダイナミクスの方程式を $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ について解くことにより行なった．

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta)\dot{\theta}^2 + G(\theta)$$

補償分の角度と角速度を出力する RNN は，ユニット数を 42 とし，入力層を 10，出力層を 7 とした．学習は，一歩行動作を終えるまで，または，設定した世代数まで行なう．

4.2 シミュレーション結果 ユニット間の結合を可変にして，GA の操作を行なった結果を示す．このときのユニット間の結合数は 625,1764 の 2 種類が残り，評価関数は 1764 の方がよいものが残った．また，RNN の構造に関しては，構造的に類似性の多いもの，つまり，個体群の中の 1 個体をランダムに生成し，あとは正規乱数を用いて，その 1 個体を少しづつ変化させて個体群を形成していった方が，すべての個体をランダムに生成していったものよりも学習の速度が 2 倍ほど速いという結果がでた．

5 まとめ

本論文では，二足歩行ロボットに適した RNN の構築ということで，Self-adaptive GA を用いて，ユニット数を変化させながら学習を行なった．初期個体群の違いによる学習の速度の違いを比較し，構造に類似性のある方が学習速度が速いという結果がでた．このことより，RNN の GA を用いた学習においては，GA の交叉のオペレーションが解の探索において重要な役割を果たしていて，さらに，構造の類似性が GA の交叉をより効率的に行なわせているということが言える．

参考文献

(1) 呉松，井上，北村，" ニューラルネットワークの学習機能を用いた二足歩行ロボットの軌道計画と制御"，SICE '89,

(2) 呉松，前田，北村" 神経振動しによる二足歩行ロボットの軌道生成"，SICE '92,

(3) 高西、石田、加藤: "2 足歩行ロボット WL-10RD による動歩行の実現"，日本ロボット学会誌計測

名古屋市千種区不老町　古俣 洋一郎
052(789)4481　komata@robo.mein.nagoya-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC4-3

遺伝的アルゴリズムによる仮想的な移動ロボットの環境変化に対応する一般化行動判断ルールの獲得手法

A method of the generalized skill acquisition of mobile robot for adaptation to environmental changes using Genetic Algorithms

大野 宏司* 古橋 武 内川 嘉樹

Hiroshi Ohno Takeshi Furuhashi Yoshiki Uchikawa

(株) 豊田中央研究所* 名古屋大学

Toyota Central Research & Development Labs., Inc Nagoya University

We propose a method for acquisition of generalized action-decision rules for mobile robot which is based on the assumption that selection of adequate focal point is important for the skill acquisition. The method makes it effective to acquire the generalized knowledge which are robust against environmental changes. The skill acquisition starts from discovery of rules to drive a robot to a goal point under a certain environment using genetic algorithm. Then, for the generalization of acquired rules, we select an adequate sensing range of the robot for detecting obstacles, which is described in the if-part of rule. Results of computer simulation show that the extracted skills worked well to accelerate the learning of robot under a new environment.

1 はじめに

ピアノ演奏や車の運転などのスキル獲得では, 目の付け所 (注視点) をいかに選択するかが習熟度の向上において非常に重要である. すなわち, スキルの習熟度により注視点の選択に違いが見られる. 例えば, 三浦, 高山, 三木 [1] は技能水準の高いピアノ演奏者の読譜の範囲が, 技能水準の低い演奏者に比べて広いことを示している. そこで, 移動ロボットやエキスパートシステムなどの知的システムにおける知識獲得の問題を取り上げ, 注視点と習熟度の関係に着目した検討を行う.

一般に知的システムの学習は特定の環境下で行われる場合が多い. そのため, 環境変化に対するロバスト性が低いことが問題となる. 一方, 人の熟達者 (適応的な熟達者) は, 経験を通して知識の一般化を行い課題状況の変化に柔軟に対応することができる. そこで, 本研究では, 適応的な熟達者に見られる特徴を参考にして, 注視点と習熟度の関係およびスキルの転移による環境変化に対するロバスト性の向上について検討を行う. スキルの転移による環境変化に対するロバスト性については, 適応的な熟達者に見られる特徴の一つであり [2], 知的システムの学習において重要な要件であると考えられる. 本研究では, 仮想的な移動ロボットを題材として, 行動判断ルールの遺伝的アルゴリズム (以下, GA) による学習を取り上げる. そして, 注視点の観点から一般化知識を獲得するアルゴリズムを提案する.

この一般化知識を学習時とは異なる環境下における学習に適用することで, スキルの転移による環境変化に対するロバスト性の向上を図ることができることを示す. この結果は, また, 適応的な熟達者の特徴を採り入れた知的システムの実現の可能性を示唆する.

従来研究では塩瀬ら [3] は, アフォーダンスの考えに基づいてスキル転移を注視点に着目した観点で検討を加えている. そこでは, 進化的計算の過程で環境が提供する情報の変遷により, アフォーダンスと注視点の変化を関係付けて論じている. これに対して, 筆者らのアプローチでは注視点の選択により行動の変化をもたらすようにルールを記述し, 獲得されるルールの一般化によりスキル転移を可能としている.

2 移動ロボットの構成

移動ロボットは前面に等角度に分けられた5つの領域を対象とする5つのセンサを備えている (図1参照). センサの機能は障害物の有無を検知することである. また, センサの各領域はロボットからの距離により3つの領域 (NEAR, MIDDLE, FAR) に分けられている. ロボットに対する行動指令は, 前進 (MOVE-FORWARD), 停止 (STOP), 左旋回 (TURN-LEFT), 右旋回 (TURN-RIGHT) および継続 (CONTINUE) の5つである. 前進は速度一定で進むことを行う. 左, 右旋回は

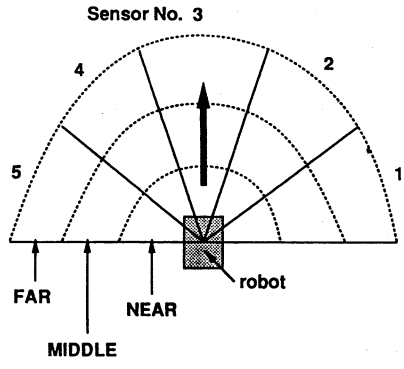


図 1: 移動ロボットのセンサ領域

速度一定でそれぞれ左右に 90 度進行方向を変えることを行う．継続は次時刻の行動指令が現在のものと同じであることを意味する．速度の大きさは単位時間あたりの単位長さである．ロボットの行動判断はプロダクションシステムにより行われる．IF-THEN ルール（以下，行動判断ルール）の競合解消は等確率でルールを選択することにより行う．ルールの形式は，

IF(and (action) (sensor, t/f, range))
THEN (action)

とした．IF 部では，現在の行動指令（action）とセンサの番号（sensor），真偽フラグ（t/f）および領域指定（range）の論理積の真偽により発火するかどうかが決められる．THEN 部では，次時刻の行動指令が指定される．IF 部に現在の行動指令を入れた理由は，ルールの競合を減らす働きと後述する一般化知識の獲得を容易にするためである．

3 GA による行動判断ルールの学習

仮想的な環境下で移動ロボットに与えられた目的はゴールに入ることである．そのために必要なルールを GA により学習する．図 2に示す手続きにより，行動判断ルールの学習が行われる．次に，染色体へのルールのコーディングの仕方を表 1に示す．表より，一つのルールは 12bit で表現される．一つの染色体には複数のルールがコーディングされている．また，センサについては前方（3）と近接（NEAR）の出現頻度が高くなるようなバイアスが掛けられている．これは，一般に行動において進行方向と自分の近くを良く見ることが自然であると考えられるからである．

次に，設計者がロボットに与える習熟の評価は，「なるべく早くゴールに到達する」こととした．そして，習熟の評価を反映するように適応度関数（fitness）の定義を以下のようにした．

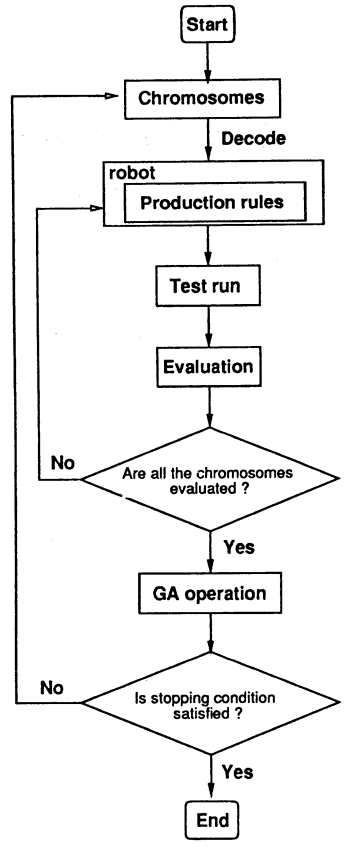


図 2: 行動判断ルールの学習手続き

$$fitness = \begin{cases} 1/time & \text{success} \\ 0 & \text{fail} \end{cases} \quad (1)$$

ここで，time はゴールに到達した走行時間である．success はゴールに入った場合（ゴールで停止する必要はない），fail はある一定時間動かなかった場合とゴールに到達せず障害物に衝突した場合である．GA のオペレータは一点交叉およびエリート保存によるランキング戦略とした．

表 1: ルールのコーディング

action	bit pattern(3bit)
MOVE-FORWARD	000 and 001
TURN-LEFT	010 and 011
TURN-RIGHT	100 and 101
STOP	110
CONTINUE	111
sensor	**bit pattern(3bit)**
1	000
2	001
3	100 and 101 110 and 111
4	010
5	011
t/f	**bit pattern(1bit)**
FALSE	0
TRUE	1
range	**bit pattern(2bit)**
NEAR	00 and 11
MIDDLE	01
FAR	10

4　一般化知識獲得アルゴリズム

適応的熟達者の特徴である環境変化に対する高いロバスト性を本システムにおいて実現するためには，獲得した知識を一般化した形態で利用することが必要であると考えられる．すなわち，環境に依存しない知識を持つ必要がある．そのための，一般化知識獲得アルゴリズムを図3に示す．アルゴリズムはルールの抽出とルールの一般化からなる．ルール抽出では，初期時のルール（初期ルール）と習熟後のルール（習熟ルール）の比較を行い，習熟ルールのうち，行動系列に変化をもたらすルールを抽出する．そして，その中からIF部とTHEN部のactionが等しい初期ルール中の対応するルールと交換し習熟度を求める．次に，抽出されたルールの中から，習熟度の（初期ルールに比べ）向上が最も大きくなったルール（抽出ルール）を選択する．初期ルールは設計者が学習時に初期値として与えられる．このことは初心者が習熟の過程で専門家から概略的な知識（アドバイス）を与えられることに対応する．行動系列の変化は，ルールのIF部とTHEN部のactionの違いにより調べる．ただし，一般的には複数のルールが関与すると考えられる．今回は簡単な場合としてこのようなルールは単独（習熟度の向上を最も高めたもの）であるとした．

また，抽出ルールは注視点の観点から，ルールのIF部におけるrangeの部分を対象として一般化される（一般化知識の獲得）．そして，このように獲得された一般化知識は，習熟度の評価である「なるべく早くゴールに到達する」という基準のもとに適用される．以下では，スキル転移により環境変化に対するロバスト性を検討するために，一般化知識を学習時の条件とは異なる条件下（環境条件も含む）に適用して習熟過程における習熟促進の効果を調べる．一般化知識を学習時に適用するために以下のようにした．ただし，行動系列に変化をもたらすルールであるため，IF部とTHEN部のactionが違うルールの場合にのみ一般化知識が適用される．

- 適応度がある値以上になった時点でエリート保存された染色体に一般化知識を適用し染色体（各ルール）を変更する

Step 1) Rule extraction

1-1) find rules for producing action changing in skillful rules

1-2) find rules for maxmizing fitness value when exchanging with corresponding rule in intial rules

Step 2) Rule generalization

generalization for the range of IF-part of the rule in Step 1)

図 3: 一般化知識獲得アルゴリズム

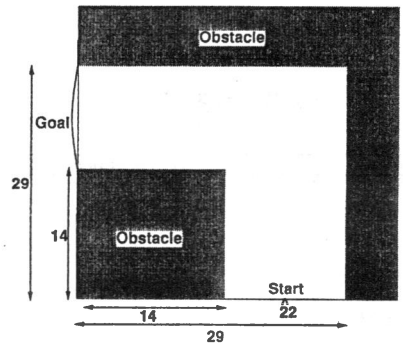


図 4: 移動ロボットの環境

表 2: 初期ルール

No.	action	sensor	t/f	range	action
1	STOP	3	FALSE	NEAR	MOVE-FORWARD
2	MOVE-FORWARD	3	FALSE	NEAR	CONTINUE
3	MOVE-FORWARD	3	TRUE	NEAR	TURN-LEFT
4	TURN-LEFT	3	FALSE	NEAR	MOVE-FORWARD

5　シミュレーション実験および結果

5.1　環境と課題

移動ロボットが動き回る環境を図4に示す．図中ハッチが掛けられた部分が障害物である．ここで，スタート地点は右下の通路中央であり，ゴールは左上のライン上の任意の地点である．図中の座標値の単位は単位長さである．

5.2　行動判断ルールの学習

ここでは，習熟度により注視点がどのように変化するかを調べる．初期ルールを表2に示す．すべての初期ルールが一つの染色体にコーディングされている．これらのルールはロボットが自分の近接の障害物に注意しながらスタート地点からゴールに到達するためのルールである．これを，初心者が専門家から与えられるアドバイスに相当すると考える．学習条件は，世代数100，染色体数30，ランキング戦略における染色体の選択数10，crossover rateおよびmutation rateはそれぞれ0.9，0.6とした．GAにより100世代目に得られたルール（習熟ルール）を表3に示す．初期ルールと習熟ルールの比較から，習熟度の向上をもたらす原因はセンサの領域をNEARからFARに切替えることであることがわかる．すなわち早くゴールに到達するという習熟の評価のもとでは，注視点を遠くに置き，障害物を早く捉えることが習熟度を高くすることになる．

以上のシミュレーション実験から，適切な注視点が習熟度の向上をもたらすことを移動ロボットの行動判断ルールの獲得に題材を置いて示すことができた．

表 3: 習熟ルール

No.	action	sensor	t/f	range	action
1	STOP	3	FALSE	NEAR	MOVE-FORWARD
2	MOVE-FORWARD	3	FALSE	FAR	CONTINUE
3	MOVE-FORWARD	3	TRUE	FAR	TURN-LEFT
4	TURN-LEFT	3	FALSE	NEAR	MOVE-FORWARD

5.3 一般化知識の効果

ここでは, 学習で獲得されたルールから一般化知識を獲得し学習時とは異なる条件下で行動判断ルールの獲得に適用し習熟促進効果を調べる. そして, 習熟促進効果があれば, スキル転移により環境変化に対するロバスト性があるという判断が可能である. 図3に示した一般化知識獲得アルゴリズムにより一般化知識を獲得する. 抽出ルールは,

IF(and (MOVE-FORWARD) (3, TRUE, FAR)) THEN (TURN-LEFT)

であった. 次に, これを注視点の観点から一般化すると,

IF(and (x) (x, x, FAR)) THEN (x)

となる. ここで, x は不定であり何にでも整合することを示す. ただし, IF 部と THEN 部の x は両者の action が異なるものであれば何でもよいことを示す. この知識を学習とは異なる条件下で行動判断ルールの獲得に適用する. 今回は, 題材とした移動ロボットの行動判断ルールの形式では, IF 部のセンサによる判断が 1 つであるため, 環境を複雑にしても適切なルールが獲得できない恐れがある. そこで, 学習条件で初期ルールがすべてランダムに設定される場合を環境変化と考え, 習熟度の促進効果が見られるかを調べる. 一つの染色体にコーディングされるルール数を 6 つとしてシミュレーションを行った. 一般化知識の適用は適応度の値が 0 より大きくなった時点とした. 16 種のランダムシードでシミュレーションを行い, 13 種の場合 (8 割強) で習熟促進効果が見られた (一例を図5に示す).

以上のシミュレーション実験から, 一般化知識の適用により学習時とは異なる環境 (学習条件) 下でも習熟度の促進効果が見られた. これは, 適応的熟達者が示す特徴の一つを仮想的な移動ロボットの行動判断ルールの学習を題材として示したことであり, 知的システムにおいて一般化知識の必要性を示唆する.

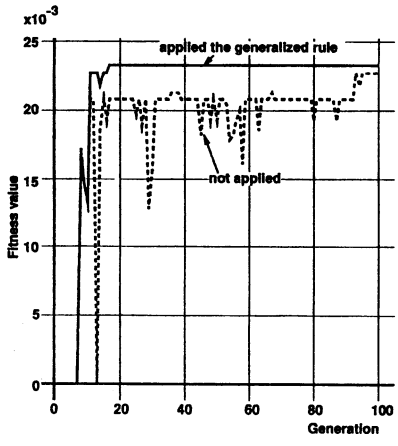


図 5: 一般化知識の効果検証

6 まとめ

本研究では, 習熟度と注視点の関係に着目し, 仮想的な移動ロボットの行動判断ルール獲得のシミュレーション実験を通して, 適切な注視点の選択が習熟度の向上に重要であることを示した. また, 適応的な熟達者に見られる特徴の一つである環境変動に対する高いロバスト性が提案した一般化知識獲得アルゴリズムにより得られる可能性を示唆する結果を得た. すなわち, スキルの転移をルールの視点から捉えた一般化知識の有効性を示した.

今後の研究では, 獲得されるルールと環境との相互作用する過程の中に見い出される有用な情報 (不変情報) と習熟の関係について検討を加えていくことが重要であると考えられる.

参考文献

[1] 三浦利章, 高山典子, 三木睦子 : ピアノ視奏時の情報獲得・処理 : 曲の難易度と技能水準を中心として, 音楽研究, 6 , 9/40 (1988)

[2] 大浦容子 (波多野 (編)) : 熟達化, 認知心理学 5 学習と発達. 東京大学出版会 (1996)

[3] 塩瀬隆之, 椹木哲夫, 山下剛史, 片井修 : 自律移動体の行動からの創発的注視点形成, 第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 899/902 (1996)

問い合わせ先

〒 480-11 愛知県愛知郡長久手町大字長湫 (ながくて) 字横道 41-1
大野 宏司
Tel : (0561)62-6111
E-mail : oono@milab.tytlabs.co.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRC5-1

マルチエージェントロボットの集団行動学習における進化シミュレーション

Evolutionary Simulation for Group Behavior Learning of Multi-Agent Robots

前田 陽一郎
Yoichiro MAEDA

松永 貴司
Takashi MATSUNAGA

大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract — In this research, we carried out the evolutionary simulation of the co-operative behavior creating an environmental map for multi-agent robots which has both behaviors of obstacle avoidance and target (food points) reaching. Each agent robot has two coflicted task, that is, local individual behaviors for self-preservation or self-protection and global group behaviors for the co-operative task. We also report simulation results performed with the evolutionary simulation which we developed for multi-agent robots with the map creation task.

1 緒 言

複数の自律ロボット要素から構成されるマルチエージェントロボットシステムでは、システムに要求される機能を複数の自律エージェントに分散化し、それを状況に応じて協調させ、知的行動を行わせることを目標としている。一方、最近では人工生命において、創発に関する研究が盛んに行われており、マルチエージェントロボットの研究にも影響を与えている。

マルチエージェントロボットシステムなどに学習機能を付加する研究として、例えば G.Weißら [1] の研究がある。これは個別の行動ルールを持ったエージェントが協調して1つのタスクを達成しようとするものであり、分類子システムの分散化とみることもできる。M.J.Mataric ら [2] は5台の実ロボットを用いて heterogeneous なエージェントによる集団行動の生成メカニズムを研究している。また人工生命的な立場からは、畝見ら [3] が強化学習の手法によりエージェントの集団行動をシミュレートすることによって集団の中の棲み分けの発生を確認している。さらに、Koza らのグループ [4] が、遺伝的プログラミングの手法を用いて行った移動ロボットのシミュレーションでは、ランダムに生成されたアルゴリズムが世代数を重ねるに従って次第に環境に順応していくという進化現象を確認している。

しかしながら、一般に自律分散型のマルチエージェントシステムの場合、各エージェントが自己保存や防御を行なうローカルな行動目的と協調作業や群行動を行なうグローバルな行動目的が混在し、両方の目標を達成しようとするため、一般に競合が起こる。このようなことから、個々のエージェントに与えるローカルな単独行動ルールとグローバルな協調行動ルールが、それらの相互作用として発生する創発現象に何らかの影響を与える可能性があると考えられる。

そこで本研究ではこれまで、創発メカニズムに関する研究の第1段階として、障害物回避行動とエネルギー回復のための餌場到達行動という相反する行動目標を与えたマルチエージェントロボットの進化シミュレーションを行い、比較的低レベルではあるが、個々のエージェントの創発的行動を観測した [5] [6]。本論文ではこれをさらに発展させ、集団としての協調行動を確認するため、環境マップ生成という集団としての行動目標を与え、集団進化による行動学習を行った。提案したアルゴリズムをマルチエージェントロボットに適用した進化シミュレータを作成し、その検証シミュレーションを行ったのでこれについても報告する。

2 エージェントロボットの行動目的

2.1 マルチエージェントロボットモデル

本研究で提案するマルチエージェントロボットのモデルを図1に示す。各エージェントは個体エネルギーをもち、移動による消費、餌場 (エネルギー補給地点) 到達の報酬、衝突回避に対する罰 (および報酬) などの自己保存関するローカルな単独行動とマップ生成に対する報酬という協調作業に関するグローバルな集団行動をともにタスクとして実行することにより、個体エネルギーの増減が決定される。このエージェントの個体エネルギーによりステアリングゲインが決定され、最も近傍にいる他のエージェントまでの最短距離により衝突回避ゲインが決定される。これらの行動ゲインをもとに移動方向が算出され、エージェントが行動する。

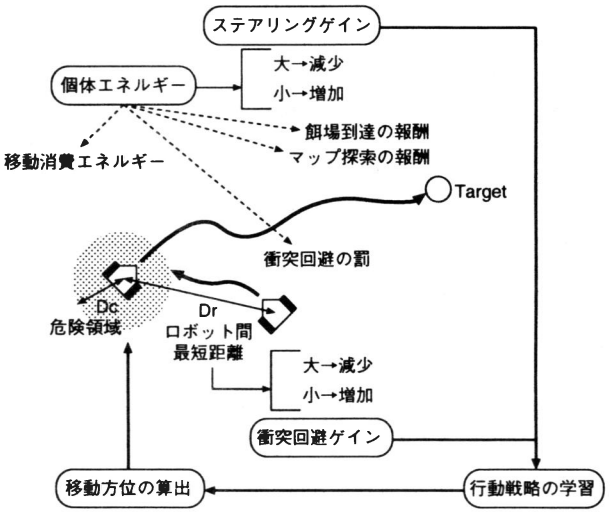


図 1: マルチエージェントロボットのモデル

2.2 マップ生成

ここでは、エージェントの協調行動にあたるマップ生成手法について説明する。本シミュレーションでは正方形の仮想環境フィールド内に一定の形状の障害物が配置され、この部分以外にエージェントとエネルギー補給のための餌場がランダムに配置される。

マップ生成手法は、まずエージェントを中心として X 方向と Y 方向にそれぞれ一定幅の正方形領域を用意し、そこを 3×3 の格子状エリアに分割する (図2参照)。このそれぞれのエリアごとに未探索率 (=未探索エリア／全探索エリア、図中の四角で囲んだ数字) が計算され、最も未探索率が高いエリアの中心座標へのベクトルと、現在のエージェントの進行方向との角度がマップ探索旋回角となる。そして実際にエージェントが移動した際に、センサが未探索領域を感知すると、その点に探索済の属性がつけられる。

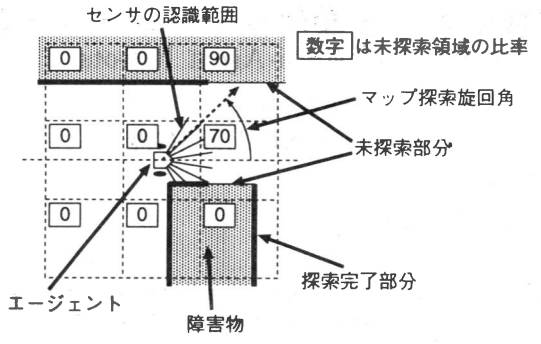


図 2: マップ生成手法の概略

3 エージェントロボットの行動学習

3.1 行動ルール

各エージェントは壁などの障害物を回避するルールと、エネルギーを得るために目標に到達するルールの相反する行動ルールを持っている。まず、衝突回避ルールは簡略化ファジィ推論を用いて作成されている。今回用いたルールはすでに報告 [5] しているのでここでは紙面の都合上割愛する。各エージェントは、自己の最も近くにいるエージェントに対する距離と方位を測定し、それを入力としてファジィルールにより衝突回避角を導き出す。

目標到達に関しては目標をエージェントがエネルギーを補給するための餌場 (Food Point:FP) と未探索点 (Seach Point:SP) に分け、最も近くにある餌場の方向と、自己の近傍での未探索点の方向に対しそれぞれのゲインを加味してエージェントのステアリング角度を設定した。ただし、前回入った餌場には向かわないものとする。各エージェントは図2に示すような自己の前方 8 方向にそれぞれ 15 度間隔で一定の範囲のみが計測可能な超音波センサを持っていると仮定する。このセンサにより、エージェントは近傍のエージェントとマップ上の壁の位置を認識する。

また、それぞれのエージェントは様々なパラメータを持っているが、主なものとして、個体エネルギー ($Energy$)、餌場到達ゲイン (G_{fp})、衝突回避ゲイン (G_{col})、適応度 ($Ffit$) などがある。個体エネルギーは、各エージェントが活動するためのエネルギーであり、この値がゼロになったエージェントは死滅したものとみなされる。餌場到達ゲイン及び衝突回避ゲインは、各エージェントが餌場に向かっていく度合い、衝突を回避する度合いを表しており、これらのゲインの大きさによって各エージェントの行動戦略 (重み) が決定される。適応度は、各エージェントがエネルギーや報酬をいか多く保有しているか、すなわち環境に対してどれだけ適応しているかという指標を表す。

3.2 行動決定

各エージェントはすべての餌場の絶対座標のみが与えられ、周囲の環境情報をセンシングにより得る。次にそれらの情報をもとに目標到達 (餌場及び未探索点) および衝突回避ゲインの重みづけにより最終的な行動 (移動方向) を決定する。

まず、最も近くにある餌場に向かうための旋回角 (ΔS_{fp})、最も近くにいる自己以外のエージェントに対しての衝突回避のための旋回角 (ΔS_{col})、近傍での未探索点の最も残っているエリアへの旋回角 (ΔS_{sp})、さらに壁が近くにある場合はその壁との衝突を回避するための旋回角 (ΔS_{wall}) を求める。これらのうち餌場到達のための旋回角 (ΔS_{fp}) は餌場への絶対座標に向かうベクトルにより比較的容易に求められる。また、衝突回避旋回角 (ΔS_{col}) は、前述のファジィルールで決定され、マップ探索のための旋回角 (ΔS_{sp}) は 2.2 節で述べた方法により決定される。さらに、壁回避旋回角は (ΔS_{wall}) 以下の (1) 式により決定される。

$$\begin{aligned}\Delta S_{wall} &= (-\frac{1}{2} + \frac{3.5-El_{min}}{12})(\frac{S_{lim} \times \pi}{Dist+S_{lim}}) \quad [El_{min} < 3.5] \\ &= (\frac{1}{2} + \frac{3.5-El_{min}}{12})(\frac{S_{lim} \times \pi}{Dist+S_{lim}}) \quad [El_{min} \geq 3.5]\end{aligned} \tag{1}$$

ΔS_{wall} ：壁回避旋回角
El_{min} ：最も近傍に物体を検知したセンサ番号
S_{lim} ：センサの限界値
$Dist$ ：センサの実測値

これらの各旋回角とゲインの大きさによって (2) 式で移動方位角θが決定される。

$$\theta = \theta_0 + G_s \times \frac{\Delta S_{fp} \times G_{fp} + \Delta S_{col} \times G_{col} + \Delta S_{wall} \times G_{wall} + \Delta S_{sp} \times G_{sp}}{G_{fp} + G_{col} + G_{wall} + G_{sp}} \tag{2}$$

θ_0 ：前回のエージェントの絶対方位
G_s ：ステアリングゲイン
ΔS_{fp} ：餌場到達旋回角
G_{fp} ：餌場到達ゲイン
ΔS_{col} ：衝突回避旋回角
G_{col} ：衝突回避ゲイン
G_{wall} ：壁回避ゲイン
ΔS_{sp} ：マップ探索旋回角
G_{sp} ：マップ探索ゲイン

3.3 行動学習

それぞれのエージェントは、相反する行動である目標到達と衝突回避の各ゲインについて逐次学習を行う。以下では＋が報酬、－が罰を示す。エージェントは、移動することにより (3) 式に示すような一定量のエネルギーを消費する。

$$\mathrm{E_{loss}} = -\Delta \mathrm{E_{loss}} \times \mathrm{T} \tag{3}$$

E_{loss} ：移動による消費エネルギー
ΔE_{loss} ：単位時間当たりの消費エネルギー
T ：経過時間

あるエージェントが餌場に到達した場合、各個体の最大エネルギーを超えない範囲で (4) 式のように一定の報酬が与えられる。逆に餌場のエネルギーは同量失われるものとする。

$$\begin{aligned}E_{tr} &= +E_{max} - E_{now} \quad (E_{now} + E_{rewmax} > E_{max}) \\ &= +E_{rewmax} \quad (E_{now} + E_{rewmax} \leq E_{max})\end{aligned} \tag{4}$$

E_{tr} ：餌場で与えられる報酬
E_{max} ：個体エネルギーの最大値
E_{now} ：エージェントの現在の個体エネルギー
E_{rewmax} ：餌場で与えられる報酬の最大値

あるエージェント A の危険領域 Dc 内に他のエージェント B が入ってきた場合、B が最も近づいた地点 Dr で A に (5) 式のような罰が与えられ、危険領域外でうまく回避できた場合には逆に報酬が与えられる。

$$E_{ca} = -\frac{G_p \times E_{max} \times (D_c - D_r)}{D_c} \quad \begin{matrix}[D_c > D_r\text{:罰}] \\ [D_c < D_r and D_r < 2D_c\text{:報酬}]\end{matrix} \tag{5}$$

E_{ca} ：衝突回避の罰（報酬）
G_p ：罰（報酬）ゲイン
D_c ：危険領域
D_r ：最も近くにいる他のエージェントまでの距離

さらに、マップ生成を行ったエージェントに対して、(6)式のような報酬が与えられる。

$$\begin{aligned} E_{sp} &= +E_{max} - E_{now} \quad (E_{now} + E_{spmax} > E_{max}) \\ &= +E_{spmax} \quad (E_{now} + E_{spmax} \leq E_{max}) \end{aligned} \tag{6}$$

E_{sp} ：マップ生成により与えられる報酬
E_{spmax} ：マップ生成により与えられる報酬の最大値

以上の式により、ある時点でのエージェントの個体エネルギーは(7)式で与えられる。

$$E_{all} = E_o + E_{loss} + E_{tr} + E_{ca} + Esp \tag{7}$$

E_{all} ：ある時点でのエージェントの個体エネルギー
E_o ：前回の個体エネルギー

また、E_{all}の値により、餌場到達ゲインおよび衝突回避ゲインは(8),(9)式のように修正される。

$$\begin{aligned} G_{fp} &= G_{fp0} + G_{fpup} \quad (E_{all} < E_{low}) \\ &= G_{fp0} - G_{fpdown} \quad (E_{all} \geq E_{low}) \end{aligned} \tag{8}$$

G_{fp0} ：前回の餌場到達ゲイン
G_{fpup} ：餌場到達ゲインの増加分（一定）
G_{fpdown} ：餌場到達ゲインの減少分（一定）
E_{high} ：ゲイン修正のエネルギー上限値（一定）
E_{low} ：ゲイン修正のエネルギー下限値（一定）

$$\begin{aligned} G_{col} &= G_{col0} - \frac{D_c - D_r}{D_c} \times G_{coldown} \quad (D_c > D_r) \\ &= G_{col0} + \frac{2D_c - D_r}{D_c} \times G_{colup} \quad (D_c < D_r \mathrm{and} D_r < 2D_c) \end{aligned} \tag{9}$$

G_{col0} ：前回の衝突回避ゲイン
G_{colup} ：衝突回避ゲインの増加分（一定）
$G_{coldown}$ ：衝突回避ゲインの減少分（一定）

このように二つのゲインをリアルタイムで修正することによって、餌場到達と衝突回避の行動学習がなされる。さらに、報酬及び罰が一定回数与えられた場合には、簡略化ファジィルールの後件部のチューニングも行なわれる。

さらに本研究ではエージェントの進化として、あるエージェントが死滅した場合に近傍にいる他のエージェントの中から最も適応度の高いエージェントの持っているパラメータを転写(コピー)する方法をとっている。これはダーウィン進化論における自然淘汰ではなく、そのときにおける最適個体のクローンをつくるという方法をとっており、「獲得形質の遺伝」を提唱したラマルク進化の一種と見なすことができる。エージェントの適応度は、(10)式によって決定される。

$$Ffit = E_{ave} + P_{ave} \tag{10}$$

$Ffit$ ：エージェントの適応度
E_{ave} ：過去10回分のエネルギーの重みづけ平均
P_{ave} ：過去10回分の報酬及び罰の重みづけ平均
(これらは最近のものほど重みを高くして加算)

4 マップ生成シミュレーション

4.1 進化シミュレータ

本研究で作成した進化シミュレータは、UNIX上のXlibグラフィックスライブラリ及びMotifウィジェットを利用している。プログラム言語はC言語を使用した。シミュレータ画面(図3-図5参照)において、左上のウィンドウは実際にエージェントが動くフィールドである。この場所にエージェント、障害物及び餌場が配置される。エージェントによりマップ生成(壁の認識)が行われると、このウィンドウ中の壁の境界部分の色がピンクから黒に変化する。その右側のバーグラフは上から各エージェントの現在の個体エネルギー、衝突回避ゲイン、餌場到達ゲインが各エージェントごとにリアルタイム表示される。その下のグラフは、上部に各エージェントの適応度、下部に環境マップの生成率が時間軸表示される。

右端にはシミュレーション制御用のボタン及びパラメータ修正を行うレバーが並んでいる。これはMotifウィジェットを利用したパラメータ修正パネルで、上部には、シミュレータ制御用のボタンがあり、これによって、シミュレーションの開始、終了、一時停止及び再実行が行える。これらのボタンの下には17種類のパラメータを変化させるためのレバーが配置されている。なお、それぞれのパラメータはシミュレーション中でも変更可能である。

4.2 シミュレーション結果および考察

今回は、全てのエージェントが同じ初期パラメータを持つ状態でその初期パラメータを様々に変化させてシミュレーションを行った。本論文で紹介するシミュレーション条件を表1に示す。ここでは、エージェント数20の場合の結果のみを示した。(1)は協調行動(ここではマップ生成作業)より単独行動(ここでは餌場到達や障害物回避などの行動)を重視するエージェント集団である。マップ探索ゲインは0(無効)としている。(2)は協調行動と単独行動を両方行うエージェント集団である。若干エネルギーを補給する度合いが高い設定になっている。(3)は単独行動より協調行動を重視するエージェント集団である。マップ生成以外の行動はあまりとらない設定になっている。なお、制限時間は3000秒に設定した。

表1: エージェントの初期パラメータ

初期条件	(1)	(2)	(3)
$Agnt$	20	20	20
$Energy$	100	100	100
E_{max}	200	200	200
E_{high}	0.95	0.95	0.80
E_{low}	0.25	0.35	0.15
G_{fp}	5.0	5.0	5.0
G_{fpmax}	10.0	10.0	10.0
G_{col}	5.0	5.0	5.0
G_{colmax}	10.0	10.0	10.0
G_{sp}	0.0	5.0	10.0
G_{wall}	5.0	5.0	5.0
G_{fpup}	0.40	0.40	0.40
G_{fpdown}	0.02	0.02	0.02
G_{colup}	0.50	0.50	0.50
$G_{coldown}$	0.20	0.20	0.05

上記の条件においてそれぞれ進化シミュレーションを行った結果を図3～図5に示す。

- 協調行動より単独行動を重視するエージェント集団[(1)]
  シミュレーション開始直後の探索が全く行われていない状態ではマップ生成によって得られるエネルギーによって餌場到達ゲインが減少するため、エージェントの動きにほとんど変化が見られなかった。しかし各エージェントが初期出現位置近傍のマップ生成を完了してしばらく経つとエネルギーの減少したエージェントが出始め、餌場到達ゲインが増加し、常にランダムな位置に出現する餌場に向かって行動するため、いわゆる団子状態となり、それほど安定したマップ生成ができなかった。マップ生成率は初期エージェント数にも左右されるが、ある一定の時間から5割程度で横這い状態になることが多い。いずれも生成スピードは速くないが、最終的にはほぼマップが完成した。
- 単独行動より協調行動を重視するエージェント集団[(2)]
  シミュレーション開始直後、見かけ上は前述の場合とほぼ同様に各エージェントが行動するが、すぐに他の未探索領域を探索する行動を取り始めた。その後もそれぞれのエージェントが協調してマップを生成してい

く行動が見られ、マップ生成率の上昇も速く、1500 秒前後でほぼマップ生成が完了した。

- 協調行動のみを極端に重視するエージェント集団 [(3)] シミュレーション開始直後は概ね他の例よりマップ生成率の上昇度は高いが、相対的に壁回避ゲインなどの重みが小さくなるため、エージェントの初期配置によっては障害物を避けきれないエージェントが衝突しながら壁の向こう側にある未探索点に向かって右往左往し、そこに他のエージェントが集まってくる行動が見られた。マップ生成の上昇率はほぼ一定であったが比較的低く、制限時間終了後も未探索領域が 1 割ほど残っていた。本シミュレーションではマップ生成に傾注するあまり、個体保存のための単独行動が軽視され、エージェントの適応度がかなり下がっている様子がわかる。

今回行ったシミュレーション結果を比較すると、単独行動を重視するエージェント集団では、シミュレーション開始直後はなかなかマップ生成率が上昇しないが、ある程度エネルギーが減少しても相対的に餌場到達ゲインが高くなるため生き残りやすく、最終的なマップ生成率は比較的高いことが多かった。協調行動を極端に重視するエージェント集団では結局は他の行動が制約されてしまい、協調行動がとれなくなってしまっていた。さらに、協調行動を重視するエージェント集団では、エージェント数が少ない時でもマップ生成率の上昇率および達成率が安定して高水準であった。これらのことから、均質な行動特性を持つエージェント集団では、協調と単独の各パラメータのバランスに重点をおいた設定をすることによって比較的能力の高い協調行動が発現する傾向があることが確認できた。

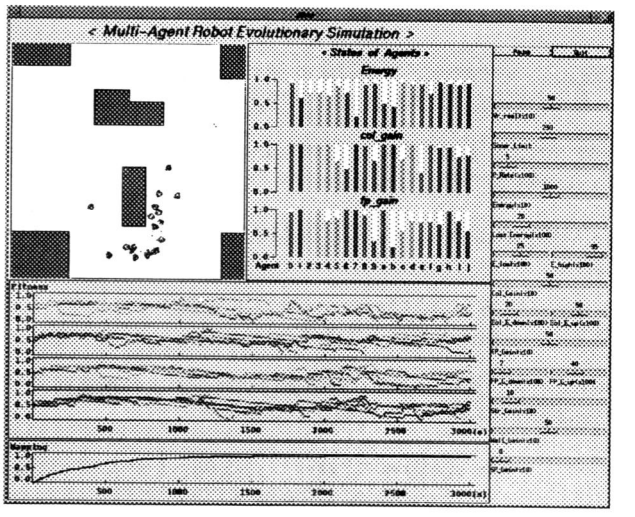


図 3: シミュレーション結果 (1)

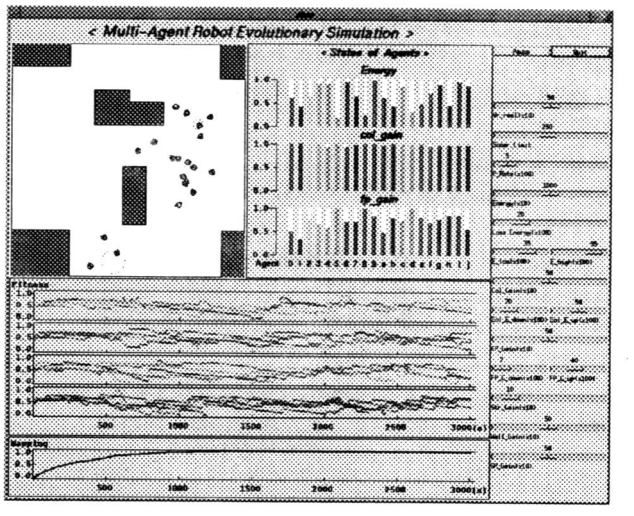


図 4: シミュレーション結果 (2)

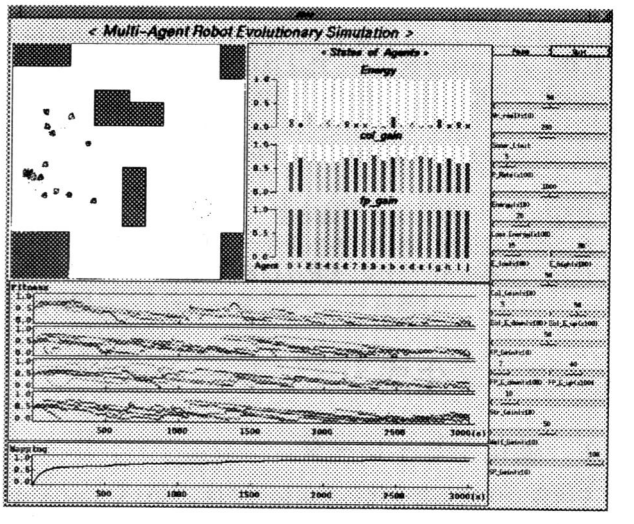


図 5: シミュレーション結果 (3)

5 結 言

自律分散型マルチエージェントロボットの進化シミュレータを開発し、環境マップ生成を例題として、集団の協調行動として与えられた範囲内のマップをいかに速く完成させることができるのか、その過程においてどのような創発現象が発現し得るのかを検証することを試みた。その結果、協調行動と単独行動のパラメータをバランス良くエージェントに設定することによって均質なエージェント集団でも協調的な行動が起こりやすくなることを確認した。

参考文献

[1] G.Weiß: Learning to Coordinate Action in Multi-Agent Systems , *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence* , pp.331-316 (1993)

[2] M.J.Mataric: Designing and Understanding Adaptive Group Behavior , *Adaptive Behavior* , Vol.4, No.1, pp.51-80 (1995)

[3] 畝見 達夫: 実例に基づく強化学習法, 人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp.697-707 (1992)

[4] John R. Koza: , *GENETIC PROGRAMING* , The MIT Press (1992)

[5] 前田 陽一郎: マルチエージェントロボットの進化型行動学習, 第 *11* 回ファジィシステムシンポジウム, pp.627-628 (1995)

[6] 前田 陽一郎、山脇 孝志: 進化アルゴリズムによるマルチエージェントロボットの集団行動シミュレーション, 第 *12* 回ファジィシステムシンポジウム, pp.895-898 (1996)

＜連絡先＞

〒 572 大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学 情報工学部 情報工学科 前田 陽一郎
Tel & Fax : 0720-25-4698(直通)
E-mail : maeda@mdlab.osakac.ac.jp

FRC5-2

基本心理状態に基づく自律移動ロボットの感情シミュレータ

Emotional Simulator for Autonomous Mobile Robot Expressed with Basic Mental State

前田 陽一郎
Yoichiro MAEDA

田中 秀樹
Hideki TANAKA

大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract — The purpose of our research is to attempt to represent emotions which are difficult to express into a robot as compared with the logical knowledge. The emotional simulator for an autonomous mobile robot which is able to express various emotions based on three basic emotional vectors was developed in this research. These basic emotional vectors are described only with simplified fuzzy rules. In this paper, we also report the result of experiments performed with miniature robot for the purpose of confirming the efficiency of this simulator.

1 緒 言

近年、ロボットは高機能化、高性能化と並んで高知能化が急速に進んでいる。その中でも、ファジィ推論によるルール記述は従来の人工知能におけるプロダクションルールに比べ対人親和性が良く、「人間らしい」「人間に優しい」ヒューマンフレンドリロボットの構築を可能とした[1]。その後ニューラルネットワークによる認識·学習能力、遺伝的アルゴリズムによる探索·進化能力などの新しい知能化技術が相次いでロボットに適用されるようになった。最近では人工生命の生態系の研究応用としてマルチエージェントロボットや自律分散ロボットの研究も盛んに行われている。

しかしながら、一方では人間の右脳レベルにあたるといわれている感情、情緒や情動などの心理的状態のロボットへの埋め込みに関してはまだほとんど手つかずの状態である。実際にはロボットに複雑な感情を与えることは容易ではなく、しかも様々な感情表現を柔軟に行うための確立された有効な方法論も世の中には存在しない。そのため、ロボットへの感情移入の研究は高知能化、高性能化などの研究に比べると、大幅に遅れているのが現状である。

ブライテンベルグは「模型は心をもちうるか」[2]という自身の著書でロボットの自我の生成過程(回遊、恐怖·攻撃、愛情、価値·嗜好、論理、淘汰·見えざる手、概念、空間·物体·運動、形状、概念形成、規則と規則性、思考連鎖、予見、自我と楽観主義)をレベル的に順を追って解説している。彼の考案した模型は単純なセンサや装置の付加およびその組み合わせにより、徐々に段階を経て高度な知能ロボットが構築できる特長をもっている。しかしこの模型はあくまでも彼の空想であり、彼自身は実験を行なっているわけではない。

さらに近年、脳·神経科学の分野が重視されるとともに、工学的な手法で「感情とは何か」に迫ろうとする研究も盛んになっている。例えば、脳機能研究所の武者ら[3]は感性スペクトラム分析法(ESAM)を用いて人の感情を数値的に解析し、心の状態としての感情を客観的に捉える試みを行っている。ESAMは感性要素を「怒り」「悲しみ」「喜び」「弛緩(リラックス)」の4つとし、被験者の脳波から計算した感性要素をもとに「感性マトリックス」を定義し、4つの特徴量(レベル)で表現している。また吉田ら[4]は、生理学的状態、無言反応および発言行動の3つをEmotional Memoryとして定義し、これらの数値により感情のパターンを3次元空間の座標軸で表現した。

一方、感情表現のロボットへの応用としては、五味ら[5]がサブサンプションロボットを用いて行ったロボットへの意思をもたせる実験がある。これは定義された要素行動群が、システム全体に有効なパラメータの値をある生起条件で参照することにより異った生起をさせたり、パラメータの値に応じて出力を変化させることができる。

そこで筆者らは、自律移動ロボットの高知能化の中でも論理的知識などに比べて表現が比較的困難である感情を効率的にロボットに表現させることを目的として研究を進めている。すでに本研究ではブライテンベルグの提唱した感情のうち比較的低レベルのものをファジィルールのみで表現することを試み、マイクロマウスを用いた感情移入実験でその効果を確認している[6]。この結果をふまえ、さらに本研究では、喜び(Joy)·怒り(Anger)·悲しみ(Sadness)の3つの基本心理状態をファジィルールで表現し、これらを直交ベクトルと仮定し、これらの合成により他のさまざまな感情を表現できる自律移動ロボットの感情シミュレータを開発した。さらにこのシミュレータを用いてどの程度の感情をロボットに表現することが可能であるかを超小型マイクロマウスを用いて検証実験を行ったので、これについても報告する。

2 基本心理状態に基づく自律移動ロボットの感情シミュレータ

筆者らはブライテンベルグの模型について昨年度実際にマイクロマウスを用いてリファー実験を行い、さらにファジィルールのみを用いていくつかの感情を表現し、マイクロマウスを用いた実験で行動によりロボットへのある程度の感情移入が可能なことを確認した[6]。本年度はこれをさらに発展させ、基本心理状態を基に感情表現を行う感情シミュレータを開発し、より汎用性の高い感情表現が可能なシステムを構築した。

2.1 基本心理ベクトル

前章で述べた感情表現の工学的アプローチにおけるさまざまな研究例を参考に、本研究ではロボットへの汎用的な感情表現を行うため、基本感情を定義し、これを基に他の感情を柔軟に表現することを今回の研究目標とした。ここではこの基本感情を人間の基本的な心理状態として知られている「喜怒哀楽」から楽を除いた「喜び」(Joy:J)、「怒り」(Anger:A)、「悲しみ」(Sadness:S)の3つと考え、これらを独立した直交単位ベクトルとしたものを基本心理ベクトルと定義する。

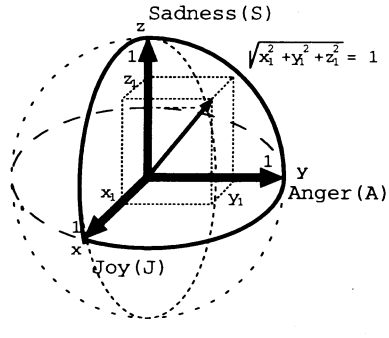


図 1: 基本心理ベクトルの概念図

図1に基本心理ベクトルの概念図を示す。この図においてX,Y,Z軸の各単位ベクトルは喜び(J)、怒り(A)、悲しみ(S)を示しており、これらの合成により図中の黒で示された8分の1球面上にさまざまな感情が表現される。また、これらの感情以外の感情は基本心理ベクトルの合成ベクトルとして表現される。

2.2 感情シミュレータ

図2に感情シミュレータの基本心理ベクトル値の設定パネルを示す。図中のレバーによって調節される基本心理ベクトルのそれぞれの値(重み)によって変化する行動モデル(ファジィルール)があり、それらの合成で行動による感情表現が形成される。シミュレータの起動中でもレバーのそれぞれの各値はリアルタイムに変化させることが可能である。

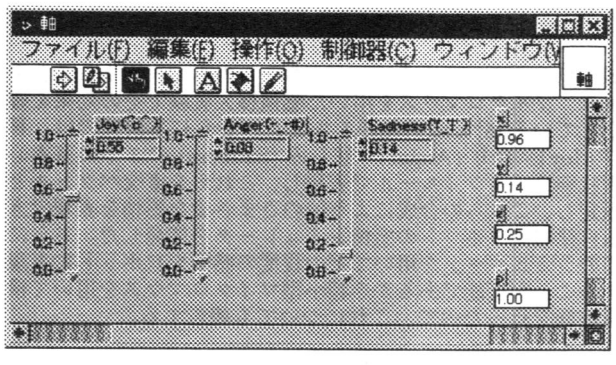


図 2: 感情シミュレータのパネル

今回作成した感情シミュレータの基本心理ベクトルにおける行動モデルは簡略化ファジィ推論法を用いているが、ファジィルール前件部は図3のようになっており、これらのメンバーシップ関数は3つの基本心理ベクトルの大きさ(レバーで入力する値)に左右されず固定とした。さらにファジィルール後件部は図4のようになっているが、操舵角(シングルトン値)やモータ出力の関数(1次関数の傾きと切片)の値は、それぞれ3つの基本心理ベクトルの大きさ(レバーで入力する値)で重みづけ加算をした値をシミュレータとしての出力としている(但し操舵角のシングルトンの値は常に左右対称と仮定)。

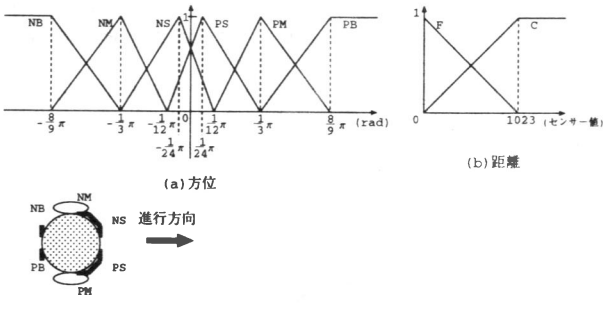


図 3: ファジィルール前件部

重みづけ加算の方法はまず、3つの基本心理ベクトルの値を X, Y, Zとする。図1より感情ベクトルは半径1の球面上にあることから、

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = 1 \qquad (1)$$

とすると、正規化して

$$\frac{X}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}} = x_1,\ \frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}} = y_1,\ \frac{Z}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}} = z_1 \qquad (2)$$

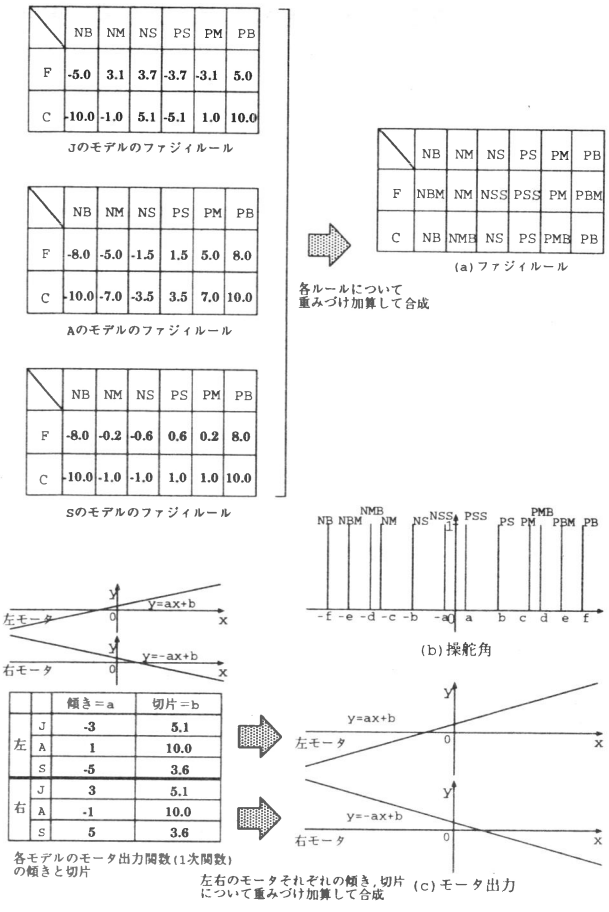


図 4: ファジィルール後件部

とおける(但し、$X = Y = Z = 0$のときは$x_1 = y_1 = z_1 = 0$とする)。例えば図4において、後件部シングルトンPSSについて考えると(p, q, rはJ,A,Sのそれぞれの基本心理ベクトルの重み値とする)、p=-3.7, q=1.5,r=0.6であるから、シングルトンの値αは、

$$\alpha = px_1 + qy_1 + rz_1 = -3.7x_1 + 1.5y_1 + 0.6z_1 \qquad (3)$$

となる。図4にある他のシングルトン値やモータ出力関数の傾きおよび切片についても同様に計算する。

しかしながら、基本心理ベクトルの大きさ(x_1, y_1, z_1の値)が次の場合には出力値が連続でないことがある。

- 0が1つで他の2つが等しい値のとき
- 3つが等しい値のとき(0でない値)
- 0が2つあるとき

そこで、これらの場合にのみ次式のように式(3)に係数kの値を掛け、これら以外の場合は$k = 1$としている。

$$\alpha = kpx_1 + kqy_1 + krz_1 \qquad (4)$$

3 自律移動実験

今回作成した感情シミュレータを用いてどの程度の感情をロボットの行動により表現することが可能であるかを実験により検証した。

3.1 システム構成

本実験ではパーソナルコンピュータ(IBM ThinkPad530CS)上で制御用グラフィックプログラミングツールLabVIEWを

用い、シリアルケーブル (RS232C) を介して超小型マイクロマウス Khepera を制御して実験を行った。図5に実験のシステム構成図を示す。実験において使用したパラメータ及び制御アルゴリズムはすべて LabVIEW を用いてブロックダイアグラムでビジュアルに定義されている。また、センサやモータの状態などもグラフィカルに確認できるようにシミュレータを構築した。

本実験では超小型マイクロマウス Khepera を使用した。図6に Khepera の外観を示す。このロボットにはロータリエンコーダ付きの DC サーボモータ 2 個と 8 個の赤外線近接センサ及び電源システムが実装されている。2 個のモータはそれぞれ独立に制御でき、ロータリエンコーダは 1 パルスあたり約 0.1mm の精度を持っている。赤外線近接センサは本体前方に 6 個、後方に 2 個配置され、センサからの読みは 10 ビットの A／D 変換を受けた値として使用できる。周囲の雰囲気、対象物の表面状態にもよるが、通常、30mm～40mm までの距離にある障害物を探知できる。

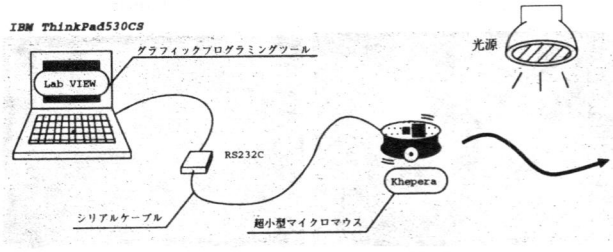


図 5: 実験のシステム構成

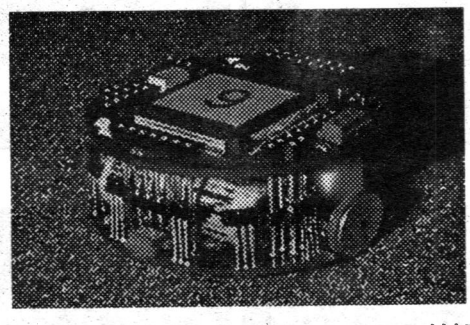


図 6: 実験で用いたマイクロマウスの外観

3.2 実験方法

今回の感情シミュレータを用いた実験の処理フローを図7に示す。実験は感情シミュレータのパネルのスタートボタンを押してスタートする。ファジィルール前件部は固定で、ファジィルール後件部およびモータ出力関数をレバーでチューニングした値により更新する。実験はストップボタンを押すまで繰り返される。3 つの基本心理ベクトルの値 (レバーの値) は実験中にリアルタイムで変更できる。決定されたモータ出力値は、シリアルケーブルを通じてマイクロマウスへ動作指令として送られる。

3.3 感情生成実験

本研究ではまず基本心理ベクトルにより決定される基本感情をファジィルールのみを用いて表現し、さらにこれらを合成することによりいくつかの感情を生成する実験を行った。以下に Joy, Anger, Sadness の基本感情およびそれ以外の感情で用いた各基本心理ベクトルの大きさ (それぞれ J,A,S と略記) および実験において観測された行動を示す。

- Joy(喜び)･･･J=1,A=0,S=0
  心がウキウキとしている状態であり、無邪気にはしゃぎまわり、光に反応するとその周辺をぐるぐると動き回る。Joy のレバーの値を上げるにつれ動きが速くなり、旋回の回数も増える。
- Anger(怒り)･･･J=0,A=1,S=0
  心が攻撃的になる状態で、光に反応するとその方向へ突進するような行動を示す。Anger のレバーの値を上げるにつれ動きが速くなり、光に対して一旦通過しても再び戻って向かって来る。
- Sadness(悲しみ)･･･J=0,A=0,S=1
  心が沈んで閉鎖的になる状態で、明るいところを避けて暗いところへ行く傾向があり、光に反応するとその光に対して後退りする。Sadness のレバーの値を上げると、最初は光に対して前進して動きが鈍くなり、近づくにつれてしだいに後退し始め、体を振動させる。
- Attack(攻撃)･･･J=0.1,A=0.5,S=0
  光に対して攻撃的で光に向かって突進するが、一旦通過すると、光には戻って来ない。
- Defense(防御)･･･J=0,A=0.1,S=0.8
  光に対して防御する、すなわち光に向かう体勢を保ち、後退はするが決して光には背を向けない行動をとる。
- Fear(恐怖)･･･J=0.21,A=0.53,S=0.74
  光に対して恐れを示し、光から遠ざかろうとする行動をとる。光の近傍までやってきて、光に反応すると方向変換をして暗い所へと向かって行く。
- Love(愛情)･･･J=0.23,A=0.1,S=0.2
  光に対して優しく接する行動、すなわち光に対する愛情表現を示す。光に近づくにつれてゆっくり接近し、その近傍でうろうろする。しかしながら、光から遠ざかろうとすることはない。
- Disgust(嫌気)･･･J=0,A=0.21,S=0.67
  光に対して若干の嫌悪感を示し、恐怖ほどのスピードではないが光に反応すると徐々に光から遠ざかって行く。
- Happiness(幸福)･･･J=0.5,A=0,S=0
  光に対してうれしさを表現し、Joy ほどではないが光の周囲を大きくゆっくりと動き回る。

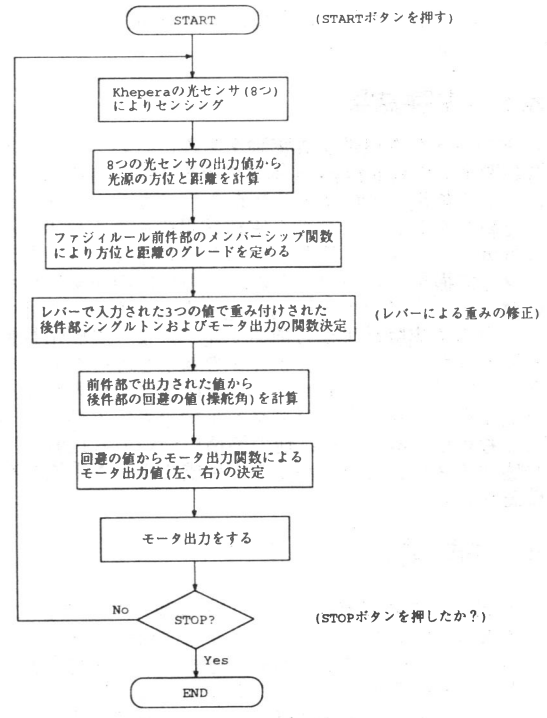


図 7: 実験の処理フロー

- Pleasant(快感)･･･J=0.24,A=0.2,S=0.43
  光に対して快さを表現し、光の周囲をゆっくりと回遊するような行動をとる。

3.4 実験結果

前節で述べた感情生成実験を実際に行い、ロボットの動きを観測するため Khepera 本体の上部中央に青の色紙を貼り付け、その色紙を CCD カメラを介してカラーイメージトラッカで軌跡をトレースした。実験結果の画面を図 8に示す。これはカラーイメージトラッカから出力された画面をデジタルカメラで撮影したものである。図中の白の曲線はロボットの軌跡を示し、中央の黒の円は光源を当てた位置を示す。

これらの実験結果から前述で述べたような感情行動がほぼ確認できた。今回はまず J,A,S の基本心理ベクトルを直交ベクトルと仮定したが、3 つの心理状態はそれぞれ独立で表現可能なものであり、直交ベクトルで定義するのは妥当であったと考えられる。さらに他の感情についても比較的人間が持つ感性イメージに近いかたちで生成でき、本手法の有効性が確認された。

4 結 言

本研究ではまず簡略化ファジィ推論ルールのみにより、3 つの基本心理ベクトル (Joy,Anger,Sadness) を表現し、これらのベクトル合成により容易にさまざまな感情を表現することができる感情シミュレータを開発した。このシミュレータではファジィルール前件部は一定とし、後件部シングルトン及びモータへの出力関数は 3 つの基本心理ベクトルの重みづけ加算により微妙にチューニングされる。さらにこの感情シミュレータを用いてマイクロマウスを用いた実験により、リアルタイムに感情を変化させたり、基本感情の合成で他の感情を比較的容易に生成できることを検証した。しかしながら、今回の実験では光源にのみ反応することで光から遠ざかると動きがなくなることや、モータ出力関数が 1 次関数のみで表現したため、動きが若干スムーズでないことなどの問題点も残った。さらに今後の課題として、光だけでなく種類の異なるセンサ情報を用いた感情表現や学習機能を付加した自律的な感情生成メカニズムの検討などが挙げられる。

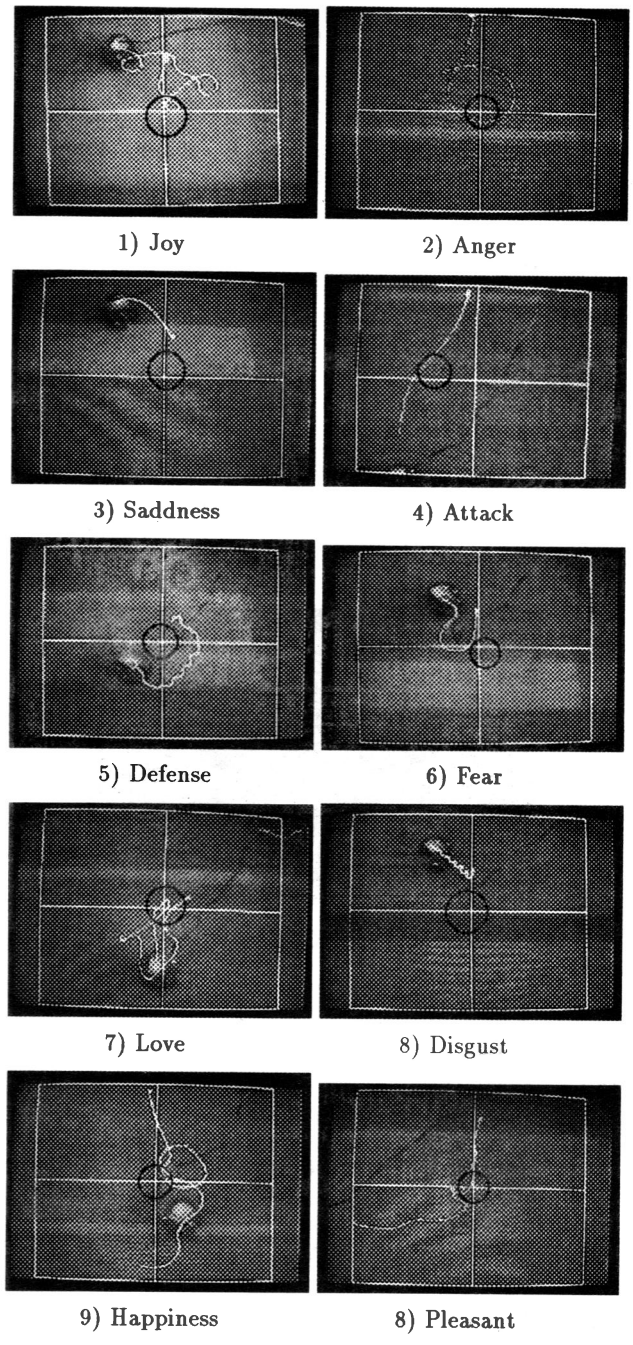


図 8: 実験結果

参考文献

[1] 前田 陽一郎: あいまい状況適応能力を有する自律移動ロボットの行動決定ファジィアルゴリズム, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.1, pp.116-128 (1993)

[2] V.Braitenberg 著, 加地大介訳: , 模型は心を持ちうるか, 哲学書房 (1987)

[3] 武者 利光: 『こころ』を測る, 日経サイエンス, Vol.26, No.4 (1996)

[4] K.Yoshida, M.Nagamatsu and T.Yanaru: A Proposal of Emotional Processing System , *Proceedings of the 4th International Conference on Soft Computing (IIZUKA'96)*, Vol.2, pp.802-805 (1996)

[5] T.Gomi and K.Ide: Emulation of Emotion Using Vision with Learning , *Proceedings of Robot and Human Communication (RO-MAN'94)* (1994)

[6] 前田 陽一郎、高谷 知則: ファジィルールによる自律移動ロボットへの感情移入の試み, 第 *12* 回ファジィシステムシンポジウム, pp.907-910 (1996)

＜連絡先＞

〒 572 大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学 情報工学部 情報工学科 前田 陽一郎
Tel & Fax : 0720-25-4698(直通)
E-mail : maeda@mdlab.osakac.ac.jp

FRC5-3

Q-LearningによるCMAC学習マップのチューニング手法の提案

Tuning method of CMAC Learning Map Modfied by Q-Learning

中西　康仁　　前田　陽一郎

Kouji Nakanishi　　Yoichiro Maeda

大阪電気通信大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka Electro-Communication University

Abstract: In this paper, we propose the tuning method of CMAC learning which can apply without evident teaching signals. It is not necessary to give the teaching signals in CMAC learning algorithm because ΔQ of Q-learning, a kind of the reinforcement learning, is used insted of the learning error. We also report the result of experiments performed for the purpose of confirming the effectiveness of this method.

1 はじめに

現在、実用化されているロボットは用いる場所や作業内容など多くの制限が課されているものが多い。実際に実用的なロボットを考えた場合、ロボットが与えられた環境と制御目的に応じて、学習により自らの制御方法を獲得していくことが望まれる。また、自律移動ロボットにおいて最も重要な機能である障害物回避制御にファジィルールが用いられる場合がある。しかしながら、人間の知識に基づいて作成されるファジィルールではチューニングが重要な問題となる。このルールチューニング方法には、遺伝的アルゴリズム[1]や最急降下法などを用いる方法[2]など、いくつか報告されている[3]。

一方、ニューラルネットワークの一手法で効率良く学習することのできるCMAC学習アルゴリズム用いて移動ロボットのファジィ障害物回避ルールを学習する方法なども提案されている[4]。この手法では、自律移動ロボットの障害物回避制御を実際、オペレータにシミュレータ上で行わせることにより、その操作知識をCMAC学習アルゴリズムを用いることで自動的に獲得できることが示されている。しかしながら、この手法では学習する際に教師が必要とされるため、目標となる制御ルールが明確に与えられていない場合には適用することができない。

そこで本研究では、強化学習の代表的なアルゴリズムの一つであるQ-Learning[5]を用いることにより明確な教師がない場合においても、CMAC学習が適用できるCMACマップチューニング手法を提案する。本手法はCMAC学習アルゴリズムの学習誤差の代わりにQ-LearningのΔQを用いて明確な教師が得られない場合においても学習可能なアルゴリズムを提案する。本手法の有効性を検証するため、自律移動ロボット(マイクロマウス)を用いた障害物回避実験を行ったので、これについても報告する。

2 CMAC学習アルゴリズム

小脳の情報処理機構の数学モデルとしてJ. S. Albusにより提案されたニューラルネットワークの一手法であるCMAC(Cerbellar Model Arithmetic Computer)は、複雑な入力空間マップの要素を幾つかのセルに分担させることにより効率良く学習できるアルゴリズムを提供するものである[6]。

CMAC学習では次のような特徴があげられる。

1. 汎化作用をもつ。
2. 従来のテーブルマッピングよりはるかに少ない記憶容量で足りる。
3. 荷重を分散させることにより学習速度が速い。

3 Q-Learning

TD法[7]の発展形としてC. J. C. H. Watkinsによって提案されたQ-Learningは、状態と行為の組の評価を用いる。この評価を「Q値」と呼び、状態と行為の組から評価の見積りを導く関数を「Q関数」と呼ぶ。すなわち、Q-Learningでは状態と行為の組のルールに対してQ値と呼ばれる評価の見積りを行いつつ学習を進めるとともに、そのQ値をもとに行為を決定する。Q値の見積りは以下のように行われる。

時刻tにおいて状態がx_tであって行為a_tを実行した結果、状態はx_{t+1}に遷移し、報酬がr_tが得られたとすると、更新するQ値の変更幅は以下のように定義される。

$$\Delta Q(x_t, a_t) = \alpha \left(r_t + \gamma \max_b Q(x_{t+1}, b) - Q(x_t, a_t)\right) \qquad (1)$$

ここで、αは学習率(learning rate: $0 < \alpha < 1$なる定数)、γは割引率(discount rate)である。

Q-Learningでは、学習されたQ値をもとに行動を決定する。Q-Learningでは、学習率αを適切に減少させると多数の試行の後にQ値が収束し、そのとき各状態における最大のQ値をとるルールの選択が最適政策となることが証明されており、結果としてなるべく大きい報酬を得るという最適性を重視したアルゴリズムであるといえる[8][9]。

4 Q-Learning によるCMAC学習のチューニング手法の提案

本研究では、Q-Learningの更新幅であるΔQをCMAC学習の学習誤差と見なすことにより明確な教師がない場合においてもCMAC学習を可能にする手法を提案する。

本来、階層型ニューラルネットワークの一手法であるCMAC学習では明確な教師が必要である。しかしながら、本研究では自律移動ロボットを制御対象としているために時々刻々変化をする環境に対応するため試行錯誤的な経験から適切な行動が学習できるようなアルゴリズムを構築するため、強化学習法の一手法であるQ-Learningを用いた。Q値が学習後にはゼロに収束することに着目しQ値の更新分であるΔQをCMAC学習での学習誤差として組み込むことを考える。また、これにより、強化学習が様々な環境での試行錯誤が必要であったに対して、本手法を用いる事によりCMAC学習の特徴である汎化作用のために学習時間の短縮も可能となる。

図1に本手法のアルゴリズムフローを示す。

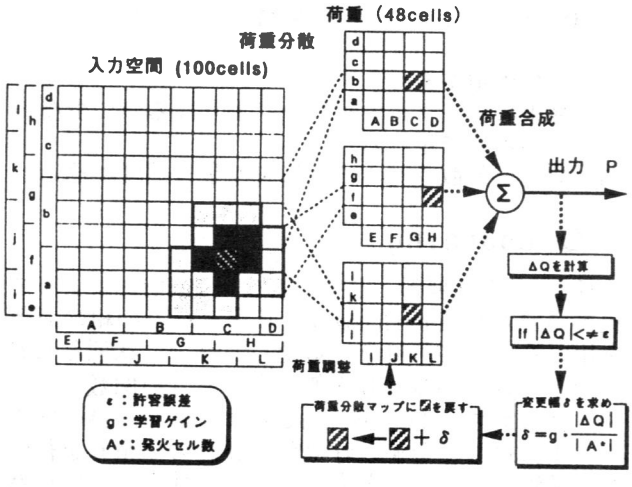


図1. 提案手法のアルゴリズム

CMACマップ学習は以下の手順で行なう。

step1. 2次元の入力空間(マップ)としてそれぞれn分割(10分割の場合、セルは4*4)で表現し最初のマップとセル全てを0にしておく。

step2. 現在の状態によりQ値を求める。

step3. 現在の状態により発火した3つのセルの和をPとし行動を選択する。

step4. 次の状態での行為についてのQ値を求める。

step5. Q値の更新分ΔQを計算し、もし、$|\Delta Q| > \varepsilon$（ε:微小値)ならばセル要素の修正量δを次式で算出する。

$$\delta = g \cdot \frac{\Delta Q}{|A^*|} \qquad (2)$$

但し、εは許容誤差、gは学習ゲイン$|A^*|$は発火セル数である。又、$|\Delta Q| \leq \varepsilon$ならば学習を完了する。

step6. 修正量δを発火に関係したセルの要素全てに加え、修正する。

step7. step2に戻る。

5 マイクロマウスを用いた障害物回避制御実験

本手法の有効性を検証するため、自律移動ロボット(マイクロマウス)を用いた障害物回避実験を行った。図2に本実験のフローを示す。

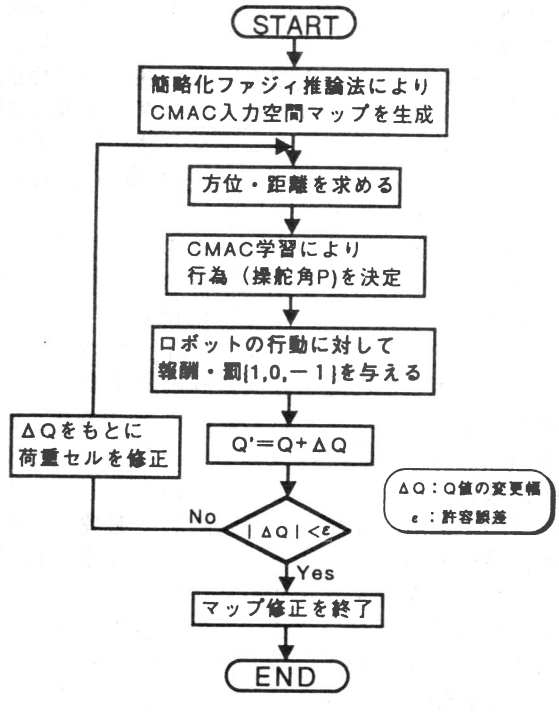


図2. 障害物回避実験のフローチャート

フローチャートの各stepでは以下の処理を行なう。

step1. 簡略化ファジィ推論法により、CMACマップの生成を行なう。

step2. ロボットのセンサから得られた入力により方位・距離を算出する。

step3. 得られた方位・距離によりCMACの入力空間マップに該当するcellを求め、cellの要素である操舵角により行為決定。

step4. ロボットが動作した行為に対して評価を行う。

step5. 得られた評価値をもとにQ値を更新する。

step6. ΔQが許容誤差εより小さければマップ修正を終了する。

step7. ΔQをもとに発火した荷重セルの修正を行ない、step2へ戻る。

図2のフローチャートに従い、ロボットが行なった行為に対し評価を行ない、評価値を更新しながら学習を進めることによってより望ましい行動を獲得させる。また、step1において簡略化ファジィ推論法によりCMACマップの生成を行なっているが、これは比較的正しく動作する初期マップを用いることにより学習時間の短縮が期待できるからである。step7の許容誤差εが大きければ学習性能が低く、逆に小さければ学習性能が高くなる性質をもつ。

本研究で行なった実験のシステム構成を図3に示す。

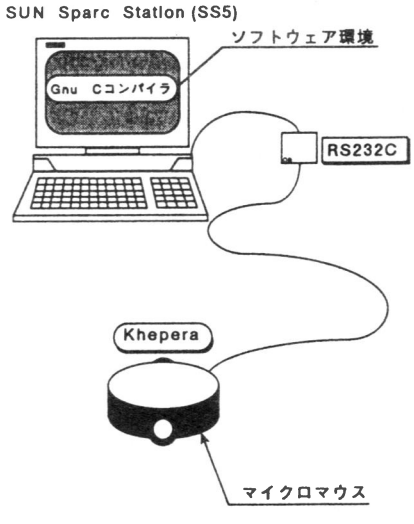


図3. 実験のシステム構成

ホストコンピュータに、Sparc－Station(SS5)を用いて作成したプログラムをGNU C コンパイラでコンパイルし、実行形式のプログラムをRS232Cケーブルを通してマイクロマウスにダウンロードする。また、本研究では、マイクロマウスとしてKhepera (ケペラ)を使用した。

6 実験結果および考察

今回の実験では本手法の有効性を確認するために自律移動ロボットによる障害物回避制御を行った。図4、図5にそれぞれ学習前、学習後の実験結果を示す。その結果、図4の学習前の障害物回避の軌跡に比べて図5の学習後の障害物回避の軌跡では無駄な操舵角がなくなり、障害物回避をスムーズに行っている。図4において学習前のF3の地点では障害物を大きな操舵角を用いて無駄に回避を行なっているのに対し、学習後のK3の地点では学習前の無駄な回避行動を操舵角を戻すことによって避けている。

また、大きく相違する点として学習前と学習後では障害物回避にかかった時間が大幅に異なっていたことが挙げられる。これは学習前の図4におけるF2とF3の地点の障害物間隔を比較的狭くコース設定を行ったため、学習前の障害物回避では左右両方の障害物にセンサが反応し、ロボットがジグザグに走行しながら直進してしまったためと考えられる。その結果として、ロボットの障害物回避スピードが極端に落ち込んでしまった。一方、学習後の障害物回避ではいろいろな環境に対してロボットにあらかじめ十分な学習を施したため、左右両方の障害物にセンサが反応しても障害物回避スピードをほぼ落さずにスムーズな障害物回避を行ないながらゴールしている。

学習前の図4においては移動軌跡の線が太く鮮明なのに対し、学習後の図5においては破線のように見えることから学習前の障害物回避より学習後の障害物回避の方がより優れた回避性能を示しており、素早い動きを行なっていることがわかる。学習前と学習後、それぞれ10回づつ試行したときに障害物回避に要した時間をあらわしたのが図6である。図より平均トライアルタイムで約16秒の差になっており、回避に要した時間に関しては、約半分以下の時間で同じコースをクリアしていることがわかる。また最低タイムと最高タイムの差も学習前より学習後の結果の方が縮まっている。これは学習前では失敗した障害物回避(たとえば2回目や5回目)があったのに対し、学習後では明らかに失敗した障害物回避がなかったのが原因であると考えられる。これらのことから障害物回避性能は、学習後の方がかなり向上していることが確認できる。

7 おわりに

本研究ではQ-LearningのΔQを学習誤差として用いることにより明確な教師が得られない場合においても、CMAC学習が適用できるマップチューニング手法を提案した。さらにその有効性を検証するために自律移動ロボットを用いて、障害物回避実験を行い、その有効性を確認した。しかしながら、今回の提案手法では一旦CMACマップとしてファジィルールを学習させ、その後それを初期値として強化学習によるCMACマップのチューニングを行ったため、完全な未知学習にはなっていない。そこで、今後の課題としては、初期ルルールを含めすべての学習を教師なしでロボットに効率良く行なわせるアルゴリズムの提案、多種多様なケースにおいて最適な行動選択を行いかつ探索に時間をかけない手法の提案などがあげられる。

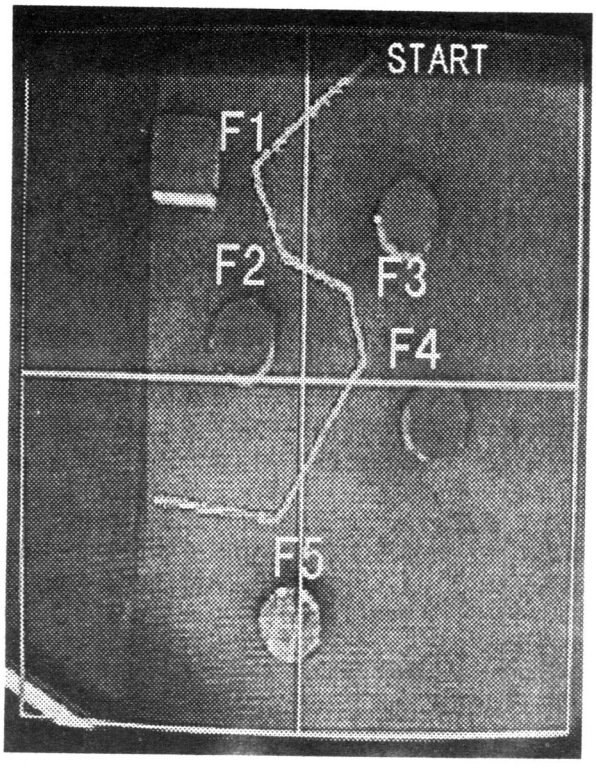


図4.　学習前の障害物回避の軌跡

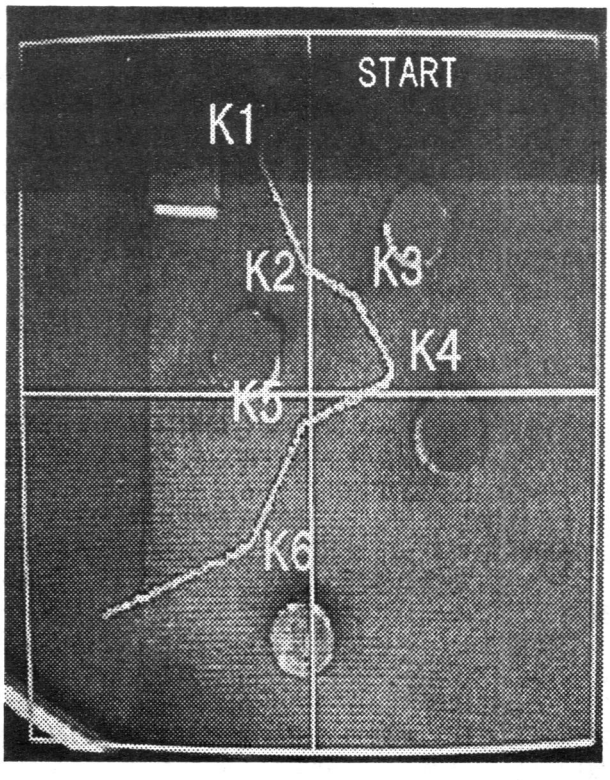


図5. 学習後の障害物回避軌跡

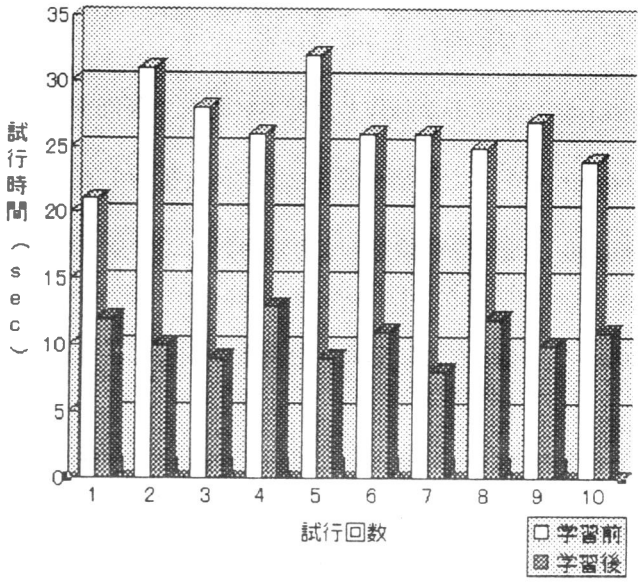


図6. 学習前と学習後の障害物回避に要した時間

[参考文献]

[1] 高浜, 宮本, 小倉, 中村, "遺伝的アルゴリズムによるファジィ制御規則の学習", 第8回ﾌｧｼﾞｨｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集, pp. 241-244 (1992)

[2] 野村, 林, 若見, "最急降下法によるファジィ推論の自動チューニングと障害物回避への応用", 第6回ﾌｧｼﾞｨｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集, pp. 423-426 (1990)

[3] 中西康仁, "強化学習法に基づく自律移動ロボットのファジィ障害物回避", 大阪電気通信大学卒業論文 (1996)

[4] 前田陽一郎, "CMAC学習に基づくオペレータの制御戦略を有するファジィ障害物回避", 第6回ﾌｧｼﾞｨｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集, pp. 531-534 (1990)

[5] Watkins, C. J. C. H and P. Dayan, Q-Learning, machine Learning, Vol. 8, pp279-292 (1992)

[6] James.s.albus,"ロボティックス",哲学出版 (1984)

[7] Sutton, "Learning to Predict by the Methods of Temporal Difference", Machine Learning, Vol. 3, pp9-44 (1994)

[8] 畝見達夫, "強化学習法とロボットへの応用", 日本ロボット学会誌, vol. 13, No. 1. pp. 51-56 (1995)

[9] 堀内, 藤野, 片井, "連続入出力値を扱うファジィ内挿型Q－Learningの提案", 第12回ﾌｧｼﾞｨｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集, pp. 653-656 (1996)

＜連絡先＞
〒572 大阪府寝屋川市初町18-8
大阪電気通信大学大学院 工学研究科 情報工学専攻
中西　康仁
Tel&Fax (0720)25-4698
E-mail nakanisi@mdlab.osakac.ac.jp

FRD1-1

インターネットを用いた絵画データベースにおけるファジィ情報検索

Information Retrieval Method of Fine Arts Data Base System on Internet

野崎浩成* 吉根勝美** 磯本征雄* 山崎初夫***

Hironari Nozaki Katsumi Yoshine Yukuo Isomoto Hatsuo Yamasaki

名古屋市立大学 * 南山大学** 名城大学***

Nagoya City University Nanzan University Meijo University

Abstruct : In this report, the authors describe the method of information retrieval for the fine arts database system on Internet. Using this system, we have made the database of art paintings for art education. Finally, we introduce the results of information retrieval in our database system.

1．はじめに

近年，情報通信技術の急速な発展により，インターネットを活用したさまざまな学習環境が提案されてきている。また，小中学校の教室においても，パーソナルコンピュータの普及が進み，従来から行われている教科教育にもインターネットを利用する試みが行われてきた。そこで，本研究では，美術教育で利用することを目的として，インターネットを用いた絵画データベースシステムを開発した。筆者らは，既に，Windows 95 上で動作するデータベース管理システム ACCESS を用い，パーソナルコンピュータ上で動作する美術教材データベースシステムを開発しており，それらをインターネット上でのサービスを実現するのが，本稿の目的である。

さらに，本研究で開発した絵画データベースシステムには，書誌情報，情景情報，叙情データなど，さまざまなデータをキーワードとするファジィ情報検索が可能であり，その情報検索の結果を紹介する。

2．インターネットを用いた絵画データベースシステムの開発

本章では，本研究で開発した絵画データベースシステムを紹介する。

2－1．ネットワーク環境

絵画データベースシステムは，「データベースサーバ」とユーザが端末として利用する「クライアント」からなる。データベースサーバには，インターネットに接続されているワークステーションを用いた。そこには，テキスト情報や画像データを持った「絵画データベース」，スクリプト言語で記述された「検索エンジン」が実装化されており，ユーザ・インターフェイスは，ＨＴＭＬ言語やＪａｖａを用いて設計した。クライアントは，Netscape などの Ｗｅｂ ビューア を用いており，ワークステーション以外にも，インターネットに接続されている標準的なパソコン上で利用できるように工夫した。このようなネットワーク環境は，小中学校など教育現場での利用を前提としており，標準的なＯＳおよび機器構成になるように配慮した。

２－２. システムのコースウェア

絵画データベースシステムは，**「情景」**，**「叙情」**および**「書誌」**の３つの絵画検索コースウェアから構成される。ユーザは，絵画データベースシステムの「絵画検索メニュー」で，この３つのコースウェアを選択できる。**「情景」**では，「山が画面中央あたりに描かれている絵」など絵画に描かれているモノとその画面上の位置を検索条件として絵画検索が実現できる。**「叙情」**では，「美しい」「かわいい」などの印象語をキーワードとする検索ができる。さらに，**「書誌」**では，絵画の表題・副題，作家，作家の国籍，所蔵美術館などのテキストデータをキーワードとする情報検索が可能である。次節では，**「叙情」**について，詳細に論じることにする。

２－３. 叙情データによる絵画の検索

図１は，印象語をキーワードとするデータベース検索画面である。検索者は表示された印象語の中から，検索キーとなる印象語を選択する。印象語は最大３つまで選択可能であり，それぞれの印象の強さの度合いを示すために，**「強い」**，**「普通」**，**「弱い」**の三段階の評定を行うことができる。

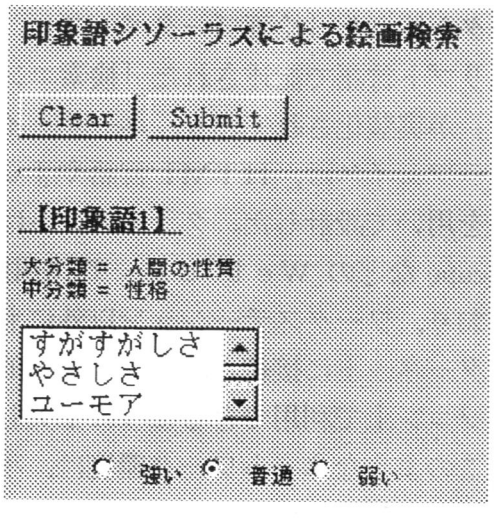


図１．印象語をキーワードとする
絵画データベース検索画面

検索キーワードとなる印象語およびその三段階評定を入力後，検索ボタンをクリックすると，満足度[3, 4]の大きい順に検索結果が表示される（図２）。表題部分をクリックすれば，絵画の画像データが表示される。

３．まとめ

本稿では，美術教育で利用することを目的として，インターネットを用いた絵画データベースシステムを開発した。このシステムは，学校教育での教材利用や教育支援のほか，美術館所蔵の絵画作品のデータベース化，画像データのデータベース化など，マルチメディア技術の応用技術として，幅広い利用が期待できる。今後，インターネットの普及に伴い，小中学校において，本システムのサービス実現が可能となるであろう。

参考文献

1) H.NOZAKI, Y.ISOMOTO, K.YOSHINE and N.ISHII, "Information Retrieval for Fine ArtsDatabaseSystems," IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol. E80-D, No.2, Feb. 1997.

2) 野崎,磯本,吉根,石井(1997),インターネットによる美術教材データベースのサービスを目的とする感性情報処理,電子情報通信学会論文誌,(印刷中)

3) 磯本,野崎,吉根,永井(1996), ファジィネスの高い蓄積データを対象とした情報検索技法 －絵画データベースを例として－,日本ファジィ学会誌,Vol.8,No.2,284-293

4) 磯本,野崎,吉根,長谷川,石井(1996), 印象語シソーラスにおけるファジィな類義語関係の定量的検証－ファジィ・シソーラスの理論的基礎の確立をめざして－, 日本ファジィ学会誌,Vol.8,No.4,401-408

連絡先

〒４６７　名古屋市瑞穂区瑞穂町山の畑１
名古屋市立大学　自然科学研究教育センター
野 崎　浩 成
TEL : 052-872-5792　FAX : 052-872-5781
Email : hnozaki@ccews1.cc.nagoya-cu.ac.jp

絵画検索の結果

検索条件 : 印象語１ =すがすがしさ(普通)
: 印象語２ =休息(強い)
: 印象語３ =工業と芸術の結合(弱い)

1. 犬を抱いた女
0.642500 休息 265「犬を抱いた女 」ピエル＝ボナール フランス 1922 油彩

2. パンかご
0.642500 休息 264「パンかご 」サルバドール＝ダリ スペイン 1926 ダリ美術館 クリーブランド油彩

3. ストラビンスキーの泉
0.636000 工業と芸術の結合185「ストラビンスキーの泉 」ニキ＝ド＝サン＝ファール、ジャン＝ティンゲリー スイス 1983 パリ, フランス噴造物

4. 黒い道路に自動車
0.430336 すがすがしさ89「黒い道路に自動車 」ジャン＝デュビュッフェ フランス 1963 ベイエラー・ギャラリースイス 油彩

図２．絵画データベースの検索結果

FRD1-2

インターネットに対応した絵画データベースの構築

Fine Arts Database based on Internet

吉根勝美[*1] 磯本征雄[*2] 野崎浩成[*2] 山崎初夫[*3]
YOSHINE, Katsumi ISOMOTO, Yukuo NOZAKI, Hironari YAMASAKI, Hatsuo

[*1]南山大学 Nanzan University
[*2]名古屋市立大学 Nagoya City University
[*3]名城大学 Meijo University

Abstract - The authors discuss design of fine arts database based on internet. The database consists of data file and search engine. The data file contains allocation, document and atmosphere data. In this paper, we deal with textbooks of art. The search engine is constructed by CGI(Common Gateway Interface) program which executes fuzzy retrieval and java applet which has function to specify fuzzy retrieval condition of allocation.

1 はじめに

教育現場へのコンピュータ導入に伴い、教材のデータベース化は有効である。例えば美術科では、美術作品のデータベースが鑑賞指導等に利用できる。一方、博物館や美術館の所蔵物をホームページで発信する試みが始まっている[1]。そこで本研究では、インターネット上での絵画データベースの構築を試みる。なお、絵画の持つ情報のあいまいさを考慮し、検索手法にはファジィ理論を応用する。

2 絵画データベースの全体構想

本絵画データベースはホームページから検索できるようにする。したがって、利用者はWWWブラウザさえ用意すればよい。

絵画データベースのサーバには検索エンジンと情報ファイルを備える(図1参照)。検索エンジンは、検索者のあいまいな意図を反映するファジィ検索機能[2]を搭載する。情報ファイルには、絵画が持つ情報を情景・叙情・書誌の各データに分類して格納し、共通の画像コードで引用できるようにする[3]。このとき、あいまいさを表すパラメータも合わせて格納する。原画データそのものはサーバでは所有せず、そのURL(Uniform Resource Locator)を情報ファイルに書き込む。各地の美術館がデジタル化した絵画作品と書誌情報をホームページで発信し始めており、そこから情報ファイルを自動的に作成する行うことは、将来的には可能だろう(図1参照)。

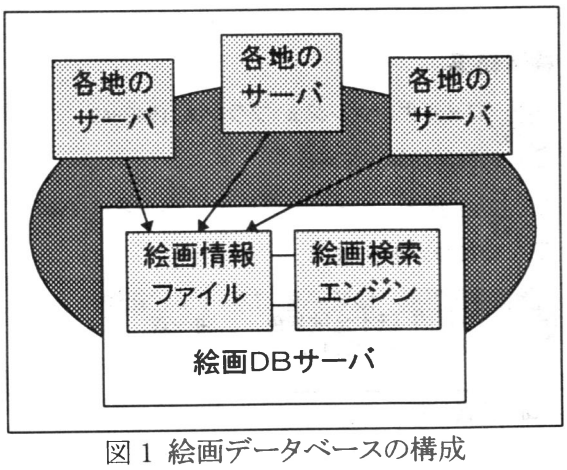


図 1 絵画データベースの構成

3 描写対象物の検索手法

絵画に描かれている対象物の検索を、画像認識の手法に頼らずに実現するため、情景データはデータベース作成者が用意する。このとき、対象物の位置を厳密に記述することは困難である。また、対象物の位置の検索に厳密さは要求されないだろう。

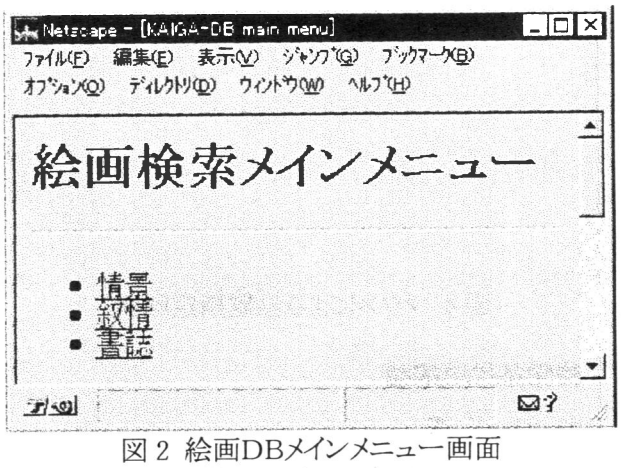


図 2 絵画DBメインメニュー画面

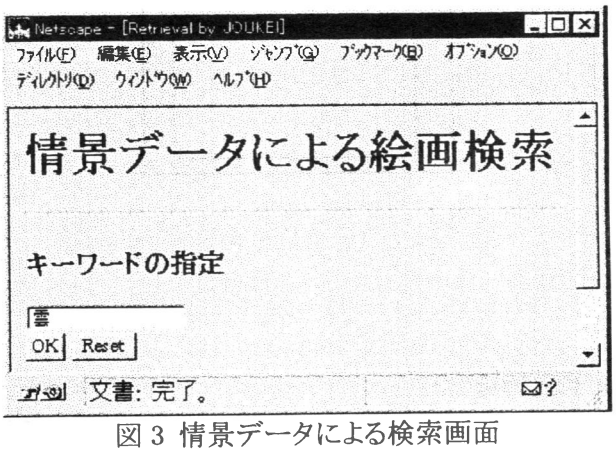


図 3 情景データによる検索画面

そこで位置情報は、二重の矩形で表現する。外側の矩形より外には対象物が確実になく、内側の矩形より内には対象物が確実にあり、両者の間では対象物の存在がファジィであると解釈する。したがって、対象物の位置は8個のパラメータで表現できる。

検索手順は、対象物の名称による検索の後、データ表現と同じ形式で与えられた検索位置に対する情景データの満足度を計算する。ここで、検索条件に含まれる度合をa、検索条件の補集合に含まれる度合をbとして、満足度は$a/(a+b)$で与える。

4 インプリメンテーションとまとめ

今回は、中学校・高等学校の美術教科書[4]を対象とした。画像はスキャナでデジタル化し、サーバと同じマシンに格納した。画像情報は表計算ソフトを利用して作成し、テキストファイルに変換した。

情景データによる検索は、図2のメインメニューの呼び出しで始まる。図3でキーワードを入力するとCGI(Common Gateway Interface)プログラムが起動し、javaアプレットによる図4の位置指定画面に移る。マウス操作で二重の矩形を決めると、図5の検索条件の確認画面となり、検索を実行するCGIプログラムを次の形式で呼び出す。

…/retr.cgi?キーワード;x1,x2,x3,x4;y1,y2,y3,y4:

ここで、retr.cgiが検索エンジンのプログラム名で、キーワードはEUCコードの16進表記である。8個のパラメータは区間[0,100]に規格化の後、整数化する。

検索結果は図6のように満足度を添えて表示する。絵画のタイトルはハイパーリンクになっていて、それをクリックすると、対応する絵画が表示される。

本稿の絵画データベースは下記のURLにて試験運用中であり、ご意見を賜りたい。

http://ccews1.cc.nagoya-cu.ac.jp/~kaiga

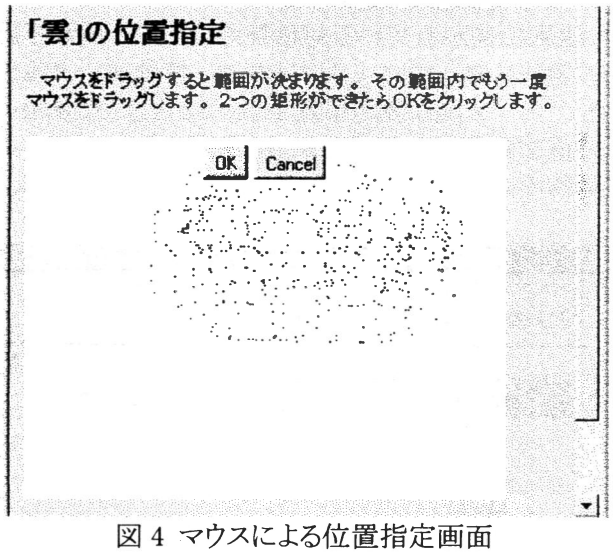


図 4 マウスによる位置指定画面

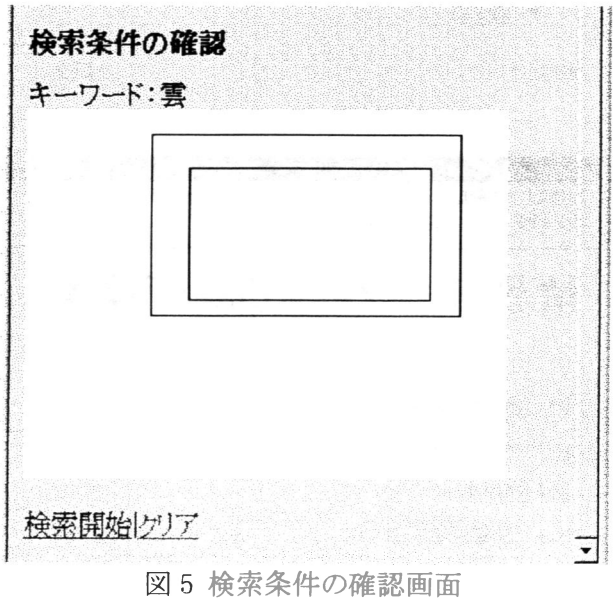


図 5 検索条件の確認画面

参考文献

[1] 例えば、http://www.cjn.or.jp/tokugawa/index-j.html (徳川美術館), http://www.tokai-ic.or.jp/ncsm/ (名古屋市科学館) など

[2] 磯本征雄, 野崎浩成, 吉根勝美, 永井弘人: ファジィネスの高い蓄積データを対象にした情報検索技法－絵画データベースを例として－, 日本ファジィ学会誌, Vol. 8, No. 2, pp. 284-293 (1996)

[3] 吉根勝美, 磯本征雄: 美術教材のための画像データベースにおけるファジィ情報検索のキーワード・メニュー画面構成, 第11回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 509-510 (1995)

[4] 美術1など, 日本文教出版株式会社

[問い合わせ先]
〒466 名古屋市昭和区山里町18
南山大学 経済学部
吉根 勝美
TEL: 052-832-3111(内線277) FAX: 052-835-1444
E-mail: *kyoshine@ic.nanzan-u.ac.jp*

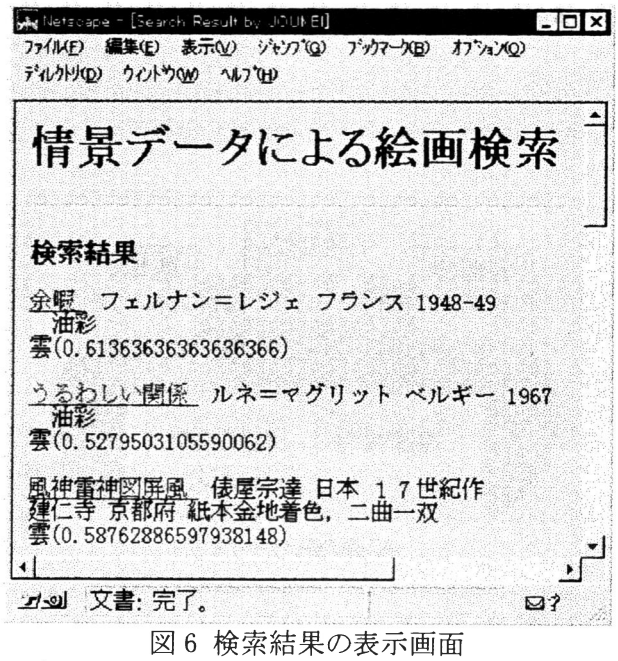


図 6 検索結果の表示画面

FRD1-3

‘笑うコンピュータ’のソフト開発事例とファジィ推論

An Example of the ‘Computer of Laugh’ and Fuzzy Inference

北垣　郁雄
Ikuo KITAGAKI

ポリテクカレッジ群馬
Gunma Poly-technic College

This report deal with a ‘computer of laugh’. We choose inferiority/popularity as factor of laugh. The bigness of laugh,in general, depends upon the environment. We characterize the environment by three factors; familiarity of a laugher and object being laughed, importance of the inferiority/popularity for the object and psychology of hiding the inferiority/popularity, then determine the possibility of laugh using fuzzy inference.

１．はじめに　本研究では、‘笑うコンピュータ’のモデルを構築している。客体の劣俗事象は、おかしみの源泉の一つとされている。そこで、劣俗事象に対してコンピュータが‘笑う’ような事例ソフトを開発する。その際、誘発環境としての可笑性を定めるのに、ファジィ推論を利用する。

２．おかしみにかかわる価値モデル　‘劣俗’にかかわる尺度において、おかしみの発生要因を、劣俗の相対性に求める。そして、おかしみを、現に発生した劣俗値（実現値ａ）と事前に予想された劣俗値（基準値a_0）の比較の下にとらえるようなモデルを想定する。次に、一つの劣俗事象に対し、おかしみの大きさに影響を与えると思われる以下の３つの尺度を取り上げ、環境変数として設定する。

1.当該劣俗事象の被笑者にとっての重要性－非重要性　たとえば、ある２人が友好関係にあるとき、相手がたまたま引き起こした‘劣俗’がその相手にとって重大な事柄であれば、おかしみは発生の度合が低い。そこで、‘劣俗’の被笑者にとっての重要度ｇ（$0 \leqq g \leqq 1$）を一環境変数とする。

2.笑者・被笑者間の友好－反発　おかしみの大きさは、笑者と被笑者の友好性が関与する。そこで、友好の度合ｅ（$0 \leqq e \leqq 1$）を一環境変数とする。

3.劣俗事象の隠ぺい－自己開示　意に反して起こした劣俗事象は、それが運悪く発覚したときに、笑者の笑いを引き起こす。そこで、隠ぺい度ｈ（$0 \leqq h \leqq 1$）を一環境変数とみなす。

以上の考察の下に、おかしみの大きさℓ（$0 \leqq \ell \leqq 1$）を可笑値ｆ（$0 \leqq f \leqq 1$）と劣俗関数ｑ（$0 \leqq q \leqq 1$）を用いて、次式で定義する。

$$\ell = f(h, e, g) \wedge q(a, a_0) \quad (1)$$

可笑値ｆは、以下に例示するファジィ推論ルールを８つ用いて、その値を求める。

> ＩＦ　ｅ　is big　and ｇ　is small and ｈ　is big, ＴＨＥＮ　ｆ　is big

そして、各推論結果の図的論理和を求め、さらに重心法で可笑値ｆを求める。

３．劣弱性のソフト開発事例　競技やテストでの順位を問い、その‘劣’を笑うようなコンピュータソフトを開発した。おかしみの環境変数は、ユーザーからのコンピュータへの回答によって定める（図１）。たとえば、友好度ｅと重要度ｇの値は、ユーザーがコンピュータに選択肢入力し、その回答データにもとづいて定める。

隠ぺい度ｈに対するソフト部分では、テストや競技での順位をユーザーに入力させるが、もし「ビリ」という選択肢を選ぶと、自己開示的回答であるから、ｈを０にする。しかし、順位を入力すると、すぐ次に参加者数ｎの入力を求める。もしｉとｎが一致すれば、最下位であり、ｈを１とする。また、ｉがｎに比べて小さいほどｈの値を１より小さくする。

(1)式において、劣俗関数ｑは、順位ｉを用いて

次式で定める。

$$q=(2i-n-1)/(n-1),\quad i\geqq[n/2]+1,\ 0\leqq q\leqq 1 \qquad (2)$$

実際のコンピュータとユーザーの会話の進行例を表１に示す。同表で、波線部に笑いとコメントがはいる。コメントは所定の枠組に則って作成した[1]。コメントの例を表２に示す。また、(1)式に示すおかしみの大きさℓは、表２の波線部の‘ハ’の数に対応させた。

次に、劣弱ソフトの会話進行例を被験者３０名に提示して、感情の調査を行った[1]。

会話進行は、隠ぺい度ｈ、友好度ｅおよび重要度ｇの３つの変数がそれぞれ０か１に対応した８種類（＝２＊２＊２）を用意した。それぞれ、表１に例示したような会話で最後の部分を空欄にし、おかしみ、驚き、喜びなど１５個の感情を提示して、各感情の発生の可能性を５段階評価で回答してもらった。その平均値を求めた結果、笑者－被笑者が「反発」のときは、「驚き」と「おかしみ」が第１位と第２位を占めること、笑者－被笑者が「友好」のときは、「励まし」が第一位で、「同情」が第二位であること、などがわかっている。

(1)北垣郁雄：劣俗性にかかわる‘笑うコンピュータ’の…、信学技報,HC94-76,pp.1-8,1995

問合先：370-12 高崎市山名町918 ポリテクカレッジ群馬 情報技術科 北垣郁雄 0273-46-9172

表２ コメントの例

［e＜０．５，g≧０．５，h≧０．５の場合］

アハハハハハハハ、順位の低さがバレてしまいましたね、コンピュータを馬鹿にするからそんな順位になってしまうんですよ

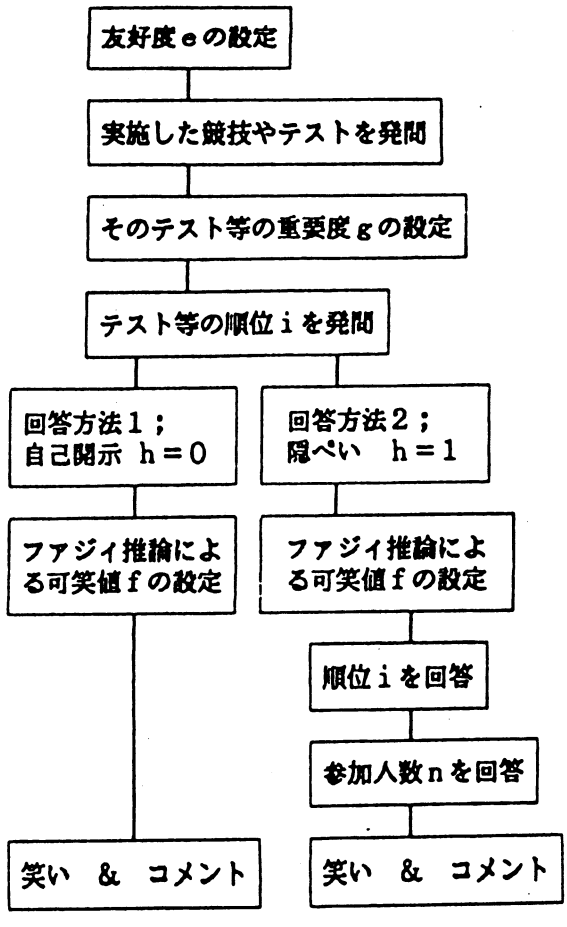


図１ ソフト開発事例

表１ 会話進行例

（ｅ＝2/3、ｇ＝2/3 ｈ＝１の場合）

ピュー子：…登くんが、日頃、ピュー子と登のどちらがより賢いと思っているかを答えて下さい。
登：（登よりピュー子の方がやや賢いと思っています）
…… （途中略） ……
ピュー子：ところで、登くんは、最近なにかテストを受けたり競技をしましたか？
登：〈マラソン〉
ピュー子：マラソンの順位は、登くんにとってどの程度重要ですか？
登：〈ある程度重要だと思っています〉
ピュー子：それで、その順位は、どうだったのですか？
登：〈５０〉
ピュー子：全員で何人参加したのですか。
登：〈５０〉
ピュー子：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

〈〉内は、選択式か数値入力を示す。

FRD1-4

手書き文字の一変動評価
Evaluation of Handprinting Variation of Letters 'Hiragana'

但馬 文昭　　呉 健
Fumiaki TAJIMA　　Jian WU

横浜国立大学　　横浜国立大学大学院
Yokohama National University　　Graduate School of Yokohama National University

Abstract: A new measure of evaluating variation on handprinting letters was proposed, and its performance was examined. Characteristics of the measure include both microscopic and macroscopic variation. Because its value was given by the difference of the number of pixels between two areas correspondingly partitioned off from the two letters according to the Pyramid Structure, the measure was named *Pyramid Structure Variation*. Evaluating the variation of five hiragana-letters written by three persons, the values obtained were appropriate for the order of the handprinting variations which were visually evaluated by another five persons.

1 まえがき

児童の文字の習得過程を分析することは書写技能の教育指導を効果的に進める上で重要と考えられる．この種の研究には，５歳から７歳位までの児童を対象としたかな文字の習得が概ね完了するまでの期間についての発達心理学的視点からの報告が多数ある [1]．しかし，文字習得過程はその時期に完全に終了するわけではなく，それに引き続く年齢においても，心身の成長や学習を重ねることにより，文字のばらつき（変動）が減少し，個人性も明確に現れていくと考えた方が自然である．このような観点からの文字の定量的変動評価に関する研究は筆者の調査の範囲においては見当たらない．

一方，文字認識等を目的とした工学的応用の視点から文字の定量的変動解析の研究が行われている．この種の変動評価方法はすでに触れた発達心理学的評価方法と異なり，定量評価が可能である．具体的には構造解析法 [2]，基準パターンを用いる方法 [3]，巨視的変動評価法 [4] に大まかに分けることができる．筆者が異なる場合の変動評価を考えるとき，基準パターンによる方法はそのパターンの決定の仕方により，変動量が変化すると考えられることから適切でない．巨視的変動法にはエントロピーによる方法があるが，カテゴリーの違いや文字の線幅が大きく異なる場合の文字評価には使用できないと考えられる．構造解析法はひらがなや漢字等の複雑な文字種に対して特徴点を与える際，作業の自動化が困難であるため，採用できない．

そこで，本研究では，コンピュータによる自動処理可能な方法としてハミング距離 [5] とピラミッド構造を基礎としたピラミッド構造変動量と呼ぶ新たな変動評価法を考案した．また，これを用いて筆者毎の文字変動の評価を行い，同一の文字について書写技能の評価の視点から文字変動の視感評価を行い，結果を比較検討したので報告する．

2 手書きかな文字の変動評価法

ここでは，反復記入かな文字 [6] を画像として２値化した後，面積，重心，黒画素数，相対ハミング距離，ピラミッド構造変動量の５種の方法で評価値を算出した．このうち，面積，重心，黒画素数は文献 [7] に詳しいので省略する．相対ハミング距離は比較する２つの文字画像と考えてハミング距離を求め，画素数で除して相対値として求める方法であり，ピラミッド構造変動量はピラミッド構造に基づいて文字画像を分割し，分割した文字画像の対応する領域ごとのハミング距離を積算して求める方法である．

表 1：各変動量の比較

変動量		ま	も	わ
面積	A	246.4	268.7	234.0
	B	253.0	228.1	219.5
	C	223.9	225.8	166.8
順位		B>A>C	A>B>C	A>B>C
重心	A	2.38	2.08	2.76
	B	2.40	2.14	2.26
	C	1.48	2.23	2.62
順位		B>A>C	C>B>A	A>C>B
黒画素	A	57.2	51.6	58.6
	B	53.1	51.2	54.1
	C	50.6	50.1	74.7
順位		A>B>C	A>B>C	C>A>B
相対ハミング距離	A	0.685	0.695	0.698
	B	0.686	0.639	0.709
	C	0.538	0.546	0.552
順位		B>A>C	A>B>C	B>A>C
ピラミッド構造変動量	A	0.397	0.399	0.395
	B	0.395	0.357	0.385
	C	0.289	0.322	0.322
順位		A>B>C	A>B>C	A>B>C
視感評価		A>B>C	A>B>C	A>B>C

3 変動評価結果と考察

使用した手書きかな文字は文献 [7] と同様であるので，簡略して示す．6，9，２２歳の３名の筆記者（順にA，B，Cとする）に，1.6 × 1.6 cm の升目 108 個が印刷されているＡ４サイズの紙に同一文字種 108 文字を反復記入してもらった．文字種は「ま」,「も」,「わ」,「を」,「ん」の５文字種とした．このうち３文字種の評価結果を表 1に示す．表はサンプル数 100 枚のときの各変動評価値である．また，同表下部には被験者５名の視感評価による変動の大小関係が示されている．視感評価結果に最も一致するものはピラミッド構造変動量である．しかし，評価した文字種や筆記者の数が少ないこと，文字の線幅，文字の大きさの影響を十分考慮していないので，今後検討を要する．

4 むすび

ピラミッド構造変動量を用いて，反復記入かな文字の変動の定量評価を行った結果，従来の変動評価方法と比較して人の目視による主観評価に近い結果が得られた．今後はさらに多数の筆記者の文字種について調べると共に，個人性との関係も考慮した個人の文字の変動分析を行う予定である．

参考文献

[1] 例えば，天野清:“子どものかな文字の習得過程”，秋山書店，p.495，1986.

[2] 斎藤泰一，山田広三，森俊二：“手書き文字データベースの解析 (III)”，電総研彙報，42,5,pp.385–434,1979.

[3] 斎藤泰一，山田広三，山本和彦，森俊二：“手書き文字データベースの解析 (V)”，電総研彙報，45,1,2,pp.49–77,1982.

[4] 長谷博之，米田政明，酒井充，吉田順作:“変動エントロピーによる文字変動の評価”，信学論 (D)，vol.J71-D，no.6，pp.1048–1056,1988.

[5] 安居院猛，長尾智晴:“画像の処理と認識”，昭晃堂，p.206，1992.

[6] 野沢繁之，竹下鉄夫，掛野英辰:“人間による筆者識別と計算機による筆者識別－反復記入手書き文字の場合”，信学技報，vol.91，no.50(PRU91，1-11)，pp.9–16，1991.

[7] 但馬文昭，呉　健:“手書き文字の変動評価法に関する一考察”，信学技報，vol.96，no.598 (PRMU96-187)，pp.51–56，1997.

連絡先

但馬 文昭

横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2，〒240

横浜国立大学教育学部技術学教室

TEL :045–339–3448

E-mail:tajima@ed.ynu.ac.jp

FRD2-1

コンピュータシミュレーションを活用した教授方略

— ライフゲームと太陽系モデルを例として —

Instruction Strategy based on Computer Simulation

Case Studies by Life-game and Solar System

磯本征雄 * 野崎浩成 * 中野宇宙 * 吉根勝美 **
Yukuo ISOMOTO Hironari NOZAKI Uchuu NKANO Katsumi YOSHINE

山崎初夫 *** 伊藤 敏 + 松永公廣 ++
Hatsuo YAMASAKI Satoshi ITOH Kimihiro MATSUNAGA

名古屋市立大学 * 南山大学 ** 名城大学 *** 愛知技術短期大学 + 摂南大学 ++
自然科学研究教育センター 経済学部 情報センター 経営情報学部
Institute of Natural Science Faculty of Economics Information Center Aichi College of Business of Administration
Nagoya City University Nanzan University Meijo University Technology Setsunan University

ABSTRACT Recent Information technologies contribute s visualization of mathematical models on a computer., so that we can apply the technology to the instruction strategy for a theoretical rule. In this paper, the authors discuss case studies of computer simulations ; LIFE-game and the solar system. We propose the simple and interesting theme for a computer simulation.

1 はじめに

近年の情報処理技術は、抽象的で記号表記の多い理論や原理の内容を視覚化し理解を助ける上で強力な道具となってきた。多様化し高度化する研究教育を効果的に進めていく上で、こうした情報処理技術をシミュレーションという方法で活用することも無視できない重要な手法である。本論文では、主としてコンピュータ・リテラシー教育教材作成の観点から、シミュレーションの目的および活用法を、「太陽系内の星間旅行」と「ライフゲーム」を事例にして議論する。

教育教材の構成や提示手法は、学習への動機付けに大きな影響を与える。コンピュータ・リテラシー教育においても、近年の「新しい教育観」で強調されているように、創造性・独創性に裏付けられた思考力や表現力の訓練が求められている。「太陽系内星間旅行」と「ライフ・ゲーム」の2例は、こうした教育目標の具体化をねらいとした、コンピュータで手軽に実現できるシミュレーションである。これらの規則は、簡潔で明快であるにもかかわらず、その動きは実に複雑で直感的な理解は容易でない。本論文では、特にコンピュータ・リテラシー教育教材とその活用方法という観点に焦点を絞ってシミュレーションを議論する。

2 教育教材としての特徴

教育教材は、学習目標が容易に理解でき、しかも自由な議論展開の可能な素材であることが望ましい。太陽系内星間旅行とライフ・ゲームの2事例は、操作法の訓練に止まりやすいコンピュータ・リテラシー教育において、学習者が興味を持って自発的に取組み、その表現方法や処理方法を考察し工夫する創造的・独創的発想を刺激する好材料である。以下に、その構成および特徴を説明する。

2．1 太陽系星間旅行

この課題では、地球、月、火星、太陽を扱い、これらの間を宇宙船で行き交うことを話題にした。太陽系星間旅行は、ニュートン力学に基づく連立2階常微分方程式の数値解法で処理しており、以下の力学法則および学習目標を効果的に導き出す方法を考えさせる：

(1) 物体間の引力は、質量の積に比例し、距離の2乗に反比例する。
(2) 物体の加速度は、加わる力に比例する。
(3) 宇宙船の質量は、星に比べて十分に小さく、重力としての影響を無視できる。
(4) 宇宙船の加速度（減速度）は、進行方向にのみ働く。

図1は、太陽とその周辺を周回する2惑星（例えば地球と火星）の軌道を示す擬似モデルである。この教材では、地球から火星や月に向かう星間旅行をゲーム風に扱うことで、専門

知識を学ぶ前段階の学習者にも楽しめる内容にした。内部処理は、

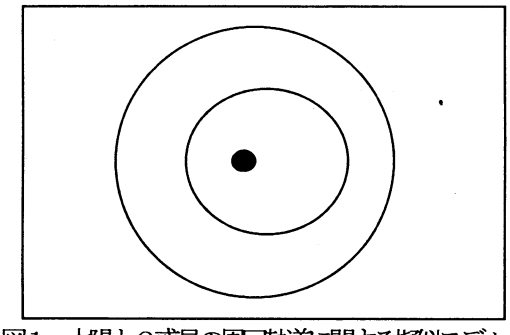


図1　太陽と2惑星の周回軌道に関する擬似モデル

時間を独立変数とし、(x,y)-平面上の4体問題（太陽、地球、火星、宇宙船）になっている。簡潔な基本原理「万有引力による運動方法則」の下で、宇宙船の加速度を制御することで、能率のよい星間旅行を達成することが、学習の最終目標である。宇宙船操縦における加速度制御には、時間と加速度の大きさを選択する可能性分布に関するファジィ論的課題でもある。

2．2　ライフ・ゲーム

ライフ・ゲームは、メッシュ上に分布する擬似生命体を対象に、過密と過疎を避け適度の密度を生存条件とする生命体について、生息分布の世代間変遷をシミュレートする。擬似生命体の消滅・生存は、次の規則に従って決められる。

(1)　近隣の擬似生命体が、4以上の過密ないしは1以下の過疎になれば消滅する。
(2)　近隣の擬似生命体が、2なし3の適度の状態ならばそのまま生存する。
(3)　空白領域にあっては、周辺に3個の擬似生命体があれば、そこに新たに生命体が生成される。
(4)　必要ならば、1～2の範囲で擬似生命体の生成と消滅に対して割り込み操作ができる。

ライフ・ゲームは、初期状態を与えれば、以後の擬似生命体の世代変遷の全てが決定される。この簡潔な規則から、実に様々なパターンが生成される。さらに(4)の規則を加えることで、生命体集落の制御が可能なモデルとなる。また、制御変数は、各桝目ごとの生命体による占有の有無を示す不連続量であり、太陽系モデルとは異なる特色がある。

3　教育場面における活用方法

本論文で扱う教材は、コンピュータ処理を前提にしている。本章では、前述の2種類の教材について、想定される活用事例に言及する。

3．1　太陽系星間旅行

この課題には、以下の4つの視点がある：

(1)　ニュートン力学に関する物理学
(2)　連立2階常微分方程式の数値解法
(3)　宇宙船操作のためのプログラム記述
(4)　星間旅行のための宇宙船の加速度制御

特に(4)については、制御方法に様々な可能性があり、制御理論やファジィ理論としても課題になり得る。

3．2　ライフ・ゲーム

この課題には、次の4つの視点がある。

(1) 人工知能における規則と事実の表現方法
(2) マンマシン・インターフェイスの設計手法
(3) 生命体集落の生成・消滅機構のモデル
(4) 社会科学における計画と制御の技法

コンピュータ・プログラムとしては、比較的簡単な仕組みであるだけに、よく構造化されたロジックを考えさせたり、途中で割り込み可能な操作を組み入れるなど、創意工夫への意欲をかきたてるに十分な内容を持っている。

著者らは、ライフゲームを通して、擬似生命体の大まかな分布を、ファジィ論的に議論する題材として取り上げる予定である。また、規則を少し曖昧にすることで、現象の変化への影響を観察するのも興味ある教材となる。

4　考察およびまとめ

本論文で提示した教材は、非常に高度な内容を含んでいる。しかし、筆者らの体験では、提示方法をアニメーション風やゲーム風にすることで、課題の意図や目的を理解させることは決して困難ではないと思われる。この点は、今後に残された課題である。

近年のコンピュータにおけるマルチメディア化によって、視聴覚を駆使した教材作成が可能になった。特に、表現力や創造性に正面から挑戦するコンピュータ・リテラシー教育において、文字・数字・記号・数式で書かれた抽象的な規則や概念を視覚化する手法は、まず第一に取り上げたい教育課題である。ここに示した教材は、このままでは多くの学生にとって水準が高過ぎるであろう。しかし本論文では、疑問には敢え目を向けずに、コンピュータ・リテラシー教育に役立てる教材作成への姿勢を示すことを目的に議論した。具体的な教育実践を繰り返すことで、教材としての一般的な構成と、それらを活用するための方策を明確にするつもりである。

本論文では、著者らの研究の目的と内容を発表するに止めたが、議論した事柄の原形はN88BASICで試作しており、希望者には譲渡可能である。内容に興味があれば、下記までご連絡頂ければ、現状の内容のプログラムを提供する。

連絡先：　磯本征雄
名古屋市立大学　自然科学研究教育センター
〒467　名古屋市瑞穂区瑞穂町山の畑1
Tel 052-872-5790,　Fax 052-872-5781
E-mail　yisomoto@cc.nagoya-cu.ac.jp

FRD2-2

大学(文系)基礎教育におけるファジィ数，ファジィ推論の教材について

On the Instruction of Fuzzy Number and Fuzzy Reasoning in the Basic Education of University (Non-engineering Course)

須田　宏
Hiroshi Suda

慶応義塾大学
Keio University

Abstract—Last year, I tried the lecture "Introduction to Fuzzy Theory" from the year before last on. In this lecture I used the instruction about fuzzy number and fuzzy reasoning that had been written by Prof.N.Nakajima and collected the data. Here, I would report the correspondence of students.

1．はじめに

1995年度に商学部1，2年次学生を対象とする「総合教育セミナー」(4単位)の1科目として「ファジィ理論入門」を開講することができた．この全授業の様子を毎時限のアンケート調査をもとに昨年6月に早稲田大学で開催された第12回ファジィシステムシンポジウムで報告した．96年度も同セミナーを担当したので，前年度得られた資料をもとに教案を改訂し，ほぼ同じ内容の授業を行った．

昨秋，富山大学の中島信之教授より，文系学部初年次学生を対象とするセミナー用のプレプリントを頂いたので，'ファジィ数'と'ファジィ推論'の2課について授業に取り込んでみた．今回はこの結果について学生の反応を報告する．

2．「ファジィ理論入門」授業内容

授業内容の詳細は前々回および前回の報告に記載してあるが，概略を再掲すると次のようになる．

Ⅰ 「あいまいさ」
- ファジィネス　・ファジィ理論

Ⅱ ファジィ集合
- ファジィ集合とメンバーシップ関数
- ファジィ集合の演算　・相補律の不成立
- 代数和，代数積とその基本性質
- α-レベル集合，分解定理

Ⅲ ファジィ関係
- ファジィ関係の演算　・ファジィ関係の合成
- 類似関係　・ファジィ順序関係

Ⅳ ファジィ数と拡張原理
- ファジィ数の四則演算　・拡張原理
- クリスプ関数によるファジィ集合の像

Ⅴ ファジィ推論
- ファジィ命題　・ファジィ推論
- 一般のファジィ推論　・ファジィ制御

3．セミナー・テキストの内容

第1課　大学で何を学ぶの？
——社会科学とファジィ理論
- 1.1 最小のコストで最大の収益を
- 1.2 意思決定とその支援
- 1.3 情報化社会，意思決定とファジィ理論

第2課　どんな車をお探しでしょうか
——ファジィ概念とメンバーシップ関数
- 2.1 安いクルマとは？ 新しいクルマとは？
- 2.2 「おおよそ50万円以下」に該当する度合いは？
- 2.3 ファジィ概念とクリスプ概念

第3課　安くて「かつ」新しいクルマが欲しいのです
——ファジィ概念の演算
- 3.1 「安くてかつ新しい」クルマ——共通概念
- 3.2 せめて「安いかまたは新しい」クルマを！——和概念
- 3.3 意思決定と論理学

第4課　私はこちらの方があちらよりやや好きです
——ファジィ2項関係，ファジィグラフ
- 4.1 2項関係
- 4.2 2項関係とグラフ
- 4.3 ファジィ2項関係とファジィグラフ

第5課　価格はおおよそ50万円です
——ファジィ数とその計算法
- 5.1 ファジィ数とは
- 5.2 ファジィ数の演算
- 5.3 拡張原理とファジィ最大・最小

——具体例を提示してファジィ数を定義し，大小，足し算・引き算，三角型ファジィ数を説明している．次に，関数の例をあげ数の関係からファジィ数の関係—拡張原理と結び，最後に，ファジィ最大・最小

に触れている．

第６課　一緒に働くと能率が上がるというのは本当ですか――ファジィ測度

6.1　ファジィ測度

6.2　ファジィ測度の性質と構成法

6.3　λ-ファジィ測度

第７課　一芸に秀でるものは幸いなり――ファジィ積分

7.1　平均，重みつき平均，積分

7.2　ファジィ積分の性質

7.3　ファジィ積分による総合評価

第８課　赤いトマトは熟しているか――ファジィ推論

8.1　推論とは

8.2　近似推論とファジィ推論

8.3　ファジィ制御に見るファジィ推論法

――推論とは何か，論理的推論と実用的・日常的推論について述べ，ファジィ推論を身近な例で解説している．後半ではファジィ推論を利用したファジィ制御の例としてエアコンをとりあげ推論の手法を詳しく説明している．

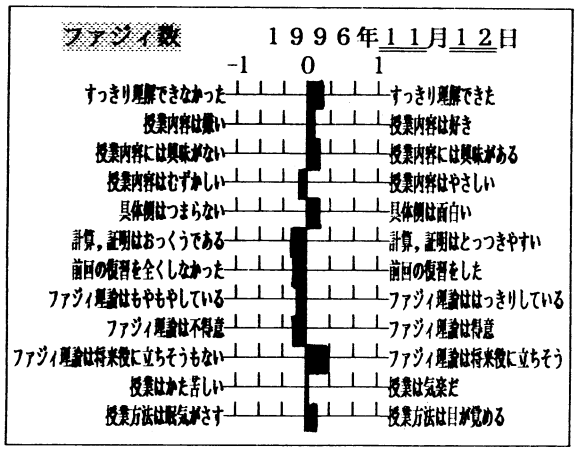
以上が富山大学の中島信之教授より頂いたプレプリントの内容であるが，まだこの先，数課執筆され半期相当分となる予定と伺っている．

各課は１時限(90分)３名の学生により輪講できるように構成されており，明快かつ軽妙な筆致で非常に読みやすい．

４．学生の反応

毎時限，下掲のようなアンケート用紙を配布し受講生の反応を調査している．

第⑰回：第５課「ファジィ数」および第⑳回：第８課「ファジィ推論」については，それぞれ前週にプリントを配布し，あらかじめ指名した学生に発表させた．



‘感想・意見’の一部を紹介する．⑰について――

＊「ファジィ数とは」と「ファジィ数の大小」の説明は分かりやすく面白かった．

＊ 今日の授業内容はいつもに比べてやさしかった．

＊ 例題から内容が理解できた．

＊ 発表するのは，かなり大変でした．

⑳について――

＊ 分かりやすい例がでてきて親しみを感じた．

＊ 今日のようなプリントの方が(いつものプリントよりも)身近に感じ理解しやすい．

＊ ファジィ推論が身近なエアコンで説明されており，結構分かりやすかった．

＊ どちらかというと，計算よりも，今回の方が現実味があるように感じます．

＊ 今日の発表は非常に緊張した．自分はしゃべるのが下手なのでこのような発表はつらかった．

５．結果の検討

新しく学ぶ概念を理解させるには身近な例題から導入するのが効果的である．この点で中島教授のプリントは好評であった．文系にファジィ理論を導入するにあたって，社会科学，人文科学に関連する具体例の開発が急務である．

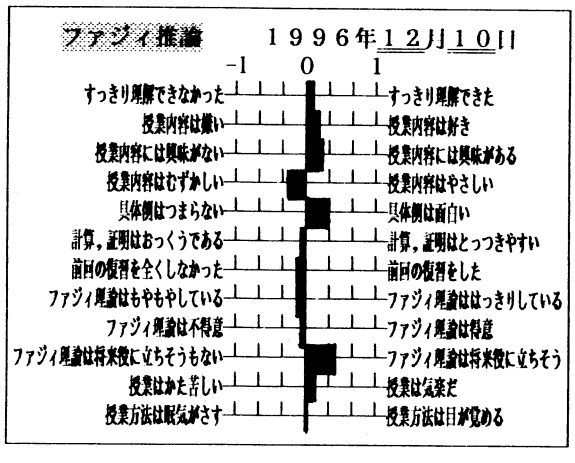
また，学生の反応からみても数学的な取り扱いについて実践研究を進める必要があろう．

当該２課は学生が授業を展開したが，不慣れによるぎこちなさが目に付いた．１年次学生がセミナー形式に早く慣れる雰囲気づくりをせねばなるまい．

６．おわりに

今回の報告は数学教育にファジィ理論を導入する試みの一環であった．本年度は２節の授業内容に含まれていない３節の「ファジィ測度」，「ファジィ積分」の２課について試行する予定である．

末筆ながら，終始ご助言を頂いている山下元教授，貴重な資料を頂いた中島信之教授に深く感謝する．



［問い合わせ先］

〒223 横浜市港北区日吉 4-1-1 慶応義塾大学

須田　宏

Tel 045-563-1111(内3703)

FRD2-3

メディア利用と授業戦略との関連性

A Study on the Relevance of Media and Teacher's strategy

成瀬　喜則　　前田　隆　　中島　信之
Yoshinori NARUSE　　Takashi Maeda　　Nobuyuki Nakajima

富山商船高等専門学校　　金沢大学経済学部　　富山大学経済学部
Toyama National College of Maritime Technology　　Faculty of Economics Kanazawa University　　Faculty of Economics Toyama University

This paper describes a new method for evaluating educational components in a class using media and network.

It is necessary to examine how multimedia tools such as network and computer are utilized in a class. We discussed about effective use of multimedia by AHP and game theoretical approach.

Using this method,we can understand the relevance of media and teacher's strategy.

1.はじめに

授業で使うメディアは、情報機器の発達により急激に増えてきた。どのメディアを授業のどの場面に利用するかは、教師の力量にかかっているといっても過言ではない。

それとともに、教師の指導方法、学習方法、学習形態等の見直しが求められており、授業の質的な変化にも対応していく必要性が求められている。

これまでコンピュータ等のメディアの教育利用としては、下記のものがあった[5]。

(1)学習の個別化を目標としたドリル、チュートリアル型の利用
(2)情報検索、シミュレーション等、学習の道具としての利用
(3)マルチメディアを活用した表現能力のための利用
(4)通信、コミュニケーションの能力育成のための利用

これらの利用の仕方は、良い・悪い、というレベルの議論ではなく、教師の指導観によって大きく左右されるものである。
すなわち、教師が行う授業に対する戦略によって、メディアの利用も大きく変わってくるのである。

そこで、本論では、情報処理プロセスの観点から、ネットワークなどメディアを利用した授業について分析を行い、メディアがその授業に対して占めた重要度についてゲームを用いて検討を行った。また、教師の授業戦略との関連性を調べた。

2.授業展開の分析と場面の重要度

ここでは、モデル化を簡単にするために、学習活動における授業展開の過程を情報処理プロセス」からながめ、次のようなカテゴリーに分類する[1]。

A：課題の認識・意味付け
B：情報の検索・収集
C：情報の活用・発信

授業にはこの３つの場面が存在し、これらが有機的に結合しあって構成されると考えれるが、それぞれの場面の重要性は同じとは限らず、授業戦略によって変化する要素を持っている。

そこで、場面の重要度をAHP (Analytic Hierarchy Process)を使って意志決定をさせることによって授業戦略の意志決定を明確にさせる。（図１）

これによって求められた場面の重要度を w_1, w_2, w_3 とし、
$w_1 + w_2 + w_3 = 1$
になるように設定をする。

また、各場面で教師はそれらのメディアを有効に活用することによって効果を上げようと考え授業に望むわけであるが、授業を終了した後に自己評価を行った結果、それらのメディアを利用したことによってどの程度効果があったかを数値化する。各場面での有効性を e_1, e_2, e_3 として、
$0 \le e_1 \le 1, 0 \le e_2 \le 1, 0 \le e_3 \le 1$ とする。

最終的に、各メディアが授業のどの場面でどのように利用されたかが図２に示される。

3.メディアと授業場面との関わり

例を挙げて考察を行う。今、メディアをプレイヤーと見立て、各授業場面でどのような利用がなされたかを調べる。（図２）

そこで、次のような特性関数を作ることができる。

$v(1)=0$

$v(2)=0$

$v(3)=f(w_1,e_1)$

$v(12)=f(w_3,e_3)$

$v(13)=f(w_2,e_2)$

$v(23)=0$

$v(123)=f(w_1,e_1)+f(w_2,e_2)+f(w_3,e_3)$

v(i)はプレイヤーi（ここではメディアi）が参加したことによって得られる貢献度を表している。また、v(ij)はプレイヤーiとjが一緒に参加した（協力した）ことによって得られる貢献度を表している。

ここで、例えば、場面２は、メディア１と３が利用されて初めて成立していると考えている。つまり、それぞれのメディアだけの貢献度は考えていない。

このようにして作成された特性関数から、それぞれのメディアの持つ貢献度を求めることができる。

本研究では、Shapley値の適用を考えており、その時の値は

$$\phi(1)=\frac{1}{6}f(w_1,e_1)+\frac{1}{2}f(w_2,e_2)+\frac{1}{2}f(w_3,e_3)$$

$$\phi(2)=\frac{1}{6}f(w_1,e_1)+\frac{1}{2}f(w_3,e_3)$$

$$\phi(3)=\frac{1}{6}f(w_1,e_1)+\frac{1}{2}f(w_2,e_2)$$

である[(2)][(3)]。

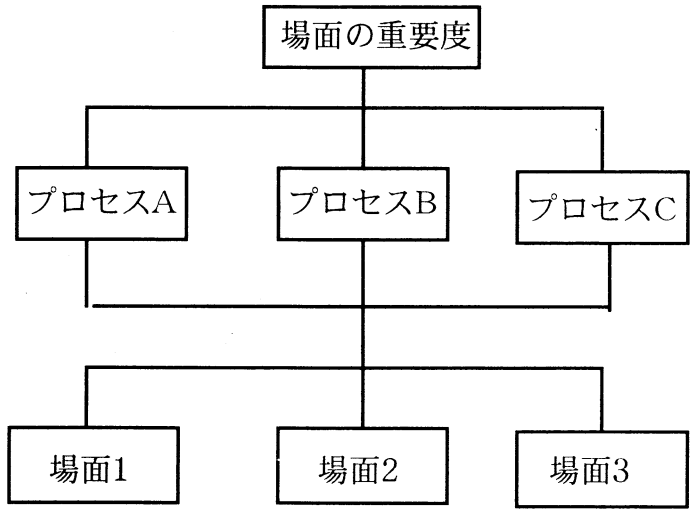


図１　場面の重要度に関する階層図

場面	場面1	場面2	場面3
重要度	w_1	w_2	w_3
効果	e_1	e_2	e_3
メディア1		○	○
メディア2			○
メディア3	○	○	

図２　授業場面とメディア利用の関係

参考文献

(1)古川久敬：電子コミュニケーションとチーム活動,組織科学 Vol;.29 No.1,(1996),pp.18-28

(2)Sharkey.W.W.:Suggestions for a game-theoretic approach to public utility and cost allocation.The Bell Journal of Ecomonics,pp57-68

(3)鈴木光男:新ゲーム理論, (1995),pp330-361,勁草書房.

(4)水越敏行:教育工学研究のあり方について,日本教育工学雑誌,vol.20,No.2, (1996),pp75-81

（問い合わせ先）
933-02　富山県新湊市海老江練合1-2
富山商船高等専門学校
成瀬喜則
TEL:0766-86-5212 FAX:0766-86-5110
E-mail:naruse@toyama-cmt.ac.jp

FRD2-4

インターネット上でのファジィ推論によるＣＡＩの試行錯誤型学習支援システム
ーExcelを使った学習制御のモデル化ー

The Trial-and-Error Learning System of CAI by the Fuzzy Interface Rules on Internet
- Modeling of the Learning Control using Excel -

磯本征雄* 吉根勝美** 山崎初夫*** 野崎浩成* 中野宇宙*
Yukuo ISOMOTO*, Katsumi YOSHINE**, Hatsuo YAMASAKI***, Hironari NOZAKI*, Utyu NAKANO*
名古屋市立大学* 南山大学** 名城大学***
Nagoya City University*, Nanzan University**, Meijo University***

(ABSTRACT) The teaching materials and assisting software using CAI are transfered to learner's personal computer at any place and any time through Internet, and a Learner may be to take a remote assistance of learner's self-learning. When a new problem confronts a learner in such a case, he often tries to solve the problem by trial-and-error method. In this paper, the authors designed and implemented such a CAI model of remote assistance for self-learning with the semantic network model[1], actor model[2], and the fuzzy set theory[3]. For CAI model , the authors designed and implemented such a CAI model that helps a learner to learn a subject by trial-and-error. The authors discuess an instruction method of the frame type CAI, on the assumption that fuzziness of his knowlege causes his trial-and-error learning.

1 はじめに

CAI(コンピュータによる教育支援)で使われる教材や学習支援ソフトウェアを、インターネットを介して学習者のパソコンに転送すれば、時間と場所に関係なく、学習者の遠隔支援が可能である。本稿では、意味ネットワーク[1]、アクターモデル[2]、ファジィ理論[3]を背景にして、遠隔学習支援システムの設計について述べる。

従来のCAIでは、教材を「フレーム」と呼ばれる単位に分割し、あらかじめ教材作成者が設定した順序にしたがってフレームを学習させるので、教材同士のつながりや教授方略がさまざまであり、学習者の遠隔支援には不向きであった。また、教授方略は教材内容に依存することも多く、単一の教授方略では多様な学習者への個別対応は困難である。そこで、本研究の遠隔学習支援システムでは、教材内容に依存しない学習支援モデルを階層的に統合している。

一般に、学習者がすべてのフレームを直ちに理解するのは困難であり、むしろ徐々に理解していくであろう。教材を順序良く学習していても、ときに以前の教材に戻ることがある。こうした学び方は、まさに試行錯誤と言える。本稿では、フレーム毎に数値化された学習者の理解度を入力情報として、ファジィ推論を応用して、試行錯誤型学習支援モデルを定式化する[4]。

2 遠隔学習支援システムの階層構造

教材すべてをフレーム単位に分割して管理することは困難であり、フレーム毎の教材転送も効率的でない。教材内容の観点から、いくつかのフレームを「単元」としてまとめることができるが、遠隔支援の視点に立てば、単元はファイル転送の単位でもある。

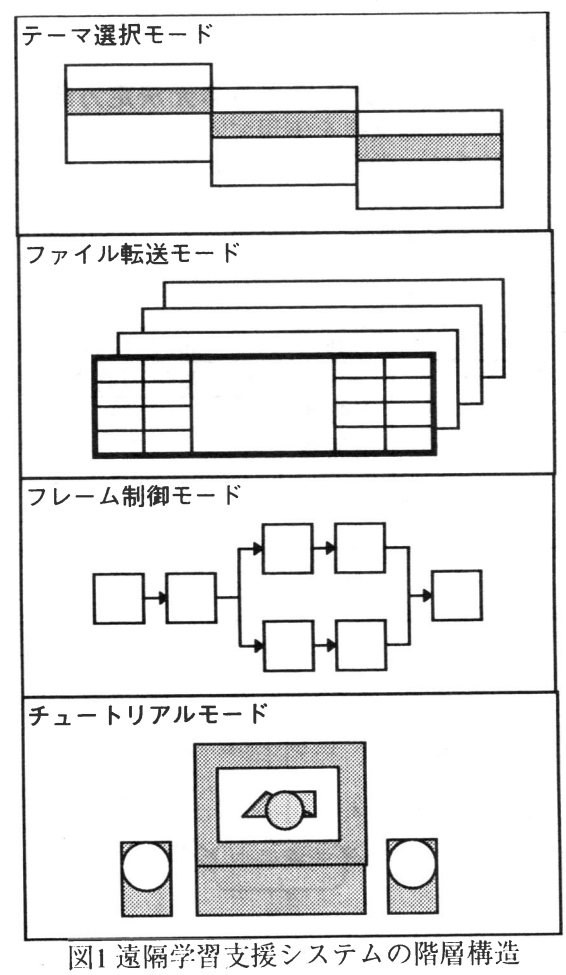


図1 遠隔学習支援システムの階層構造

図1に、遠隔学習支援システムの階層構造を示す。テーマ選択モードでは、教材の一覧メニューから学習するテーマを学習者が選択する。

ファイル転送モードでは、学習者の学習状況にもっともふさわしい単元が選択されて、サーバマシンから学習者のパソコンに転送される。テーマ毎に設定される知識構造は意味ネットワークで記述され、学習者の状況は意味ネットワークにマッピングされたキーワードに対する理解度として表現される。単元の選択ルールにアクターモデルの考え方を応用する。

フレーム制御モードでは、フレームに対する学習者の理解度をファジィ集合とみなし、学習順序の決定にファジィ推論を応用して、試行錯誤的な学習支援を実現する。

チュートリアルモードは、実際に学習者を支援するマンマシンインターフェースであり、本システムにおいて、教材の内容に依存するのはこのモードだけである。

3 遠隔学習支援の数理モデル

3.1 テーマ選択メニュー

テーマ選択モードでは、学習テーマの一覧がメニュー形式で提示される。学習者は自分が学びたいテーマをメニューから選択する。図2は、「人体」を教材とした場合のテーマ選択メニューの一部である。テーマを決めると遠隔支援が始まる。

3.2 アクターモデルによる単元決定方略

学習者の遠隔支援を実現するため、ファイル転送モードでは、学習者の学習状況にもっともふさわしい単元を選択し、サーバから学習者のパソコンへ教材を転送する。したがって、一つの単元を構成するには、学習内容のひとまとまりであると同時に、ファイル転送の単位でもあることを考慮する必要がある。

一つの学習テーマを通して、学習すべき知識構造は意味ネットワークとして記述する。図3にその例を示す。ノードが学習テーマにおけるキーワードに対応し、アークはキーワード間の関係の強さを表す。

意味ネットワークにおけるノードの属性として学習者の理解度を与えることで、学習者の学習状況を表現する。一つの単元の学習終了後、あるキーワードw_iを理解度e_iで理解したとすれば、キーワードw_jも理解度$r_{ij}e_i$で理解したと考える。ここで、r_{ij}はw_iとw_jとの間の関係の強さを表す。

単元は、分割された教材と学習支援ソフトウェアからなり、意味ネットワークに反映された学習者の学習状況に応じて、適切な単元が学習者のパソコンに転送される。転送する単元を決定するには、アクターモデルの考え方を応用する。図4は、開始条件と終了状況が付加された単元の例を示す。開始条件とは、その単元を学習する前に理解していることが望ましいキーワードとその理解度の対の集合である。終了状況は、その単元を学習した後で理解させると思われるキーワードとその理解度の対の集合である。単元の決定においては、一つひとつの単元をアクターとみなし、学習者の学習状況に該当するアクターが駆動すると考える。

意味ネットワーク上に表現された学習者の理解度が開始条件を満足している単元が複数個ある場合には、学習者の理解度と単元の開始条件との間の距離が最小の単元を次に学習する単元と決定する。

一つの単元の学習が終了したら、終了状況にあるキーワードに対応する理解度を、意味ネットワーク上で更新する。あわせて、終了状況のキーワードと関係があるキーワードの理解度も、キーワード間の強さに応じて更新する。

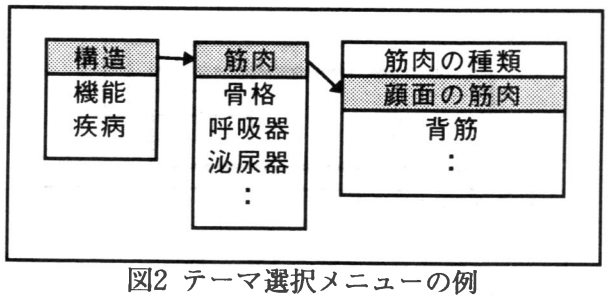


図2 テーマ選択メニューの例

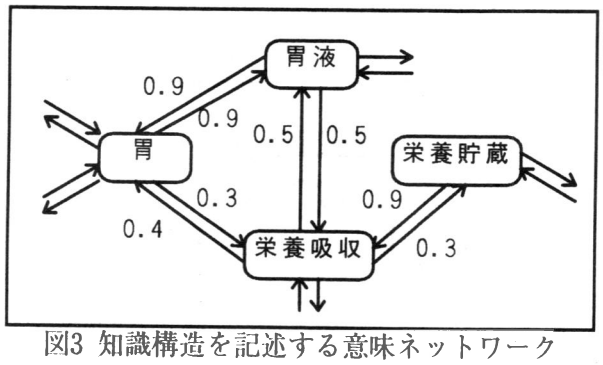


図3 知識構造を記述する意味ネットワーク

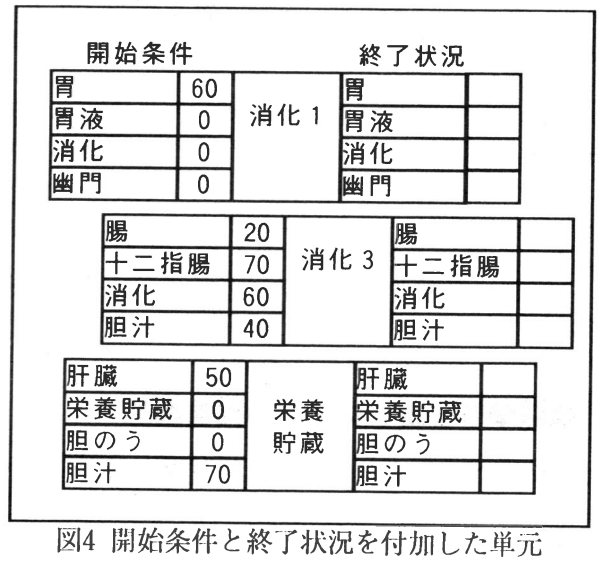


図4 開始条件と終了状況を付加した単元

3.3 ファジィ推論による学習支援方略

ファイル転送モードで転送された単元は、フレームという単位に分割された教材と、それを駆動する学習用ソフトウェアから構成される。フレームとフレームとの間には、教材作成者が仮の学習順序を決めておく。必要に応じてフレームの分岐を設けてもよい(図1参照)。

フレーム制御モードを通して、学習者の学習状況はフレーム毎の学習者の理解度として表現する。ここで、学習者の理解度はあいまいなものと考え、区間[0,1]を全体集合とするファジィ数として表すことにする。例えば、フレームF_iの理解度をテスト形式で計測した場合には、テストの点数を0～1点の範囲のb_i点に換算した後、三角型ファジィ数

$$<(1-w)b_i, b_i, (1-w)b_i+w>$$

をフレームF_iの理解度m_iとする。ここでwは三角型ファジィ数の幅($0 \leqq w \leqq 1$)である。このファジィ数は図5に示すように左右非対称であり、点数が低い場合には点数よりも理解している可能性を、点数が高い場合には点数ほどには理解していない可能性を見込んでいる。

学習支援過程において、学習者の学習状況に応じて学習フレームを決定するために、フレーム列を移動しながら検索する。順序づけられた2つのフレーム$F_i \rightarrow F_j$において、それぞれの理解度m_iとm_jとを比較して、理解度が低い方を学習するのが当然であろう。そこで、下記により探索指数を定義する。

$$s_{ij} = \alpha m_i m_j + \beta m_i(1-m_j) + \gamma(1-m_i)m_j + \delta(1-m_i)(1-m_j) \quad (1)$$

ここで、$\alpha=0.5$、$\beta=1$、$\gamma=-1$、$\delta=-0.5$である。

式(1)で定義される探索指標の意味は次の通りである。探索指標の定義域は区間[-1,1]で、フレーム列$F_i \rightarrow F_j$に対する探索指標s_{ij}が負のときは学習フレームはF_iの側にあり、正のときは学習フレームはF_jの側にあることを示す。また、探索指標の絶対値が、学習フレームがそれぞれの側にあることの確信度を表す。特に、$m_i=1$、$m_j=0$のときは、$s_{ij}=\beta=1$であり、$m_i=0$、$m_j=1$のときは、$s_{ij}=\gamma=-1$である。さらに、$m_i=m_j=1$のときは、F_j以後のフレームに、$m_i=m_j=0$のときは、F_i以前のフレームに学習フレームがあることを期待して、それぞれ$s_{ij}=\alpha=0.5$、$s_{ij}=\delta=-0.5$という値を割り当てた。

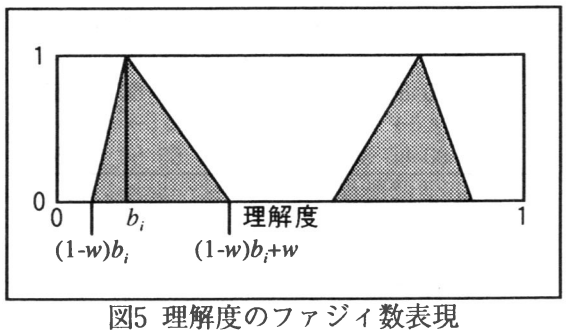


図5 理解度のファジィ数表現

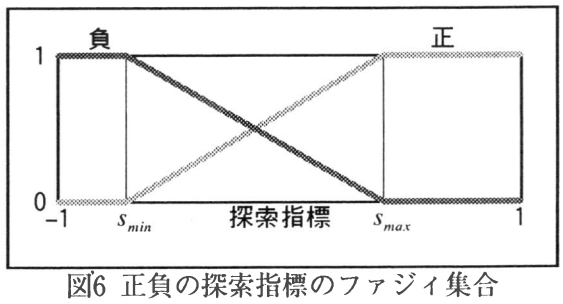


図6 正負の探索指標のファジィ集合

一つの単元にあるすべてのフレームの中から学習フレームを決定するには、以下のようにファジィ推論を応用する。あるフレームF_kに対して、$F_p \rightarrow F_k \rightarrow F_q$を考える。分岐のため$F_p$に該当するフレームが複数個ある場合には、その分岐が連言的か選言的かにより、理解度が最小あるいは最大のフレームをF_pとする。F_qが複数個ある場合は、理解度が最小のフレームをF_qとする。理解度m_p、m_k、m_qは三角型ファジィ数で与えるので、探索指標s_{pk}、s_{kq}も、式(1)を援用して、近似的に三角型ファジィ数として計算する。そして、探索指標の正負により、学習フレームを探索する方向を以下のファジィ推論規則で定義する。

If “s_{pk}が正” かつ “s_{kq}が負” then
“F_kは学習フレームである(○)”
If “s_{pk}が負” かつ “s_{kq}が負” then
“F_pについて探索を続ける(←)” (2)
If “s_{pk}が正” かつ “s_{kq}が正” then
“F_qについて探索を続ける(→)”
If “s_{pk}が負” かつ “s_{kq}が正” then
“別のフレームで探索を続ける(×)”

正の探索指標、負の探索指標は、それぞれ区間[-1,1]に対するファジィ集合であり、そのメンバーシップ関数は図6のように定める。ここでs_{min}は、式(1)においてm_i=最低点、m_j=合格点としたときの探索指標で、s_{max}は、m_i=合格点、m_j=最低点としたときの探索指標であり、それぞれ探索指標の符号が確実に決まる場合の境界条件である。

図7にファジィ推論の過程を示す。いわゆるMamdaniの方式でファジィ推論を行うが、最後の非ファジィ化では、メンバーシップ値が最大の探索方法を採用する。

F_pまたはF_qについて探索を続ける場合は、それをあらためてF_kとして探索を続行する。別のフレームで探索を続ける場合は、フレーム全体の中から、式(2)の第1規則に該当するフレームを見つける。

3.4 マンマシンインターフェース

実際の学習支援は、チュートリアルモードにおけるマンマシンインターフェースが担う。すなわち、学習用ソフトウェアが稼動して、フレーム単位の教材により、説明文やイラストの提示や理解度確認のテスト等を行う。

4 ファジィ推論による試行錯誤的学習支援

遠隔学習支援においては、学習過程の制御が重要な役割を演じている。ここでは、ファジィ推論による学習支援の有効性を確認するため、表計算ソフトウェアを用いて学習過程のシミュレーションを行った。

図8に結果の一例を示す。11個のフレームを左から右へと学習する。数字は100点満点で表示した点数で、合格点は60点としている。○、←、→、×は直上の理解度に対する推論結果である。直前に学習したフレームを出発点として探索する。推論結果が×の場合は、←と→とで大きい方を選んだ。◎が実際に学習したフレームである。図8の例では、後半で理解度が合格点に満たなくても学習を進めて、最後まで到達してから以前の理解度の低いところに戻って学習をやり直している。これは、試行錯誤の様相を呈している。

5 まとめ

本稿では、遠隔学習支援CAIシステムのための数理モデルを定式化した。特に、ファジィ推論による学習支援は、試行錯誤的な学習を実現している。意味ネットワークやアクターモデルで、理解度のあいまいさを考慮したモデルも可能である。

本モデルは、教材内容や教授方略に依存しないので、さまざまなCAIへの応用が可能である。

参考文献

[1] Findler, N. V. (editor): Associative networks, Academic Press, New York (1979)

[2] 米澤明憲 : ACTOR理論について, 情報処理, **20**(7), 580-589 (1979)

[3] Zadeh, L. A. : Fuzzy sets, Information Control, **8**, 338-353 (1965)

[4] 吉根勝美, 磯本征雄, 石井直宏 : コンピュータ支援による試行錯誤的学習のためのファジィ論的方略, 日本ファジィ学会誌, **5**(5), 811-822 (1993)

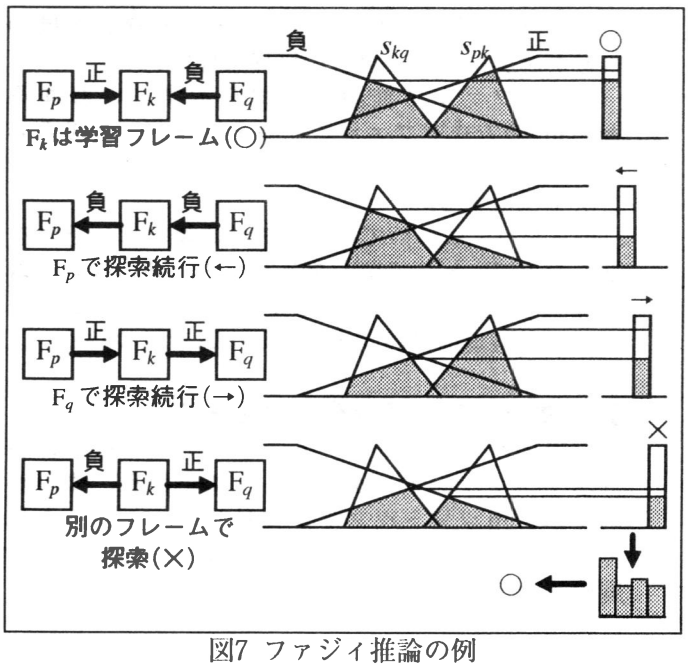


図7 ファジィ推論の例

回数	F_0	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	◎	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	→	◎	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	90	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	→	→	◎	←	←	←	←	←	←	←	←
	90	85	80	0	0	0	0	0	0	0	0
4	→	→	→	◎	←	←	←	←	←	←	←
	90	85	80	75	0	0	0	0	0	0	0
5	→	→	→	→	◎	←	←	←	←	←	←
	90	85	80	75	70	0	0	0	0	0	0
6	→	→	→	→	→	◎	←	←	←	←	←
	90	85	80	75	70	65	0	0	0	0	0
7	→	→	→	→	→	→	◎	←	←	←	←
	90	85	80	75	70	65	60	0	0	0	0
8	→	→	→	→	→	→	→	◎	←	←	←
	90	85	80	75	70	65	60	55	0	0	0
9	→	→	→	→	→	→	→	→	◎	←	←
	90	85	80	75	70	65	60	55	50	0	0
10	→	→	→	→	→	→	→	→	→	◎	←
	90	85	80	75	70	65	60	55	50	55	0
11	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	◎
	90	85	80	75	70	65	60	55	50	55	60
12	→	→	→	→	→	→	→	→	◎	←	←
	90	85	80	75	70	65	60	55	60	55	60
13	→	→	→	→	→	→	→	◎	×	○	←
	90	85	80	75	70	65	60	65	60	55	60
14	→	→	→	→	→	→	○	×	→	◎	←
	90	85	80	75	70	65	60	65	60	60	60

図8 学習過程のシミュレーション例

問い合わせ先

〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501
名城大学情報センター
山崎初夫
TEL:052-832-1151(内線5103)
FAX:052-833-5850
E-mail:yamasaki@meijo-u.ac.jp

FRD3-1

感性評価のためのファジィ測度の同定について（Ⅱ）

Applicable Conditions on Fuzzy Measure Using for KANSEI Evaluation (Ⅱ)

宮武直樹、松田修三、布施光男、　中島洋一
Naoki miyatake, Syuzo Matsuda, Mitsuo Fuse, Yoichi Nakajima
(法政大学工学部)　(滝川市立江陵中学校)
(Faculty of Engineering, Hosei University), (Koryo Junior High School of Takikawa)

In this report, we propose KANEI evaluation that a teacher and a pupil expresse sensitivty and an image by a language with sensitivity evaluation. So it is translated in the numerical value that is evaluation element and there is with KANSEI. This KANSEI evaluation must be a method that is kind to a pupil and is encourged. It is the absolute evaluation that take in self evalua t ion of pupil in evaluaion of teacher. We reporte practice example of this evaluation.

1．はじめに

新指導要領では観点別学習状況評価が導入され、新しい学力観による評価は、学ぼうとする力（学習意欲）の捉え直しと測定方法の整備が急がれている。学習意欲の評価については、評価の範囲すら明確ではない。概念規定に関する提案はあるが、実証事例が過少であることから、あまり理解が得られていない。また、数量化に馴染まないという感覚が根強くこの種の研究が遅れている。

本研究は、新しい学力観に伴う学習意欲や関心などの評価について、主として生徒自身のメタ認知報告と、判断の方法は論理的洞察ということでこの種の問題解決の糸口とする評価方法に取り組んできた実践研究の経過を報告である。

その評価に筆者が提案している教育における感性評価は、「教師や生徒の感性やイメージを言葉で表現し、これを評価要素である数値に翻訳して、感性と合った言葉又は数値（評価）を求めることで、その評価は子供たちに優しく、励まし、奮起を促すものでなくてはならない。」と考えている。

2．ファジィ測度λの同定とそのもつ意味

ここで用いた評価モデルは、人間の主観的評価尺度として、λ－ファジィ測度を用い、菅野のファジィ積分を実行して総合評価値を求めた。

本研究ではパラメータλが各評価基準間のバランスを示す尺度として利用できることに着目し、

λ＜０ならば、個性重視（独自性）となり、－１に近ければ近い程その度合いが強くなること。

λ＞０ならば、バランス重視（特徴の共通性）となり、大きければ大きい程その度合いが強くなることを応用している。

λ－ファジィ測度は一律の値を生徒全員に課した場合と、個々の生徒別に設定し、個人指導の導入の可能性についても検討した。

X：評価項目の有限集合$X=\{x_1, x_2, \cdots x_n\}$

$F=2^X$

μ：ファジィ測度 $\mu : F \rightarrow [0,1]$

$\mu(\phi)=0,\ \mu(x)=1$

$A, B \in F, A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leqq \mu(B)$

Z_j：j番目の評価対象のファジィ積分値

$$Z_j = \bigvee_{i=1}^{n} \{X(x_i) \wedge H_i\}$$

λ－ファジィ測度

$A \cap B = \phi \Rightarrow \mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) + \lambda \mu(A) \mu(B)$

λはパラメータで、$\lambda \in [-1, +\infty]$ となる。

本研究では、この重みにλ－ファジィ測度を用い、加重和の計算の代わりにファジィ積分を用いた。これは、各評価項目の評価値$H(x_i)$と評価項目群の重要度を示すファジィ分布関数Q_iから、∧と∨を組み合わせた演算を行うものである。λ－ファジィ測度g_λは評価項目$H_1, H_2, \cdots, H_n$に対応する重み$g_\lambda(H_i)$を用いて、式（３）から、次式を導き、

$$g_\lambda\left(\bigcup_{i=1}^{n} H_i\right) = \frac{1}{\lambda}\left(\prod_{i=1}^{n}(1+\lambda g_\lambda(H_i)) - 1\right)$$

$(H_i \cap H_j = \phi,\ i \neq j)$

ただし、上式におけるはｉ＝１からｎまでの$(1+\lambda g_\lambda(H_i))$の乗算を意味している。

この式に、有界性と単調性の条件を代入して、ｎ次の方程式を解いてg_λとλを求めている。

次に、このλを用いて、$\lambda_\kappa = \lambda / \kappa$とし、κを感性係数と呼ぶことにする。ここで、κを微少きざみで変化させ、教師の主観評価や生徒の自己評価及びベテラン教師の評価基準や判断に最適と思われる評価を示すκの値を、下記の評価基準の尺度、言い換えると評価の態度合致とする値を同定し感性評価を算出した。

① 最高点で決める。個性重視、積極的
　（例） 一芸に秀でた者を評価する
② ほとんど個性重視
③ 平均、中立
④ ほぼバランス重視
⑤ ほぼ最低点で決める、バランス重視、慎重（厳しい評価態度）

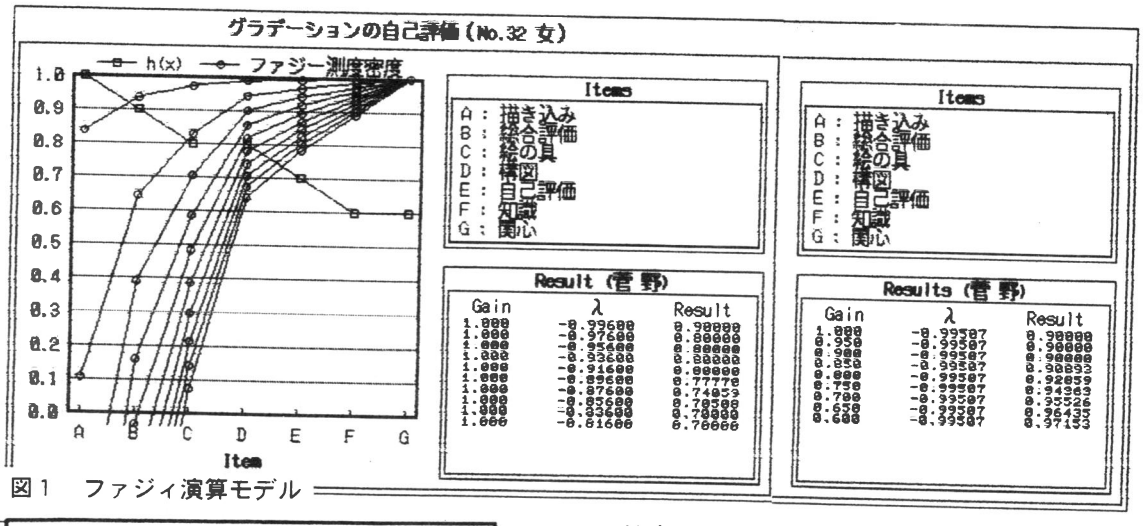


図１　ファジィ演算モデル

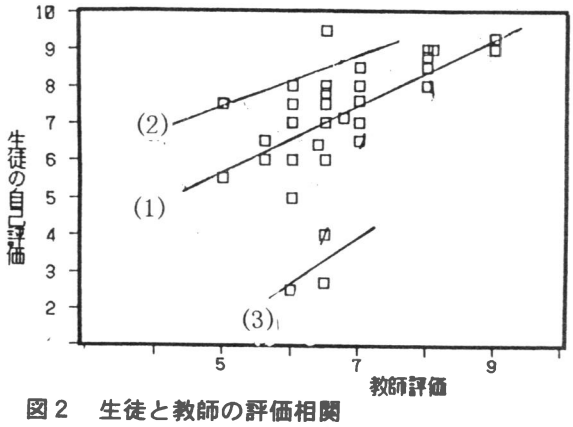


図２　生徒と教師の評価相関

３．主体的に学び活動するための感性評価

図１は、本システムの演算の過程を示したもので、λの値を適当に定めることによってファジィ積分値（感性評価値）を求めている。この例では、λの初期値-0.996、終値-0.916、きざみ0.02のときの感性評価の変化の様子を図示したものである。

本システムはもう一つの方法として、$g_\lambda(H_i)$の値を感性係数κを乗じた値$\kappa g_\lambda(i)$にして得られる式から数値解析することによって解を求め、最終的にκの値を前述と同様の方法で同定するようになっている。

図２はこのようにして求めた生徒の自己評価と教師の主観による評価との関係を示したものである。多くの場合、(1)生徒と教師の評価の間には相関関係がみられるが、(2)生徒の評価が教師の評価より高い場合と、(3)逆に低い場合の３通りのタイプに分類されることが判った。

これは、一種の子供の持つ感性の現れであると思われる。前述κの式でみると、

(イ)$1/\kappa < 1$、$\lambda\kappa < \lambda$の場合をとり、上の①、②及び(2)の場合であり、感性が楽天的であり、一つでも良いことがあればこれを評価する。

(ロ)$1/\kappa = 1$、$\lambda\kappa = \lambda$の場合で、上の③及び(1)の場合で、ファジィ積分値をとり中立、平均的。

(ハ)$1/\kappa > 1$、$\lambda\kappa > \lambda$の場合で、④、⑤及び(3)で自分に厳しく、謙虚。

などのタイプに分類できる。

教育現場では相対評価以上に教師の主観による評価は教師の実力による真剣勝負といった意味合いが強く、良くつけるのも悪くつけるのも大変に神経を使っている。実際、現場では成績の低い子につけるとき、または高い子につけるときに教師の主観のゆらぎも大きい。間違っているわけではなく、さまざまな別の要因を導入してきて、その評定にした裏付けを教師自身が行っているわけである。この点を本研究はファジィ理論を取り入れて論理的に解決しようと試みたわけである。

４．おわりに

本研究は感性評価を新しい学力観にともなう評価方法の一つとして提案したものである。というのは今日、教育の流れは大胆にいえば３割の成績優秀者よりも、５％の創造的能力を持つた人材を育成しようとしている。それとともに、一人ひとりの個性や意欲を認めようというものである。生徒各自が興味・関心に応じて意欲的に取り組み、友達同士、互いの活動や違いを理解し合う基盤をいかに作っていくかと言うことになる。

実践の結果、感性評価は生徒に優しく、励ます評価となるとなり、教師に対しては授業の方法、技術、考え方の反省を促すものとなっている。新しい学力観にともなう絶対評価の代替え案としての感性評価の有用性と共に、多少なりとも理論的根拠を示し得たのではないかと思われる。

＜参考文献＞

(1) 高萩：ファジィ積分による総合評価、第4回ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会、講演論文集(1994年)pp. 64

(2)宮武、三村、西沢、中島：新しい学力観にともなう評価システムとその実践、日本教育工学会、第11回全国大会（1995年）

(3)宮武：「新しい学力観にともなう情意面の評価について」（財）学習ソフトウェア情報研究センター「学習情報研究」（1995年12月）

(4)宮武、松田、三村、中島：情意面の評価に関するあいまい問題について（Ⅲ）、第１２回ﾌｧｼﾞｨ ｼｽﾃﾑ ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集(1996年)

FRD3-2

感性評価を用いた授業実践と生徒の変容（II）

空知教育工学実践研究会　滝川市立江陵中学校教諭　中島　洋一
法政大学工学部システム工学科　宮武　直樹

Abstract

The relative evaluation method that is done in a junior high school hold many problems so that order will touch a student by a grade of pass examination. So, we did a device to draw the recognition of inside of students. It uses for self evaluation of students and it 's done numerical value of teacher's heaviness account a class . I consider transfiguration of students on the basis of self evaluation composition for 1 year of students.

Key Word 感性評価、重み付け、Fuzzy積分、形成的評価

1，はじめに

今日の学校教育をめぐる様々な環境の変化は我々大人はもちろん子どもの意識の変化までも急速に影響を及ぼし始めている。特に教室で毎日続けられている教育実践のほとんどは依然として黒板とチョーク、最近では印刷機の改良により手軽にプリント資料が授業中に配布できるようになった。「ゆとり」ある教育を目指して出発した中教審であったが、実際の現場の様子からはゆとりはあまり見られず、多忙な教師、多忙な生徒のいる学校が数多く見られていることは残念と言わざるを得ない。

四季の移り変わりの美しい北海道に居ながら、果たして子ども達はどれくらい身の回りの自然を感じ、これを理解しようとしているのだろうかとふと思うことがある。教育は教科書に書かれていることを忠実に教え、これを試験によって確認していく営みのみではあるまい。子ども達の知的な好奇心に訴えることはもちろん、様々な感動を経験し、人の心がわかる教育こそ最も大切にされるべきものと思う。現在、中学校の9教科中5教科が公立高等学校の入学試験で実施され、その数値は合否判定の資料に使われる。このこと自体はなにも否定されるべきものではないと考える。しかし、その試験の準備は中学校における定期試験や実力試験であり、その評価もそのまま数値を用いてこれを相対評価法によって偏差値区別され、区別された者へ「評定」が与えられていく。評定は子どもの学習点として入試の個人調査書へ記入され、当日の学力点と併せて合否の際の重要な目安とされる。ここでは、子どもの評価を巡って基本的でとてもデリケートな問題を扱おうとしている。偏差値によって輪切りランク付けされた高等学校の進学に関する情報は誰でも簡単に入手できる。一般社会の過剰な反応が、当事者である中学生の心に「失敗してはけない」「間違ったことを言ってはいけない」という無言の圧力を与え、その反動として、多くの悲しむべきことが起こっている。当たり前のことであるが教育は学校にいる教員だけの責任で行われるものではない。地域・家庭の協力が必要であり、彼らの理想のもとで教員は教室の授業経営を行うのである。そこでは子どもの失敗や成功を暖かく見守る教育者がおり、彼らはいつも期待の中で育てられる。教師が理想を掲げ模範となる行動を子ども達の前に示すとき、彼らの興味や関心は高まり、授業への意欲を湧き起こらせるであろう。しかし、現実には多くの教師が理想を未来へ先送りし、目の前の現実へ対応を余儀なくされている。その子ども達もまた、数年後にやってくる進学をただ何となく上級学校へ行くのだというあやふやな意識のまま、とりあえず試験勉強するという姿勢になっていく。

入試科目にならない他の4教科では、子ども達は授業を息抜きと感じ、知識の詰め込みがいかに彼らを苦しめているかが伺える。何が教育にとって最も優先されるべき事柄なのかをもっと明らかにしていかなければ、悲劇はまだ続くであろう。教師と学校の意識を変えることが重要であり、そのためにはこれを取り巻く社会全体の意識の変革が必要である。本拙稿では、**感性評価**（注1）を用いた授業実践からスケッチされる子どもの変容を見つめつつ、学校教育の未来を展望し、これからの「人つくり」について学校教育の一つの指標となる提言を試みる。

2，評価の教育学的考察

教育的機能としての評価の省察には数多くの実践研究がある。もっとも注意しておかなければならないことは、『評価は自ら学ぶ（学習動機）ための必要不可欠な教育的手段である』という認識である。評価はカリキュラムに基づいて行われる活動であるから、教育課程の編成がもっとも重要になる。その中でも教育目標の設定は基本であろう。教育目標の領域についてはブルームによる次の三つの領域区分が有名である。

(1)**認知的領域**
(2)**情意的領域**
(3)**精神運動的領域**

このうち感性評価は(2)情意的領域を中心に(1)、(3)の領域にわたって行われるいわゆる形成的評価の一つと見ることができよう。ところでもう一つの評価である総括的評価は、現在、中学校においては指導要録に記載される5段階相対評定とＡＢＣ観点別評価であり、教師のできる限り客観的な観察による評価方法である。

従来、評価は教師が自らの行った教授活動の結果を知る上で行われることが多かった。しかし、今では授業を省みる間もなく試験による成績結果をそのまま評価として用いることが行われている。情意の側面が授業に影響を与えていることは誰もが認め得るものと思われるが、それがどのように知的な活動に影響を与えているのかについては全く解明されていない。従来の評価方法とは基本的に異なる感性評価は、現場の認識を得るために時間がかかるであろう。

例えば、評定で3という数値を与えられたとすると、この数値を言葉で言い直すように色々な子ども達に言うと、ある子は「普通に勉強できる」と答え、ある子は「まあまあよくできた」と答えている。学期末に担任教師から返される通信簿に記載された評定数値を子どもは様々な気持ちで見ていると言える。もしも、この評定方法を言葉による記述に変えたならどうなるであろう。指導教師の記述に対して、子どもは、喜んだり、驚いたりするのであろうか。そうした評定が現場において正しく機能していくかどうか今のところわからない。単元全体から毎日の授業まで明確な目標をあらかじめ子どもに示し得るかどうかは大きな問題点の一つと言えよう。このことは形成的評価がガニェ学派が示したように課題分析が中心となる、大目標の必要条件を満たす諸能力の記述を集める作業であることでも推察できる。今のところ多忙な現場においてこれらの指導の徹底は困難であるに違いない。

さて、もう一つの問題点は実践場面において子どもの変容を的確に示し得るかどうかである。そのためには個に応じた適切な指導目標が設定されなければならず、子どもの困難に対して対処療法的な仕事が優先されてばかりでは、根本的な指導効果をあげることは難しいであろう。子どもの活動状況を把握する上で重要なことは観察場面の選択と自己評価の活用である。適切な観察場面を選択した後、チェックリストや評定尺度法を用いるなど、できるだけ客観的な評価方法を用いるとなおよい。また、自己評価は記述させる内容を授業の観点別小目標と照らし合わせて作り、子ども自身の内面を見えるように工夫する必要がある。これらによって子どもの発達や成長を適切に把握したことになる。

感性評価はまさにこの場面に視点を当てた評価活動と言えるのではないだろうか。

3，指導場面における感性評価

感性評価が直接に生徒の通信簿や指導要録、個人調査書に記載されなくとも、これらを用いた実践によって子ども一人一人の能動的な態度や関心・意欲を引き出すことが可能であることを子どもの自己評価作文から推察する。以下は平成8年度滝川市立江陵中学校1年生の女子生徒の1年間の自己評価作文を追跡したものである。

中学1年生（Ｙ・Ｙ）女子

（上靴のデッサン）暗いところと（カゲ）がうまくいったと思う。あまり靴の形がくずれないように書けたのでよかったと思う。くつのひもは描くのが難しいと思ったけどぐちゃぐちゃにならなかったのでよかった。くつの位置がちょっと左によっていたのが少し残念だった。

（混色の技法）色の組み合わせがあまりうまくいかなかった。塗り方はよかったと思う。

（配色の技法）色の組み合わせがうまくいかなかった。違う色を塗ればよかった。

（グラデーション）色は自分の好きな色でできたし、思っていた色が塗れたのでよかったと思います。少しはみ出たので今度から気をつけたいと思います。

（１２色相環）あまりはみ出したりしなかったところがよかった。

（１点透視図法）少しはみ出したけど全体的によくできたと思います。色の組み合わせが好きな色でできてよかった。

（２点透視図法）少しはみ出した所が多かった。でもだいたいよくできたと思います。

（リズミカルな構成）いつもは水をつけすぎてちょっと変になっていたけど、今回はあまりつけすぎないで普通にできてよかったと思います。

（全体反省）私はすごく行動が遅くておしゃべりをしないでやるというのが最初の目標でした。でも美術の時間はほかの授業と違ってすごく自由な感じがして、やりやすくてとてもおもしろかったです。でも友達との話がだんだん美術から離れていって話すぎた日もあって、そこが私の反省点です。授業ではいろいろなことを学んだと思います。レタリングもおもしろかったし、グラデーションなど、今までわからなかったことをいっぱい知りました。私は一番最後にやった絵文字やピクトグラフがたくさんあったら楽しいだろうなと思いました。そして、あまり気に入らなかったのは夏休みにやったリズミカルな構成です。あれはそのまま原色を塗ってしまってすごく色のことで後悔しました。色の塗り方も色が好きじゃなかったのですごく雑になりました。だからすごく後悔していました。最初のころは美術はあまりやりたくありませんでした。でも今までずっとやってきてすごく楽しくやれたと思います。一枚一枚できていく作品を見るとまた何か描きたいと思うようになります。これからも自分の描いた作品をいい作品だと思えるようにがんばります。

（ステンシル）2/10最初は簡単にできそうに思ってたけど、いざやってみるとすごく難しくて思うようにできませんでした。すぐくずれてしまって結局最後は全部くずしてしまいました。2/17今回は前よりうまくできました。でもぐちゃぐちゃになったりしたけど最後まで楽しくできた。

（ステンシル最終）この絵は富良野です。どうして駅から富良野になったかと言うと駅というと田舎、田舎というとおじいちゃんおばあちゃんを思い出しました。おじいちゃんとおばあちゃんは富良野に住んでいました。そのころは私もとても小さくて幼稚園に入る前であまり記憶はありません

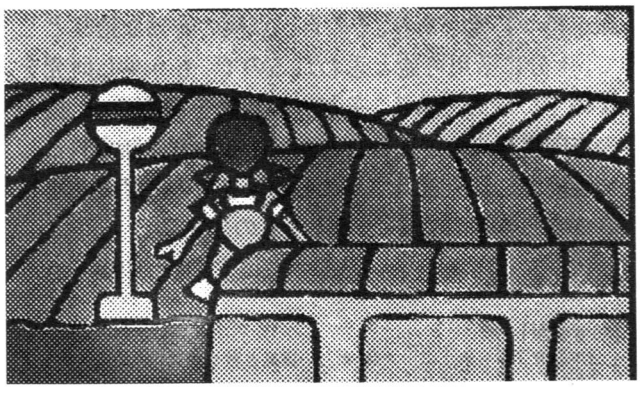
が、山奥ですごく広い畑があって道を歩くと砂利道で歩きにくかった思い出があります。そんな場所ももう行くことがないと思います。おじいちゃんが亡くなっておばあちゃんは今、旭川に住んでいます。小学生になって一度、いとこ達と昔住んでいたおじいちゃんの家に行ってみると、あのころお城のように大きく見えた家も今は普通の家にしか見えませんでした。その家は何かの物置になっていました。大きな畑も草がはえて何かが植えられていました。なんだかさみしかったけどこんな大自然に囲まれてその時はとても楽しかったです。本当に私はこの場所が好きでした。記憶はあまりないけど楽しかった思い出はあります。

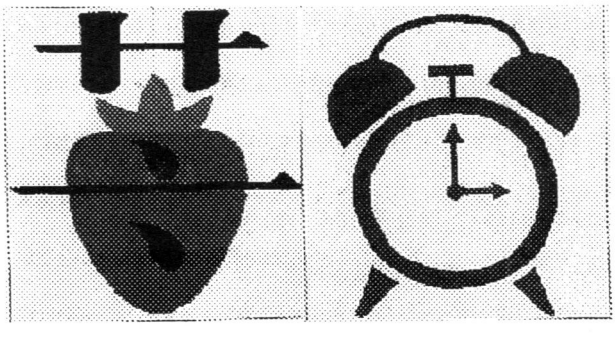
一つ一つ思い出して見ると涙が出てきそうなほど大好きです。だから私はこの絵を描きました。本当はこんなに大きくないけどまた行きたい、おじいちゃんとおばあちゃんと大自然の中で楽しい思い出を作りたいと思ったからです。本当はこんな所にいない私を想像で描きました。

最初、この絵を思いつくまではすごく時間がかかったしあまりやる気がしませんでした。でもこのイメージがふっと頭の中に浮かぶと手がスイスイ動いて時間がかからないでできました。こんな絵がかける時間があってとても嬉しいです。この文を書いていてもこんな富良野のことを思い出せたのもとても嬉しいです。

(学年末試験記述)

私はこの1年間で美術という時間が前より好きになりました。それはとても自由な時間だからです。とくにそう思ったのはステンシルです。テーマは駅だったけど、自分で自由に連想していってとても楽しかったです。小学生の時は作品をうまいか下手かというだけでしか見ていなかったけど、今はこの作品にどういう思いがこめられているかなど。違う方向から見ることができました。





図表3　生徒（Y．Y）の作品　ステンシル（上）、絵文字（左下）、ピクトグラフ（右下）

感性評価はこうした子ども自身の声を裏付ける記述方法である。子どもは自分に与えられた課題に対して、その時々の指導の影響によって主観的に授業内の小目標の軽重を決めていることがこの作文からも伺える。このように作文を毎時間書かせたことで(指導の初めには少し反発もあったかも知れないが)今では自分の気持ちをかなり正直に書くことができている。そして、この作文と同時に主観的に数値化をさせている。(図表1参照) この数値は生徒の主観による自己採点と教師の授業に対する重み付けとをFuzzy積分を用いて計算したものである。その結果、4月の6点から徐々に上がり、年明けの3ヶ月間はほぼ9点という評価を得ている。その原因としては、自己評価に見られる精神的な発達であり、もう一つは、教師がこれとは別につける相対評定が高いことがあるのではないかと推測するものである。なぜなら、相対評定が低い子どもの感性評価はしだいに低くなる傾向にあり、3程度の中間層の子ども達あまり大きな変動がないのである。(もっとも、作文にはどの子にも教科への期待と意欲が書かれており指導者として喜んだものである。研究者としてはいささか問題のある態度だが)

ただし、この点については客観的に、この感性評価を使った場合と相対評価を与えてから行う場合とでの比較データが不完全なため、そのように感じることだけにとどめておく。しかし、始めに断ったように、評価が生徒の学ぼうという意欲を阻害するのであれば行わない方が良いのだから、この点についての慎重な調査は今後続ける必要があると思われる。

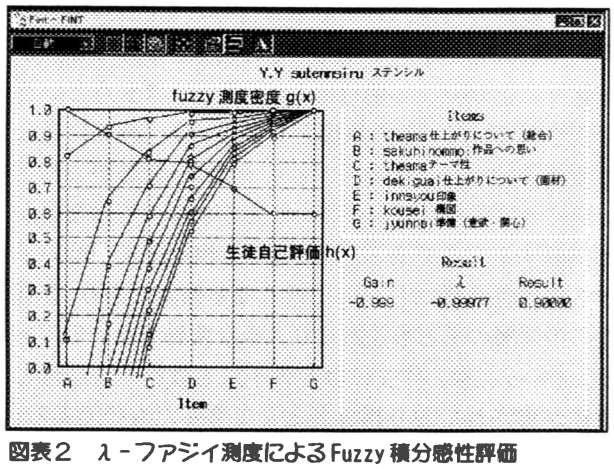
感性評価を集団で観察しこれを継続してみると、感性評価と生徒自身の自己評価の分散図は徐々に縮んで行く。このことは教師が生徒の適正にあった授業を行うようになるという側面と、生徒が自分なりの目標で自己評価を客観的に行えるように育つという側面の二つがあると思われる。これも、授業を客観的な他者の評価と照らし合わせて考察する必要があるが、生徒との人間関係が円滑に進んでいるかどうかを知る上での手がかりの一つとなり得るであろう。教師の努力に生徒が応えてくれていることはとても嬉しいことであるが、いつもそうなるとは限らない。自らの授業経営を厳しく律するにはこうした診断をすることも大切ではないだろうか。

注1「感性評価」は宮武・中島によって、学校教育における生徒の情意面に関する新しい評価方法として95年に美術科の授業実践結果を用いて発表した評価方法である。

注2 この理念は19世紀以来我が国の教育界、特に理科教育において導入されてきたが、子どもの感覚を無視し、事物事象の提示のみに留まったため、子どもの感覚を彼らの認識活動に位置づけることに失敗したとされる。

4月	上靴のデッサン	6	8月	リズミカルな構成	6
4月	混色の技法	7	9月	ピクトグラフ	9
5月	配色の技法	5	9月	絵文字	9
5月	グラデーション	8	10月	永字八法	8
6月	12色相環	8	10月	表紙レタリング	9
6月	1点透視図法	7	11月	ステンシル	9
7月	2点透視図法	7	1月	陶器制作	9

図表1　月別の美術科進度表と生徒の感性評価数値



図表2　λ－ファジイ測度によるFuzzy積分感性評価の数値とFuzzy演算グラフ（Y．Y）

4、子どもの認識と感性評価の課題

現場における教授活動の主要な側面として子どもの認識力を教師が適切にとらえていることがあげられる。これにもっとも成功したものに遠山氏の水道方式というものがある。これは人間の基本的思考様式を「複雑な現象世界から単純な素過程に分解した後に統合して理解の体系をなす」というものであり、現代数学の基本的な立場を継承したものとして知られる。それは現代数学を発展させたと言われるブルーバッキ学派によるところの三つの構造を持つものである。

(1)代数的構造
(2)順序的構造
(3)位相幾何学的構造

(1)は可逆性、結合性等の性質を持つ。(2)は線型順序系と半順序系の二つがあり、線型順序系の場合、自然数のように比較した時に順序があるもので、半順序系の場合、順序のつけられないものを含む集合を指す。(3)は遠近、開閉などの空間的質的な関係を重視する。これら三つの構造概念は現代の学校教育にも大きな影響を与えていると言えよう。例えば、教育現場で評価対象となり得る複雑な要素を教師の主観によって順序つけたり、数値化して結合するといった相対評価や教師の主観的な評価が多く行われたことは、この事柄ともよく符合し、記号化・序列化による評価方法は、人間の心を把握する具体的な方法がなかったことを物語るのである。これに対し、我々が提案している感性評価は子どもの内面における「感じ方」を直接に扱おうとしており、その点で(3)のようにトポロジカルな性質を持つものとも言えよう。また、授業それ自体を評価する点でも従来の学校現場における評価方法と異なっている。しかしながら代数的・順序的な性質は表れにくく、また数値による定量化は可能であっても、その検定方法は今後の課題となるであろう。

さて、ここで私は太田堯氏の「学力とは何か」の一節、『教師の採点評価の「科学化」「合理化」は、多くの教師達から能力や学力の内容を捉える努力を方法的に放棄させている。P127国土社』という言葉を思い出している。まさしく現代こそ多くの教師達が授業において何を子どもに教えてよいのかに戸惑う時代となっているのではないだろうか。学力についてはっきりとした理念を持ち、教壇に立つことのできる教師がどれほど多くいるであろう。

感性評価法はまだ産声を上げたばかりの新しい評価法であるが、その基本的理念は太田氏が昭和44年に書き記した精神と同じである。したがって、この科学的方法が現場の教師達から能力や学力の内容を捉える努力を方法的に奪うものであるならば即刻研究を中止しなければならないだろう。自己評価の側面だけを見つめるならば、かつて、子どもの科学的認識の発達に寄与した「生活綴方」教育に似ているし、教師の授業に対する主観的側面に留意すれば、ペスタロッチの直観教授の理念にも似ている。(注2)

いずれにせよ、今、教師自身が自らの授業に課題意識を持つ必要があり、その自己点検の有効な道具として、十分に活用可能と思われるので、もう少し研究を深めているのである。子どもの認識を高めつつ、授業の方向性を決めて進むことが可能な教育診断資料として現場でこれを試用することが今までの評価方法を見直すきっかけになると考えるものである。

（文責　中島　'97）

【参考文献】
全日本教育工学会新十津川大会「新しい授業と教材精選のためのメディアの活用について」平成5年10月；中島

全日本教育工学会石川大会「美術の授業におけるビデオカメラの使用とその効用について」平成6年10月；中島

日本教育情報学会誌「教育情報研究」第11巻3号p21「教育における情意面の評価とその実践」平成7年10月；宮武、中島

電子通信学会ET95-72「ファジィー積分による絶対評価について」平成7年10月；中島、宮武

全日本教育工学会兵庫大会「ビデオ映像を活用した英語科の授業実践について」同11月；中島

第6回ノンエンジニアリングファジィワークショップ「情意面に関するあいまい問題について（Ⅱ）」平成8年3月；中島、宮武

第12回国際ファジィシステムシンポジウム「情意面に関するあいまい問題について（Ⅲ）」同7月；中島、宮武

全日本教育工学会宮城大会「感性を評価するための授業実践について」同11月；中島、宮武

第7回ノンエンジニアリングファジィワークショップ「感性評価を用いた情意面の評価に関する実践研究」平成9年3月；中島、宮武

滝沢武久著「授業と認識」国土社p57学力評価の検討昭和34年10月

北海道教育研究所連盟「授業過程における評価」p11昭和57年4月

FRD3-3

ファジィ推論を応用した教育評価法Ⅲ

An Educational Evaluation Method Applying Fuzzy Reasoning Ⅲ

奥田　良治
Yoshiharu OKUDA
早稲田大学
Waseda University

箭内　顯彦
Akihiko YANAI
早稲田実業
Waseda-Jitsugyo H.S.

箭内 美智子
Michiko YANAI
淑徳高校
Syukutoku SR.H.S.

津田　栄
Ei TSUDA
国学院高校
Kokugakuin S_R.H.S.

稲井田 次郎
Jiro INAIDA
日本大学
Nihon University

山下　元
Hajime YAMASHITA
早稲田大学
Waseda University

Abstract : The inexact phenomena such as the mental process and cognition would effectively be analyzed by using fuzzy theory which is often applied to social science and human science, updatingly.

As the educational evaluation is liable to be subjectively decided, the fuzziness exists concerning it. In such a case, if we apply fuzzy reasoning, it could be done objectively. However, it is not so easy to execute fuzzy reasoning practically. Therefore, it is necessary to develop its supporting system.

In this paper, we would not only discuss our analysis method but also explain its supporting system.

1　はじめに

近年，学校教育の評価の中心は，相対評価から到達度評価へと移行しつつある．到達度評価では，評価の基準は教授者の主観的で直観的な判断によって定められることが多く，あいまいになりやすい．そこで，教授者の判断をファジィ集合や推論規則で表現し，ファジィ推論を用いて評価を行うことで，かなり客観的で構造的な評価が可能となる．しかし，実際の教育現場において多数の生徒の評価に，ファジィ推論を用いることは困難であるので，評価支援システムを利用すると非常に便利である．

本稿では，ファジィ推論を応用した教育評価方法を提案するとともに，実際の教育現場で効率よく評価を行うための評価支援システムについて述べる．

2　ファジィ推論を応用した教育評価方法

教育評価にファジィ推論を応用する場合，評価の手順は次のようになる．

(1)評価系列の構成
(2)評価基準と推論規則の作成
(3)評価基準に対するメンバーシップ関数の作成(評価値のファジィ集合による表現)
(4)事実の分析とファジィ推論の実行
(5)推論結果の評定

例えば，数学の成績評価をテスト，レポート，出席から評価する場合，「テストが80点，レポートが60点，出席が70点であるような学生の成績はどうなるか」を例にとり，(1)～(5)の手順を具体的に述べる．

(1)評価系列の構成

この場合の「E：成績評価」は，下位の評価要素「F_1:テスト」，「F_2:レポート」，「F_3:出席」から構成されるので，評価系列は図1のようになる．

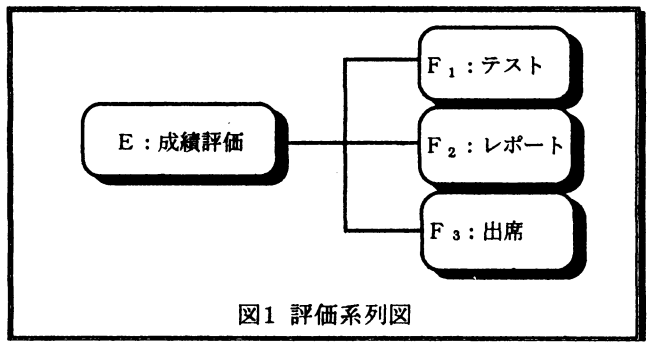


図1 評価系列図

これを評価関数φを用いて表せば，

$$E=\phi(F_1, F_2, F_3)$$

となる．したがって，評価関数に

$$\phi(F_1, F_2, F_3)=(F_1+F_2+F_3)/3 \quad \cdots(\text{相加平均})$$

を用いれば，

$$E_0=\phi(80, 60, 70)=(80+60+70)/3=70$$

となり，また，

$$\phi(F_1, F_2, F_3)=(0.6\cdot F_1+0.2\cdot F_2+0.2\cdot F_2) \quad \cdots(\text{加重平均})$$

を用いれば，

$E_0 = \phi(80, 60, 70) = (0.6 \cdot 80 + 0.2 \cdot 60 + 0.2 \cdot 70) \fallingdotseq 74$

となるが，本稿では，評価値$E_0 = \phi(80, 60, 70)$をマンダニのファジィ推論法により求める．

(2)評価基準と推論規則の作成

ここでは，E:成績評価を

A(優)，B(良)，C(可)，D(不可)

の4段階で，F_1:テスト，F_2:レポート，F_3:出席については，

A(テスト・レポート・出席の成績が良い)

B(テスト・レポート・出席の成績が普通)

C(テスト・レポート・出席の成績が悪い)

の3段階で評価を行う．また，推論規則は図2のように与えることにする．

	F_1	F_2	F_3		E
規則1 :	A,	A,	A	ならば	A(優)
2 :	A,	A,	B	ならば	A(優)
3 :	A,	A,	C	ならば	B(良)
4 :	A,	B,	A	ならば	A(優)
5 :	A,	B,	B	ならば	A(優)
6 :	A,	B,	C	ならば	B(良)
7 :	A,	C,	A	ならば	B(良)
8 :	A,	C,	B	ならば	B(良)
9 :	A,	C,	C	ならば	B(良)
10 :	B,	A,	A	ならば	A(優)
11 :	B,	A,	B	ならば	B(良)
12 :	B,	A,	C	ならば	C(可)
13 :	B,	B,	A	ならば	B(良)
14 :	B,	B,	B	ならば	B(良)
15 :	B,	B,	C	ならば	C(可)
16 :	B,	C,	A	ならば	C(可)
17 :	B,	C,	B	ならば	C(可)
18 :	B,	C,	C	ならば	C(可)
19 :	C,	A,	A	ならば	C(可)
20 :	C,	A,	B	ならば	C(可)
21 :	C,	A,	C	ならば	D(不)
22 :	C,	B,	A	ならば	C(可)
23 :	C,	B,	B	ならば	C(可)
24 :	C,	B,	C	ならば	D(不)
25 :	C,	C,	A	ならば	D(不)
26 :	C,	C,	B	ならば	D(不)
27 :	C,	C,	C	ならば	D(不)

図2 評価規則

(3)評価基準に対するメンバーシップ関数の作成

例えば，テストの評価値A(テストの成績が良い)などは，あいまいな表現である．このようなあいまいな表現をファジィ集合として表すために，それぞれの評価値に対するメンバーシップ関数を定める必要がある．この例題では，評価Eの評価値A, B, C, Dおよび，評価要素F_1, F_2, F_3の評価値A, B, Cのメンバーシップ関数を次のように定める．

$$E : \mu_A(y) = \begin{cases} \frac{20}{3}y - \frac{14}{3} & (0.7 \le y \le 0.85) \\ 1 & (0.85 \le y \le 1) \end{cases}$$

$$\mu_B(y) = 1 - \left| \frac{14}{3} - \frac{20}{3}y \right|$$

$$\mu_C(y) = 1 - \left| \frac{11}{3} - \frac{20}{3}y \right|$$

$$\mu_D(y) = \begin{cases} \frac{11}{3} - \frac{20}{3}y & (0.4 \le y \le 0.55) \\ 1 & (0 \le y \le 0.4) \end{cases}$$

$$F_1 : \mu_A(x_1) = 2x_1 - 1$$
$$\mu_B(x_1) = 1 - |1 - 2x_1|$$
$$\mu_C(x_1) = 1 - 2x_1$$

$$F_2 : \mu_A(x_2) = 2x_2 - 1$$
$$\mu_B(x_2) = 1 - |1 - 2x_2|$$
$$\mu_C(x_2) = 1 - 2x_2$$

$$F_3 : \mu_A(x_3) = 2x_3 - 1$$
$$\mu_B(x_3) = 1 - |1 - 2x_3|$$
$$\mu_C(x_3) = 1 - 2x_3$$

これは，ごく普通に使われる三角型のメンバーシップ関数である(図4)．

(4)事実の分析とファジィ推論の実行

事実(F_1:テストが 80点，F_2:レポートが 60 点，F_3:出席 が 70 点)から，マンダニのミニマックス法を用いると，図5のように推論される．ここで，推論の結果Uを重心法を用いて非ファジィ化すると，その代表値$Z_0 \fallingdotseq 0.81$(約81点)を得る．

(5)推論結果の評定

代表値が $Z_0 \fallingdotseq 0.81$(約81点) であることから，評価値E_0は

$$78 < E_0 = \phi(80, 60, 70) \fallingdotseq 81 < 85$$

となるので，この学生の成績はA^-(優)となり，順当な評価が得られたことが分かる．

3 評価支援システム

教授者の主観に左右されやすい教育評価に，ファジィ推論を応用することは有効であるが，実際の教育現場で多くの生徒の評価に，ファジィ推論を用いることは非常に困難である．そこで，実際の教育現場で，効率よく，評価を行うための支援システムを開発した．

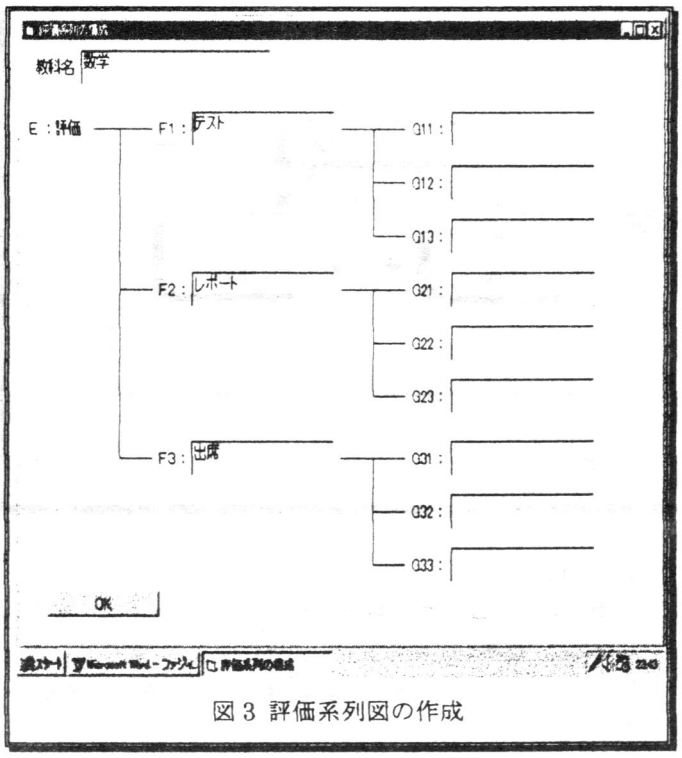


図 3 評価系列図の作成

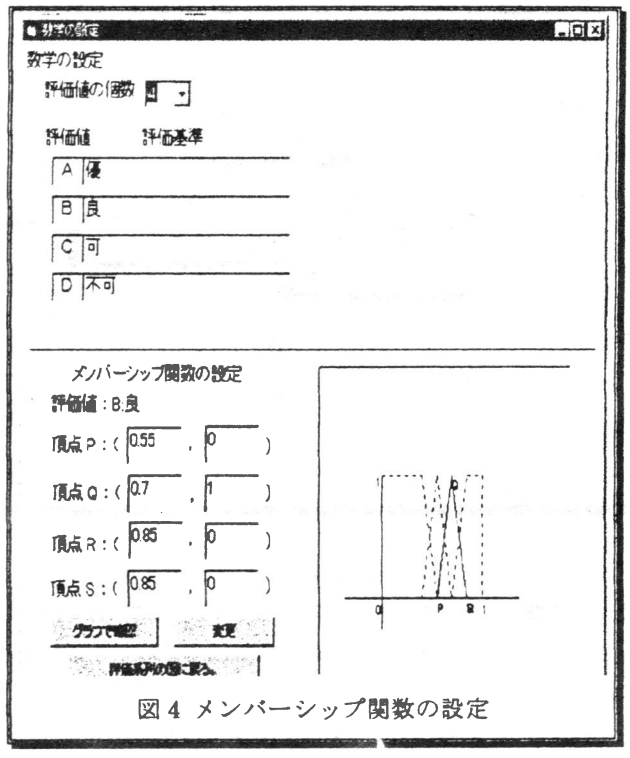


図 4 メンバーシップ関数の設定

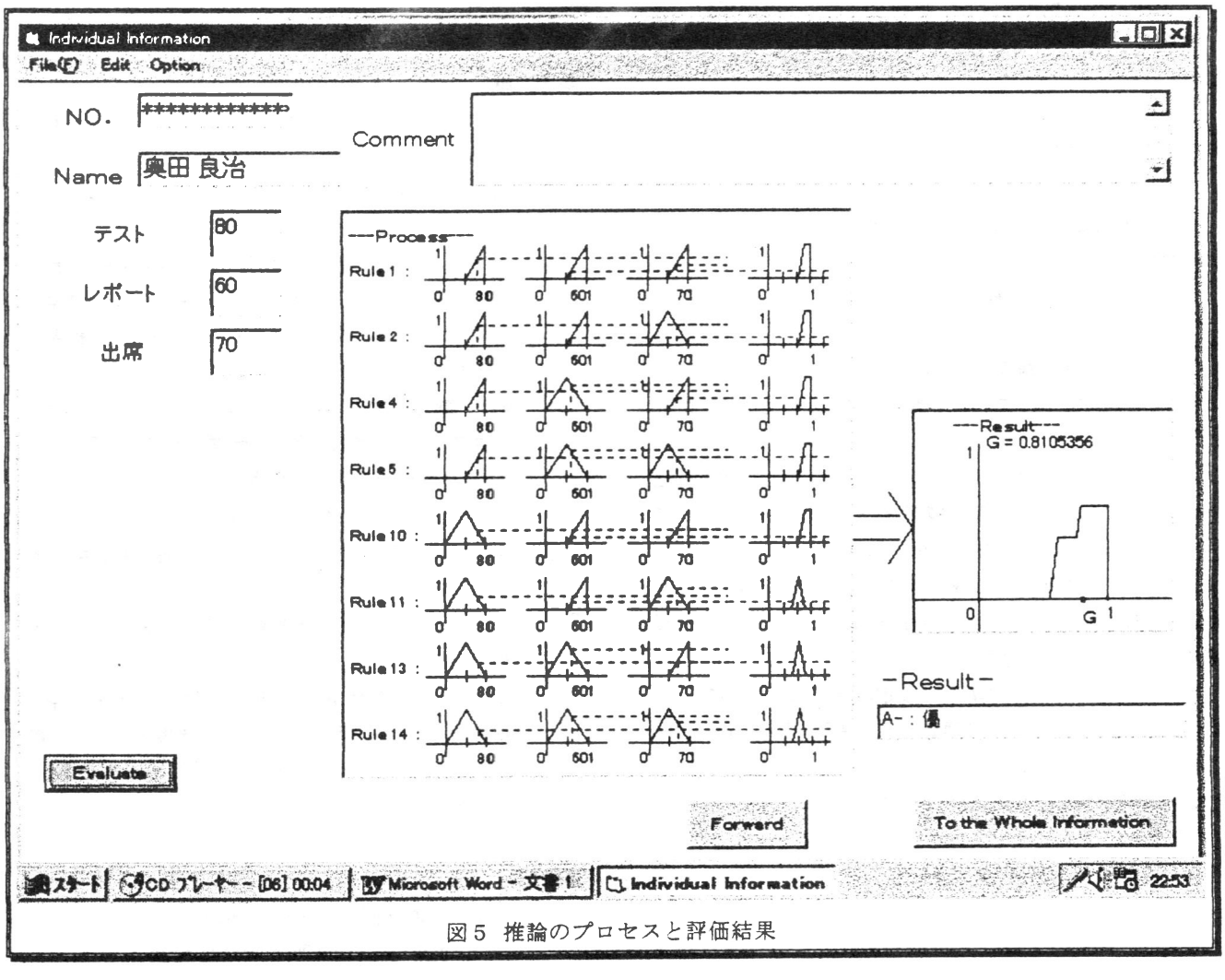


図 5 推論のプロセスと評価結果

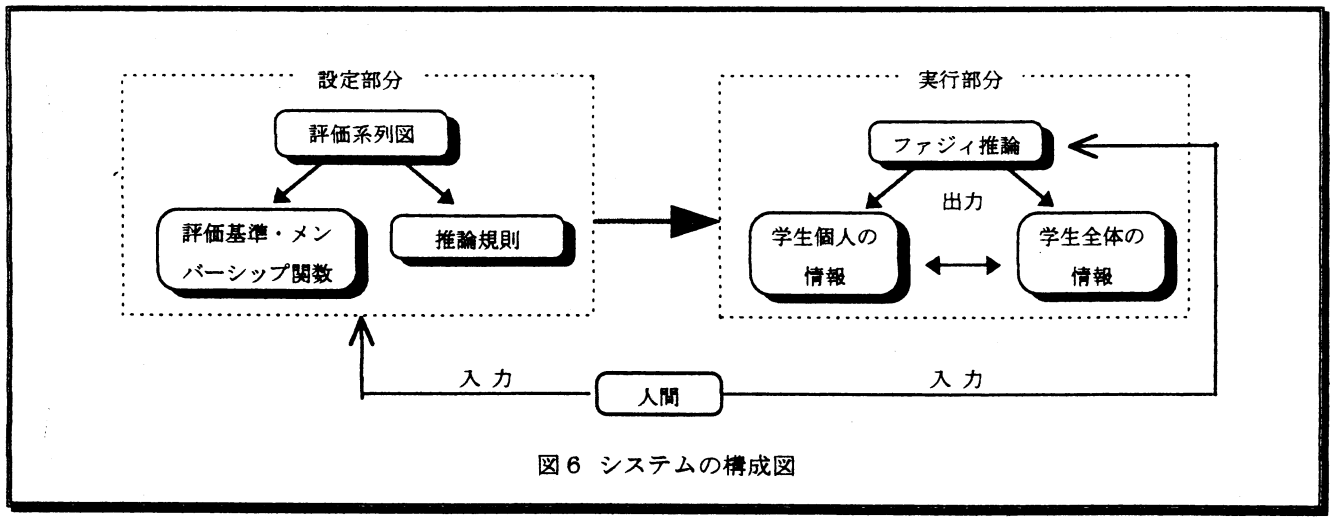


図6 システムの構成図

本システムは，実際の教育現場での利用を前提としているため，標準的なOSであるWindows 95, NT対応のアプリケーションソフトとして開発した．開発にはVisual Basic 4を用いた．

本システムは大きく分けて以下の2つの部分からなる．

(1)ファジィ推論を用いて評価を行うための設定部分

(2)ファジィ推論を実施し評価を決定する実行部分

さらに，(1)部分は，あらゆる教科の評価を行うことができるよう，

①評価系列図の作成と表示

②評価基準と評価基準に対するメンバーシップ関数の設定

③推論規則(評価規則)の設定

からなり，(2)部分は

①ファジィ推論の実行と評価の決定

②学生個人の情報の表示

③学生全体の情報の表示

からなる．よって，本システムの構成を図に示すと図6のようになる．

また，図 3, 4, 5 は，2. ファジィ推論を応用した教育評価方法で例にあげた数学の成績評価を，実際に本システムを用いて，評価したときの様子を表している．

図3は評価系列図の作成画面である．本システムでは，最大 2 階層までで，それぞれの評価要素に 3 つまでの下位要素を持たせることができる．

図 4 はメンバーシップ関数の設定画面である．ここで，扱うことのできるメンバーシップ関数は，三角型，あるいは，台形型のメンバーシップ関数で，三角形，あるいは，台形の頂点の座標を入力することで，設定される．

図 5 は，学生個人の情報を表示する画面で，推論のプロセスや評価結果などが，表示される．

4. おわりに

教授者の主観的で直観的な判断に左右されやすい教育評価には，数多くの「あいまいさ」が存在する．本稿では，このような「あいまいさ」をファジィ推論を利用して処理する方法とその支援システムについて述べた．

今後，マンダニ以外のファジィ推論法ではどうであるか，検討していきたい．

[参考文献]

[1] 水本 雅晴:ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988.

[2] 山下 元:教育学におけるあいまいさの取り扱い，日本ファジィ学会誌，4－6，1992.

[3] 山下 元，清水 誠一，奥田 良治，稲井田 次郎，箭内 顯彦，箭内 美智子，津田 栄:ファジィ理論を応用した評価システム(Ⅰ)～(Ⅱ)，電子情報通信学会技術研究報告 ET，1993～1997.

[4] 箭内 顯彦，箭内 美智子，清水 誠一，津田 栄，稲井田 次郎，奥田 良治，瀧澤 武信，山下 元:ファジィ推論を応用した教育評価法(Ⅰ)～(Ⅱ)，ファジィシステムシンポジウム，1994～1996.

[5] 洲之内 治男，山下 元:ファジィ情報分析，共立出版，1995.

[6] 山下 元:ファジィ教育情報科学，早稲田大学出版部，1995.

[7] 奥田 良治，箭内 顯彦，箭内 美智子，津田 栄，稲井田 次郎，山下 元:ファジィ理論を応用した教育評価法(Ⅰ)～(Ⅱ)，日本教育工学会大会論文集，1995～1996.

[連絡先]

〒169 東京都新宿区西早稲田 1－6－1

E-mail yamashit@mn.waseda.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRD4-1

ファジィグラフの特性解析システム III

Computer aided Analysis system of Fuzzy Graph

木藤智光 1), 駒形真樹 1), 富樫正彦 1), 土田賢省 1), 佐藤 章 1), 山下 元 2)
Tomomitsu KIDOH1),Masaki KOMAGATA1),Masahiko TOGASHI1),
Kensei TSUTIDA1),Akira SATOH1),Hajime YAMASHITA2)

1) 東洋大学 2) 早稲田大学
1)TOYO UNIVERSITY 2)WASEDA UNITERSITY

abstract

It should be important to represent a fuzzy graph as an approximate graph and clarify its relational structure. We propose a methodology to solve this problem through a computer aided analysis system, which we have developed. The system could analyze the problem easily, speedly and exactly.

But the system had some points to be desired. So, we have partially improved some performances of the system and inplemented on the workstation. In this paper, we describe the funcitons, performances and outline of the sysytem.

1 はじめに

人間の認識や行動に関する情報のように、あいまいさを含む情報は数多く存在する。心のはたらきや感性についての情報などはその典型と考えられる。このような情報は主観によるために、客観的に計測したり、解析したりすることは難しく、したがって、客観的な基準の確立や法則性を見つけることが困難である。そこで人間の判断、評価、心情、感性などに関する情報を定量的に取り扱えるファジィ理論を用いた分析方法が望まれる。

ファジィグラフを関連性や類似性などの観点から分析すると、その本質の抽出がかなり明確になる。そのような解析の過程では、必要とするパラメータを決めてそれを迅速に処理したり、またその結果を効率的に判断したりするための図式化が必要になる。そのために、コンピュータ支援によるシステムが有効と考えられ、ワークステーション上に分割樹形図とファジィグラフの近似表現に関するシステムを構築した。このシステムは、近似グラフの表示が円周上にノードを配置する表現形式をベースとするマンマシン処理によるものであるが、新たな観点から種々の表現方法を提案する。今回は関連構造分析と類似構造分析をその対 象として、幾つかの機能を付加したシステムを構築した

本報告では、システムの概要、付加した機能、性能ついて述べる。

2 特性解析システム

本システムはファジィグラフを用いた類似構造分析や関連構造分析をマンマシンによって解析するシステムであり、コンピュータ支援により効果的にファジィグラフの特性解析することを目的としている。

2.1 システムの機能

本システムは使用目的により、以下の機能が必要となる。ファジィグラフの解析は、試行錯誤に大きく依存する面がある。そのために、ユーザにとって理解し易く、かつ解析し易い処理および表示方法の実現、という観点から考慮したマンマシン処理としてある。

マンマシン処理の段階として、つぎの機能を設定した。類似構造分析、関連構造分析ともに共通する機能が(a)、(b)、(e)であり、(c)と(d)は個別の機能となっている。

(a) ファジィ行列の入力
(b) 入力誤り修正
(c) 類似構造分析、分割樹形図の作成と表示
(d) 関連構造分析、近似グラフの作成と表示
(e) マンマシンによるグラフ表現の修正

2.2 システムの構成

システムの構成は入力部、処理部、出力部の３つの部分から構成される。

(A) 入力部 ：画面の指定にしたがって、ファジィ行列をキーボードから入力し、入力間違いがあればそれを訂正する。正しいファジィ行列の入力後に、類似構造分析と関連構造分析のいずれかの処理を行う。

(B) 処理部 ：各アルゴリズムにしたがって、類似構造分析、関連構造分析に必要とする計算および再計算をそれぞれ行う。

ファジィ行列から、各々の係数の類似性を表現するために、分割樹形図を表示する。分割樹形図を作成するときのアルゴリズムは以下のようになる。

(a) ファジィ行列から、推移包(可達行列)を求める。
(b) クラスター分析の Rz、階層の段数を決める。
(c) 最初の段のノードの順番を決める。
(d)(b) で求めた Rz に従って、ノードをつなげる。
(e)Rz を構造化し、分割樹形図を出力する。

また、近似 N 値グラフを求めるアルゴリズムは以下の通りである。

(a)F の p グラフ Fp を求める。
(b)F と Fp の距離関数 d(p) を求める。
(c)F の表現関数 e(p) を求める。
(d)d(p) と e(p) から最適な p*を求める。
(e)F の近似 N 値グラフを作成し、基本となる形で図形を表示する。
(f) 表示されたファジィグラフを必要に応じて変形する。

ファジィグラフの近似計算を行うアルゴリズムは、近似N 値グラフ (N ≧ 3) を求めることが基本となる。近似3値グラフを求めるか、近似4値グラフを求めるか、などは N(N ≧ 3) の指定による。また、作成されたグラフの図形表現は必要に応じて修正することができる。

(C) 出力部 ：類似構造分析では、分割樹形図 (図1) を、関連構造分析ではファジィグラフを表示する。ファジィグラフが見にくい形である場合には、マンマシン処理によって、グラフの変形を行う。これらの変更は円周上に配置された、対となるノード番号を入れ換えすることによって行われる。また。解析を容易とするために後述する各種表示方法を提案している。

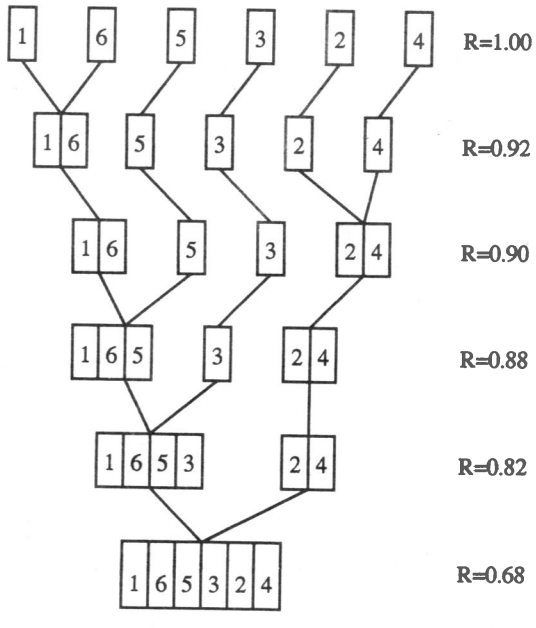


図 1: 分割樹形図

3 マンマシン処理方式

当初のシステムは誰にでも使えるという観点から、パソコン上で構築した。しかしユーザに対して提供できるグラフの変形処理および表現方法に限界があった。そこで、よりユーザに使い易いマンマシン処理を実現するためにワークステーション上にシステムを再構築し、システムの改良を行った。本システムは次のような性能、機能を備えている。今回付加した機能は (F)〜(K) である。

(A) 取り扱いノード数 ：ワークステーション上では X-Window を用いることにより、５０個程度まで可能となる。

(B) データの修正 ：入力したデータから近似グラフを表示し、表示した近似グラフのデータを修正して近似グラフを即座に表示できれば、ユーザにとってより使い易く、より容易に解析できる。

(C)N-1 色のカラーでエッジを表現 ：近似 N 値グラフのエッジを N-1 色のカラーで表現することにより、ファジィ関係の表現を色で認識することが可能となり、ファジィグラフを直観的に認識できる効果が期待される。

(D) 近似グラフの拡大 ・縮小 ：近似グラフ表示に拡大 ・縮小機能を付加することにより、ノード数やエッジ数の多い複雑なグラフに対して、個々の関係がより明確に理解できる。また、よりユーザの見易い大きさのグラフに表現できる。

(E) 近似グラフの特定表示 ：指定したノードに関するエッジのみを表示することにより、特定のノードに着目してファジィグラフを解析する効果が期待できる。(図2)

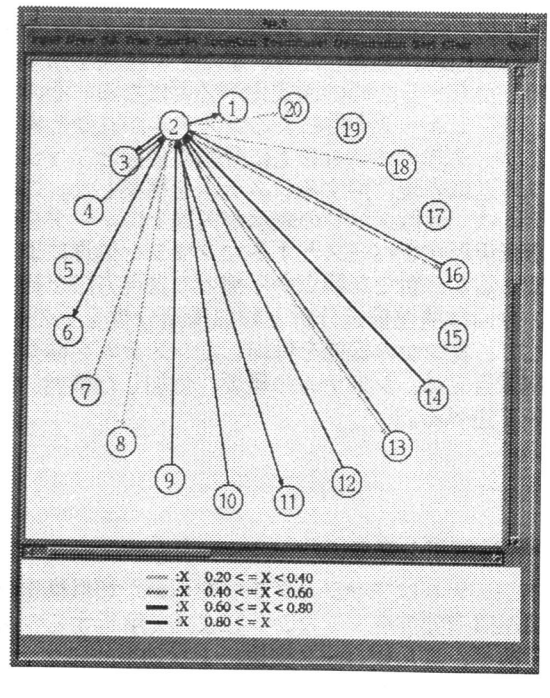


図 2: 特定表示

(F) エッジ交差数減少機能 ：エッジ同志の重なりへの対策として、エッジの交差する箇所の数を計算し、なるべくエッジの交差数が少なくなるような順序でノードを配置する機能である。これによりグラフ全体の構造をより容易に把握することができる。(図3、図4)

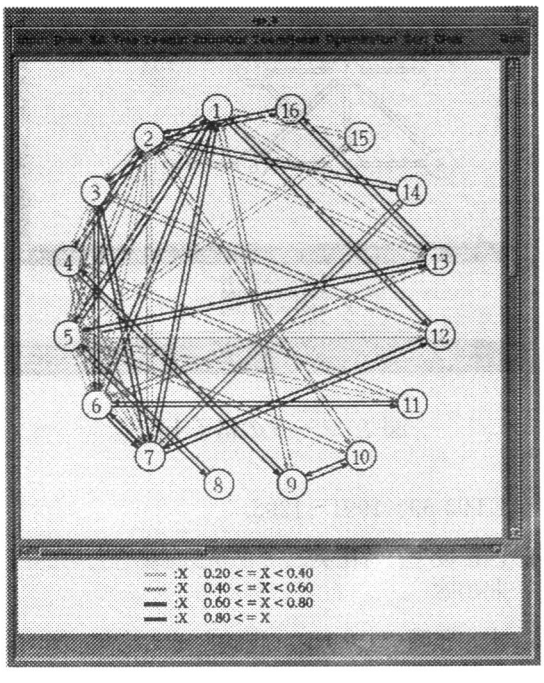


図 3: エッジ交差数減少前

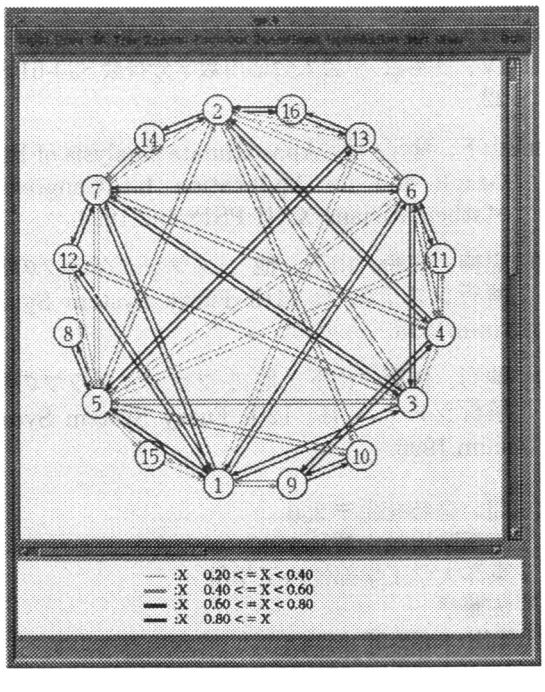


図 4: エッジ交差数減少後

(G) ノード位置変更機能 ：マウスのドラッグにより、ノードを自由に移動することができる。また、ドラッグ中に別のボタンを押すことで、ポインタの現在位置にノードが移動した場合のグラフの概形を表示することができる。

(H)c-カットグラフの表示機能 ：ユーザがしきい値 c を入力することで、関連度が c 未満のエッジをカットすることができる。これによって、単なる近似 N 値グラフよりの様々な分析が行える。

(I) クラスタ任意作成・削除機能 ：行列表示ウィジェットで指定することにより、任意にクラスタを作成したり、削除したりすることができる。これにより、1対1の関係だけでなく、1対多の関係もグラフに表すことができる。(図5)

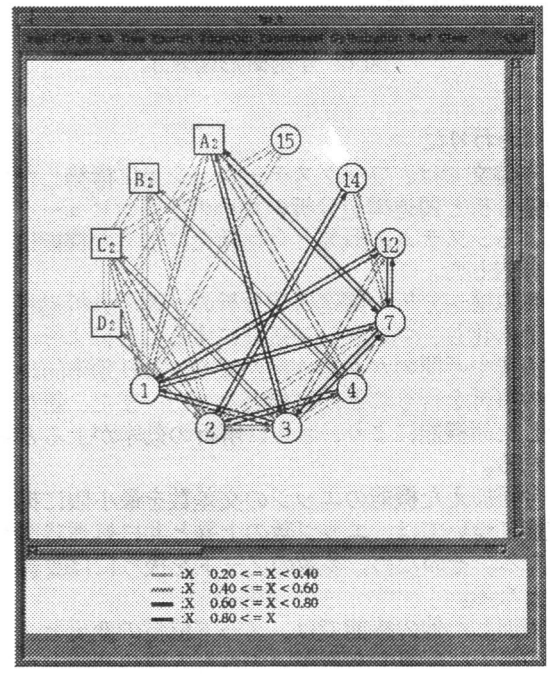


図 5: クラスタを含むグラフ表示

(J) 分割樹形図表示機能 ：メニューバー操作により、入力されたデータの各ノード間の類似度を分析し、分割樹形図を表示することができる。また、分割樹形図表示中に、指定値以上の類似度をもつノードからクラスタを作成することができる。この機能により、ノードの類似度が視覚的に表現でき、それを即座にグラフの分析に用いることができる。(図6)

(K) ノードの格子上配置 ：メニューバーの操作により、格子上にエッジを配置することができる。また、その際にエッジを全て表示するか、隣接するノードのみを表示するかを選択できる。(図7)

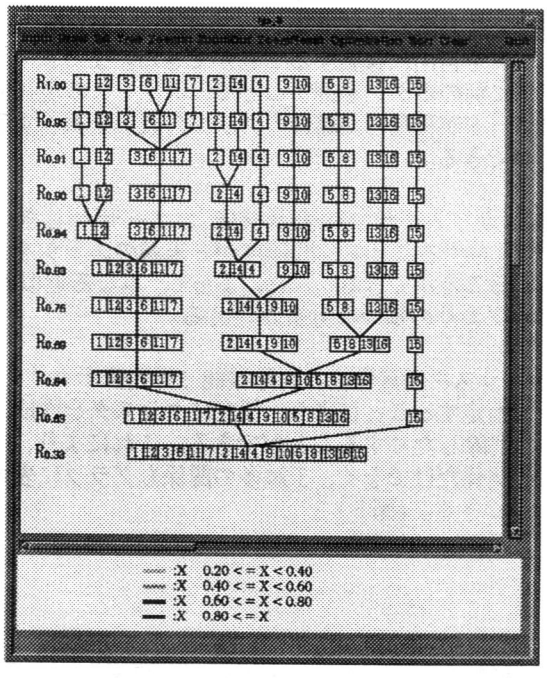


図 6: 分割樹形図表示

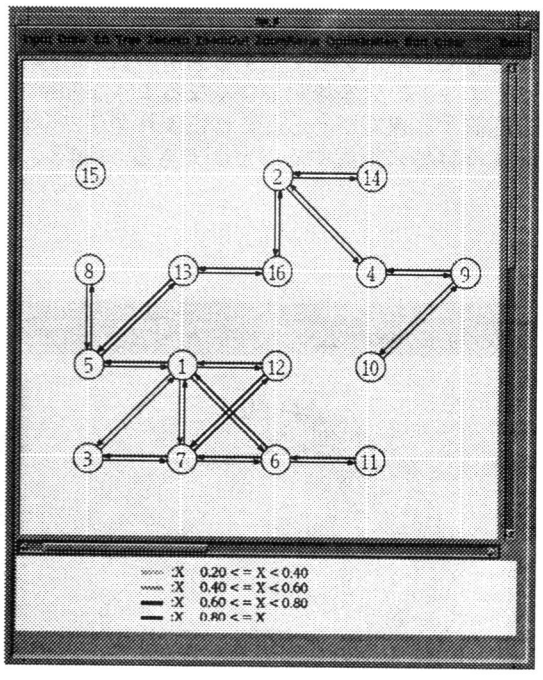


図 7: ノードの格子上配置

4 おわりに

本論文では、ワークステーション上に構築した類似構造分析と関連構造分析のための、コンピュータ支援によるシステムの概要と今回新たに加えた機能について報告した。

類似構造分析や関連構造分析の一連の分析過程をシステム化し、マンマシン処理にすることにより、時間の浪費や手間のかかる作業が減り、より効率的にグラフの解析を行うことが可能となった。また、新たに作成した諸機能により、さらに解析の効率が上ると考えられる。

今回加えた機能のエッジの交差数を最小限に抑える機能については、エッジ数の上昇と共に処理時間が長くなる。そのため、多数のノードを扱うには改善が必要となる。

追加した他の機能では、ノード位置の変更と、ノードの格子状配置であるがいずれも人間の認識力への依存が高く、複雑なグラフに対応することは難しい。

今後は、現システムの課題をふまえてさらなる機能の充実をはかり、より解析し易いシステムの構築を目指したい。また、類似構造分析、関連構造分析だけでなく、結合度分析、その他の分析機能を付加することによって充実したシステムにしたいと考えている。

5 参考文献

1. 山下元、佐藤章 ：ファジィグラフの近似表現と応用、ファジィシステムシンポジウム、1995.
2. 清水誠一、他 ：ファジィグラフを応用した教材構造分析I～III、ファジィシンポジウム、1990～1995.
3. 山下元 ：ファジィグラフの近似構造分析と応用I～II、電子情報通信学会技術研究報告 ET91-46、ET93-59、1991～1993.
4. 西田俊夫、竹田英二 ：ファジィ集合との応用、森北出版
5. 水本雅晴 ：ファジィ理論とその応用、サイエンス社
6. 山下、勝又、津田 ：ファジィグラフの解析と応用、日本数学会大会応用数学分科会 F89-13,1989.
7. 山下元 ：Approximation Algorithm of a Fuzzy Graph and its Application,Int'l Congress of Fuzzy System Association III p.492-295,1989.
8. 山下、滝沢：ファジィグラフの近似分析と応用I～IV、日本数 学会大会応用数学分科会 S90-01,S92-22,
9. 山下、滝沢、他：Approximate Analysis of Fuzzy Graph and its Application Int'lCongress of Mathematicians XXII PS18-102,1994.
10. 黒柳、佐藤、山下、他 ：ファジィグラフの特性解析システム I、11th Fuzzy System Symposium,1995.
11. 駒形、佐藤、山下、他 ：ファジィグラフの特性解析システム II、12th Fuzzy System Symposium,1996.

問い合わせ先〒350
埼玉県川越市鯨井2100
東洋大学工学部情報工学科
佐藤章
TEL 0492-39-1434
FAX 0492-33-9788
E-mail akira@eng.toyo.ac.jp

FRD4-2

ファジィグラフを応用した曲順の編集法 II

Editing a Smooth Playing Order Applying Fuzzy GraphII

浜中 雅俊
Masatoshi HAMANAKA
日本大学
Nihon University

稲井田 次郎
Jiro INAIDA
日本大学
Nihon University

箭内 顯彦
Akihiko YANAI
早稲田実業
Waseda-Jitugyo H.S.

箭内 美智子
Michiko YANAI
淑徳高校
Shukutoku SR.H.S.

奥田 良治
Yoshiharu OKUDA
早稲田大学
Waseda University

山下 元
Hajime YAMASHITA
早稲田大学
Waseda University

Abstract : Recently by accessing each music source randomly on CDs (Compact Discs) we can easily edit an order of music tracks. However it is very difficult to find a good flow of music sources that mean not only a good connection each other but also a good mixing in total.

In this paper we propose how to edit the order of music sources for the above them.

1．はじめに

数枚のCDから選んだ曲を適当な順で編集する際、曲と曲とのつながりが滑らかである曲順を探すことを考える。従来このような編集は何通りもの曲順を聴き比べる困難な作業であった。本稿では前後2つの曲で基本調や曲調が変化することによって生じる音楽メッセージに着目し、音楽理論に基づいて曲間の相性度をファジィ関係で表現することを試みた。多くの曲に曲順を付ける場合、その曲順におけるすべての曲間の相性度の最小値が最大となるものを選び出す。このような曲順は、基本調、曲調それぞれのつながりが滑らかとなる曲順である。

2．曲間の音楽メッセージ

我々の神経システムは、新しく入ってくる情報の同定過程を容易にしたり、速めたりするために以前の記憶から得られる情報を利用しようとする。音楽を聴く場合にも同様のことが行なわれる。我々の脳は、過去に貯えた音楽の情報と、現在聴いている音楽の情報とを比較、連想することにより、価値があると認められた情報だけを音楽メッセージとして受け取る（図1）。

曲を何曲か続けて聴く場合には、それぞれの楽曲の中での音楽メッセージだけでなく、曲間における音楽メッセージが問題となる。殊に、曲間においては音楽の情報が大きく変化するため、その曲順によって曲間における音楽メッセージが不快なものとなったり、逆に情緒的なものになったりする。したがって、曲間における音楽メッセージは、曲のつながりの滑らかさ、すなわち曲間の相性度を決めるものである。

曲間における音楽メッセージにとって重要な音楽情報には、前後2つの曲の基本調（keynote）、曲調（rhythm）、旋律(melody)など多くの要素が考えられる。

ここでは基本調、曲調の2つの要素における音楽メッセージに着目することにする。

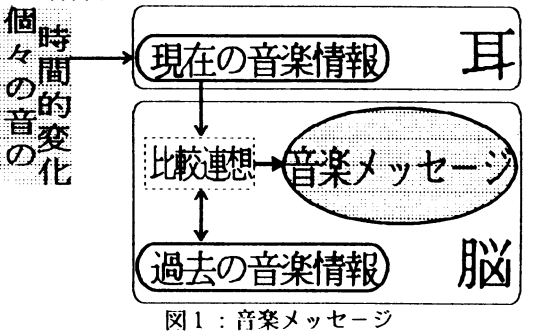


図1：音楽メッセージ

3．曲の基本調

音楽とは、リズムに整えられながら、さまざまな高さに移り変わっていく和音の運動である。和音は、楽曲の調性を作る働きをするものである。調性は、長音階を基礎とする長調（major chord)と，短音階を基礎とする短調(minor chord）とに大別される。それぞれ12個の基音(Tonic）を持つため、合計で24種類の調がある。楽曲は、その24個ある調のうち、いくつかの調の間の転調(Modulation)を繰り返すことにより作られている。我々が一般に聴く調性音楽においては、転調がいかに多く行なわれても、基本調に戻ることが原則であり、1つの楽曲には、ただ1つの基本調が定まっている。

24種類の調には、それぞれ調の基音(Tonic）から始まる音階(Scale）が定められている。音階とは、2つかそれ以

上の周波数が異なる音が発せられたとき、最も多数の和音の組み合わせを作り、最も不協和音となる組み合わせの少ない音のセットであると定義できる。

７音階（Diatonic Scale）はその調における主要三和音と深い関係があり、楽曲は７音階に含まれる音を中心に構成されているといえる（図２）。

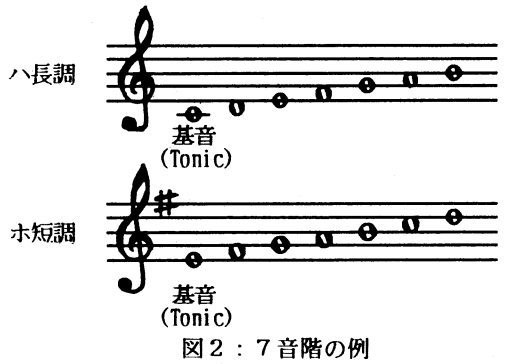


図２：７音階の例

したがって、基本調における７音階は、曲間の音楽メッセージ、すなわち曲間の滑らかさの相性を決める重要な要素である。

４．曲の曲調

音楽の性格つまり曲調を決定する最も重要な要素は曲のリズムである。我々が現在聴くことのできる大部分の音楽のリズムは拍節的リズムと呼ばれ、アクセントが一定の間隔を置いて整然と反復するものである。２つの曲をつなげて聴いたとき、曲調の変化の滑らかさは、このアクセントの間隔によって決まってくる。

ポピュラー音楽では、ドラムスなどのパーカッション（打楽器）により、パターン化されたリズムが刻まれるため、アクセントの間隔はビートおよびテンポにより決定される。ビートとは一小節が何個の音で刻まれているかを表したものである（図３）。

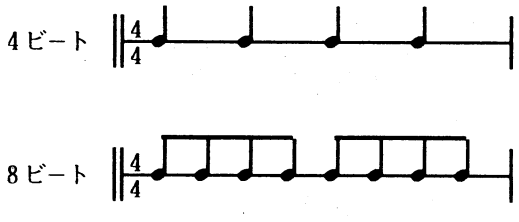


図３：曲のビートの例

また、テンポとは、楽曲の速度を表わすもので、通常一分間に４分音符が何個演奏されるかで表現される。

曲のアクセントの間隔を求めるためには、曲のビートと曲のテンポという２つの要素を同時に考える必要がある。しかし、一般に用いられている楽譜では、一小節の長さ（一小節演奏するのにかかる時間）は、テンポにより決まってくるので、異なるテンポの曲を同じ時間軸で比較することはできない。

そこでここでは、時間の長さを空間的距離に置き換える小節円表現という方法を考案することにより、曲のビートと曲のテンポという２つの要素を同じ時間軸で比較することを試みた。

５．曲調の小節円表現

①ビートの小節円表示

同じビートの小節が繰り返されることは、半径１の単位円（今後これを小節円と呼ぶ）を回転させることに置き換えて考えることができる。例えば４ビートでは、小節円の中に４つのアクセントを持ち、８ビートでは、８つのアクセントを持つ（図４）。

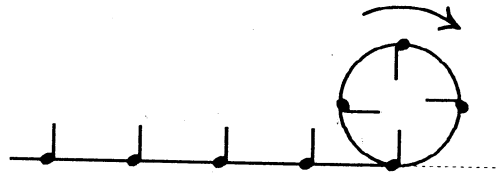


図４：４ビートの小節円表示

このように、曲のビートを小節円表示することにより、楽曲の進行という時間的な変化は小節円の回転という空間的な移動に置き換えることができる。

②テンポの円周表示

テンポｔで曲がすすむことは、小節円が一分間でｔ回転していることを表す。これは半径ｔの長さの円を小節円が一周することと同じである（図５）。

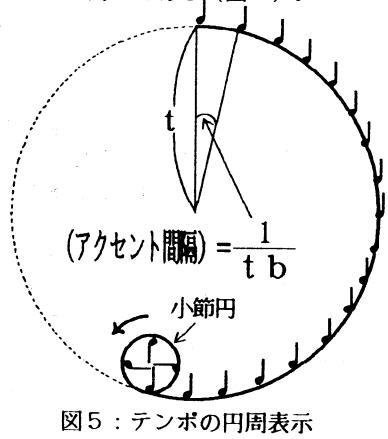


図５：テンポの円周表示

したがって、曲のアクセントの間隔は、円周表示された円の上の２つのアクセントの作る角の大きさすなわち次式で表わされる。

$$(\text{曲のアクセントの間隔}) = \frac{1}{tb} \quad [\text{rad.}] \qquad (5.1)$$

６．曲間の滑らかさ

平均律音階において、同種のすべての音程（たとえば５度、７度等）は、それらの構成要素のピッチ（音の高さ）を除くと全く同一である。つまり、ハ長調で演奏された調子は、ニ短調で演奏された調子と（カバーされたピッチ帯域を除いて）決して異なるものではない。我々の脳が１つの調子を音楽メッセージの大切な情報として判断し記憶するのは、ピッチの絶対値よりもむしろ一連のピッチの変化の流れのほうである。しかしながら、絶対的な音の高さは10秒から数分までの短時間の間は、あらゆる通常の人

（絶対音感のない人）にも記憶され得る。したがって、基本調による曲間の音楽メッセージは、“ピッチの絶対値”および“ピッチの変化”という記憶された２つの音楽情報と後の曲の音楽情報とを比較、連想することにより決まる。

また、曲調による曲間の音楽メッセージは、“アクセントの間隔”という記憶された音楽情報と後の曲の音楽情報とを比較、連想することにより決まる。

そして、前の曲の音楽情報と後の曲の音楽情報との違いが少ないほど曲間の音楽メッセージが自然なものとなり、曲間が滑らかにつながると考え、以下の条件を導びいた。

曲間が滑らかにつながる条件
１）基本調のピッチの絶対値によるもの
　後の曲の出だしの基本調の基音が前の曲の終りの基本調の７音階に含まれる場合曲が滑らかにつながる。
２）基本調のピッチの変化によるもの
　前の曲の終りの基本調の７音階と後の曲の出だしの基本調の７音階との共有する音が多ければ多いほどそのつながりが滑らかだと感じる。
３）アクセントの間隔によるもの
　前の曲のアクセントの間隔に挿入される後の曲のアクセントの個数の変化が少ないほどそのつながりが滑らかだと感じる。

７．曲の基本調と相性度

条件１および条件２は、調性の関係をグラフ化した“五度圏（circle of fifth)”によって表される（図６）。

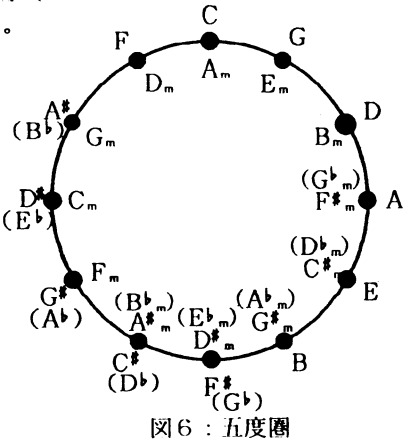


図６：五度圏

①　ピッチの絶対値による曲の相性度（条件１によるもの）

図において後の曲の基本調の基音が前の曲の基本調に共有されるのは、以下の場合である。

１）後の曲の基本調が長調の場合
　前の曲の基本調が後の曲の基本調から反時計回り方向に５つ離れた位置までと時計回り方向に１つ離れた位置までの範囲にあるとき。

２）後の曲の基本調が短調の場合
　前の曲の基本調が後の曲の基本調から反時計回り方向に２つ離れた位置までと時計回り方向に５つ離れた位置までの範囲にあるとき。

このことから、ピッチの絶対値による曲の相性度を以下のように定義する。

後の曲の基本調の基音が前の曲の基本調の７音階に共有される場合

（ピッチの絶対値による曲の相性度）＝１

後の曲の基本調の基音が前の曲の基本調の７音階に共有されない場合

（ピッチの絶対値による曲の相性度）＝０　　（７．１）

②　ピッチの変化による曲の相性度（条件２によるもの）

図において、同じ位置にある調との共有音は７音、１つ離れた位置にある調との共有音は６音、２つ離れた位置にある調との共有音は５音、３つ離れた位置にある調との共有音は４音、４つ離れた位置にある調との共有音は３音、５つおよび６つ離れた位置にある調との共有音は２音である。

このことから、ピッチの変化による曲の相性度は基本調の７音階の共有音の個数に比例すると考え以下のように定義する。

$$（ピッチの変化による曲の相性度）＝1-\frac{（非共有音）}{7}　（７．２）$$

③　基本調による曲間の相性度

（７．１）、（７．２）の代数積により２つの曲の基本調による相性度が求まると考え次式を定義する。

（２つの曲の基本調による相性度）
＝（ピッチの絶対値による曲の相性度）
×（ピッチの変化による曲の相性度）　（７．３）

８．曲の曲調と相性度

テンポ４t_1でb_1ビートの曲M_1から、テンポ４t_2でb_2ビートの曲M_2につながるとき式（５．１）より曲M_1の各アクセントの間隔に入る曲M_2のアクセントの数は、ｍ個またはｍ＋１個であるといえる（図７）。

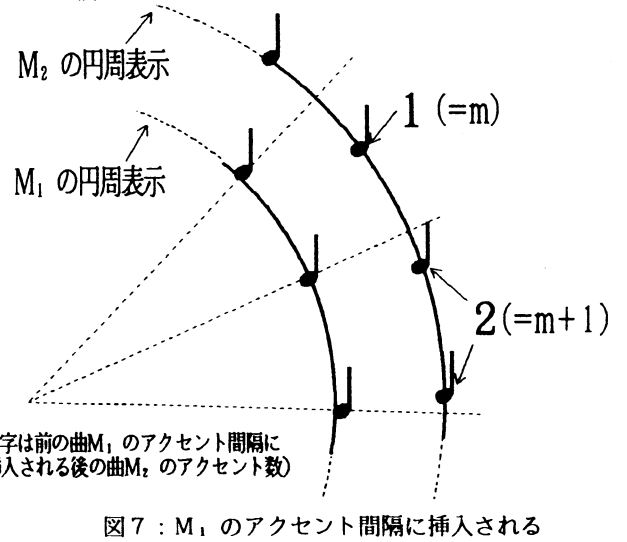


図７：M_1のアクセント間隔に挿入されるM_2のアクセント数

このときｍ個のアクセントが挿入されているアクセント間隔の数をｐ個、ｍ＋１個のアクセントが挿入されているアクセント間隔の数をｑ個とすると、曲M_1から曲M_2への曲調の変化の度合いは次式で与えられる。

$$（曲調の変化の度合い）＝\frac{Max(p,\ q)}{p+q}　（８．１）$$

式（８．１）をt_1、t_2、b_1、b_2を用いて表すことにより、２つの曲の曲調による相性度が求まると考え次式を定義する。

（２つの曲の曲調による相性度）

$$= \frac{2\mathrm{Max}\left\{t_2b_2-t_1b_1\left[\frac{t_2b_2}{t_1b_1}\right],\ t_1b_1\left(1+\left[\frac{t_2b_2}{t_1b_1}\right]\right)-t_2b_2\right\}}{t_1b_1} - 1 \qquad (８．２)$$

（［　］はガウス記号を表す。）

９．実行例

本稿では、次の５曲について曲間の基本調、曲調それぞれのつながりがよりよい曲順を選択した。

曲名（アーチスト名）	調	ﾃﾝﾎﾟ=4t	ﾋﾞｰﾄ=b
M_1:KICKIN'BACK (L.T.D.)	D	250	4
M_2:SATURDAY, SATURDAY NIGHT (ZOOM)	G	129	8
M_3:IN MY HOUSE (MARY JANE GIRLS)	E♭m	117	8
M_4:STOMP! (THE BROTHERS JHONSON)	Gm	120	16
M_5:CAN'T LIVE WITHOUT YOUR LOVE (TAMIKO JONES)	Cm	113	16

各曲の間の基本調による相性度と曲調による相性度をファジィグラフで表示すると次のようになる（図８、図９）。

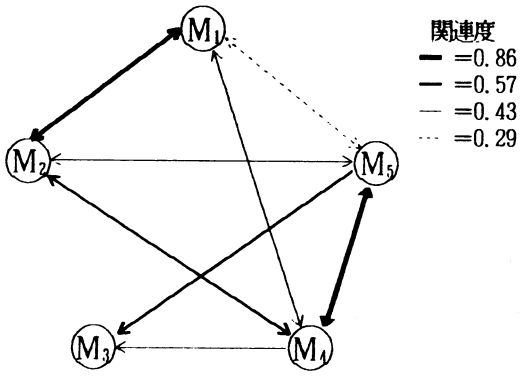


図８：基本調による相性度のファジィグラフ

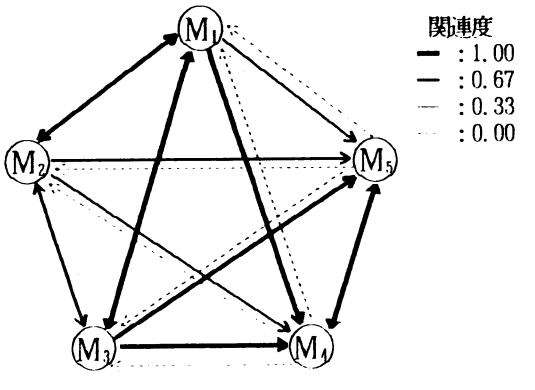


図９：曲調による相性度の近似４値グラフ

これらの曲M_1～M_5におけるよりよい曲順は、それぞれのファジィグラフにおける長さ４の全域歩道のうち、４つの関連度の最小値が最大である経路で表せる。

４つの関連度の最小値が最大である経路をベイシック（Visual Basic4）でプログラムを組み求めたところ、５秒足らずで以下の結果が得られた。

基本調のつながりが滑らかな曲順

$M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5 \rightarrow M_3$

（連結度＝0.57）

曲調のつながりが滑らかな曲順

$M_2 \rightarrow M_1 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5$

（連結度＝0.84）

実際に何人かの音楽愛好家に聴いてもらったところ、曲間の基本調、曲調それぞれのつながりが滑らかであるとの感想が多かった。

10．おわりに

本稿では、曲間において基本調と曲調とが滑らかにつながる曲順を２つの相性度よりそれぞれ選択した。今後、２つの相性度が同時に良くなるような曲順を選択したい。

また、ここで選ばれた曲順は、前の曲の音楽情報と後の曲の音楽情報との違いが少なく、曲間の音楽メッセージが自然となるものである。しかし、曲間が滑らかにつながる曲順が最適の曲順とは限らない。曲中の音楽メッセージは曲の豊かさを決めるものである。したがって、前後の曲の音楽情報の変化の度合いをうまく調節し、曲間の音楽メッセージに起伏をもたせることができれば、曲順全体の流れを豊かにすることができるであろう。今後、曲順に起承転結をつけるなど曲順全体の流れについても調べていく必要がある。

[参考文献]

[１] 浜中雅俊，稲井田次郎他：ファジィグラフを応用した曲順の編集法，ファジィシステムシンポジウム，THF4-2，1996.

[２] 浜中雅俊，箭内顯彦他：ファジィ理論を応用した曲順の設定法，日本行動計量学会大会，S3-4，1996.

[３] 浜中雅俊，奥田良治他：ファジィ理論を応用した音曲の系列分析，日本教育工学会大会，I2a2D4，1996.

[４] Meyer, L: Emotion and Meaning in Music, Chicago, 1956.

[５] Roderer, J: Intoroduction to the Physics and psychophysics of Music, Springer, 1979.

[６] 洲之内　治男、山下　元：ファジィ情報分析、共立出版、1995.

[７] 山下　元：ファジィ教育情報科学、早稲田大学出版部、1995.

[８] 石桁　真礼生、他：楽典―理論と実習―、音楽之友社、1965.

[９] 山懸　茂太郎：新訂　音楽通論、音楽之友社、1958.

連絡先：

日本大学理工学部　精密機械工学科　　浜中　雅俊

〒157 東京都世田谷区祖師谷５丁目３番１３号

☎　03-3483-3170

FRD4-3

ファジィグラフを応用した教材構造分析Ⅳ

INSTRUCTION & COGNITION ANALYSIS APPLYING FUZZY GRAPH

津田 栄 El Tsuda
箭内 美智子 Michiko Yanai
箭内 顯彦 Akihiko Yanai
稲井田 次郎 Jiro Inaida

国学院高校 Kokugakuin Sr.H.S.
淑徳高校 Shukutoku Sr.H.S.
早稲田実業高校 Waseda-Jitsugyo H.S.
日本大学 Nihon University

瀧澤 武信 Takenobu Takizawa
奥田 良治 Yoshiharu Okuda
山下 元 Hajime Yamashita

早稲田大学 Waseda University
早稲田大学 Waseda University
早稲田大学 Waseda University

The inexact phenomena concerning human behavior, mental processes and cognition are reasonably represented as fuzzy graphs. In order to clarify the global features of such fuzzy information, we analyze them from the similarity and connectivity points of view.

We recently developed an analytical method concerning the cognitive structure of a subject by applying fuzzy graphs and fuzzy shapley value, which enables us to verify and /or modify instruction programs based on the test data.

In this paper, we discuss the theoretical explanations of the analysis method and illustrate its instructional effectiveness through a case study in mathematics.

はじめに

教材項目の教授順序が適切であるかどうかを確認するために，「テスト結果を分析し，教材概念の類似性や関連性を調べることによって，項目をグループ分けし，さらに適切な順番に並べる。」といったことを筆者等は提案してきた。一方，ゲーム理論では，各プレイヤーのもつ重要度をシャプレイ値で表しているが，これを用いると人間関係や連立政権の力関係などを明瞭に説明することができる。本稿では，ファジィグラフにシャプレイ値を導入し，その簡単な求め方，および，それを応用した教材項目の重要度の分析方法を提案するとともに，事例研究を通じてその効用について報告する。

1．ファジィグラフ上のシャプレイ値

プレイヤーの集合N＝｛1，2，3，…，n｝の部分集合Sの提携の価値v(S)は次のように定義できる。

定義1．1

$$v(S)=\begin{cases} 0 & (|S|=0,\ 1) \\ v(i,j)\in R & (S=\{i,\ j\}) \\ \sum_{k<l} v(k,\ l) & (|S|\geqq 3, \forall k,l\in S) \end{cases}$$

このとき，提携ゲームの全体は，対称グラフ $A=(a_{ij})$，$v(i,j)=a_{ij}=a_{ji}$ により定義される。また，$v(S)$は優加法性をみたす。

補題1．1　$A\cap B=\phi$のとき，

$$v(A\cup B)\geqq v(A)+v(B)$$

ファジィシャプレイ値$\phi(i)$は，シャプレイの定理を拡張して,次のように定義される。

定義1．2

$$\phi(i)=\frac{\sum_{r}[v(S_i\cup\{i\})-v(S_i)]}{v(N)|N|!}$$

ここで，rはN上で定義される相異なる$|N|!$個の順列すべてにわたるものとし，S_iは順列rにおいて,iに先行するプレイヤーの集合を表すものとする。さらに,定義1.1をみたすゲームのシャプレイ値は次の性質をもつ。

定理1．1

(Ⅰ) $\phi(i)=\Sigma a_{ij}/\Sigma\Sigma a_{ij}$

(Ⅱ) $\phi(i)=P(i)/\Sigma P(k)$
$(P(i)=v(N)-v(N-\{i\}))$

(Ⅲ) $\Sigma\phi(i)=1$

(Ⅳ) $0\leqq\phi(i)\leqq 1/2$

(Ⅰ)は,$\phi(i)$が行列 $A=(a_{ij})$から計算できることを示し，(Ⅱ)は，$\phi(i)$が$P(i)$によって，特徴づけられることを示している。また，(Ⅲ)は、$\phi(i)$の定義から明らかであり，(Ⅳ)は$\phi(i)$の最大値が1/2であることを示している。

2. ファジィ構造グラフ

n人の学習者$\{S_k:1\leqq k\leqq n\}$にm項目のテスト$\{P_i:1\leqq i\leqq m\}$を行うと，テストの得点行列$X=(x_{ki})$が得られる。ただし，S_kがP_iを正答した場合は$x_{ki}=1$，誤答した場合は$x_{ki}=0$とする。

次に，得点行列Xから項目の応答パターンを集計すると，図2.1のクロス集計表ができる。

項目P_iとP_jが等質であれば，クロス集計表で，bとcの値は相対的に小さいので，$(a+d)/n$の値は1に近く，異質であれば,その値は0に近い。この視点から，P_iとP_jのファジィ類似係数s_{ij}が定義される。

P_i \ P_j	1	0	合計
1	a	b	a+b
0	c	d	c+d
合計	a+c	b+d	n

図2.1　クロス集計表

定義2．1　ファジィ類似係数s_{ij}

$$s_{ij}=\frac{a+d}{n}\in[0,1]$$

類似係数s_{ij}から，ファジィ類似構造グラフ(行列)$S=(s_{ij})$，$s_{ij}=s_{ji}$が作成でき，これからファジィシャプレイ値が求められる。

また，P_iがP_jの前提項目であれば，クロス集計表で，cの値は相対的に小さいので，$a/(a+c)$と$d/(c+d)$の値は，ともに，1に近い。この視点から，P_iからP_jへのファジィ関連係数f_{ij}が定義される。

定義2．2　ファジィ関連係数f_{ij}

$$f_{ij}=\frac{\lambda a}{a+c}+\frac{\mu d}{c+d}\in[0,1]$$

ただし，$a+c\neq 0$，$c+d\neq 0$，$\lambda+\mu=1$，$0\leqq\lambda,\mu\leqq 1$，とする。

ここで，応答者数の加重平均を考えて，

$$\lambda=\frac{a+c}{(a+c)+(c+d)}$$

とすると，津田のファジィ関連係数t_{ij}となる。

定義2．3　ファジィ関連係数t_{ij}

$$t_{ij}=\frac{a+d}{(a+c)+(c+d)}\in[0,1]$$

ただし，$a=c=d=0$のときは，$t_{ij}=1$とする。

関連係数t_{ij}から,ファジィ関連構造グラフ(行列)$T=(t_{ij})$ができる。

ファジィ類似構造行列Sをクラスター分析すると分割樹形図Pができる。これから，項目の類似性に関するクラスターの分岐状態がわかり，項目の類別ができる。また，ファジィ類似構造行列Sからファジィシャプレイ値を求めると，項目の重要性が分析できる。

また，ファジィ関連構造行列T＝(t_{ij})を近似構造分析すると，近似三値グラフT*ができる。これから，項目の順序性に関するクリスプ/ファジィな関連状態がわかり，項目の順序づけができる。

項目の類似構造を表す分割樹形図Pと，関連構造を表す近似三値グラフT*を総合すると，認知構造グラフ$\psi^z(z=z_0)$ができる。さらに，ファジィシャプレイ値の大きさで，項目を強調すると，学習者の認知構造がわかる。

3. 教材構造分析への適用

ファジィシャプレイ値を応用した教材構造分析として，高校数学の「順列の数」についての適用事例を述べよう。

「順列」の教材構造は，

(ア) 基本型，(イ) 円卓型，(ウ) 数珠型

および

(A) 単純順列，(B) 重複順列

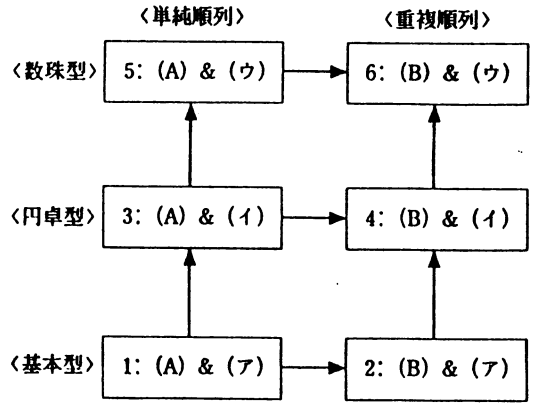


図3．1　教材構造グラフI

（1） SPRITEの基本順列の数を求めよ.
（2） COFFEEの基本順列の数を求めよ.
（3） SPRITEの円卓順列の数を求めよ.
（4） COFFEEの円卓順列の数を求めよ.
（5） SPRITEの数珠順列の数を求めよ.
（6） COFFEEの数珠順列の数を求めよ.

図3．2　テスト問題

などの特性により分類される。これから，その教材構造として，図3．1の教材構造グラフIができる。

教材構造グラフIに基づいて「順列」の授業を行い，40名の学習者に図3．2のテストを行った結果，得点行列Xが得られた。

得点行列Xから，図3．3のファジィ類似構造行列Sができる。また，Sをクラスター分析すると，図3．4の分割樹形図Pができる。

						$\phi(1)$
0	0.95	1.00	0.75	0.98	0.40	0.18
0.95	0	0.95	0.80	0.93	0.45	0.18
1.00	0.95	0	0.75	0.98	0.40	0.18
0.75	0.80	0.75	0	0.73	0.65	0.17
0.98	0.93	0.98	0.73	0	0.43	0.18
0.40	0.45	0.40	0.65	0.43	0	0.11

図3．3　ファジィ類似構造行列S

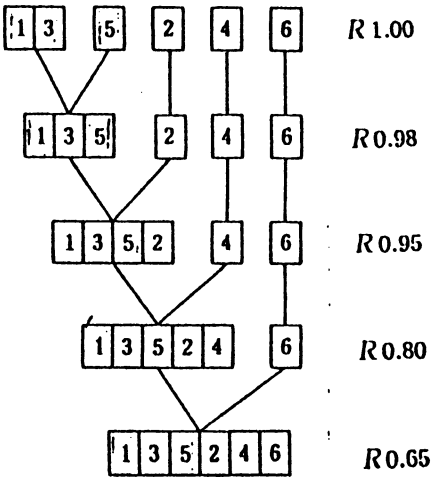


図3．4　分割樹形図P

得点行列Xから，図3．5のファジィ関連構造行列Tができる。また，Tを近似構造分析すると，図3．6の近似三値グラフT*（p*＝0.09）ができる。

次に，分割樹形図Pと近似三値グラフTを総合し，ファジィシャプレイ値の大きい項目1と3を強調すると，図3．7の認知構造グラフψ^z（z＝0.98）ができる。

1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.90	1	0.90	1.00	0.90	1.00
1.00	1.00	1	1.00	1.00	1.00
0.60	0.67	0.60	1	0.59	1.00
0.95	0.95	0.95	0.94	1	1.00
0.25	0.29	0.25	0.48	0.27	1

図3．5　ファジィ関連行列T

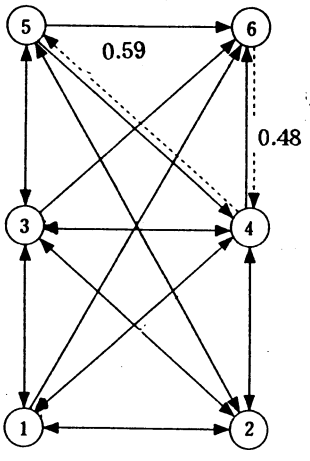


図3．6
近似三値グラフT*

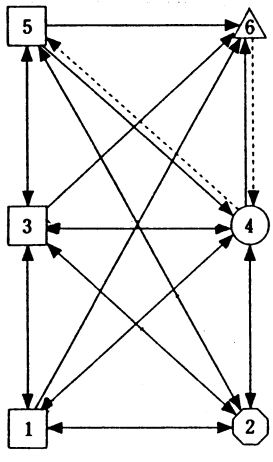


図3．7
認知構造グラフψ^z

これらの結果から，次のことが考察される。

(1)　クラスター{1, 3, 5}があることから，(A)｜(B)は，(ア)｜(イ)｜(ウ)より強い性質であることが判断される。

(2)　1，3，5のファジィシャプレイ値の和は，2，4，6のファジィシャプレイ値の和よりも大きいことから，{1, 3, 5}の重要性が検証される。

(3)　グラフψ^zに，弧1→2，3→4，5→6があることから，順序(A)→(B)が検証される。また，1→3→5，2→4→6があることから，順序(ア)→(イ)→(ウ)が検証される。

(4)　1，2，3，5のシャプレイ値が他より大きいことから，それらは重要な教材項目で，4，6は発展項目であることが顕出される。

おわりに

ファジィシャプレイ値を応用した教材構造分析は，教材概念の重要性を明らかにする新しい方法であり，この分析により，学習課題の中心項目や教材系列を，検証，または，改善することができる。

なお，適用事例としては，数学を題材として説明したが，任意の教科，教材に関しても，この分析法を適用することができる。また，ファジィシャプレイ値は，ソシオメトリー分析，意識調査などにも広く応用できる。

[参考文献]

1. 西田，竹田：ファジィ集合とその応用，森北出版，1978.
2. 津田，瀧澤，山下，他：ファジィ理論を応用した教材構造分析Ⅰ~Ⅷ，日本教育工学会大会，1986~1995.
3. 山下，稲井田，瀧澤：ファジィグラフの近似分析と応用，日本数学会大会，1990~1996.
4. R．オーマン，丸山，立石：ゲーム論の基礎，勁草書房，1991.
5. 鈴木：新ゲーム理論，勁草書房，1994.
6. 洲之内，山下：ファジィ情報分析，共立出版，1995.
7. 山下：ファジィ教育情報科学，早稲田大学出版部，1995.
8. 津田，山下，箭内顕，箭内美，稲井田，奥田：ファジィグラフのシャプレイ値分析と応用，日本数学会秋季大会，応用数学分科会13，1996.
9. 箭内美，箭内顕，津田，奥田，山下，稲井田：Fuzzy Sociogram Analysis Applying Shapley Value，Biomedical Fuzzy and Human Sciences，Vol. 2，No.1, 1996.
10. 津田，箭内美，箭内顕，清水，稲井田，奥田，山下：シャプレイ値を応用したファジィソシオグラム分析，ファジィシステムシンポジウム，1996.

FRD5-1

楽観-悲観軸を用いた直感的推論による財務分析システムに関する一研究

A Financial Analysis System by Intuitive Reasoning Using Optimistic-Pessimistic Axis"

○谷　久壹朗，亀井　且有
○Kyuichiro TANI, Katuari KAMEI
立命館大学大学院理工学研究科
Ritsumeikan University, Faculty of Science and Engineering

Abstract

The purpose of our work is to design a financial analysis system by intuitive reasoning on optimistic-pessimistic axis. Computer aided financial analysis system based on fuzzy theory and intuitive reasoning is a new challenge for computer technology experts and management science specialists. The analysis system proposed here consists of three processes. Firstly, intuitive reasoning is examined based on financial data. Secondly, the results of intuitive reasoning is projected on optimistic-pessimistic axis. Finally, fuzzy membership functions for financial analysis is composed. Some practical examples is given in this paper and four membership functions of typical financial condition are shown.

1.はじめに

実際の財務分析で扱う個々のデータは，互いに異質なものであるため，これを客観的な手法だけで表現するにはかなり困難な処理を必要とする．

現在では，かかる問題の解決方法として，専門家の経験的知識を何らかのルールベースに変換したエキスパートシステムなどを導入している．しかし，人間の直感的評価を完全に表現するにいたっていない上，より人間に近い処理をさせるためには膨大なルールベースを必要とする．

そこで本研究では，企業の財務評価用意志決定支援システム構築の一研究として，人間の直感的推論を“楽観-悲観”という軸から表現した財務分析システムの構築方法を検討する．

2.財務分析における直感的推論と楽観-悲観軸の意義

従来の財務分析では，人間の主観性を極力排除し客観性のみで分析·評価を行うことが望ましいと思われてきた．これは，経営活動の程度を示す種々の指標が統計的処理により求められた一意的な結果であり，通常の四則演算を用いて結果を導き出す方がより正確であると考えられていたためだと言える．

しかし,評価を行う際に扱う個々のデータは，会計上のデータを加工する場合とは異なり異質なもの同士である．我々は，このような質的に異なった要素をあたかも同質のもののように評価し結論を導き出している．つまり，単に数値として処理するのではなく，主観的な概念上の共通尺度に置換え，通常の四則演算法とは異なる演算方法を行っていると考えられる．

本研究では,この主観的共通尺度として“楽観-悲観”の概念を用いた直感的な合成・評価方法を導入する．なお，本稿では直感を”人間の感覚的な推論による大局的な情報処理”と定義し，評価対象の動的変化を単純な感覚的推論ルールで評価する方法を直感的推論とする．

この方法の利点は，データを感覚的に評価させることにより，推論ルールの数を少なくし，階層化が難しいデータを階層化せずに合成出来ることである．

また，評価を行う際，“楽観-悲観”といった人間の積極的な思考と消極的な思考をそれぞれ表現した概念を導入する．これは，一意的な感覚的評価を行わせるのではなく，事象の不確実性に対して幅を持たせた推論を行わせるためである．この方法で求められた結果は楽観-悲観軸上で表示される．楽観-悲観軸の利点は，データが持つ多義性を一つの視覚的データとしてユーザーに認識させることが出来る点である．意思決定者は，楽観－悲観軸上の色の分布等から評価対象に対する評価を感覚的に理解することが可能になる．

3.システムの概要

本研究で構築したシステムでは，ウォールの指数法で用いられる７つの指標(流動比率,負債比率,固定比率,製品回転率,受取勘定回転率,固定資産回転率,自己資本回転率)の成長性をもとに任意の企業の財務評価を行う．

実際には，楽観的－悲観的ファジィ推論により各指標ごとの成長の度合いを評価する．その後，ファジィ演算を用い各指標に対する評価結果を楽観－悲観軸上で合成し，これを企業の財務評価として出力する．

3.1.“楽観的-悲観的”ファジィ推論

楽観的主観性，悲観的主観性をもとに作成したファジィ推論ルールを用い，過去６年間における成長度 y_{1i}^{j}(成長の全体的な動向，i=1992，j:７つの指標)と成長率 y_{2i}^{j}(指標の成長の変化，i=1992，j:７つの指標) から各指標に対する財務評価 z_{*}^{j}(j:７つの指標，＊:op(楽観),nu(中庸),pe(悲観))を求める．また，このシステムでは”楽観”，”悲観”の主観的概念以外に，両者の中間的な概念として中庸的主観性をもとにした中庸的ファジィ推論ルールをも用いて評価を行っている．

次に，一例として楽観的ファジィ推論ルールを示す．(図１)

If x_A is *Up*	and x_B is *Up*	then x_C is *Very Up*		else
If x_A is *Up*	and x_B is *Neutral*	then x_C is *Up*		else
If x_A is *Up*	and x_B is *Down*	then x_C is *Neutral*		else
If x_A is *Down*	and x_B is *Up*	then x_C is *Up*		else
If x_A is *Down*	and x_B is *Neutral*	then x_C is *Neutral*		else
If x_A is *Down*	and x_B is *Down*	then x_C is *Very Down*		else
If x_A is *NotUp*	and x_B is *Not Up*	then x_C is *Neutral*		

図１楽観的推論ルール

また，このシステムで用いられる推論ルールは，それぞれが独立したものではなくパラメータの調整により楽観～中庸，中庸～悲観へ変化するようになっている．これにより，人間の評価に対する主観性を表現することができる．

3.2.楽観-悲観軸から見た財務評価

ファジィ推論により求められた指標のそれぞれの評価値 z_{*}^{j} を，楽観的評価では和演算(T-conorm)を,悲観的評価では積演算(T-norm)を，中庸的評価では平均法を用い合成を行う．

ただし，推論ルール自体が楽観～中庸，中庸～悲観と変化するため，これに連動させ合成方法も和演算～平均法，平均法～積演算へと変化させ，その合成結果を楽観－悲観軸上に表示する．(図2)

このシステムにより表示された楽観－悲観軸は，次の４種類のタイプに大局的に分類･評価され，これが企業の総合評価になる(図３)．

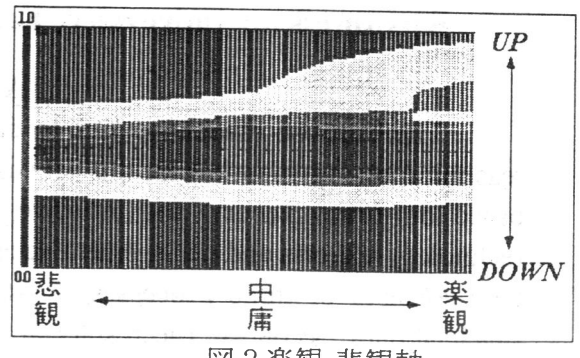


図２楽観-悲観軸

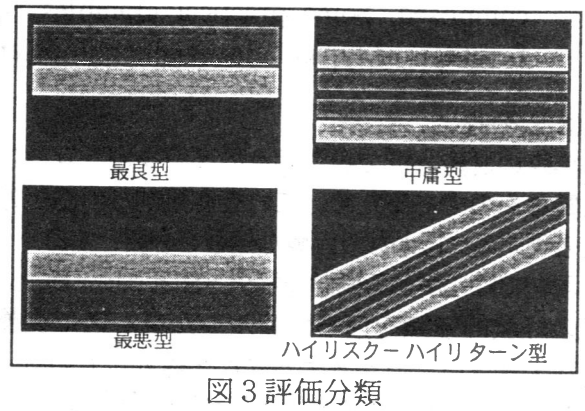


図３評価分類

4.おわりに

本研究で提案した手法により，評価対象となる企業の財務状態を楽観－悲観軸で表現し，直感的な評価をすることが出来た．

参考文献

1) 金子 隆臣,谷 久一郎稿「ファジィによる視覚的財務分析システムの構築」，(社) 日本経営工学会,平成５年度秋季研究大会予稿集,D-2,pp.92-93,1993.11.5.

2) 山下 利之著,「ファジィー心理学への展開」，(株) 垣内出版,pp.134-138,1992.11.30.

3) 戸田 正直著,「認知科学選書 24 感情」，(財) 東京大学出版,pp.83-125,1992.5.20.

連絡先

〒525 滋賀県草津市野路町 1916
立命館大学 理工学部 情報学科 亀井研究室
谷 久壹朗
Tel :0775-61-2807
E-Mail:tani@spice.cs.ritsumei.ac.jp

FRD5-2

ジャーナリズムの英語の年代による推移

---*TIME* と *Newsweek* を中心として---

The Chronological Transition of Journalistic English

--- With Reference to *TIME* and *Newsweek* ---

伴 浩美* 森 俊也** 大藪 多可志*
Hiromi BAN* Toshiya MORI** Takashi OYABU*

*富山国際大学, **金沢科学技術専門学校
*Toyama University of International Studies
**Kanazawa Institute of Science and Technology

The linguistical transition of *TIME* and *Newsweek* from 1940 to 1990 was analyzed by using a computer. As a result, it was proved that both the frequency of words and that of letters had almost the same characteristics in both magazines. From this, the language of journalism is assumed not to have changed so much and the variation of the information quantity is also considered to be little.

1. はじめに

国内外ではコンピュータの普及とともに様々な文体的特徴を数量化する方法が開発され，文体統計学(Stylostatistics)，文体計量学(Stylometrics)，或いは計量文体学(Quantative Stylometry)というような学問として確立されつつある。[1]

本研究においては，ニュース誌の *TIME* と *Newsweek* を取り上げ，これらの文体が 1940 年から 1990 年までの 50 年間に，どのように変化してきたかを調べた。*TIME* と *Newsweek* を選んだのは，最もポピュラーであり，アメリカの言語文化を反映しているものと考えたからである。なお，解析の対象は記事(本文)のみとし，広告や見出しの部分は除外した。[2]

結果として，1990 年代より特性がわずかに異なってきているが，解析した 1940 年代から 1990 年代までは，単語の頻度特性や文字の頻度特性はほとんど同じ傾向であることが判明した。

2. 解析方法

TIME, *Newsweek*（両誌共 1940 年，1950 年，1960 年，1970 年，1980 年，1990 年の各々最初の号）をスキャナ（EPSON. GT-5000 WINP，パーソナルスキャナ Calario）によりOCR ソフトを用いて1ページずつ読込む。その後，読み込んだ内容に誤読がないか人間により1文字1文字チェックする。さらに，コンピュータでスペルチェックを行い，入力したデータをページ毎に連結する。[2]

単語と文字頻度を求めるプログラムは C++により開発した。このとき，C++の連想配列を用いる。連想配列においては，添字に文字列を用いることができ，本研究の解析には非常に有効である。また，配列は添字をキーとして2分木により構成される。各単語や文字がカウントされる毎に2分木が成長する。

3. 解析結果

3. 1 単語出現頻度

まず，両ニュース誌の 12 個の資料の単語出現頻度 10 位までを比較した。THE, OF, AND, TO, A, IN, THAT の7つの単語が共通しており，THE の1位，OF の2位は変わらない。AND, TO, A, IN は3位から6位の間で入れ替わる位であり，それ以下でも若干の違いが見られるがほとんど変化がない。なお，THAT の順位が少しずつではあるが，上昇している。THAT は指示代名詞や関係代名詞など様々な形式で使われる。一文ずつ調べたわけではないので確証は

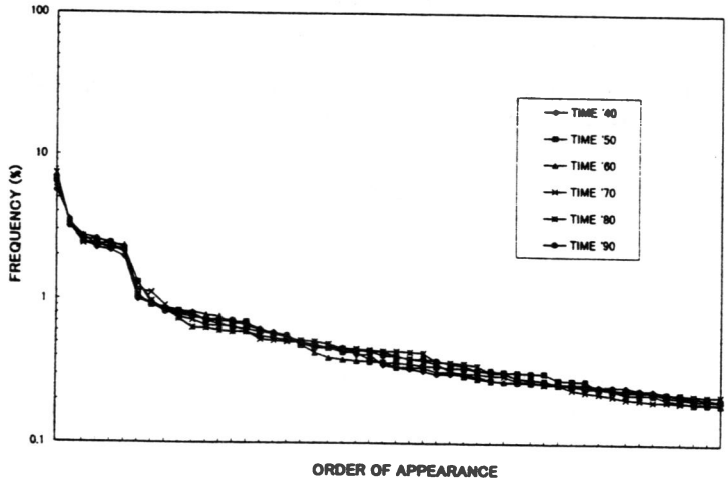


図1: *TIME*における各年代の単語頻度特性

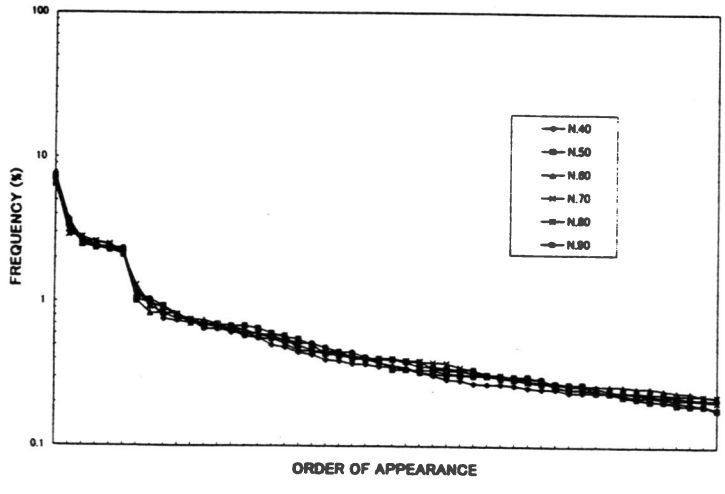


図2: *Newsweek*における各年代の単語頻度特性

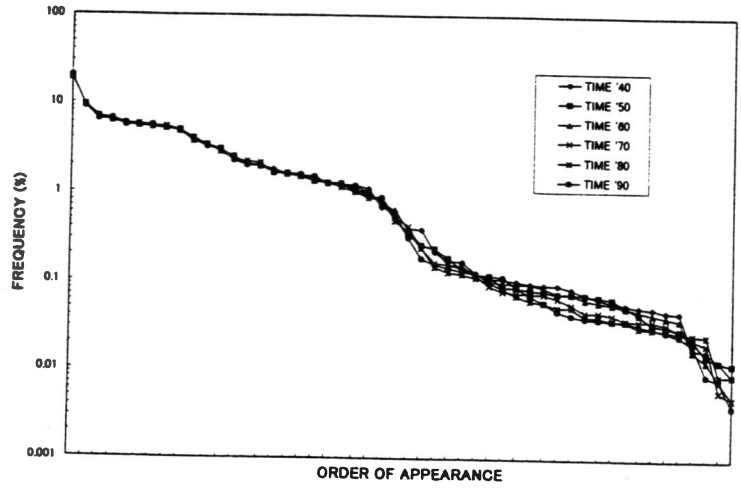


図3: *TIME*における各年代の文字頻度特性

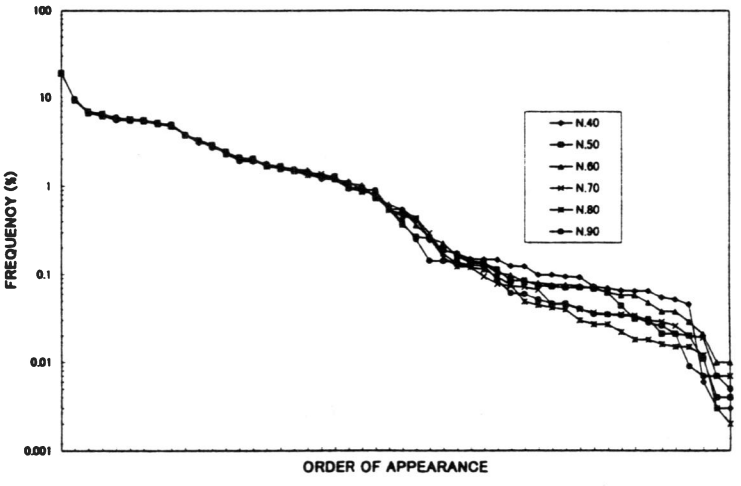


図4: *Newsweek* における各年代の文字頻度特性

表1: *TIME* における各年代の文体解析結果

	TIME '40	TIME '50	TIME '60	TIME '70	TIME '80	TIME '90
総出現文字数	203,439	260,906	247,977	235,104	217,249	201,051
純文字数	154,345	198,634	189,104	181,334	168,797	156,363
総出現単語数	31,932	41,836	39,835	37,262	34,645	31,842
総出現単語種数	7,788	8,818	8,885	8,348	7,407	7,254
総出現文数	2,311	3,150	2,535	2,479	2,294	2,133
総出現段落数	490	613	428	398	342	370
平均単語長 （純文字数／総単語数）	4.834	4.748	4.973	4.866	4.872	4.911
一文当たりの単語数 （総単語数／総文数）	13.817	13.281	15.714	15.031	15.102	14.928
一語当たりの使用回数 （総単語数／単語種数）	4.100	4.744	4.483	4.464	4.677	4.390
一文当たりのコンマ使用数 （コンマ出現数／文数）	1.071	0.844	1.060	0.924	0.824	0.840

表2: *Newsweek* における各年代の文体解析結果

	N. '40	N. '50	N. '60	N. '70	N. '80	N. '90
総出現文字数	185,569	170,187	170,336	253,768	212,459	137,359
純文字数	140,719	131,088	128,885	194,722	164,661	106,606
総出現単語数	29,039	26,859	27,242	40,844	33,736	21,972
総出現単語種数	6,924	6,271	6,374	8,203	6,837	5,118
総出現文数	1,670	1,624	1,751	2,256	2,020	1,234
総出現段落数	422	429	444	394	317	212
平均単語長 （純文字数／総単語数）	4.846	4.930	4.731	4.767	4.881	4.852
一文当たりの単語数 （総単語数／総文数）	17.389	16.539	15.558	16.105	16.701	17.806
一語当たりの使用回数 （総単語数／単語種数）	4.194	4.283	4.274	4.979	4.934	4.293
一文当たりのコンマ使用数 （コンマ出現数／文数）	1.252	1.001	1.038	1.097	0.895	1.036

できないが，このことから，複文が増え，文の構造が複雑になってきているのではないかと考えられる。また，40 年と 50 年で WAS の頻度が高かったが，70 年以降は IS の頻度の方が高くなっており，過去形により文章を表現する形式から現在形を用いる形式に変化してきたと言える。上位 100 位までを見てみると，やはり，40 年，50 年は，HAD の頻度が高かったが，70 年位から HAVE の頻度が高くなっている。このことからも全体的に過去形から現在形で表現する形に変化してきていると言える。50 位までの頻度をグラフにより表してみると，解析した全てがほとんど同じ曲線となった。これを図1と図2に示す。このことより，文体が 50 年間という年代の差や雑誌毎の差異は認められず，同じ特性曲線上に表されることが判明した。

3．2　文字出現頻度

文字出現頻度としては，*TIME*, *Newsweek* のいずれも空白の出現頻度が最も高く，それに続いて，E, T, A, O, I, N, S, R, H が高い頻度を有している。順位は，O, I, N が5位から7位の間で入れ替わる位で文字の種類と頻度は共にほとんど変化が見られない。また，この文字の 50 位までの出現頻度をグラフに表すと図3と4のようになる。*Newsweek* の 30 位以降に多少のばらつきが見られるものの，単語と同様，どれもほとんど同じ曲線を描いている。以上のことにより，ここ 50 年間において言語的情報量の変化はほとんど認められないことが判明した。

3．3　その他の特徴

各年代の全体的な比較を表1，2に示す。この表の順文字数とは，総出現文字数からコンマやピリオドなどを抜き，アルファベットの文字のみを数えた値である。これらを見てみると，総出現文字数が *TIME*, *Newsweek* 共 90 年は，少なく，特に *TIME* の場合，50 年をピークに徐々に減少している。単語数も同様である。これは，紙面が広告やスペース等で占有される割合が増え，視覚に訴えるような構成になってきているものと思われる。この表の総出現文数とは，ピリオドの数を数えた値である。しかし，ピリオドやコンマの数は，文末や文の区切りだけに用いられるわけではなく，ごく僅かではあるが，単語を省略したり，数字の桁の区切りを表したりもするので，厳密には正確ではない。これらの区別をどう処理するかを，今後，プログラムにより検討する予定である。その他，段落数，平均単語長，1文当たりの単語数，1語当たりの使用回数，1文当たりのコンマ使用数を求めてみた。1文当たりの単語数は *Newsweek* の方が *TIME* よりもやや多かったが，いずれも変化と言えるような差異は認められなかった。

4．まとめ

最もポピュラーな週刊誌である *TIME*, *Newsweek* の 50 年間の推移に関する研究では，単語や文字の頻度特性にほとんど変化が認められなかった。これは，あまり言語が変化してきていないものと考えられる。これらのことから，調べた言語の情報エントロピーは変化しておらず，また，その値は小さいことが判明した。このことから，記者が独特の方法でランダムに文章を構成するのではなく，かなり限られた状況の下で記事を書いていることになる。

今後，*TIME* を基準にして，他のジャンルの単語や文字の特性の特徴を抽出し，ファジィ・ルールによりジャンルを同定する手法について検討を行っていく予定である。さらに，これにより，教育現場におけるジャンルや作者・作品毎の難易度などを導き，講義等の参考にしたいと考えている。

参考文献

[1]　長瀬眞理，西村弘之："コンピュータによる文章解析入門"，オーム社，1986

[2]　伴，田中，森，大藪："*TIME* 誌における文体の年代による推移"，日本 OR 学会第 14 回「意志決定と OR」研究集会講演論文集，pp. 9-12 (1996. 11)

問合わせ先

〒 930-12 富山県大山町東黒牧 65-1

富山国際大学・人文学部

伴　浩美

TEL: (0764)83-8000

FAX: (0764)83-8008

E-mail: oyabu@tuins.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRE1-1

ファジィ在庫問題
Fuzzy Inventory Problem

片桐英樹 Hideki Katagiri
石井 博昭 Hiroaki Ishii
伊藤 健 Takeshi Itoh

大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract

In this paper, we consider an allocation problem of perishable commodity with fuzzy shortage cost based on LIFO issuinig policy. Under the allocation policy, commodities are distributed from a regional center to n locations in the region. Costs are charged at each location for every unit short, outdated or transported. But unit shortage cost is considered to be ambiguous and so estimated as a L-fuzzy number. The purpose of this paper is to compare optimal solution of nonfuzzy shortage cost case with that of fuzzy one.

1 はじめに

腐敗しやすい製品に対する在庫管理問題はPrastacosによって品切れコストと廃棄コストのみを考慮したモデルが提案され[1]、その後、様々なモデルが考えられてきた。このような問題では在庫の払い出し政策によっても、腐敗量が大きく左右される。払い出し政策には、最も古い製品から払い出すFIFO政策と、最も新しい製品から払い出すLIFO政策の2つの政策があるがT.Nose,et.alはLIFO政策で払い出される配分問題において品切れコスト、廃棄コスト、輸送コストを考慮してモデルを提案し、最適発注政策を求めた[2]。これまでのいずれのモデルにおいても、品切れコストの曖昧性は考慮されていないが、元来品切れコストは見積りが難しいといわれている。本論文では、[2]のモデルにおいて品切れコストをファジィ数で表した場合について考察する。

2 問題設定

周期的在庫モデルを仮定する。注文は期間の最初に起こり、コストは期間中にかかるものとする。さらに次のような仮定を設ける。

1. 製品の寿命は一定でM期間である。
2. 在庫はLIFO政策に従って、期間の最初に需要によって払い出される。
3. 各々の期間の最後に残っている在庫は、中央センターへ戻される。
4. もし商品がM期間経っても払い出されなければ、廃棄処分する。
5. 各々の配分所kでは、次のようなコストがかかるものと仮定する。
   $\tilde{s}_k$：配分所kでの単位あたりの品切れコスト
   w_k：配分所kでの単位あたりの廃棄コスト
   u_k：配分所kから中央センターへまたはその逆に輸送する場合の単位あたりの輸送コスト(ここでは$u_k > w_k$とする)

ここで$\tilde{s}_k$は次のようなメンバーシップ関数によって制限されるL−ファジィ数と仮定し、$(m_k, \alpha_k)_L$と表す。

$$\mu_A(x) = \max\{L((x - m_k)/\alpha_k), 0\}$$

上の式で型関数L : $\mathbf{R}\rightarrow\mathbf{R}$は次の条件を満たすものとする。

1. $L(x) = L(-x) \quad \forall x \in \mathbf{R}$
2. $L(0) = 1$

3. L は上で [0,+∞] 上で広義単調減少

4. $x_0 = \inf\{x > 0 | L(x) = 0\}$ とおくとき、$0 < x_0 < +\infty$ が成り立つ。

6. 配分所 k における需要は確率分布関数 F_k, 密度関数 f_k をもつ互いに独立な確率変数とする。

N_k : 配分所 k における残りの寿命が M から 2 までの新鮮な在庫量

B_k : 配分所 k における残りの寿命が 1 である新鮮でない在庫量

$\mathbf{N} = (N_1, N_2, \cdots, N_n), \mathbf{B} = (B_1, B_2, \cdots, B_n)$

$N = \sum_{k=1}^{n} N_k, B = \sum_{k=1}^{n} B_k.$

3 問題の定式化

新鮮な製品が N 単位あり、新鮮でない製品が B 単位あったとすると、全体のコストの期待値 $\tilde{C}(N, B)$ は

$$\begin{aligned}\tilde{C}(\mathbf{N},\mathbf{B}) = \sum_{k=1}^{n}[&\tilde{s}_k \int_{N_k+B_k}^{\infty}(x - N_k - B_k)dF_k(x)\\ &+w_k \int_{N_k}^{N_k+B_k}(N_k + B_k - x)dF_k(x)\\ &+w_k B_k F_k(N_k) + (N_k + B_k)u_k\\ &+u_k \int_{0}^{N_k}(N_k - x)dF_k(x)]\end{aligned}$$

となる。品切れコスト $\tilde{s}_k$ が L ファジィ数であるので $\tilde{C}(\mathbf{N},\mathbf{B})$ も L−ファジィ数 $(m(\mathbf{N},\mathbf{B}), \alpha(\mathbf{N},\mathbf{B}))_L$ となる。ここで

$$\begin{aligned}m(\mathbf{N},\mathbf{B}) = \sum_{k=1}^{n}[&\tilde{s}_k \int_{N_k+B_k}^{\infty}(x - N_k - B_k)dF_k(x)\\ &+w_k \int_{N_k}^{N_k+B_k}(N_k + B_k - x)dF_k(x)\\ &+w_k B_k F_k(N_k) + (N_k + B_k)u_k\\ &+u_k \int_{0}^{N_k}(N_k - x)dF_k(x)]\end{aligned}$$

$$\alpha(\mathbf{N},\mathbf{B}) = \sum_{k=1}^{n}\alpha_k \int_{N_k+B_k}^{\infty}(x - N_k - B_k)dF_k(x)$$

である。

$\tilde{C}(N, B)$ の大きさを比較するために次のファジィマックス順序の定理を用いる。

定理 3.1 [3](ファジィマックス順序)

2 つの L−ファジィ数 $A = (m, \alpha)_L, B = (n, \beta)_L$ に対して

$$A \preceq B \Leftrightarrow n - m \geq x_0|\alpha - \beta|$$

この順序関係は半順序であるため、必ずしも最適配分政策が一つに求まるとは限らない。そこで以下に定義する極小配分政策を求めることを考える。

定義 3.1

2 つの転送配分政策 $(\mathbf{N},\mathbf{B})$ と $(\mathbf{N}',\mathbf{B}')$ に対して条件 $\tilde{C}(\mathbf{N},\mathbf{B}) \preceq \tilde{C}(\mathbf{N}',\mathbf{B}')$ かつ $\tilde{C}(\mathbf{N},\mathbf{B}) \neq \tilde{C}(\mathbf{N}',\mathbf{B}')$ が成り立つならば、転送配分政策 $(\mathbf{N},\mathbf{B})$ は $(\mathbf{N}',\mathbf{B}')$ に優越するという。また、転送配分政策 $(\mathbf{N},\mathbf{B})$ にたいして優越するものが存在しないとき、$(\mathbf{N},\mathbf{B})$ は極小であるという。

4 おわりに

極小配分政策を求める方法等、詳細は発表会当日に述べる予定である。なお、この研究は文部省科学研究費基盤研究 (C)(2)08680460 によるものであることを付記しておく。

参考文献

[1] G.P.Prastacos, "Optimal myopic allocation of a product with fixed leadtime", *Journal of the Operational Research Society* **29** (1978) 905-913.

[2] T.Nose, H.Ishii, T.Nishida, "LIFO allocation problem for perishable commodities", *Journal of the Operational Research Society of Japan* **26** (1983) 135-145.

[3] N.Furukawa, "A Parametric Total Order on Fuzzy Numbers and a Fuzzy Shortest Route Problem", *Optimization*, **30** (1994) 367-377.

連絡先 : 〒 565 大阪府吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
応用物理学専攻数理情報工学講座
片桐　英樹
TEL: 06-879-7870
FAX: 06-878-1385
e-mail: katagiri@ap.eng.osaka-u.ac.jp

Data Allocation in Distributed Database System with Fuzzy Coefficients Using GA

Mitsuo **GEN**, Yasuhiro **TSUJIMURA** and Sucbum **KO**

Department of Industrial and Systems Engineering
Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga 326, Japan
Tel: +81(284)62-0605 Fax: +81(284)64-1071
E-mail : ksb@genlab.ashitech.ac.jp

Abstract

Distributed database systems(DDS) can yield significant cost and response time advantages over centralized systems for geographically distributed organization. An efficient data fragmentation and strategy to join those again are important in the distributed database system. The design of efficient distributed database is also a complex task involving data allocation. In this paper, various coefficients in DDS are represented by triangular fuzzy numbers, and we propose an efficient method for solving an optimal data allocation problem with fuzzy costs by transforming it to the crisp problem according to the concepts of possibility and necessity. Simultaneously, the final mathematical model, overall costs, developed according to these consideration is minimized by genetic algorithm(GA).

Key words: Genetic algorithm, Distributed database system(DDS), Possibility Theory

1 Introduction

Key Distributed Database System(DDS) design issues include data and operation allocation. Data allocation defines what data is stored at what nodes(including possible redundancy). Operation allocation defines where accessing and processing operations will be performed,*i.e.*, how and where to process the data and its strategies are join node selection, join order and reduction by semijoin[1, 4, 7. 8]. More detail structure of DDS is shown in the section of numerical example.

In real world, there are various costs which may be vague or imprecise in natural, so the fuzzy numbers are usually used to represent the vagueness of the coefficients. In this paper, we propose an efficient method for solving a data allocation on DDS with fuzzy costs by transforming it to the crisp problem according to the concepts of possibility and necessity[10]. The transformed crisp problem can be also solved by using GA. And we show some numerical experiment to demonstrate good performances of the proposed method for solving the problem.

2 Fuzzy DDS Design Model

To illustrate, consider a fuzzy DDS(f-DDS) design model that allocates data to nodes, minimizing the sum of network communication cost for retrieval and update and local data storage costs[3, 8].

The main concept to derive this mathematical model can be considered by the interrelations between the numbers of allocated data and the operating costs as devices. For example, allocating a duplicated data, as units of file fragment, to extremely many nodes are required a low retrieval cost because the possibility to exist a hopeful data in the local node is high. The case means that the cost for using network to search another nodes is not so spent. But at the same time, the storage costs to store the data to many nodes will be spent higher ones. The model which is based on the considerations has a simple cost function and a small number of decision variables as follows:

Problem Parameters:

R_{ri} : proportion of data from unit i is needed for retrieval r (0 if i is not required by r)

$\tilde{\alpha}_{rj}$: retrieval frequency of retrieval r from node j (origination and destination) , $r = 1, 2, \cdots,$ number of retrieval(n_r)

U_{uj} : proportion of data from data unit j used in update u, $u = 1, 2, \cdots,$ number of update(n_u)

$\tilde{\beta}_{uj}$: update frequency of update u from node j (origination and destination)

V_j : volume of data allocation unit j (characters)

$\tilde{S}$: storage cost

$\tilde{C}_T$: variable transmission cost per packet from one node to any other node

P : network packet size (characters)

Decision Variable:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{data unit } i \text{ is stored at node } j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$i = 1, 2, \cdots,$ number of fragments(n_f)
$j = 1, 2, \cdots,$ number of nodes(n_n)

The overall cost function can be considered as three kinds of criterion, 1) the cost to retrieve data unit, 2) the cost to update and 3) the storage cost.

Criterion 1: Retrieval Cost Function($\tilde{F}_R(\mathbf{x})$)
The cost to retrieve data unit i by retrieval r at node n is calculated as follows. If data unit i is at node n then x_{ij} is 1 and the network cost for it is 0. Otherwise, the network transmission costs can be obtained as $\tilde{C}_T \cdot R_{ri} \cdot V_i/P$. Hence, the cost function to retrieve can be derived as follows:

$$\tilde{F}_R(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{n_n}\sum_{r=1}^{n_r}\sum_{i=1}^{n_f} \tilde{C}_T \cdot R_{ri} \cdot V_i/P \cdot \tilde{\alpha}_{rj} \cdot (1 - x_{ij})$$

Criterion 2: Update Cost Function($\tilde{F}_U(\mathbf{x})$)
Network transmission costs can be calculated as $\tilde{C}_T \cdot U_{ui} \cdot V_i/P$. This one is incurred for each copy of data unit i except for the one at node n, the origination node of the update at a frequency of $\tilde{\beta}_{uj}$. Hence, the update cost function can be derived as follows:

$$\tilde{F}_U(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{n_n}\sum_{u=1}^{n_u}\sum_{i=1}^{n_f} \tilde{C}_T \cdot U_{ui} \cdot V_i/P \cdot \tilde{\beta}_{uj} \cdot \sum_{k\neq j} x_{ik}$$

Criterion 3: Storage Cost Function($\tilde{F}_S(\mathbf{x})$)
All data allocated to a node (V_i characters for data unit i) costs $\tilde{S}$(dollars) per 1000 characters per month to store. Hence, The storage cost function can be derived as follows:

$$\tilde{F}_S(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{n_n}\sum_{i=1}^{n_f} V_i \cdot \tilde{S} \cdot x_{ij}$$

Then, the optimization model with fuzzy coefficient can be formulated into 0-1 integer programming problem as follows:

$$\begin{aligned} \min \quad & \tilde{F}_O(\mathbf{x}) = \tilde{F}_R(\mathbf{x}) + \tilde{F}_U(\mathbf{x}) + \tilde{F}_S(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^{n_f}\sum_{j=1}^{n_n} x_{ij} \geq 1 \end{aligned}$$

Here, the constraint in the above optimization model ensures that each unit of data must be allocated to at least one node.

Also, " $\sim$ " put on the character represents a triangular fuzzy number(TFN). A TFN $\tilde{A}$ is represented by a triplet (a_1, a_2, a_3).

3 Transformation to Crisp Model

The transformation method proposed here is based on the concepts of possibility and necessity, that is, we make use of exceedance possibility which is one of four measures of possibility and necessity proposed by Dubois and Prade[8], and used as the index on comparison of fuzzy numbers. The fuzzy problem is reduced into the crisp problem by using the threshold value set by decision maker(DM).

3.1 Exceedance Possibility of TFNs

Consider the index for ranking two TFNs $\tilde{r}$ and $\tilde{b}$(membership functions are $\mu_r(u)$ and $\mu_b(v)$, respectively) presented by Dubois and Prade, which is denoted **exceedance possibility**. The exceedance possibility that $\tilde{r}$ is smaller than $\tilde{b}$ is defined as follows:

$$\text{Pos}[\tilde{r} \leq \tilde{b}] = \sup\{\min(\mu_r(u), \mu_b(v)) | u \leq v\}$$

The above index is represented by two TFNs, $\tilde{r} = (r_1, r_2, r_3)$ and $\tilde{b} = (b_1, b_2, b_3)$ as follows:

$$\text{Pos}[\tilde{r} \leq \tilde{b}] = \begin{cases} 1; & r_2 = b_2 \\ \sigma; & r_2 \geq b_2, \quad r_1 \leq b_3 \\ 0; & r_1 \geq b_3 \end{cases}$$

where, $\sigma = \dfrac{b_3 - r_1}{(b_3 - b_2) + (r_2 - r_1)}$

3.2 Transformation to Crisp Problem

The objective function value is a TFN because of the extension principle[11], and is denoted as follows:

$$\tilde{F}_O(\mathbf{x}) = (f_{O1}(\mathbf{x}), f_{O2}(\mathbf{x}), f_{O3}(\mathbf{x}))$$

where,

$$f_{Ot}(\mathbf{x}) = f_{Rt}(\mathbf{x}) + f_{Ut}(\mathbf{x}) + f_{St}(\mathbf{x}), \quad t = 1, 2, 3$$

The conditional possibility distribution of the objective function $\tilde{F}_O(\mathbf{x})$ is obtained as follows:

$$\text{Pos}[\tilde{F}_O(\mathbf{x}) = f_O(\mathbf{x}) | (\mathbf{x})] = \begin{cases} \dfrac{f_O(\mathbf{x}) - f_{O1}(\mathbf{x})}{f_{O2}(\mathbf{x}) - f_O(\mathbf{x})} \equiv \theta_1; & f_{O1}(\mathbf{x}) \leq f_O(\mathbf{x}) \leq f_{O2}(\mathbf{x}) \\ 1; & f_{O2}(\mathbf{x}) = f_O(\mathbf{x}) \\ \dfrac{f_{O3}(\mathbf{x}) - f_{O1}(\mathbf{x})}{f_{O3}(\mathbf{x}) - f_{O2}(\mathbf{x})} \equiv \theta_2; & f_{O2}(\mathbf{x}) \leq f_O(\mathbf{x}) \leq f_{O3}(\mathbf{x}) \end{cases}$$

From this equation, it can be noted that the objective function space

$$f_{O2}(\mathbf{x}) \leq f_O(\mathbf{x}) \leq f_{O3}(\mathbf{x})$$

is the largest when objective function is

$$\text{Pos}[\tilde{F}_O(\mathbf{x}) = f_O(\mathbf{x})] \equiv \theta_2,$$

because α_{ij2}, α_{ij3} and β_{ij2}, β_{ij3} are the largest among the triplets for the TFNs in the objective function, so

$$\text{Pos}[\tilde{F}_O(\mathbf{x}) = f_O(\mathbf{x})] = \frac{f_{O3}(\mathbf{x}) - f_O(\mathbf{x})}{f_{O3}(\mathbf{x}) - f_{O2}(\mathbf{x})} \equiv \theta_2, \quad (1)$$

and decision space is

$$f_{O2}(\mathbf{x}) \leq f_O(\mathbf{x}) \leq f_{O3}(\mathbf{x}) \quad (2)$$

Clearly, eq.(1) is a nonlinear function. If the DM has a lower threshold value of α, the eq.(1) is replaced by linear inequality eq.(1) $\geq \alpha$. This threshold can be take any value as long as it lies in the range $0 \leq \alpha \leq 1$. Using eqs.(1) and (2), the above fuzzy problem is transformed into crisp one as follows:

$$\begin{aligned} \min \quad & f_O(\mathbf{x}) \\ \text{s. t.} \quad & \theta_2 \geq \alpha \\ & f_{O2}(\mathbf{x}) \leq f_O(\mathbf{x}) \leq f_{O3}(\mathbf{x}) \\ & \sum_{i=1}^{nf} \sum_{j=1}^{nn} x_{ij} \geq 1 \end{aligned}$$

4 Genetic Algorithm

4.1 Chromosome Representation

Chromosome is simply represented by a decision variable, x_{ij} and has a formulation of 2-dimention array.

In the array, row, i, means an index of file fragment and column, j, represents to a position of node. Each components in the array have 0-1 integer values. Simultaneously, an initial generation is created as generation random value between 0 and 1 at every population size(*pop_size*) times. But this method has a possibility to generate an infeasible chromosome which violates the constraint, *i.e.*, the case that all genes are 0 each node. So, we need a mechanism to adjust infeasible chromosomes. To do this, we develop the simple checking and correcting procedure as shown in the next subsection.

4.2 Repairing Chromosome

The main idea to repair an infeasible chromosome is firstly to find a row of having infeasible chromosome through adding all gene of each row, and then is to adjust it. The procedure is described as follows:

```
for i = 1 to n_f
   for j =1 to n_n
     enum_i = enum_i + x_ij
for e =1 to n_f
   if enum_e == 0
    then re_generate chromosome(initial population)
         fitness = −∞(at the selection stage)
```

Infeasible chromosomes are removed in the stage of selection because the fitness value of them very low. Therefore, new generation consists of only feasible chromosomes.

4.3 Genetic Operations

For crossover, we used an applied uniform crossover[5]. On the other hand, an execution of mutation can be easily implemented by following step. First, select randomly a position to mutate at overall generation. Second, do the complement operation for the positions, *i.e.*, if a value of selected position is 0(1), then change to 1(0). For the selection operation, Next generation is constructed by roulette wheel selcetion[5]

5 Numerical Example

To demonstrate the suitability of the proposed GA, we illustrate an example of DDS taken from the banking industry[8]. In the given DDS model, only a data allocation is dealt in this paper. The operation allocation can be achieved by the same methodology. In the problem, firstly, there are three relations as follows:
Customer(c-id(5), c-name(20, ssn(9), c-address(30), c-city(20), c-state(2), c-zip(19)): 100,000 instances, 960,000 characters
Account(acc-no(8), c-id(5), br-id(5), a-type(2), a-status(2), s-balance(15), s-date(8), c-balance(15), period-interest(15), ytd-interest(15)): 15,000 instances, 1,350,000 characters
Transaction(t-id(10), t-status(2), t-ref(20)): 300,000 instances, 23,400,000 characters

Three retrievals and three updates exist below:
Retrieval 1(R1): Preparing monthly branch status reports
Retrieval 2(R2): Balance inquiry by customers
Retrieval 3(R3): Preparing monthly customer statements
Update 1(U1): Adjusting account balances: account balances are adjusted as transactions are recorded.
Update 2(U2): Maintaining customer information: add new customers, delete inactive ones, and modify existing customer information.
Update 3(U3): Adding/deleting transactions: a new transaction is added to Transaction relation or an existing transaction is deleted.

The frequencies of retrievals and updates from four nodes, headquarters(HQ) and three regions, are shown in Table 1. In Table 1, we give a tolerance, ±50, to each frequencies. Table 2 shows the fragments formed for this problem.

Table 1: Frequencies of retrievals and updates

Activity	HQ	Region 1	Region 2	Region 3
R1	1000	2000	2000	1000
R2	9000	10000	13000	5000
R3	8000	5000	5000	2000
U1	2500	62500	37500	25000
U2	50	125	75	50
U3	25000	62500	37500	25000

Table 2: File fragments

Relation	Fragment		
Customer(10k)	C1(5k)	C2(3k)	C3(2k)
Account(15k)	A1(7.5k)	A2(4.5k)	A3(3k)
Transaction(300k)	T1(150k)	T2(90k)	T3(60k)

After executing the GA with $\alpha = 0.0$, $\alpha = 0.5$, $\alpha = 1.0$, we gain the best chromosomes as follows:

α	Best Chromosome	Cost
0.0	1110 1110 1001 0100 1110 0001 0100 0010 0001	$2005
0.5	0110 1010 1001 0100 1010 0001 0001 0010 0001	$2893
1.0	1110 1110 1001 1100 1110 0001 0100 0010 0001	$1862

This result of data allocation is shown in Figure 1 .

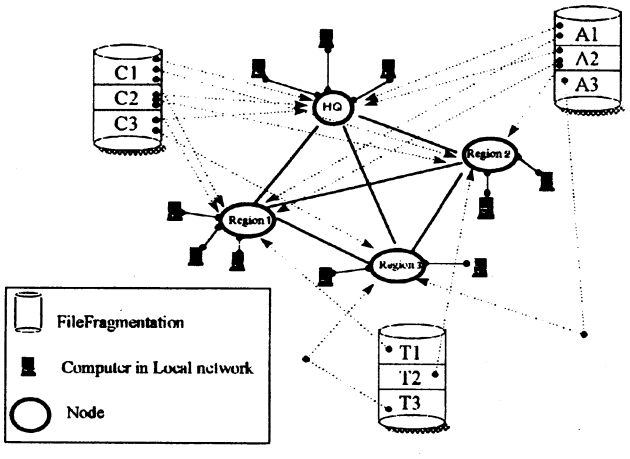


Figure 1: Overall DDS Structure($\alpha = 1.0$)

In this allocation of data, each customer fragment is allocated to all nodes from which it is accessed. A1 is replicated at HQ and Region 1. A2 is replicated at all the nodes from which it is accessed, HQ, Region 1, and Region 3. A3 is allocated only to Region 3. The is reasonable since A1 is accessed infrequently from Region 2 compared to the string nodes and A2 is accessed infrequently from HQ compared to the string node. Transaction fragments are allocated to single regions. This is reasonable since they are very large and are infrequently accessed from nodes other than the string node.

6 Conclusions

In the optimization model, we used the fuzzy numbers to express the vagueness of the coefficients because the coefficients are vague and imprecise in natural. By setting the threshold value, this problem was transformed into a crisp problem. To solve the mathematical model with the fuzzy coefficients, we used GA in this paper. The reason why GA result not only in a best solution but also in a pool of solutions. Solutions represent good schemata(partial solutions) that the designer should be able to recognize from the final pool. For example, if all solutions in the final pool store a given file at a particular node, the designer would be reasonably confident that it is important to store that file at that node.

In furture research, we will concentrate on the investigation to extend to more comprehensive DDS model for using in a real problem.

References

[1] Blankinship R., A.R. Hevner, and S.B. Yao, "An Iterative Method for Distributed Database Design," *Proc. of the 17th Intl. Conf. on Very Large Databases,* Barcelona, Spain, pp. 389-400, Sept. 1991.

[2] Ozsu, M. and P. Valduriez, *Principles of Distributed Database systems,* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall Inc., 1991.

[3] Cornell, L.W. and P.S. Yu, "*Comparative Models of the File Assignment Problem,*" *ACM Computing Surveys,* vol. 14, no. 2, pp. 287-314, June 1982.

[4] Cornell, D.W. and P.S. Yu, "On Optimal Site Assignment for Relations in the Distributed Database Environment," *IEEE Trans. on Software Engineering,* vol. 15, no. 8, pp. 1004-1009, Aug. 1989.

[5] Gen, M.and Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Design,* John Wiley & Sons, New York, 1996.

[6] Yu, C.T. , K-C. Guh, D. Brill, and A.L.p. Chen, "Partition Strategy for Distributed Query Processing in Fast Local Area Networks," *IEEE Trans. on Software Engineering,* vol. 15, no. 6, pp. 780-793, June 1989.

[7] March, S.T. and S.K. Rho, "Allocating Data and Operations to Nodes in Distributed Database Design," *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering,* vol. 7, no. 2, Apr. 1995.

[8] Dubois, D. and H. Prade. Ranking fuzzy numbers in the setting of possibility theory, *Information Sciences,* 30, pp. 183-244(1983).

[9] Zimmermann, H. -J., *Fuzzy Set Theory and Its Applications,* second edition, Kluwer Academic Publishers, U.S.A, 1991.

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRE1-3

ファジィ係数を伴う最小木問題の一解法

Minimum Spanning Tree Problem with Fuzzy Coefficients

玄 光男　井田 憲一　周 根貴　高山 政人

Mitsuo Gen　Kenichi Ida　Gengui Zhou　Masato Takayama

足利工業大学 経営工学科

Dept. of Industrial & Systems Engg., Ashikaga Institute of Technology

Abstract

The Minimum Spanning Tree (MST) problem is one of the classical problems in combinatorial optimization. In many cases, the cost or weight defined on each edge can not be determined definitely. Fuzzy coefficient is a more adequate representation of it in practice. Therefore, this problem is denoted as MST with fuzzy coefficients. In this paper, a method for this problem is proposed and numerical experiment illustrate the effectiveness of the proposed method.
Keywords: Minimum Spanning Tree, Fuzzy Coefficients, Prim's Algorithm

1 はじめに

ネットワーク的概念は，IE/OR において輸送，日程計画，要員配置，施設の位置決定等の日常的な問題を構造的に表現し，効率よく取り扱うのに適している [1].

最小木 (Minimum Spanning Tree: MST) 問題は，アークの長さ（コスト）が与えられているネットワークにおいて，それに属するアークの長さの総和が最小になるような木を求める問題である．この問題は，輸送問題，ネットワークの設計問題など，多くの組合せ最適化問題に適用されており，Kruskal[6] や Prim[7]，Dijkstra[8]，Sollin[9] など多くの研究者によって解法が提案されている [2].

現実の問題を MST 問題にモデル化する場合には，従来，各アークの長さを確定値として取り扱ってきたが，現実にはむしろ "だいたいこれくらい" というようなあいまいな値で取り扱う方が適切な場合が多い [3]．このあいまいさの表現手段として，区間数やファジィ数等が挙げられる [4]．そのうち，区間数に関しては前回の研究発表 [5] で取り上げ，その有効性を確認することができた．

本研究では，アークの長さに三角型ファジィ数を導入した MST 問題の定式化を行うとともに，Prim のアルゴリズム [2][7] に基づく解法を提案する．また，数値実験によりその有効性を検討する．

2 ファジィ係数を伴う最小木問題

任意のグラフ $G=(V,E)$ における MST 問題を考える．このとき，$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_m\}$ は m 個からなるノードの集合で，ターミナルや遠距離通信のステーション等を表す．$E=\{e_1,e_2,\cdots,e_n\}$ は n 個からなるアークの集合であり，各ターミナルやステーションを連結させるものを表す．また各アークは，その長さとして正の実数からなるファジィ係数 $\widetilde{W}_i$ を伴い，距離やコストを表す．さらに，決定変数ベクトル $\boldsymbol{x}=[x_1\ x_2\ \cdots\ x_n]$ を以下のように定義する．

$$x_i=\begin{cases}1, & \text{アーク } e_i \text{が選ばれたとき}\\ 0, & \text{それ以外のとき}\end{cases}$$

これにより，グラフ G における最小木を決定変数ベクトルで表すことができる．いま，Tを$\boldsymbol{x}$の実行可能領域とすると，ファジィ係数を伴う最小木問題 (Fuzzy Minimum Spanning Tree: f-MST) は次のように定式化される．

f-MST:

$$\min \{\widetilde{Z}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m} \widetilde{W}_i x_i \mid \boldsymbol{x} \in T\} \qquad (1)$$

3 ファジィ数の演算とランキング

ここでは，ファジィ係数として三角型ファジィ数 (Triangular Fuzzy Numbers) を用い，$\widetilde{A}, \widetilde{B}, \widetilde{C}, \ldots$ で表す．例えば，$\widetilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ は図 2 のように表される．

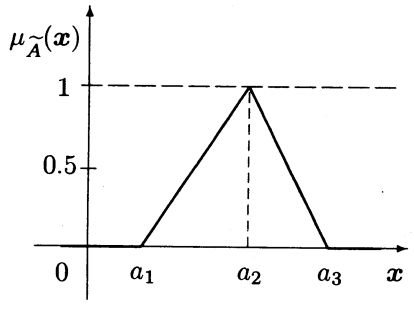


図 2: 三角型ファジィ数 $\widetilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$

また，任意の$\widetilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$，$\widetilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$ に対して，加減演算を以下のように定義する．

$$\widetilde{A} + \widetilde{B} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3)$$
$$\widetilde{A} - \widetilde{B} = (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1)$$

ファジィ数のランキングには，Liou らの方法 [10] を採用する．この方法では，自然な順序付けが成り立つような実数直線上にファジィ数を変換する関数を定義している．

メンバシップ関数 $\mu_{\widetilde{A}}(x)$ を以下のよう定義する．

$$\mu_{\widetilde{A}} = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & ; a_1 \le x \le a_2 \text{の時} \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & ; a_2 \le x \le a_3 \text{の時} \\ 0 & ; \text{その他} \end{cases}$$

また，$f_{\widetilde{A}}(x)^L = (x - a_1)/(a_2 - a_1)$, $f_{\widetilde{A}}(x)^R = (x - a_3)/(a_2 - a_3)$ とすると，対応する逆関数はそれぞれ次のように表される．

$$g_{\widetilde{A}}(y)^L = a_1 + (a_2 - a_1)y$$
$$g_{\widetilde{A}}(y)^R = a_3 + (a_2 - a_3)y$$
$$y \in [0, 1]$$

この逆関数を yについて積分すると，それぞれ次のような積分値を得る．

$$I(\widetilde{A})^L = \int_0^1 g_{\widetilde{A}}(y)^L dy = \frac{1}{2}(a_1 + a_2)$$
$$I(\widetilde{A})^R = \int_0^1 g_{\widetilde{A}}(y)^R dy = \frac{1}{2}(a_2 + a_3)$$

ここで，意思決定者の楽観の度合 (degree of optimism) $\alpha \in [0, 1]$ を導入すると，上記の三角型ファジィ数$\widetilde{A}$の積分値は次式で与えられる．

$$I_T^{\alpha}(\widetilde{A}) = \alpha I(\widetilde{A})^L + (1 - \alpha) I(\widetilde{A})^R$$
$$= \frac{1}{2}[\alpha a_1 + a_2 + (1 - \alpha) a_3] \qquad (2)$$

この積分値を大きい順に並べることにより，対応する三角型ファジィ数のランキングが行われる．この積分値は，正規化されていない三角型ファジィ数についても適用可能であり，非常に有用性が高い．本研究では，この式 (2) をファジィ数のランキングに用いることにより，意思決定者の選考基準をより反映させた順序付けを可能にしている．ちなみに，$\alpha = 0.5$ とした場合，式 (2) は代表通常数と等価になる．

4 アルゴリズム

三角型ファジィ数のランキングの式 (2) を用いることにより，式 (1) は次のように変換できる．

$$\min \{\widehat{Z}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m} \widehat{w}_i x_i \mid \boldsymbol{x} \in T\} \qquad (3)$$

ここで，

$$\widehat{w}_i = \frac{1}{2}[\alpha w_{1i} + w_{2i} + (1 - \alpha) w_{3i}] \qquad (4)$$

αは，意思決定者により [0,1] の範囲内で設定される楽観の度合である．αが 1 に近づくほど楽観的となり，0 に近づくほど悲観的となる．

以下に，提案手法のアルゴリズムを示す．なお，最小木を求める際の基本的なアルゴリズムは，文献 [2][7] の Prim アルゴリズムに基づいている．

ステップ 1:三角型ファジィ数の変換

式 (4) を用いて，三角型ファジィ数で与えられているコスト$\widetilde{W}_i$をクリスプな$\widehat{w}_i$に変換する．

ステップ 2: “既に選ばれたノード” の初期値として一番目のノードv_1を与える．一番目のノードに連結しているアークの中でコストが最小なものを見つけ，それを基底とする．(最小なものが複数ある場合は，その中から任意に選ぶ.)

ステップ 3: 基底として選ばれたアークに連結しているノードを “既に選ばれたノード” の集合に加える．

ステップ 4: “既に選ばれたノード” と連結していて，かつ基底，非基底として選ばれていないアークを見つける．さらに，その中からコストが最小なものを見つける．(最小なものが複数ある場合は，その中から任意に選ぶ.)

ステップ 5: 見つけたアークを基底とすることでループになるかどうかを判定する．ループになる場合はそのアークを非基底とする．ループにならなければ基底とする．

ステップ 6: 全てのノードが選ばれたら終了．それ以外はステップ 3 へ戻る．

5 数値例

図 3 で示すような 10 ノード，18 アークのネットワークにおける最小木を求める．各アークの長さを表 1 に示す．

このネットワークに提案手法を適用した結果，α の各値に対する最小木は，それぞれ表 2 のようになった．また，$\alpha = 0.5$ 及び 0.6 における最小木をそれぞれ図 4, 図 5 に示す．

表 2 からも分かるように，意思決定者が$\alpha = 1$，すなわち最も楽観的な立場と，$\alpha = 0$，すなわち最も悲観的な立場に立った場合の解は，それぞれ $\widetilde{Z}(\boldsymbol{x}) = (16, 35, 61)$，$\widetilde{Z}(\boldsymbol{x}) = (23, 35, 52)$ となっている．また図 4, 図 5 から，$\alpha = 0.5$ と 0.6 では，$\widetilde{w}_{10} = (1, 4, 9)$ と $\widetilde{w}_{13} = (3, 4, 6)$ の大小関係が逆転することが分かる．このように提案手法では，設定する α の値によって得られる解は異なり，意思決定者は，それらの解の中から自分の選好に沿ったものを選ぶことができる．

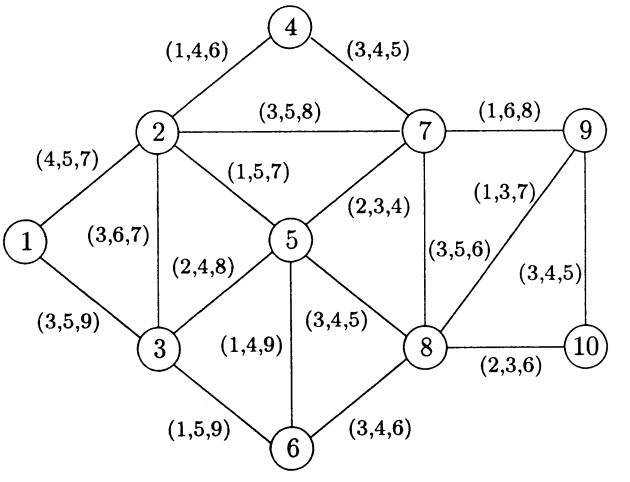


図 3: ネットワーク ($m = 10$, $n = 18$)

表 1: 各アークの長さ（コスト）$\widetilde{W}_i$

i	アーク	$\widetilde{W}_i$	i	アーク	$\widetilde{W}_i$
1	1 − 2	(4,5,7)	10	5 − 6	(1,4,9)
2	1 − 3	(3,5,9)	11	5 − 7	(2,3,4)
3	2 − 3	(3,6,7)	12	5 − 8	(3,4,5)
4	2 − 4	(1,4,6)	13	6 − 8	(3,4,6)
5	2 − 5	(1,5,7)	14	7 − 8	(3,5,6)
6	2 − 7	(3,5,8)	15	7 − 9	(1,6,8)
7	3 − 5	(2,4,8)	16	8 − 9	(1,3,7)
8	3 − 6	(1,5,9)	17	8 − 10	(2,3,6)
9	4 − 7	(3,4,5)	18	9 − 10	(3,4,5)

表 2: 各αにおける総コスト$\widetilde{Z}(\boldsymbol{x})$と最小木に含まれるアーク

α	$\widetilde{Z}(x)$	最小木に含まれるアーク
0.0	(23,35,52)	1-2,2-4,3-5,4-7,5-7,5-8,6-8,8-10,9-10
0.1	(23,35,52)	1-2,2-4,3-5,4-7,5-7,5-8,6-8,8-10,9-10
0.2	(23,35,52)	1-2,2-4,3-5,4-7,5-7,5-8,6-8,8-10,9-10
0.3	(21,34,54)	1-2,2-4,3-5,4-7,5-7,5-8,6-8,8-9,8-10
0.4	(21,34,54)	1-2,2-4,3-5,4-7,5-7,5-8,6-8,8-9,8-10
0.5	(21,34,54)	1-2,2-4,3-5,4-7,5-7,5-8,6-8,8-9,8-10
0.6	(19,34,57)	1-2,2-4,3-5,4-7,5-6,5-7,5-8,8-9,8-10
0.7	(18,34,59)	1-3,2-4,3-5,4-7,5-6,5-7,5-8,8-9,8-10
0.8	(16,35,61)	1-3,2-4,2-5,3-5,5-6,5-7,5-8,8-9,8-10
0.9	(16,35,61)	1-3,2-4,2-5,3-5,5-6,5-7,5-8,8-9,8-10
1.0	(16,35,61)	1-3,2-4,2-5,3-5,5-6,5-7,5-8,8-9,8-10

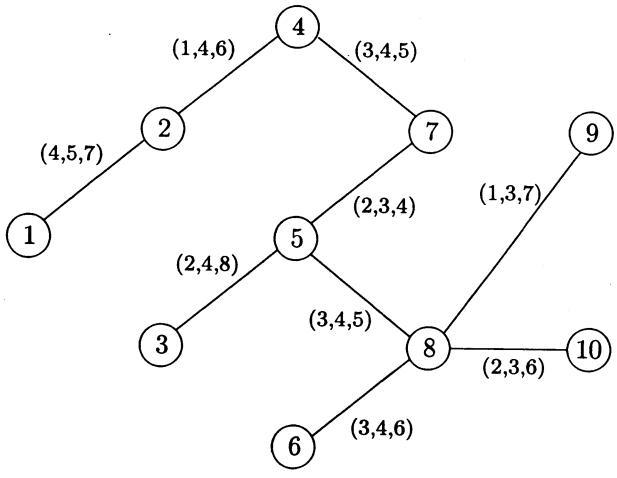


図 4: 最小木 ($\alpha = 0.5$)

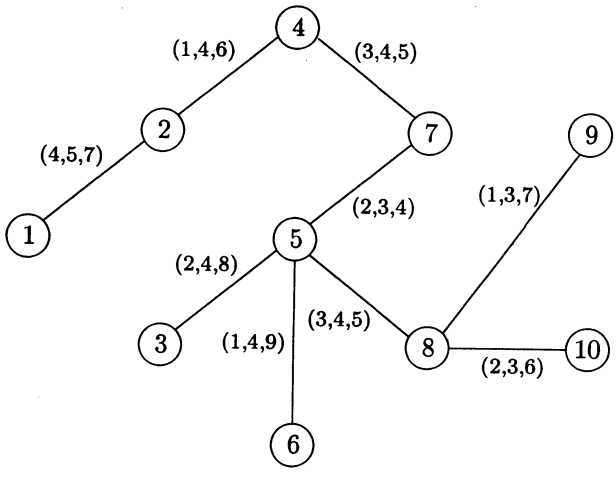


図 5: 最小木 ($\alpha = 0.6$)

6 おわりに

本研究ではf-MST問題の一解法を提案し，数値実験によりその有効性について検討した．各アークの長さに三角型ファジィ数を導入した結果，距離やコスト等のあいまいさを考慮したMST問題のモデル化が可能となった．また，アルゴリズム中の三角型ファジィ数のランキングに対して，意思決定者の楽観の度合に相当するパラメータαを導入することにより，意思決定者の性格や嗜好に柔軟に対応できる．

参考文献

[1] 伊理正夫, 古林隆:ネットワーク理論, 日科技連, 1976.

[2] Ahuja, R.K., T.L. Magnanti, and J.B. Orlin: *Network Flows Theory, Algorithms, and Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.

[3] 井田憲一, 玄光男, 李銀珍:"ファジィ係数を伴う多目的最小コストフロー問題の一解法", 日本経営工学会論文誌, Vol.46, No.5, pp.518-523, 1995.

[4] Kaufmann, A. and Gupta, M.M.: *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, Van Nostrand Reinhold, 1988. (田中英夫監訳, 松岡浩訳: ファジィ数学モデル, オーム社, 1992)

[5] 玄光男, 井田憲一, 周根貴, 高山政人: "区間係数を伴う最小木問題の一解法", 日本経営工学会平成8年度秋季研究大会予稿集, pp.67-68, 1996.

[6] Kruskal, J., Jr.: "On the shortest spanning subtree of graph and the traveling salesman problem", *Proc. ACM*, vol.7, pp48-50, 1956.

[7] Prim, R.C.: Shortest connection networks and some generalizations, *Bell Sys. Tech. J.*, Vol.36, pp.1389-1401, 1957.

[8] Dijkstra, E.: "A note on two problems in connection with graphs", *Numerische Mathematik*, vol.1, pp.269-271, 1959.

[9] Sollin, M., Le trace de canalisation, in Berge, C. and A. Ghouilla-Houri, editors: *Programming, Games, and Transportation Networks*, John Wiley & Sons, New York, 1965.

[10] Liou, T. S. and Wang, M. J.: "Ranking Fuzzy Numbers with Integral Value", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.50, No.1, pp.247-255, 1992.

連絡先:〒326 栃木県足利市大前町268
足利工業大学　経営工学科　玄研究室
高山　政人
Tel: 0284-64-0605 ext.290
Fax: 0284-64-1071
e-mail: mtakayama@genlab.ashitech.ac.jp

FRE1-4

ファジィ配置問題
Fuzzy Facility Location Problems

石井 博昭
Hiroaki Ishii
大阪大学工学研究科
Graduate School of Eng., Osaka Univ.

松富 達夫
Tatuo Matutomi
近畿大学工学部
Fac. of Engineering, Kinki Univ.

Abstract

In this paper, we consider a fuzzy version of facility location problem by introducing fuzzy location of demand points with possibility functions and fuzzy distance between each demand point and a facility whose location is to be determined. Further fuzzy goal with respect to actual distance between the faclity and each demand point is also introduced, which is specified by the membership function describing the satisfaction degree of the distance. Our objectives are to determine the facility site maximize minimal possibility of actual distances from the facility to demand points and minimal satisfaction degree of fuzzy goals. Since usually no solutions to maximize both minimal ones at a time, we seek nondominated sites of the facility for the problem after defining notion of nondominated site of the facility. In order to find these nondominated sites, we first divide the possible region into subregions and introduce a special linear rogramming problem with two objectives to each subregion. After that, these site are found by maximizing concave piecewise linear functions that are optimal values of specially parametrized linear programming problems related to these bi-criteria linear programming problems. Finally further research problems are discussed.

1 はじめに

施設配置の問題とは、需要に対して効率的なサービスを提供できる施設配置を決定することである。このときに、目的関数や制約条件がファジイである施設配置の研究には [1] や [2] などがあるが、需要点の位置は確定的なものとしてきた。しかし、実際には情報不足などからその位置は1点としては明確に識別できない、あるい識別できる前に施設配置を決定しなければならない事も多いと考えられる。また、交通渋滞や障害、傾斜などにより必ずしも需要点と施設への物理的な距離を用いて、その間の実際距離とできない場合もある。この場合、その距離に関して曖昧が存在すると思われる。そこで、ここでは需要点の位置及び距離のファジイ概念化を行い、実際距離に関するファジイ目標を設定した施設配置問題を考え、距離の可能性に関する最小値及びファジイ目標に関する満足度の最小値の両方を最大にする施設配置位置を求める。しかし、通常両方を同時に最大化する様な位置は存在しないので、施設配置の非劣位置を求める解法を与える。

2 定式化

[定義] **可能性測度**

次の条件を満たすΩ上の集合関数Πを可能性測度と呼ぶ。

1. $\Pi : \forall A \subseteq \Omega \rightarrow [0,1]$
2. $\Pi(\Phi) = 0; \Pi(\Omega) = 1$
3. $\Pi(A \cup B) = max(\Pi(A), \Pi(B)), \forall A, B \subseteq \Omega$

特にファジイ集合 A に対しては、可能性測度を

$$\Pi(A) = sup\{min(\pi(x), \mu_A(x)) | x \in \Omega\}$$

とする。ここで、$\pi(x)$ は可能性分布関数で、$\mu_A(x)$ はファジイ集合 A の帰属度関数である。

平面上に n 個の需要点 $Y_i = (X_i, Y_i), i = 1,2,\ldots,n$ があり、その位置が、点 $A_i = (a_i, b_i)$ を中心とした領域

$$R(A_i) = \{(x_i, y_i) | p_i|x_i - a_i| + q_i|y_i - b_i| \leq k_i\}$$

すなわち、$(a_i + \frac{k_i}{p_i}, b_i), (a_i - \frac{k_i}{p_i}, b_i)$

$(a_i, b_i + \frac{k_i}{q_i}), (a_i, b_i - \frac{k_i}{q_i})$ を頂点とした菱形

内にあり、点 A_i で最も可能性が高くそこから距離が遠ざかるにつれて低くなるとする。すなわち，A_i と需要点 Y_i の距離を非対称直角距離、

$$d_{1i} = p_i|x_i - a_i| + q_i|y_i - b_i|$$

で測り、、可能性分布

$$\mu_{Y_i}(x_i, y_i) = 1 - \frac{d_{1i}}{k_i}, 0 \leq d_{1i} \leq k_i$$

とする。ここで、一般性を失うことなく，$p_i \geq q_i$ とする。また、$R(A_i), i = 1,2,\ldots,n$ は互いに重ならないとする。次に施設の位置 (x, y) と需要点 (x_i, y_i) の物理的距離 d_{2i} を直角距離 $d_{2i} = |x - x_i| + |y - y_i|$ で測り、実際距離 D_{2i} の可能性分布を

$$\mu_{D_{2i}}(d_i) = \begin{cases} 1 - \dfrac{d_{2i} - d_i}{f_i} & (d_{2i} - f_i \leq d_i \leq d_{2i}) \\ 1 - \dfrac{d_i - d_{2i}}{g_i} & (d_{2i} \leq d_i \leq d_{2i} + g_i) \\ 0 & \text{その他} \end{cases}$$

とする。実際は需要点の位置がファジイであるので、中心となる d_{2i} がファジイである可能性分布となる。すなわち、施設の位置 (x, y) から需要点 Y_i への距離が d_i である可能性は

$$\mu_{D_i}(d_i) = max\{min(\mu_{D_{2i}}(d_i), \mu_{Y_i}(d_{1i})) | d_{1i} = p_i|x_i - a_i| + q_i|y_i - b_i|, d_{2i} = |x - x_i| + |y - y_i|, (x_i, y_i) \in R(A_i)\}$$

さらに各需要点に対して、ファジイ目標 G_i を考えて、その帰属度関数を実際距離に関する満足度を表す以下の関数とする。

$$\mu_{G_i}(d_i) = \begin{cases} 1 & (d_i \leq e_i) \\ 1 - \dfrac{d_i - e_i}{\ell_i - e_i} & (e_i \leq d_i \leq \ell_i) \\ 0 & (d_i \geq \ell_i) \end{cases}$$

以上の下で、

$$max[(min\{\mu_{D_i}(d_i) | i = 1,2,\ldots,n\},$$
$$min\{\mu_{G_i}(d_i) | i = 1,2,\ldots,n\}), d_1, d_2, \cdots, d_n]$$

を与える施設の位置 (x, y) を決定したい。しかし、通常両方の最小値を同時に最大にするように施設の位置を決める事ができないので、以下で定義する非劣位置を求めたい。

[定義] **非劣位置**

施設の位置 $X = (x, y)$ に対して位置のベクトル $\mathbf{V}_X = (v_X^1, v_X^2)$ を

$$\mathbf{V}_X = (min\{\mu_{D_i}(d_i) | i = 1,2,\ldots,n\},$$
$$min\{\mu_{G_i}(d_i) | i = 1,2,\ldots,n\})$$

とする。施設の位置 X, X' に対する位置のベクトル $\mathbf{V}_X, \mathbf{V}_{X'}$ について、

1. $\mathbf{V}_X \neq \mathbf{V}_{X'}$
2. $v_X^1 \geq v_{X'}^1$, $v_X^2 \geq v_{X'}^2$

であるとき、X は X' に優越するという。施設の位置 X は優越する位置が存在しないとき、非劣位置という。

3 解法

これらの非劣位置を求めるためにまず各需要点の台の領域 $R(A_i)$ の４つの頂点より、各々x, y軸に平行な直線を引き、対象領域 $R(P)$ (全ての需要点の台の集合 $R(A_1) \cup R(A_2) \cup \cdots \cup R(A_n)$ を含む最小の長方形) を幾つかのメッシュに分割する。各メッシュを北西隅の方から順に番号をつけ、$M_1, M_2, \cdots, M_{n_M}$ とする。ここで、n_M はメッシュの総数である。非劣位置は明らかにこのどれかの

メッシュのなかに存在する。また、各 $R(A_i)$ は菱形をしており、その対角線によって4つの部分領域に分けられる。その右上を $R^1(A_i)$ とし、反時計まわりに以下 $R^2(A_i), R^3(A_i), R^4(A_i)$ と名付ける。我々の問題はこのとき、各メッシュに対応する n_M の部分問題のなかでの非劣位置の中から、もとの問題として優越されるものを取り除いて全体としての非劣位置が求められる。従って、ここでは施設の位置があるメッシュ M_j にあるものとしたときの部分問題の解法のみを示す。

メッシュ M_j に対する部分問題を考えて、説明する。このとき、各需要点 $R(A_i)$ との位置関係が重要となる。今位置関係を M_j が $R(A_i)$ の南西にあるとして説明する。このとき、対称性と目的関数がマックス・ミニであることより、需要点 i の位置 (x_i, y_i) は $R^3(A_i)$ にあるとしてよい。すなわち、

$$d_{1i} = p_i(a_i - x_i) + q_i(b_i - y_i) \quad (1)$$

$$d_{2i} = x_i - x + y_i - y \quad (2)$$

としてよい。一方

$$\mu_{D_i}(d_i) = maxmin(\mu_{D_{2i}}, \mu_{Y_i})$$

であるから、$\mu_{D_{2i}}$ の左側の斜面のみを考えれば十分である。従ってマックス・ミニ型より、

$min\{\mu_{D_i}(d_i), i = 1, 2, \ldots\} = \alpha$

$min\{\mu_{G_i}(d_i), i = 1, 2, \ldots, \} = \beta$ とすると、これは

$$1 - \frac{d_{2i} - d_i}{f_i} = 1 - \frac{d_{1i}}{k_i} \geq \alpha, i = 1, 2, \ldots, n$$

$$1 - \frac{d_i - e_i}{\ell_i - e_i} \geq \beta, i = 1, 2, \ldots, n$$

で α, β をできるだけ大きくすることと同値となる。従って、(1),(2) により $d_{1i}, d_{2i}, i = 1, 2, \ldots, n$ を消去して、次の線形計画問題を解けばよいことが判る。

P_j:$max\{\alpha, \beta\}$

subject to

$$x - x_i + y - y_i - d_i \leq f_i(1 - \alpha), i \in I_1$$

$$0 \leq p_i(x_i - a_i) + q_i(y_i - b_i) \leq k_i(1 - \alpha), i \in I_1$$

$$x_i - x + y - y_i - d_i \leq f_i(1 - \alpha), i \in I_2$$

$$0 \leq p_i(a_i - x_i) + q_i(y_i - b_i) \leq k_i(1 - \alpha), i \in I_2$$

$$x_i - x + y_i - y - d_i \leq f_i(1 - \alpha), i \in I_3$$

$$0 \leq p_i(a_i - x_i) + q_i(b_i - y_i) \leq k_i(1 - \alpha), i \in I_3$$

$$x - x_i + y_i - y - d_i \leq f_i(1 - \alpha), i \in I_4$$

$$0 \leq p_i(x_i - a_i) + q_i(b_i - y_i) \leq k_i(1 - \alpha), i \in I_4$$

$$0 \leq d_i \leq (1 - \beta)(\ell_i - e_i) + e_i, i = 1, 2, \ldots, n$$

$$(x, y) \in M_j.$$

ここで、I_1は M_jが $R(A_i)$ の北東にある場合、I_2は M_jが $R(A_i)$ の北西にある場合、I_3は M_jが $R(A_i)$ の南西にある場合、I_4は M_jが $R(A_i)$ の南東にある場合である。P_jは変数が $x_1, x_2, \cdots, x_n, y_1, y_2, \cdots, y_n, d_1, d_2, \cdots, d_n, \alpha, \beta$ である2目的の線形計画問題である。一般に同時に α, β を最大にできないので、α をパラメータにして β を各 $P_j, j = 1, 2, \ldots, n_M$ について最大化する。そのなかで、最大の β を与える P_j の最適値 (x, y) が非劣位置の候補となる。このとき各 P_j の β の最大値は α の凹関数なる折れ線関数となることが容易にわかる。従って、これら n_M 個の凹折れ線の最大を求めればよいことになる。これは [3] を用いて効率的にもとめることができる。また、各 P_j は通常最初から解き直さなくても、感度解析等を用いて再最適化を行えばよい。

4 まとめ

我々は需要点の位置および距離のファジイ概念化を行い、より現実的な施設配置問題を考えた。しかし、その解法は必ずしも効率的であるとは言い難い。効率的な解法のためにはモデルの構造を利用する、例えば、もっと非劣位置の候補地が絞り込むことが必要である。また、ファジイ概念を用いた施設配置問題は始まったばかりであり、その多目的版も含めてさらに現実的なモデルとその効率的解法が望まれる。さらには、確率的な場合と組み合わせた研究も必要であり、我々はこの辺りも今取り組んでいるところである。

参考文献

[1] 松富、石井 ”ファジイ概念を用いた非対称距離施設配置問題”、日本ファジイ学会誌、Vol.8, No.1, pp.57-64, 1996.

[2] U.Bhattacharya, J.R.Rao and R.N.Tiwari, "Fuzzy multi-criteria facility location problem", Fuzzy Sets and Systems, Vol.51, pp.277-287, 1982.

[3] N.Megiddo, "Linear time algorithm for linear programming in R^3 and related problems", SIAM J. Computing, Vol.12, pp.759-776.

連絡先

〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
応用物理学専攻
石 井 博 昭
TEL 06-879-7868
FAX 06-878-1385
E − mail ishiiha@ap.eng.osaka − u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRE2-1

角型構造の大規模多目的ファジィ線形計画問題に対する分解手法の有効性

Efficiency of a Decomposition Method for Large-Scale Multiobjective Fuzzy Linear Programming Problems with Block Angular Structure

坂和正敏† 加藤浩介† 茂原英樹†
Masatoshi SAKAWA† Kosuke KATO† Hideki MOHARA†

†広島大学工学部第二類（電気系）
†*Faculty of Engineering, Hiroshima University*

Abstract: In this paper, we focus on large-scale multiobjective fuzzy linear programming problems with the block angular structure and examine the efficiency of the Dantzig-Wolfe decomposition method in the interactive fuzzy satisficing method recently proposed by Sakawa et al. After overviewing the Dantzig-Wolfe decomposition method and the interactive fuzzy satisficing method, three-objective linear programming problems with 15 coupling constraints are considered in order to demonstrate the efficiency of the Dantzig-Wolfe decomposition method over the revised simplex method. Through a lot of computational experiments on workstation for numerical examples with both 50 and 200 variables, the advantages of the Dantzig-Wolfe decomposition method are discussed with respect to processing time and required memory storage.

1. はじめに

現実の数多くの大規模な最適化問題は，角型構造の数理計画問題として定式化されることが多い．例えば，製造会社の各事業部ごとに，独自で利用可能な資源が与えられているとともに，会社全体として利用可能な最大量に制限のある共通の資源をわけあって利用しなければならないという制約のもとで，会社全体の利益を最大にするというような場合である．このような大規模な数理計画問題に対しては，なんらかの工夫により，いくつかの小規模な問題に分割して解くことが望ましい．このような観点からの試みは，1960年代の初めに Dantzig と Wolfe [1] が，角型構造の大規模線形計画問題に対する分解原理を提案して以来，角型構造の大規模数理計画問題に対する数多くの研究が活発に行われてきた [2]-[5].

筆者らは，近年，角型構造の大規模多目的線形計画問題の各目的関数に対する意思決定者のファジィ目標を線形のメンバシップ関数で規定した後，凸ファジィ決定やファジィ決定に従って変換した問題に，Dantzig-Wolfe の分解原理を適用することにより意思決定者のファジィ目標を考慮した満足解を効率よく導出するという手法を提案するとともに，対話型手法への拡張も試みてきた [6]-[10].

また，角型構造の大規模多目的線形計画問題に含まれる数多くのパラメータに対して，問題の定式化に携わった専門家の人間としての判断をより適切に表現するためには，従来のように何らかの経験的あるいは主観的な方法である値に設定するよりはむしろ，含まれるパラメータそのものをファジィ数としてとらえた方が，現実の多目的意思決定状況をより適切に表すことが可能になるものと期待できる [11, 12]. このような観点から，筆者らは，角型構造の大規模多目的線形計画問題の各目的関数や制約式に含まれるパラメータのあいまい性がファジィ数として特性づけられているという，ファジィ数を含む角型構造の大規模多目的線形計画問題の定式化を試みるとともに，含まれるすべてのファジィ数のメンバシップ関数の帰属度が α 以上となる係数ベクトルや行列の中で，特に意思決定者が最も望ましいように，その値を設定するという，非ファジィな α-多目的線形計画問題を定義して，通常のパレート最適解の素直な拡張と見なされる (M-)α-パレート最適解の概念を導入した．さらに，意思決定者が主観的に設定した基準値にミニマックスの意味で近い (M-)α-パレート最適解は Dantzig-Wolfe の分解原理の適用により求められることを示し，得られた解に意思決定者が満足しなければ基準値を対話的に更新することにより，(M-)α-パレート最適解の集合の中から意思決定者の満足解を導出するという対話型意思決定を提案した [13, 14].

しかし，残念ながら，これまでの筆者らの論文においては，簡単な数値例により提案した手法の妥当性を示したのみにとどまっており，大規模な問題に対する処理時間や必要記憶容量に関する優位性についての比較・検討は今後の課題として残されていた．このような大規模な問題に対する処理時間や必要記憶容量に関する優位性についての比較・検討は，いうまでもなく使用するコンピュータに依存するが，現実の様々な意思決定状況を考慮すれば，近年特に性能の向上が著しいパソコンやワークステーション上で，提案した手法に基づいて作成されたプログラムによる意思決定者との対話が現実に有効に実行できるのかということは，極めて重要な課題になるといわざるを得ない．このような状況を鑑み，本論文では，角型構造の大規模多目的ファジィ線形計画問題に対して，ワークステーション上で，3目的15結合制約の数値例を取り上げて，50変数と200変数のそれぞれの場合に対する数多くの数値実験を試みることにより，Dantzig-Wolfe の分解手法

を適用した場合の処理時間や必要記憶容量に関する有効性を数値的に検証する．

2. 角型構造のファジィ多目的線形計画問題

角型構造の大規模多目的ファジィ線形計画問題

$$\left.\begin{array}{rl} \text{minimize } \tilde{\boldsymbol{c}}_{11}\boldsymbol{x}_1 + \cdots + \tilde{\boldsymbol{c}}_{1p}\boldsymbol{x}_p & \\ \text{minimize } \tilde{\boldsymbol{c}}_{21}\boldsymbol{x}_1 + \cdots + \tilde{\boldsymbol{c}}_{2p}\boldsymbol{x}_p & \\ \vdots & \\ \text{minimize } \tilde{\boldsymbol{c}}_{k1}\boldsymbol{x}_1 + \cdots + \tilde{\boldsymbol{c}}_{kp}\boldsymbol{x}_p & \\ \text{subject to } \tilde{A}_1\boldsymbol{x}_1 + \cdots + \tilde{A}_p\boldsymbol{x}_p & \leqq \tilde{\boldsymbol{b}}_0 \\ \tilde{B}_1\boldsymbol{x}_1 & \leqq \tilde{\boldsymbol{b}}_1 \\ \ddots & \\ \tilde{B}_p\boldsymbol{x}_p & \leqq \tilde{\boldsymbol{b}}_p \\ \boldsymbol{x}_j \geqq \boldsymbol{0},\ j = 1,\ldots,p & \end{array}\right\} \quad (1)$$

に対して筆者らによって提案された対話型ファジィ満足化手法における M-α-パレート最適解は

$$\left.\begin{array}{rl} \text{minimize } \boldsymbol{c}^L_{1\alpha}\boldsymbol{x} & \\ \text{subject to} & \\ \boldsymbol{c}^L_{i1\alpha}\boldsymbol{x}_1 + \cdots + \boldsymbol{c}^L_{ip\alpha}\boldsymbol{x}_p & \leqq d^{-1}_{iR}(\bar{\mu}_i - v), \\ & i \in I_1 \cup I_{3R} \\ \boldsymbol{c}^R_{i1\alpha}\boldsymbol{x}_1 + \cdots + \boldsymbol{c}^R_{ip\alpha}\boldsymbol{x}_p & \geqq d^{-1}_{iL}(\bar{\mu}_i - v), \\ & i \in I_2 \cup I_{3L} \\ A^L_{1\alpha}\boldsymbol{x}_1 + \cdots + A^L_{p\alpha}\boldsymbol{x}_p & \leqq \boldsymbol{b}^R_{0\alpha} \\ B^L_{1\alpha}\boldsymbol{x}_1 & \leqq \boldsymbol{b}^R_{1\alpha} \\ \ddots & \\ B^L_{p\alpha}\boldsymbol{x}_p & \leqq \boldsymbol{b}^R_{p\alpha} \\ \boldsymbol{x}_j \geqq \boldsymbol{0},\ j = 1,\ldots,p & \end{array}\right\} \quad (2)$$

に Dantzig-Wolfe の分解原理を適用することにより求められる [13, 14]．ここで，$\tilde{\boldsymbol{c}}_{ij}$ $(i = 1,\ldots,k;\ j = 1,\ldots,p)$ は 要素がファジィ数の n_j 次元係数行ベクトル，$\boldsymbol{x}_j$ $(j = 1,\ldots,p)$ は n_j 次元列ベクトルの決定変数，$\tilde{A}_j$ は 要素がファジィ数の $m_0 \times n_j$ の係数行列，$\tilde{B}_j$ は 要素がファジィ数の $m_i \times n_j$ の係数行列である．さらに，$A^L_{i\alpha}$, $B^L_{i\alpha}$, $\boldsymbol{b}^R_{h'\alpha}$, $\boldsymbol{c}^L_{j\alpha}$, $\boldsymbol{c}^R_{j\alpha}$ は α-レベル集合の左右の端点である．また，fuzzy min と fuzzy equal の右側の強意単調減少のメンバシップ関数を $d_{iR}(\boldsymbol{c}_i\boldsymbol{x})$ $(i \in I_1 \cup I_{3R})$, fuzzy max と fuzzy equal の左側の強意単調増加のメンバシップ関数を $d_{iL}(\boldsymbol{c}_i\boldsymbol{x})$ $(i \in I_2 \cup I_{3L})$ と表している．

3. 数値実験

3.1. 実験環境

使用した計算機は Sun の SPARCStation 10 である．シミュレーションでは，3 目的，15 結合制約式の問題を対象として，問題に含まれる係数は次のような規則に基づいて生成することにした．

(1) 問題の係数ベクトル c_i と係数行列 A_i, B_i は $(-5,5)$ の区間でランダムに生成する．

(2) 生成された c_i, A_i, B_i に対して，実行可能領域が存在するように，制約式の右辺定数ベクトル b_0, b_i は (5000,10000) の区間でランダムに生成する．

3.2. 比較手法と比較内容

本論文では次のような 3 種類の手法の比較を行う．

(1) **Dantzig-Wolfe の分解手法**

2 節で述べたように Dantzig-Wolfe の分解原理を適用することにより，もとの問題を 1 つの主問題と n 個の独立な部分問題に分解して解く．

(2) **改訂シンプレックス法**

生成された問題に対して，分解手法を適用しないで直接改訂シンプレックス法で解く場合には，図 1に示されているように，各ブロック制約式に現れない変数の係数はすべて 0 に設定した等価な問題を取り扱うことにする．このようにもとの問題を改訂シンプレックス

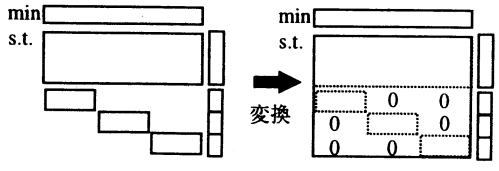


図 1: 問題の変換

法で解く場合には，ブロック制約式に現れない変数の係数をすべて 0 に設定した問題を対象とすることになり，本来不要なデータをも取り扱うことになる．

(3) **行列の疎密性を考慮した改良改訂シンプレックス法**

(2) のようにもとの問題に直接改訂シンプレックス法を適用すれば，本来不要なデータをも取り扱うことになるので，分解手法を適用するときよりも余計なデータを付加することになり得策とはいえない．このような無駄なデータの取り扱いを回避して余計な処理時間を削除するため，余計なデータを付加しないで，各ブロック制約式に現れる変数の係数のみを対象としてピボット項を決定するという工夫を付加した行列の疎密性を考慮して改良した改訂シンプレックス法を適用する．

これらの 3 種類の手法を適用して比較する内容は，次に述べるような処理時間と最大必要記憶容量である．

(1) **処理時間**

- 比較的小規模の 50 変数の問題と大規模で処理時間が 1 時間程度の取り扱いやすい 200 変数の問題におけるブロックの個数と処理時間の関係．
- 200 変数，20 ブロックの問題において各ブロックの中の変数の数が均一でなく突出して変数の個数が多いブロックが 1 つだけある場合，その変数の個数が突出したブロックの変数の個数と処理時間の関係．
- 分解手法を適用した場合と分解手法を適用しない場合のブロックの個数と必要な記憶容量の関係を 2000 変数の問題について調べる．

4. 実験結果と考察

4.1. 処理時間

まず初めに，問題の中に含まれる分解の個数，すなわちブロックの個数によって処理時間がどのように影

響するかを調べる．そのために，ブロックの個数が変化した場合の処理時間の比較を行う．ただし，ここでは各ブロックの変数の個数は均一に振り分け，端数は初めのブロックから 1 つずつ加える．得られた結果を図 2と図 3に示す．ただし，50 変数における処理時間を示す図 2ではグラフを見やすくするため改良したシンプレックス法のデータは省略している． これより，問題に対するブロックの個数が多くなればなるほど分解手法を適用した方が処理時間がより短くなっていることが分かる．これに対して，分解の数がかなり少ないとき，分解手法を適用した場合がより多くの処理時間を必要としている．これは，分解した後の部分問題がまだ大規模であるにもかかわらず，部分問題から主問題へのデータの受け渡しの分だけより多くの時間が要求されるためであると思われる． 次に，分解手法を

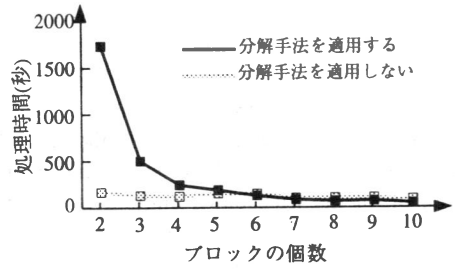


図 2: 50 変数における処理時間

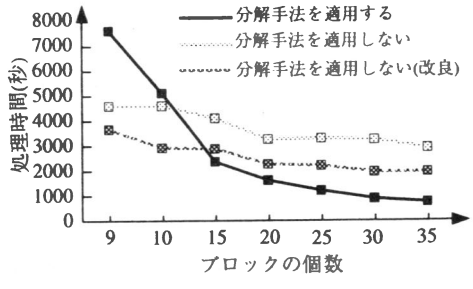


図 3: 200 変数における処理時間

適用しない場合に対する分解手法を適用した場合の処理時間の比率を求める．得られた結果を示すと図 4と図 5のようになる．50 変数に比べて 200 変数の方が分解手法を適用する場合の処理時間の短縮の有効性が向上している．このことにより，問題が大規模になるにつれて処理時間の差が拡大することになり，分解手法を適用した方が有効になることがわかる． これまでの

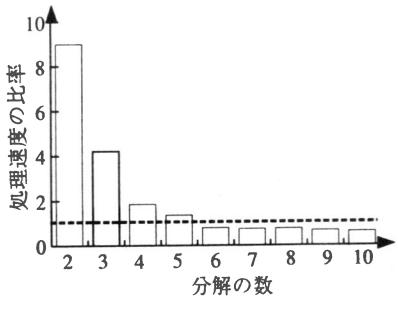


図 4: 50 変数における処理時間の比

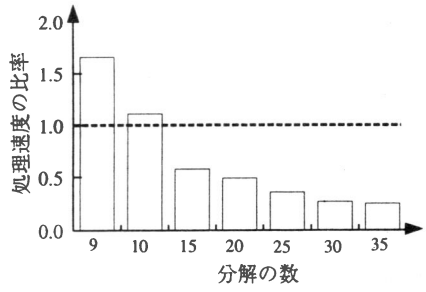


図 5: 200 変数における処理時間の比

比較においては，問題の中に含まれる各ブロックの変数の数が均一の場合を対象としてきたが，次に変数の個数が突出して多いブロックが 1 つだけあると仮定した場合を考察する．さらに，そのブロックの変数の個数が変化した場合の処理時間の比較を行う．得られた結果を図 6に示す．これにより変数の個数がある程度突出したブロックがあっても分解手法を適用する方が処理時間が短いことがわかる．しかし，問題の中に他のブロックより極端に変数の個数が多いブロックがあるとそのブロックの処理に多くの時間を必要とするためかなりの処理時間がかかってしまうことになる．

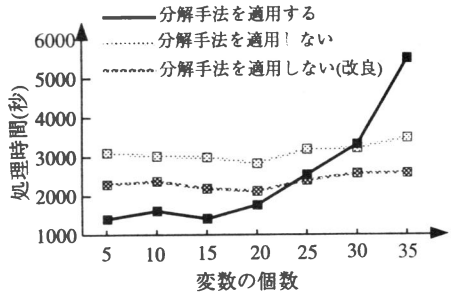


図 6: ブロックの変数の個数と処理時間

4.2. 必要記憶容量

作成したプログラムにおいて，分解手法を適用する場合と適用しない場合の最大必要記憶容量配列となる基底行列は，大まかにはそれぞれ，次のようになる．

- 分解手法を適用する場合

$$(m_0 + \underline{n} + \text{目的関数から変換された制約の数})^2$$

- 分解手法を適用しない場合

$$\left(m_0 + \underline{\sum_{i=1}^{n} m_i} + \text{目的関数から変換された制約の数}\right)^2$$

である．例えば，2000 変数，20 ブロック，3 目的，結合制約式 50，各ブロック制約式 50 の問題を解くとき，分解手法を適用する場合と適用しない場合の最大必要記憶容量は，上の最大基底配列に double 型で宣言するための 8 byte を掛けて，

- 分解手法を適用する場合

$$(50 + 20 + 2)^2 \times 8 = 41472 \quad byte$$

- 分解手法を適用しない場合

$$(50 + 20 \times 50 + 2)^2 \times 8 = 8853632 \quad byte$$

となる．2000変数においてブロックの個数を変化させてみると最大必要記憶容量は図7のようになる．

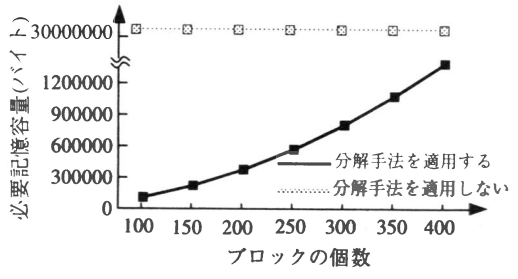


図 7: 2000 変数における必要記憶容量

分解手法を適用する場合，配列の一辺は結合制約式にブロックの個数を加えただけでよく，最大必要記憶容量はブロックの個数に依存する．よって，ブロックの個数が少ないときには分解手法を適用しない場合よりもはるかに少ない必要記憶容量ですみ有効である．今回の環境下で実行してみたところ，目的関数3，結合制約式15，分解の数50，ブロック制約の制約式40，ブロック制約式の変数の数40（すなわち，2000変数）で，分解しない場合は最大配列を確保することができなかった．これに対して分解手法を用いた場合は最大配列を確保することが可能で望ましい結果が得られた．

5. おわりに

本論文では，角型構造の大規模多目的ファジィ線形計画問題に対して，Dantzig-Wolfe の分解手法を適用したときの処理時間の短縮や使用メモリの削減などの有効性について，ワークステーション上での数多くのシミュレーションにより数値的に検証した．数値実験により得られた結論を一般に述べれば，分解手法を適用すれば適用しない場合よりもより望ましい結果が得られたといえる．特に，問題が大規模になるにつれて分解手法を適用する場合の優位性が見られた．しかし，問題の中のブロックがまだ大規模であったり，他のブロックと比べて突出して変数の数の多いブロックがあったりすると分解手法の処理速度が遅くなるという欠点も見いだされた．なお，本論文では，Dantzig-Wolfe の分解手法を適用した場合を，直接改訂シンプレックス法を適用した場合と行列の疎密性を考慮した改良改訂シンプレックス法を適用した場合との比較・検討を行ったが，今後，行列の疎密性を考慮した他の手法や内点法などとの比較や Dantzig-Wolfe の分解手法にみられた欠点を補うような新たな分解手法の提案が望まれる．

参考文献

[1] G.B. Dantzig and P. Wolfe, "The decomposition algorithm for linear programming", Econometrica, Vol. 29, pp. 767-778 (1961).

[2] L.S. Lasdon, "Optimization Theory for Large Systems", Macmillan, New York, 1970（志水訳），大規模システムの最適化理論，日刊工業新聞社，1973.

[3] J.K. Ho and R.P. Sundarraj, "An advanced implementation of the Dantzig-Wolfe decomposition algorithm for linear programming", Mathematical Programming, Vol. 20, pp. 303-326 (1981).

[4] J.K. Ho and R.P. Sundarraj, "Computational experience with advanced implementation of decomposition algorithms for linear programming", Mathematical Programming, Vol. 27, pp. 283-290 (1983).

[5] J.K. Ho and R.P. Sundarraj, "DECOMP: an implementation of Dantzig-Wolfe Decomposition for Linear Programming", Springer-Verlag, New York (1989).

[6] 坂和, 乾口, 澤田, "角型構造の大規模線形計画問題に対する凸ファジィ決定に基づくファジィ満足化手法", 日本ファジィ学会誌, 5 巻, 3 号, pp. 516-527 (1993).

[7] 坂和, 乾口, 澤田, "角型構造の大規模線形計画問題に対するファジィ計画法", 電子情報通信学会論文誌, J77-A 巻, 3 号, pp. 430-438, (1994).

[8] M. Sakawa, K. Sawada and M. Inuiguchi, "A fuzzy satisficing method for large-scale linear programming problems with block angular structure", European Journal of Operational Research, Vol. 81, No. 2, pp. 399-409 (1995).

[9] M. Sakawa, M. Inuiguchi and K. Sawada, "A fuzzy satisficing method for large-scale multiobjective linear programming problems with block angular structure", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 78, No. 3, pp. 279-288 (1996).

[10] M. Sakawa and K. Sawada, "An interactive fuzzy satisficing method for large-scale multiobjective linear programming problems with block angular structure", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 67, pp. 5-17 (1994).

[11] M. Sakawa, "*Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization*", Plenum Press, New York (1993).

[12] 坂和, 石井, 西崎, "ソフト最適化", 朝倉書店 (1995).

[13] 坂和, 加藤, 溝内, "ファジィパラメータを含む大規模多目的線形計画問題に対する対話型意思決定", 日本ファジィ学会誌, 7 巻, 3 号, pp. 612-623 (1995).

[14] 坂和, 加藤, "ファジィパラメータを含む大規模多目的線形計画問題に対する対話型ファジィ満足化手法", 日本ファジィ学会誌, 8 巻, 3 号, pp. 547-557 (1996).

[問い合わせ先]
〒 739 東広島市鏡山 1–4–1
広島大学工学部第二類（電気系）
計数管理工学講座
坂和 正敏
TEL : 0824(24)7694
FAX : 0824(24)7694/(22)7195
e-mail : sakawa@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

FRE2-2

遺伝的アルゴリズムによる多目的整数計画問題に対する対話型ファジィ満足化手法

An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective integer programming problems through genetic algorithms

坂和正敏† 柴野俊弘‡ 加藤浩介†
Masatoshi SAKAWA† Toshihiro SHIBANO‡ Kosuke KATO†

†広島大学工学部第二類（電気系）
†*Faculty of Engineering, Hiroshima University*
‡新菱冷熱工業株式会社
‡*Shinryo Corporation*

Abstract: This paper deals with multiobjective integer programming problems by considering fuzzy goals of the decision maker for objective functions. After determining the fuzzy goals of the decision maker, if the decision maker specifies the reference membership values, the corresponding Pareto optimal solution can be obtained by solving the augmented minimax problem which becomes an integer programming problem. For solving the problem, decoding algorithms for 0-1 programming problems are revised and ringed double strings are also introduced. Then an interactive fuzzy satisficing method is presented together with an illustrative numerical example.

1. はじめに

自然の進化メカニズムをモデル化した新しい学習パラダイムとして提案された遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms: GA) は，Goldberg の著書 [1] の出版を契機として，最適化，適応および学習の方法論として数多くの分野で注目を集めるようになってきている．さらに 1992 年には，Michalewicz の著書 [2] が出版され，遺伝的アルゴリズムの様々な最適化問題への適用に関する著者の研究が集大成されている．1996 年には改訂第 3 版 [2] が発行され，この分野での今後の益々の発展が期待される．近年，坂和らは 意思決定者のファジィ目標を考慮した多目的 0-1 計画問題を定式化し，意思決定者のファジィ目標を考慮したファジィ決定に基づく妥協解の導出に 2 重構造文字列を用いた遺伝的アルゴリズム [3] を導入するとともに，その対話型手法への拡張をも行った [4]．本研究では，多目的 0-1 計画問題に対する坂和らのデコード化アルゴリズムを拡張するとともに，環状 2 重構造文字列を導入することにより，多目的整数計画問題に対する遺伝的アルゴリズムを用いた対話型ファジィ満足化手法を提案する．

2. 多目的整数計画問題に対する対話型ファジィ満足化手法

一般に，k 個の目的関数 $z_i(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{c}_i\boldsymbol{x}, i = 1,\ldots,k$, の存在する多目的整数計画問題は次のように定式化される．

$$\left.\begin{array}{l}\text{minimize } (z_1(\boldsymbol{x}), z_2(\boldsymbol{x}),\ldots,z_k(\boldsymbol{x}))^T \\ \text{subject to } A\boldsymbol{x} \leqq \boldsymbol{b} \\ \qquad x_j \in \{0,\ldots,\nu_j\}, \quad j = 1,\ldots,n\end{array}\right\} \quad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{c}_i = (c_{i1},\ldots,c_{in})$, $i = 1,\ldots,k$, $\boldsymbol{x} = (x_1,\ldots,x_n)^T$, $\boldsymbol{b} = (b_1,\ldots,b_m)^T$ で $A = (a_{ij})$ は $m \times n$ 行列，ν_j は正の整数である．本論文では簡単化のため，A および $\boldsymbol{b}$ の各成分は正であると仮定する．

この問題に対して，意思決定者のファジィ目標を考慮して，メンバシップ関数の値が 0 と 1 になるような目的関数値 z_i^0 と z_i^1 を結んだ線形メンバシップ関数

$$\mu_i(z_i(\boldsymbol{x})) = \begin{cases} 0 & ; z_i(\boldsymbol{x}) \geq z_i^0 \\ \dfrac{z_i(\boldsymbol{x}) - z_i^0}{z_i^1 - z_i^0} & ; z_i^0 \geq z_i(\boldsymbol{x}) \geq z_i^1 \\ 1 & ; z_i(\boldsymbol{x}) \geq z_i^1 \end{cases} \quad (2)$$

を導入すると，解くべき問題は，もとの問題 (1) の制約集合 X 上で，これらの相競合するメンバシップ関数を同時に最大にするという次のような多目的意思決定問題に変換される [6, 7].

$$\underset{x \in X}{\text{maximize}} \ (\mu_1(z_1(\boldsymbol{x})),\ldots,\mu_k(z_k(\boldsymbol{x}))) \quad (3)$$

本研究では，多目的整数計画問題 (1) における各目的関数に対するメンバシップ関数が決定された後，メンバシップ関数空間において，意思決定者の設定する基準点に拡張ミニマックスの意味で近いパレート最適解を遺伝的アルゴリズムにより求め，もし満足できなければ対話的に基準点を更新することにより，最終的にパレート最適性の保証された満足解を求めるという対話型ファジィ満足化手法を提案する．

各メンバシップ関数に対して意思決定者の志望水準を反映させる基準点 $\bar{\boldsymbol{\mu}} = (\bar{\mu}_i,\ldots,\bar{\mu}_k)^T$ が設定されると，基準点にできるだけ近いパレート最適解は，次の拡張ミニマックス問題を解くことによって求められる．

$$\left.\begin{array}{l}\text{minimize}\\ \max\limits_{i=1,\ldots,k}\left\{(\bar{\mu}_i-\mu_i(z_i(\boldsymbol{x})))+\rho\sum\limits_{i=1}^{k}(\bar{\mu}_i-\mu_i(z_i(\boldsymbol{x})))\right\}\\ \text{subject to } A\boldsymbol{x}\leqq\boldsymbol{b}\\ \qquad x_j\in\{0,\ldots,\nu_j\},\quad j=1,\ldots,n\end{array}\right\}\tag{4}$$

ここで ρ は十分小さい正の数で，$\bar{\mu}_i, i=1,\ldots,k,$ は，基準メンバシップ値とよばれる [6, 7].

この整数計画問題の制約式は線形で係数はすべて正であるので，このような 0-1 計画問題に対して坂和らの提案した 2 重構造文字列コード化遺伝的アルゴリズム [3, 4, 5] の拡張を試みる.

3. 2 重構造文字列コード化遺伝的アルゴリズム

3.1. コード化

線形の制約式 $A\boldsymbol{x}\leqq\boldsymbol{b}$ の $A, \boldsymbol{b}$ の成分がすべて正であるような多目的 0-1 計画問題に対して，図 1 に示されているように，上段には変数の添字，下段には変数の値を要素とするような 2 重構造の文字列によるコード化が提案されてきている [3, 4, 5]. ここで，$s(i)$ は

添字	$s(1)$	$s(2)$	$\cdots\cdots$	$s(i)$	$\cdots\cdots$	$s(n)$
変数の値	$x_{s(1)}$	$x_{s(2)}$	$\cdots\cdots$	$x_{s(i)}$	$\cdots\cdots$	$x_{s(n)}$

図 1: 2 重構造の文字列

変数 x_j の添字 j に対応し，$x_{s(i)}$ は $s(i)$ に対する変数 x_j の値を表している．線形の制約式の成分がすべて正であるような 0-1 計画問題に対して，このような 2 重構造の文字列を用いて，坂和らによって提案されたデコード化アルゴリズム [3, 4, 5] を，整数計画問題に拡張すれば，実行可能解のみを生成することができる次のようなデコード化アルゴリズムを提案することができる．ここで，文字列の長さを n，文字列の位置を i，変数の添字を $s(i)$，変数の値を $x_{s(i)}$，制約式の数を m，制約式の係数を $a_{js(i)}$，デコード化された $x_{s(i)}$ の値を $p_{s(i)}$ とする.

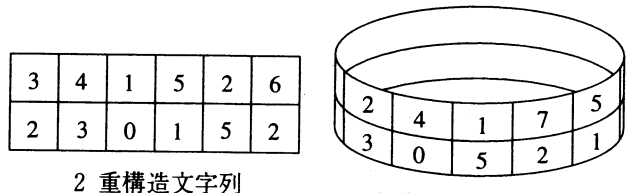
2 重構造の文字列のデコード化アルゴリズム

手順 1 $i=1$, $sum_j=0$ $(j=1,\ldots,m)$ とおく.
手順 2

$$p_{s(i)}=\min\left(\min_{\{j|a_{js(i)}\neq 0\}}\left[\frac{b_j-sum_j}{a_{js(i)}}\right], x_{s(i)}\right)$$

とする.
手順 3 $sum_j=sum_j+a_{js(i)}p_{s(i)}$ $(j=1,\ldots,m)$
$i=i+1$ とする.
手順 4 $i>n$ ならば終了．そうでなければ手順 2 へ戻る.

しかし 2 重構造文字列では，文字列の左側からデコードされるため，文字列中の左側に位置するものから優先されるという問題点が残されている．変数の取りうる値が 0-1 の場合にはこのような問題点の影響は比較的少ないが，整数値をとる場合には，左側に位置する文字がより優先されることの影響が大きくなってくる．そのため，より重要な影響を受ける左側の要素を，いかにして子に受け継ぐかという課題が発生する．このようなことを考慮して，本研究では，個体の構造が環状につながっている環状 2 重構造文字列を提案する．この文字列を用いることによる効果は，交叉の項で詳しく述べる．なお，環状 2 重構造文字列のデコード化のアルゴリズムは，2 重構造文字列と同じもの採用する．各文字列の例をあげると，図 2 のようになる．ここで，上段の値は変数の添字，下段の値はその変数の値を表す.



2 重構造文字列　　環状 2 重構造文字列

図 2: 各文字列の例

3.2. 適合度

各文字列 $\boldsymbol{s}$ の適合度関数 $f(\boldsymbol{s})$ は $f(\boldsymbol{s})=1.0-\max_{i=1,\ldots,k}\left\{(\bar{\mu}_i-\mu_i(z_i(\boldsymbol{x})))+\rho\sum_{i=1}^{k}(\bar{\mu}_i-\mu_i(z_i(\boldsymbol{x})))\right\}$ と設定するのが自然である．さらに，適合度のスケーリングとして，線形スケーリング $f_i'=a\cdot f_i+b$ を採用する．ここで係数 a, b は，個体群の平均適合度が不動点となり，最大適合度が平均適合度の 2 倍の値に線形写像されるように設定する.

3.3. 再生

坂和らはすでにファジィ目標を考慮した多目的 0-1 計画問題に対して，6 種類の再生オペレータ（ランキング選択，エリートランキング選択，期待値選択，エリート期待値選択，ルーレット選択，エリートルーレット選択）についてその性能を調べてきており，その結果エリート期待値選択が比較的有効であることを確認している [3, 4, 5]. したがって，本研究では，次世代に残る個体の期待値により再生を行う期待値選択に，現在の個体の中で最大の適合度の個体は無条件で次世代に残すというエリート保存選択を加えた，エリート期待値選択を採用する.

3.4. 交叉

個体を表す文字列が 2 重構造をしているので，一点交叉や多点交叉を行うと一つの文字列に同じ添字番号が現れる可能性がある．このような状況を回避するため，2 重構造文字列に対する，次のような部分一致交叉 (PMX: partially matched crossover) が，坂和らにより提案されてきている [3, 4, 5].

PMX のアルゴリズム (2 重構造文字列)

手順 1 2つの 2 重構造の文字列を X, Y とおき，X, Y の i 番目の添字を $s_X(i), s_Y(i)$，対応する変数の値を $x_{s_X(i)}, x_{s_Y(i)}$ とする．交叉点をランダムに 2 点選びその先端を h，末端を k とし，$i = h$ とおく．

手順 2 次の (1), (2) の操作により，X の交換する部分文字列が Y の交換する部分文字列の添字の値と一致するように，X の添字と変数の値を並べ換えたものを X' とおく．

(1) $s_Y(i) = s_X(j)$ となる j を求め X の i 番目の列 $(s_X(i), x_{s_X(i)})^T$ を j 番目の列 $(s_X(j), x_{s_X(j)})^T$ と交換して，$i = i + 1$ とおく．

(2) $i > k$ なら終了，そうでなければ (1) に戻る．同様な操作で Y の列を並べ換えたものを Y' とおく．

手順 3 X' に対して Y の交換する部分文字列と入れ換える．Y' に対しても同様な操作を行う．

しかしこのような交叉では，ランダムに選ばれた 2 点間の部分文字列の部分にのみが交叉される確率が高くなり，交叉に偏りが生じるという問題点が残されている．このような問題点に対処するため，本研究では，環状 2 重構造文字列を用いて，次のような文字列の位置に関して偏りのない部分一致交叉 (PMX: partially matched crossover) を提案する．

PMX のアルゴリズム (環状 2 重構造文字列)

手順 1 2つの 2 重構造の文字列を X, Y とおく．X, Y の i 番目の添字の要素を $s_X(i)$, $s_Y(i)$，対応する変数の値を $x_{s_X(i)}$, $x_{s_Y(i)}$ とする．交叉点をランダムに 2 点選んで，交換する部分文字列を定め，手順 2 へ進む．

手順 2 交換する部分文字列の先端と末端を h と k とし，$i = h$ とおく．

手順 3 もし $i >$ length (length は文字列の長さ) なら $n = i -$ length そうでなければ，$n = i$ とおく．

手順 4 $s_Y(n) = s_X(j)$ となる j を求め，X の n 番目の要素 $(s_X(n), x_{s_X(n)})$ を j 番目の要素 $(s_X(j), x_{s_X(j)})$ と交換して，$i = i + 1$ とする．

手順 5 $i > k$ ならば終了，そうでなければ 手順 3 に戻る．

手順 6 Y に対しても同様の操作を行い，得られた文字列 X^*, Y^* を交叉後の子として終了する．

3.5. 突然変異と逆位

突然変異は，突然変異区間をランダムに選び，その区間の変数の値 $x_{s(i)}$ をランダムに発生させる．ただし $0 \leq x_{s(i)} \leq \nu_{s(i)}$ ($\nu_{s(i)}$ は $x_{s(i)}$ のとり得る最大値) とする．またある長さの部分文字列の順序を反転させる逆位とよばれる遺伝的オペレータを用いる．

4. 対話型アルゴリズム

本研究では，整数計画問題に遺伝的アルゴリズムを適用するため，0-1 計画問題の場合よりも探索空間が非常に広くなる．というのは，例えば 20 変数の問題に対して考えてみても，0-1 計画問題の場合は探索空間は 2^{20} であるが，整数計画問題の場合は変数が 0 ～ 9 の範囲の値をとるとしても探索区間は 10^{20} となるからである．このように広い探索空間をもつ整数計画問題に遺伝的アルゴリズムを適用するには，0-1 計画問題の場合よりも効率的な手法が必要とされる．そこで，各世代において，再生を行った後に交叉を行う前に，個体群に各目的関数の個別の最適解を与える個体を含むようにする．

これまで提案してきた 2 重構造文字列コード化遺伝的アルゴリズムを取り入れた対話型アルゴリズムは次のように要約される．

手順 1 初期の基準メンバシップ値を意思決定者が設定する（もし設定が困難であれば，理想値 1.0 に設定する）．

手順 2 （環状）2 重構造の文字列でコード化された個体をランダムに N 個発生させ，初期の個体群を生成する．

手順 3 各個体の適合度を求め，適合度に応じた一定の規則で再生を行う．

手順 4 個体群に各目的関数ごとの最適解を表す個体を保存する．

手順 5 設定された交叉確率 p_c で交叉を行う．

手順 6 設定された突然変異確率 p_m で突然変異を行う．

手順 7 終了条件を満たすまで 手順 3 から手順 6 を繰り返し，条件を満たせば適合度関数が最大の個体を個体を最適解として手順 8 に行く．

手順 8 現在の最適解のメンバシップ関数や目的関数の達成レベルに満足なら終了．そうでなければ，現在の達成レベルを考慮して基準メンバシップ値を更新して 手順 2 に戻る．

ここで対話後の解が，少なくとも前の対話時の解に支配されないようにするため，対話時ごとの初期集団の発生において，前の対話で得られた近似最適解を 1 つ含むようにする．

5. 2 重構造文字列と環状 2 重構造文字列の比較

5.1. 数値例の作成方法

数値例として，20 変数の 3 目的 15 次元整数ナップサック問題を取り上げ，問題の係数は次のような規則にしたがってランダムに生成するものとする．

1. 平均 300，標準偏差 50 である正規分布に従った乱数を発生させ a_{ij} を決定する．
2. b_i は $[1.25, 1.75]$ の乱数を発生させたものに $\sum_{j=1}^{n} a_{ij}$ の値を乗じた値にする．
3. c_{1j} はすべて正，c_{2j} はすべて負，c_{3j} は半数を正，残り半数を負にして a_{ij} と同様な乱数を発生させ決定する．

5.2. シミュレーション結果

作成された問題に対して，2 重構造文字列と環状 2 重構造文字列を用いて，各 20 回のシミュレーションを行う．ここで遺伝的アルゴリズムの各パラメータは，個体数 100，交叉率 $p_c = 0.8$，突然変異率 $p_m = 0.02$，探索世代数 300 とし，各整数変数の取り得る値の最大値は 10 とする．

線形のメンバシップ関数における (z_1^0, z_1^1), (z_2^0, z_2^1), (z_3^0, z_3^1) を，$(9200, 0)$, $(0, -9600)$, $(3000, -9200)$ と設定して，2 重構造文字列と環状 2 重構造文字列の比較を行う．ここで，評価の指標として便宜上 $\min(\mu_i(z_i(\boldsymbol{x})))$ を用いて，最良値，最悪値および平均値を比較することにする．このような条件のもとで得られたシミュレーション結果を示すと，表 1のようになり，環状 2 重構造文字列の方が，最悪値と平均値に関してより良好な結果が得られている．

表 1: 比較結果

	最良値	最悪値	平均値
2 重構造文字列	0.575521	0.563804	0.571542
環状 2 重構造文字列	0.575521	0.567717	0.572829

6. 対話結果

前節の結果によれば，環状 2 重構造文字列の方が 2 重構造文字列よりも最悪値と平均値に関して良い結果が得られているので，前節と同じ数値例に対して，遺伝的アルゴリズムの各パラメータやメンバシップ関数は，前節と同様に設定し，環状 2 重構造文字列を用いて，10 回のシミュレーションを行った．本例では仮想的な DM により，表 2 に示されているように，$(\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \bar{\mu}_3)$ の値は (1.0, 1.0, 1.0) から (0.8, 1.0, 1.0), (0.8, 1.0, 0.9) へと更新されている．

遺伝的アルゴリズムによる 10 回のシミュレーションで得られたパレート最適解は，各対話において，2 個となり，ややばらつきが見られるが，この点に関しては今後さらなるデコード化の工夫などによって改善されるものと思われる．

7. おわりに

本研究では，多目的整数計画問題に対する遺伝的アルゴリズムを用いた対話型ファジィ満足化手法を提案した．遺伝的アルゴリズムに関しては，2 重構造文字列によるコード化を用いて，整数変数に対処しうるデコードを提案するとともに，環状 2 重構造文字列を導入して，文字列の位置に関して偏りのない部分一致交叉 (PMX: partially matched crossover) を提案した．さらに，交叉を行う前に，各目的関数の個別の最適解を与える個体を個体群に含むことにより，0-1 計画問題に比べて解空間の広い整数計画問題を効率的に解くための手がかりを与えた．しかし，遺伝的アルゴリズムによる 10 回のシミュレーションで得られたパレート最適解は，各対話において，2 個となり，ややばらつきが見られたので，今後さらなるデコード化の工夫などの改善が望まれる．

表 2: 対話の結果

1 回目の対話	μ_1	μ_2	μ_3	$z_1(x)$	$z_2(x)$	$z_3(x)$	個数
$\bar{\mu}_1 = 1.0$	0.5773	0.5755	0.5917	3889	−5525	−4219	2
$\bar{\mu}_2 = 1.0$	0.5763	0.5749	0.5882	3898	−5519	−4177	2
$\bar{\mu}_3 = 1.0$	0.5757	0.5742	0.5848	3907	−5513	−4135	1
	0.5740	0.5795	0.6522	3919	−5563	−4958	2
	0.5722	0.6378	0.5736	3923	−5494	−4781	1
	0.5827	0.5707	0.6331	3839	−5479	−4724	1
	0.5677	0.5762	0.5877	3977	−5532	−4170	1
2 回目の対話	μ_1	μ_2	μ_3	$z_1(x)$	$z_2(x)$	$z_3(x)$	個数
$\bar{\mu}_1 = 0.8$	0.4917	0.6872	0.7373	4676	−6598	−5939	2
$\bar{\mu}_2 = 1.0$	0.4908	0.6867	0.7292	4685	−6592	−5897	1
$\bar{\mu}_3 = 1.0$	0.4945	0.6899	0.6832	4651	−6623	−5335	2
	0.4829	0.6821	0.7422	4757	−6548	−6055	1
	0.4849	0.6768	0.7169	4727	−6497	−5746	1
	0.4753	0.6734	0.7488	4827	−6465	−6135	1
	0.4701	0.7227	0.6884	4875	−6938	−5398	1
	0.4824	0.6673	0.7579	4762	−6406	−6246	1
3 回目の対話	μ_1	μ_2	μ_3	$z_1(x)$	$z_2(x)$	$z_3(x)$	個数
$\bar{\mu}_1 = 0.8$	0.4927	0.6966	0.6310	4667	−6687	−4698	2
$\bar{\mu}_2 = 1.0$	0.4933	0.6900	0.6199	4622	−6624	−4563	2
$\bar{\mu}_3 = 0.9$	0.4945	0.6899	0.6832	4651	−6623	−5335	1
	0.4892	0.6926	0.7369	4699	−6649	−5990	1
	0.4908	0.6867	0.7293	4685	−6592	−5897	1
	0.4836	0.6845	0.6108	4751	−6571	−4452	1
	0.4827	0.6828	0.6824	4759	−6555	−5325	1
	0.4799	0.6935	0.7170	4785	−6658	−5747	1

参考文献

[1] D.E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison Wesley, Massachusetts, 1989.

[2] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, Berlin, 1992, Second, extended edition, 1994, Third, revised and extended edition, 1996.

[3] 坂和，乾口，砂田，澤田，“改良型遺伝的アルゴリズムによるファジィ多目的組合せ最適化，” 日本ファジィ学会誌，vol. 6, no. 1, pp. 177-185, 1994.

[4] 坂和，加藤，砂田，園田，“多目的 0-1 計画問題に対する改良型遺伝的アルゴリズムによる対話型ファジィ満足化手法，” 日本ファジィ学会誌，vol. 7, no. 2, pp. 361-370, 1995.

[5] 坂和正敏，田中雅博，遺伝的アルゴリズム，朝倉書店，1995.

[6] M. Sakawa, Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization, Plenum Press , New York, 1993.

[7] 坂和正敏，石井博昭，西崎一郎，ソフト最適化，朝倉書店，1995.

[問い合わせ先]
〒 739 東広島市鏡山 1-4-1
広島大学工学部第二類 (電気系)
計数管理工学講座
坂和 正敏
TEL: 0824-24-7694
FAX: 0824-24-7694/0824-22-7195
e-mail: sakawa@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

FRE2-3

凸多面体に制限された目的関数の係数ベクトルをもつ線形計画問題に対する最大リグレット最小化

Minimizing the Maximum Regret in Linear Programming Problems with an Objective Function Vector Restricted by a Convex Polyhedron

乾口 雅弘† 坂和 正敏
Masahiro INUIGUCHI and Masatoshi SAKAWA

広島大学工学部第二類（電気系）
Faculty of Engineering, Hiroshima University

Abstract: In this paper, we discuss minimax regret solutions to linear programming problems with interactive possibilistic variable coefficients. To express the interactivity, we assume that the possibility distribution is defined by a convex polyhedron. To such a linear programming problem with convex polyhedral objective coefficients, we introduce a minimax regret approach. Solution algorithms of a minimax regret solution are proposed based on a relaxation procedure, a branch and bound method and a simplex method.

1. はじめに

従来，ファジィ数理計画法では，不明確な係数間の相互関係 (従属性) はあまり取り扱われてこなかった．本研究では，不明確な係数間の相互関係を考慮して，目的関数の係数ベクトルの取りうる範囲が凸多面体で制限された次の線形計画問題を取り扱う．

$$\begin{array}{ll}\text{maximize} & \boldsymbol{\gamma}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \\ \text{subject to} & \boldsymbol{x} \in X = \{\boldsymbol{x} \mid A\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{0}\}\end{array} \tag{1}$$

ただし，$\boldsymbol{\gamma}$ は可能性変数ベクトルで，次の凸多面体 Γ に制限される．

$$\Gamma = \{\boldsymbol{c} = (c_1, \ldots, c_n)^{\mathrm{T}} \mid D\boldsymbol{c} \leq \boldsymbol{g}\} \tag{2}$$

このような不明確な係数をもつ問題に対して，可能的最適解と必然的最適解 [1] が定義されている．必然的最適解は最も合理的な解である反面，存在しないことが多い．一方，可能的最適解は，最も緩い最適解であり，常に存在するが，通常，無数に存在する．必然的最適解が存在する場合には，それに一致し，存在しない場合には，必然的最適性に近い性質をもつ可能的最適解となる最大リグレット最小解が提案されている [2]．そこで，問題 (1) に対する最大リグレット最小解を求めることを考える．

従来，係数間に相互関係のない場合について，最大リグレット最小解の計算法が与えられているが [2]，問題 (1) のように，係数間の相互関係を考慮する場合の計算法は確立されていない．本研究では，係数間に相互関係がある場合の最大リグレット最小解の計算法について考察する．この問題は，次のように定式化できる．

$$\min_{\boldsymbol{x} \in X} \max_{\substack{\boldsymbol{c} \in \Gamma \\ \boldsymbol{y} \in X}} (\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}) \tag{3}$$

この問題に対するアプローチとして，文献 [2] のように予め求めた可能的最適解集合を用いる解法と，可能的最適解集合を予め求めない解法が考えられるが，ここでは，後者の方法を述べる．

2. 最大リグレット最小化

問題 (3) は，予備変数 r を導入することにより，次のように変形できる．

$$\begin{array}{ll}\text{maximize} & r \\ \text{subjectto} & \max\limits_{\substack{\boldsymbol{c} \in \Gamma \\ \boldsymbol{y} \in X}} (\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}) \leq r \\ & A\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{0}\end{array} \tag{4}$$

この問題は，次の緩和法に基づいたアルゴリズムにより，任意の誤差 $\varepsilon > 0$ で解くことができる．

[アルゴリズム 1]

Step 1. 任意の実行可能解 $\boldsymbol{x}^0 \in X$ を求め，$k = 1$，$r^0 = 0$ とおく．

Step 2. 部分問題

$$R(\boldsymbol{x}^0) = \max_{\substack{\boldsymbol{c} \in \Gamma \\ \boldsymbol{y} \in X}} (\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0) \tag{5}$$

を解き，その最適解を $\boldsymbol{c}^k$, $\boldsymbol{y}^k$ とする．

Step 3. $R(\boldsymbol{x}^0) - r^0 < \varepsilon$ が成立すれば，終了する．この場合，$\boldsymbol{x}^0$ が最大リグレット最小解となる．

†平成 9 年 4 月 1 日より，大阪大学大学院工学研究科

Step 4. 線形計画問題

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && r \\ &\text{subject to} && (\boldsymbol{c}^j)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^j - (\boldsymbol{c}^j)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \le r, \\ & && \qquad j = 1,2,\ldots,k \\ & && A\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{x} \ge \boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{6}$$

を解き，$(\boldsymbol{x}^0, r^0)$ を最適解 $(\boldsymbol{x}^*, r^*)$ に更新する．$k = k+1$ として，Step 2 へ戻る．

3. 部分問題の解法

アルゴリズム 1 の Step 2 の部分問題 (5) が解ければ，問題 (3) を解くことができる．しかし，Step 3 の部分問題は，非凹問題であるため，容易には解けない．

問題 (5) を書き換えると，

$$\begin{aligned} &\underset{\boldsymbol{c},\boldsymbol{y}}{\text{maximize}} && \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0 \\ &\text{subject to} && D\boldsymbol{c} \le \boldsymbol{g},\ A\boldsymbol{y} = \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{y} \ge \boldsymbol{0} \\ & && \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} = \underset{\boldsymbol{z}}{\text{maximum}}\ \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z} \\ & && \qquad \text{subject to}\ \ A\boldsymbol{z} = \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{z} \ge \boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{7}$$

となり，Stackelberg 問題になっていることがわかる．従来，非凹の Stackelberg 問題に対する解法はほとんど提案されていない．ここでは，問題 (7) を等価変換し，分枝限定法に基づいた解法を提案する．

下位問題の最適性条件を用いると，問題 (7) は，

$$\begin{aligned} &\underset{\boldsymbol{c},\boldsymbol{y},\boldsymbol{u}}{\text{maximize}} && \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0 \\ &\text{subject to} && D\boldsymbol{c} \le \boldsymbol{g},\ \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \\ & && A^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} \ge \boldsymbol{c},\ A\boldsymbol{y} = \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{y} \ge \boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{8}$$

となる．また，$A^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{s} = \boldsymbol{c}$ として，$\boldsymbol{c}$ を消去すると，

$$\begin{aligned} &\underset{\boldsymbol{y},\boldsymbol{u},\boldsymbol{s}}{\text{maximize}} && \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0 \\ &\text{subject to} && DA^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} - D\boldsymbol{s} \le \boldsymbol{g} \\ & && A\boldsymbol{y} = \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{y} \ge \boldsymbol{0},\ \boldsymbol{s} \ge \boldsymbol{0},\ \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

と変形できる．ここでは，問題 (9) に冗長な制約条件 $\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} \le (\boldsymbol{c}^{\mathrm{R}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}$ を追加した次の問題を考える．

$$\begin{aligned} &\underset{\boldsymbol{y},\boldsymbol{u},\boldsymbol{s}}{\text{maximize}} && \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0 \\ &\text{subject to} && DA^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} - D\boldsymbol{s} \le \boldsymbol{g},\ \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} \le (\boldsymbol{c}^{\mathrm{R}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \\ & && A\boldsymbol{y} = \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{y} \ge \boldsymbol{0},\ \boldsymbol{s} \ge \boldsymbol{0},\ \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} = 0 \end{aligned} \tag{10}$$

問題 (9)，(10) は，相補条件 $\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} = 0$ を取り除けば，線形計画問題となる．相補条件を取り除いた問題をそれぞれ，問題 (9')，(10') と記すことにする．問題 (10') は，常に有界で最適解をもつ一方，問題 (9') は非有界となりうる．

いま，$R(\boldsymbol{x}^0 \mid \boldsymbol{y}) = \max_{\boldsymbol{c}\in\Gamma}(\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0)$ と定義すると，問題 (10')，あるいは，問題 (10') に $y_j = 0$ または $s_j = 0$ なる制約条件を追加した問題の最適解 $(\boldsymbol{y}^*, \boldsymbol{u}^*, \boldsymbol{s}^*)$ に対して，

$$(\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0 - (\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^* \le R(\boldsymbol{x}^0 \mid \boldsymbol{y}^*) \tag{11}$$

が成立することが証明できる．このことより，$((\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0 - (\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^*)$ を計算すれば，最大リグレットの下界値を得ることができる．

以上の議論より，次のアルゴリズムにより，部分問題 (5) を解くことができる．

[アルゴリズム 3]

Step 1. $\tilde{r} = -\infty$, $\mathcal{P} = \emptyset$ と初期化する．問題 (10') の最適解を $(\boldsymbol{y}^*, \boldsymbol{u}^*, \boldsymbol{s}^*)$ とする．

Step 2. $(\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^* = 0$ ならば，終了する．このとき，$R(\boldsymbol{x}^0) = (\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{c}^k = A^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}^* - \boldsymbol{s}^*$, $\boldsymbol{y}^k = \boldsymbol{y}^*$ となる．

Step 3. $s_j y_j > 0$ なる J を選ぶ．問題 (10') に $s_j = 0$ を加えた線形計画問題 (P_1) と，$y_j = 0$ 加えた線形計画問題 (P_2) を生成する．$\mathcal{P} = \mathcal{P} \cup \{(\mathrm{P}_1), (\mathrm{P}_2)\}$ と更新する．

Step 4. $\mathcal{P} = \emptyset$ となれば，終了する．このとき，$R(\boldsymbol{x}^0) = \tilde{r}$, $\boldsymbol{c}^k = A^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{u}} - \tilde{\boldsymbol{s}}$, $\boldsymbol{y}^k = \tilde{\boldsymbol{y}}$ となる．

Step 5. $\mathcal{P}$ から線形計画問題 (P) を選択し，$\mathcal{P} = \mathcal{P} - \{(\mathrm{P})\}$ と更新する．問題 (P) の最適解 $(\boldsymbol{y}^*, \boldsymbol{u}^*, \boldsymbol{s}^*)$ を計算する．

Step 6. $(\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0 \le \tilde{r}$ ならば，Step 4 へ戻る．

Step 7. $(\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0 - (\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^* > \tilde{r}$ ならば，$\tilde{r} = (\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0 - (\boldsymbol{s}^*)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^*$, $\tilde{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{y}^*$, $\tilde{\boldsymbol{u}} = \boldsymbol{u}^*$, $\tilde{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{s}^*$ とおき，Step 4 へ戻る．

Step 8. $s_j y_j > 0$ となる j を選ぶ．問題 (P) に $s_j = 0$ を加えた線形計画問題 (P_1) と，$y_j = 0$ 加えた線形計画問題 (P_2) を生成する．$\mathcal{P} = \mathcal{P} \cup \{(\mathrm{P}_1), (\mathrm{P}_2)\}$ と更新し，Step 4 へ戻る．

なお，Step 5 で線形計画問題を解く際，再最適化手法を用いることができる．

参考文献

[1] M. Inuiguchi and M. Sakawa: Possible and Necessary Optimality Tests in Possibilistic Linear Programming Problems, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.67, pp.29–46 (1994)

[2] M. Inuiguchi and M. Sakawa: Minimax Regret Solutions to Linear Programming Problems with an Interval Objective Function, *European Journal of Operational Research*, Vol.86, pp.526–536 (1995)

［連絡先］（平成 9 年 3 月 31 日まで,）
〒 739 東広島市鏡山 1 丁目 4-1
広島大学工学部第二類（電気系）
乾 口 雅 弘
Tel. 0824-24-7695 Fax.0824-22-7195
E-mail: inuiguti@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

（平成 9 年 4 月 1 日から,）
〒 565 吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
電子情報エネルギー工学専攻
乾 口 雅 弘
Tel. 06-879-7787 Fax.06-879-7939

FRE2-4

多目的0-1計画問題に対する遺伝的アルゴリズムに基づくファジィ意思決定
Fuzzy Decision Making Based on Genetic Algorithms for Multiobjective 0-1 Programming Problems

矢野均[a] 坂和正敏[b] 柴野 俊弘[c]
Hitoshi YANO[a], Masatoshi SAKAWA[b] and Toshihiro SHIBANO[c]
[a]名古屋市立大学人文社会学部, [b]広島大学工学部第二類, [c]新菱冷熱工業(株)
[a]School of Humanities and Social Sciences, Nagoya City University, [b]Faculty of Engineering, Hiroshima University, [c]Sinryou Cooperation

In this paper, we propose a fuzzy decision making method based on genetic algorithms for multiobjective 0-1 programming problems. In the proposed method, by considering the imprecise nature of human judgements, it is assumed that the decision maker (DM) has a fuzzy goal for each of the objective functions and adopt the minimum-operator for combining the membership functions for fuzzy goals of the DM. In order to solve the formulated 0-1 programming problem, instead of using the penalty function for treating the constraints, we propose the revised genetic algorithm in which the infeasible individuals are modified by applying *the random 0-1 reverse method.* The proposed method is applied to the media selection planning problem to clarify its efficiency.

1. はじめに

本論文では、係数の符号は任意であるような線形不等式をもつ多目的0-1整数計画問題を対象として、遺伝的アルゴリズムに基づくファジィ意思決定手法を提案する。また、提案したアルゴリズムを、3目的19制約式30変数の多目的0-1計画問題として定式化される広告媒体選択問題[3]に適用し、その有効性を検討する。

2. 多目的0-1計画問題に対するファジィ意思決定

本論文では、以下のような多目的0-1計画問題について考察する。

$$\left.\begin{array}{l}\text{minimize } (f_1(\boldsymbol{x}), f_2(\boldsymbol{x}), \cdots, f_k(\boldsymbol{x})) \\ \text{subject to } A\boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{b} \\ \qquad x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \ldots, n\end{array}\right\} \tag{1}$$

ここで、$f_i(\boldsymbol{x}), i = 1, \cdots, k$は、$k$個の相競合する目的関数で任意の実数値関数、制約式はすべて線形関数で、$A = (a_{ij})$は$(m \times n)$次実数値行列、$\boldsymbol{b} = (b_1, b_2, \cdots, b_m)^T$の$m$次実数値ベクトルであり、各構成要素は任意の符号をもつものとする。

本論文では、意思決定者は、各目的関数$f_i(\boldsymbol{x})$に対してあいまいな目標（ファジィ目標）を持ち、主観的に彼のファジィ目標をメンバシップ関数$\mu_i(f_i(\boldsymbol{x}))$により規定することができるものと仮定する。この時、もとの問題(1)は、次のような各メンバシップ関数を最大化するファジィ多目的0-1計画問題に変換される。

$$\left.\begin{array}{l}\text{maximize } (\mu_1(f_1(\boldsymbol{x})), \ldots, \mu_k(f_k(\boldsymbol{x}))) \\ \text{subject to } A\boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{b} \\ \qquad x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \ldots, n\end{array}\right\} \tag{2}$$

さらに、本論文では、意思決定者は、これらのメンバシップ関数を統合するオペレータとしてファジィ決定を採用するものと仮定する。この時、ファジィ意思決定問題は、以下のような通常の0-1計画問題に帰着できる。

$$\left.\begin{array}{l}\text{maximize } \min\limits_{i=1,\ldots,k} \{\mu_i(f_i(\boldsymbol{x})\} \\ \text{subject to } A\boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{b} \\ \qquad x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \ldots, n\end{array}\right\} \tag{3}$$

ここで、制約式の係数が任意の符号であるため、制約式の係数が正であることを前提にしている坂和らの2重構造のストリングによる改良型遺伝的アルゴリズム[2], や、Beanのランダムキーによる方法[1]を適用することはできないことに注意しよう。以下では、このような0-1計画問題に対しても対処しうる遺伝的アルゴリズムを提案する。

3. ランダム0-1反転法に基づく遺伝的アルゴリズム

0-1整数計画問題(3)に対して、単純GA(SGA)を適用した場合、交叉・突然変異により生じた個体は、制約条件を満たさない可能性が高い。そこで、このような制約条件付き最適化問題に対して遺伝的アルゴリズムを適用する場合、しばしば、制約条件を破れば対応する目的関数にペナルティを課す（ここでは、ゼロに置き換える）ことによって、次のような適応度関数$F(x)$が採用されている。

$$F(x) = \min\left\{\left(\min_{i=1,\cdots,k} \mu_i(f_i(x))\right), \chi_C(x)\right\} \tag{4}$$

ここで、$\chi_C(x)$は、xが(3)の制約条件を満たせば1、そうでない場合には0をとるペナルティ関数である。

しかし、このようなペナルティ関数を含む適応度関数に対しては、制約条件が非常に厳しい問題の場合、生成した個体のほとんどが適応度ゼロになってしまい、効率的な最適解の探索は期待できない。

このような問題点に対処するため、本論文では、(3)の制約式の係数行列A、係数ベクトルbの各要素の符号が任意であるような最適化問題(3)に対して、SGAに基づくアルゴリズムを提案する。その前に、まず、SGAの基本アルゴリズムを以下に示す。このアルゴリズムにおいて、式(3)の目的関数にペナルティ項を付け加えた式(4)を適応度関数として採用している。

[SGAの基本アルゴリズム]

ステップ1 解空間を、変数の次数nに対応してn個の要素からなる0-1アルファベットのストリングに符号化する。

ステップ2 0-1アルファベットのストリングを設定した個数（個体群サイズ）だけランダムに発生させて、初期個体群を生成する。初期世代$t=1$と設定する。

ステップ3 各ストリングに対して、適応度関数の値を計算する。$i=0$とする。

ステップ4 選択オペレータを用いて、個体群の中から適応度関数の値に応じて、2つのストリングを選択する。

ステップ5 選ばれたストリングのペアに対して、確率p_cで交叉オペレータを適用する。

ステップ6 選ばれたストリングのペアに対して、確率p_mで突然変異オペレータを適用する。

ステップ7 $i=i+2$として、もし、$i \geq pop_size$ならば、新たに生成された個体群を旧個体群と入れ替えて、世代$t=t+1$として次のステップへいく。そうでなければ、ステップ4へもどる。

ステップ8 世代$t < T$ならばステップ3へもどる。そうでなければ、次のステップへいく。

ステップ9 最終世代Tまでの集団の中で最大適応度をもつストリングを、もとの解空間にデコード化してそれを近似最適解とする。

本稿では、制約条件を破る個体に対して、係数の符号情報と構成要素の値の情報をもとにして、ランダムな順序で各制約式を満たすように0,1をいれかえるという、ランダム0-1反転法を提案する。すなわち、ステップ3において生成された個体が実行不可能な場合、以下の処理を行う。

[ランダム0-1反転法]

ステップ1 実行可能でない制約式（m_u個とする）に対して、ランダムに順位付けを行い、それらの添字集合を$\{c_1, c_2, \cdots, c_{m_u}\}$とおく。

ステップ2 $j=1$とおく。

ステップ3 決定変数の添字集合$\{1, 2, \cdots, n\}$をランダムに並び替え、それらを、$\{d_1, d_2, \cdots, d_n\}$とおく。$j > m_u$ならば、終了する。

ステップ4 $i=1$とおく。

ステップ5 もし、$x_{d_i}=1$かつ$a_{d_i c_j} > 0$ならば、$x_{d_i}=0$とする。

ステップ6 もし、$x_{d_i}=0$かつ$a_{d_i c_j} < 0$ならば、$x_{d_i}=1$とする。

ステップ7 j番目の制約式$\sum_{i=1}^{n} a_{d_i c_j} x_{d_i} \leq b_{c_j}$を満たす場合、あるいは、$i=n$の場合には$j=j+1$として、ステップ3へ戻る。そうでなければ、$i=i+1$として、ステップ5へ戻る。

このアルゴリズムをSGAの基本アルゴリズムのステップ3に組み込むことにより、修正された遺伝的アルゴリズムを構成することができる。すなわち、SGAのステップ3を次のステップ3'に置き換える。

ステップ3' 各ストリングに対して、適応度関数の値を計算する。$i=0$とする。実行不可能なストリングに対しては、ランダム0-1反転法を適用し、再度適応度関数の値を計算する。

提案したアルゴリズムの有効性を検討するために、Wiedey and Zimmermann [3]により定式化された広告媒体選択問題に適用した。ランダム0-1反転法を組み込んだSGAのアルゴリズムを、個体数100個、突然変異率$p_m=0.01$として、交叉率p_cを0.1から0.9まで0.1きざみで設定した場合の適用結果を表1に示す。SGAの適用結果と比較して、格段に収束状況が改善していることが明らかになったが、この件については、紙面の都合上、当日のべる。

表1 ランダム0-1反転法による適用結果

交叉率p_c	最適解$F(x_{opt})$	最適解が得られる世代
0.1	0.492418	42
0.2	0.492418	44
0.3	0.492418	44
0.4	0.492418	35
0.5	0.492418	35
0.6	0.492418	32
0.7	0.492418	16
0.8	0.492418	30
0.9	0.492418	31

References

1. Bean,J.C.: "Genetic Algorithms and Random Keys for Sequencing and Optimization", ORSA Journal on Computing, **6(2)**, pp.154-160 (1994).
2. 坂和, 乾口, 砂田、澤田:" 改良型遺伝的アルゴリズムによるファジィ多目的組合せ最適化", 日本ファジィ学会誌, 6(1) pp.177-186 (1994).
3. Wiedey, G. and Zimmermann, H.-J.: "Media Selection and Fuzzy Linear Programming", Journal of the Operational Research Society, **29(11)**, pp.1071-1084 (1978).

問合わせ先：
467 名古屋市瑞穂区瑞穂町山の畑1 名古屋市立大学人文社会学部 矢野均 Tel&Fax:052-872-5182 E-mail:d43093g@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp

FRE3-1

アダプティブB-スプラインによる認知地図

Cognitive Maps with Adaptive B-splines

○大谷 崇　市橋 秀友　三好 哲也
Takashi Ohtani Hidetomo Ichihashi Tetsuya Miyoshi
大阪府立大学 工学部
College of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract: Cognitive maps and time space maps make use of multidimensional scaling (MDS) techniques to analyze data relating to spatial and environmental preferences and perception. Perceptual configuration of the points is represented by a cognitive map with surface feature interpolation. In this paper we propose two procedures of MDS using Spline function for surface feature interpolation. The procedures are based on (1) Hayashi's quantifying method of paired comparisons and (2) Gradient descent method which is the basic learning method of adaptive systems such as the artificial neural networks and neurofuzzy modelling. In numerical examples, an application to sociometry analysis is presented.

1. はじめに

認知地図 [1] は人が頭の中に描く地図であり，対象物の配置以外に道路や国境線などの尺度構成の計算に用いられない部分を描画する必要がある．本研究では写像制約としてアダプティブB-スプラインを用いるニューロ・ファジィ多次元尺度構成法を提案する．そして林の数量化理論IV類 [2] にスプライン関数を適用する認知地図作成法と比較検討する．認知地図を作成する目的は，我々が認識している空間がどのように歪んでいるかをインパクトのある地図として表現することであり，位相が大きく破壊されず現実の地図との比較が可能なものである必要がある．そこで位相破壊を防ぐ方法についても検討する．

2. 数量化理論IV類へのスプライン関数の適用

まず，各対象物を1次元空間に布置することを考える．そのためには次の目的関数 Q を最小化するように，$y(\boldsymbol{x}_i)$ $(i = 1, \cdots, n)$ を決めればよい．

$$Q = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} e_{ij}\left(y(\boldsymbol{x}_i) - y(\boldsymbol{x}_j)\right)^2 \tag{1}$$

ここで，n はデータ数である．また，e_{ij} は親近性を表す数量であり，$\boldsymbol{x}_i$ は2次元の入力データとする．$y(\boldsymbol{x}_i)$ はスプライン関数である．

$$y(\boldsymbol{x}_i) = \sum_{k=1}^{K} \mu_k(\boldsymbol{x}_i) w_k \tag{2}$$

ただし，K は基底関数の数である．この最小化問題の解は，$\boldsymbol{A} = \{\alpha_{lk}\}$，$\boldsymbol{B} = \{\beta_{lk}\}$ とし

$$\alpha_{lk} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} e_{ij}\left\{\mu_l(\boldsymbol{x}_i) - \mu_l(\boldsymbol{x}_j)\right\}\left\{\mu_k(\boldsymbol{x}_i) - \mu_k(\boldsymbol{x}_j)\right\} \tag{3}$$

$$\beta_{lk} = \sum_{i=1}^{n} \mu_l(\boldsymbol{x}_i)\mu_k(\boldsymbol{x}_i) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{w} = \lambda \boldsymbol{B}\boldsymbol{w} \tag{5}$$

の最小の固有値に対応する固有ベクトルとして求まる．それをスプライン係数 $\boldsymbol{w}$ として布置すればよい．

2次元空間に布置する場合は，式(5)の固有値のうち，最小の固有値と2番目に小さい固有値に対する固有ベクトル $\boldsymbol{w}^1$ と $\boldsymbol{w}^2$ を求めればよい．

親近性を表す数量ではなく距離が与えられている場合，距離から親近性を計算する必要がある．得られる地図はどのような関数を変換式として用いるかによって変わるが，線形変換では地図は変化しない．さらに非線形変換を用いても大きくは改善されなかった．

3. 多次元尺度構成法へのアダプティブB-スプラインの適用

次の目的関数 Q_1 を最小化するように，$\boldsymbol{y}(\boldsymbol{x}_i)$ $(i = 1, \cdots, n)$ を定める．

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left\{d_{ij}^2 - \sum_{l=1}^{2}\left(y_l(\boldsymbol{x}_i) - y_l(\boldsymbol{x}_j)\right)^2\right\}^2 \tag{6}$$

$\boldsymbol{w}$ の逐次射影法に基づく学習則はつぎのようになる．

$$w_k^{mNEW} = w_k^{mOLD} + \tau \Delta w_k^m \tag{7}$$

$$\Delta w_k^m = \lambda\left\{y_m(\boldsymbol{x}_i) - y_m(\boldsymbol{x}_j)\right\}\left\{\mu_k(\boldsymbol{x}_i) - \mu_k(\boldsymbol{x}_j)\right\} \tag{8}$$

$$\lambda = \frac{d_{ij}^2 - \sum_{l=1}^{2}\left\{y_l(\boldsymbol{x}_i) - y_l(\boldsymbol{x}_j)\right\}^2}{2\sum_{l=1}^{2}\sum_{k=1}^{K}\left\{y_l(\boldsymbol{x}_i) - y_l(\boldsymbol{x}_j)\right\}^2\left\{\mu_k(\boldsymbol{x}_i) - \mu_k(\boldsymbol{x}_j)\right\}^2} \tag{9}$$

ただしτは緩和パラメータである．

対象間の距離 d_{ij} を忠実に再現しようとすると位相破壊が生じる．そこで位相破壊を制御するために次式を評価関数に加える．

$$Q_2 = \eta\left\{H\Big(-\frac{\partial y_1}{\partial x_1'}\Big)\Big(\varepsilon - \frac{\partial y_1}{\partial x_1'}\Big)^2 + H\Big(-\frac{\partial y_2}{\partial x_2'}\Big)\Big(\varepsilon - \frac{\partial y_2}{\partial x_2'}\Big)^2\right\} \tag{10}$$

ただし，η と ε は小さな正数である．また，Q_2 の計算にはデータとして与えられた$\boldsymbol{x}_i$ を用いるのではなく，データの変域を等分割した格子点$\boldsymbol{x}_i'$を用いて評価する．$H(x)$ はヘビサイド関数である．未知パラメータ $\boldsymbol{w}$ は次のように更新される．

$$w_k^{mNEW} = w_k^{mOLD} - \tau\left(\Delta w_k^m - \frac{\partial Q_2}{\partial w_k^m}\right) \tag{11}$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial w_k^m} = \eta\sum_{m=1}^{2} H\Big(-\frac{\partial y_m}{\partial x_m'}\Big)\left\{-2\Big(\varepsilon - \frac{\partial y_m}{\partial x_m'}\Big)\frac{\partial}{\partial w_k^m}\frac{\partial y_m}{\partial x_m'}\right\} \tag{12}$$

4. オフィスにおけるソシオメトリー

ソシオメトリー とは，集団構成員の選好／排斥感情を測定することによって得られたソシオマトリクスから集団構成員の関連構造を定量的に測定し解析するもので，ファジィグラフによる集団構成員の関連構造の表現方法も提案されている．本章では提案手法のソシオメトリーへの応用を検討する．

N社の人事部と経理部の構成員40人にアンケート調査を行い，構成員相互の業務上の密接度合いを調査し，構成員の平

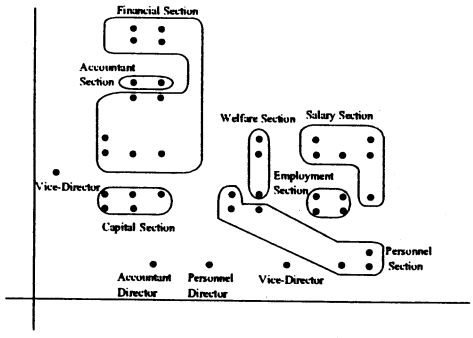


図 1: 構成員のデスクの配置(学習回数0回目)

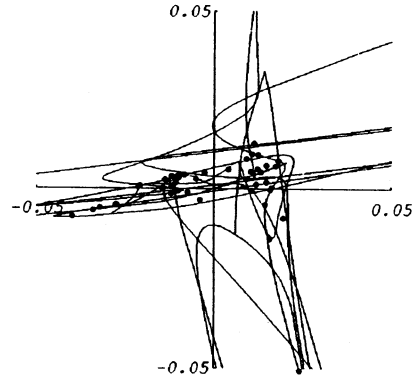


図 2: 数量化IV類にスプライン関数を用いた場合

面的配置をそれぞれの手法により求めた．得られたデータは2人の構成員の親近性を表すと考えられるので，これを基準化して e_{ij} とし，40人の構成員の平面的配置を求めた．また，構成員相互間の距離 d_{ij} は $d_{ij} = 1 - e_{ij}$ として算出した．ただし、$d_{ii} = 0$ である．

計算結果を以下に示す．用いたB-スプラインの数は図 2〜図 4ともに2次元平面上に合計25個である．図 1はアダプティブB-スプラインでの学習0回目の平面的配置である．右側が人事部，左側が経理部になっている．図 2は，数量化IV類にスプライン関数を用いた場合の結果である．位相破壊が激しいので e_{ij} の非線形変換についても検討したが改善されなかった．アダプティブB-スプラインによる方法では，学習を始める前の各点の初期値(図 1)が現在の構成員の平面的配置と同じになるようにスプライン係数 $\boldsymbol{w}$ を設定した．図 3は，学習回数が100回の結果である．右下に人事部，左上に経理部とはっきりと2つに分かれているが，経理部の中でも経理部長や次長は人事部に近いところに位置していて，他の経理部の構成員に比べて人事部との関係が深いと考えられる．学習100回目の図 3は格子線が錯綜していて位相が破壊されている．そこで評価関数に位相破壊を制御する項を加え，再度学習を行った．図 4に学習結果を示す．図でも人事部と経理部が左右に大きく分かれ経理部長は人事部に近いところに位置している．このように，位相破壊が小さく各構成員間のつながりの深さを視覚的に表現できるオフィスの地図が得られた．

5. おわりに

本研究では，数量化理論IV類とNLMS学習による多次元尺度構成法にスプライン関数を適用する2つの方式を提案し，作成した認知地図を比較検討した．多次元尺度構成法にアダプティブB-スプラインを適用する場合の方が，数量化理論IV類を用いる場合に比べて距離の再現性は良い結果が得られた．多次元尺度構成法にアダプティブB-スプラインを適用する方法の利点として次のような点が挙げられる．

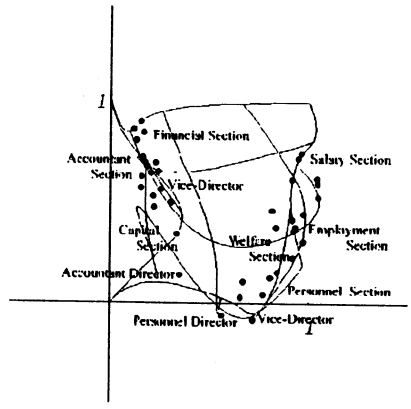


図 3: 多次元尺度構成法にアダプティブB-スプラインを用いた場合(学習回数100回目)

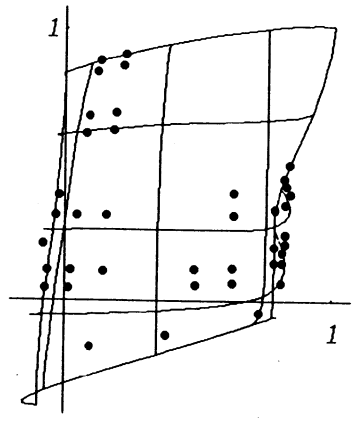


図 4: 評価関数に位相破壊を制御する項を加えた場合(学習回数100回目)

1. 評価関数に位相破壊を制御する項を加えることで，極端な位相破壊を防ぐことができる．
2. 学習前にスプライン関数の出力がもとの平面配置と同じになるようにパラメータ $\boldsymbol{w}$ を設定することができるので直交回転・鏡映が起こりにくい．
3. 対象物の実際の位置がどのようにゆがめられていくかを視覚的に訴えることができる．

種々の現実問題に適用していくことが今後の課題である．

参考文献

[1] Tolman, E. : "On cognitive maps in rats and men," *Psychological Review*, Vol.55, pp.189-208 , (1948)

[2] 林 知己夫: 「数量化-理論と方法-」, 朝倉書店, (1993)

連絡先

〒593 大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学工学部経営工学科
市橋　秀友 TEL:0722-52-1161. FAX:0722-59-3340
E-mail:ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

射影追跡ID3による感性データ処理

Processing of Sensation Data by Projection Pursuit ID3

○ 三好哲也，市橋秀友(大阪府立大学)，下村武(常磐会短期大学)

○ T.Miyoshi, H.Ichihashi(Osaka Prefecture University) and T.Shimomura(Tokiwakai Junior College)

ABSTRACT

In this paper we propose a projection pursuit regression (PPR) algorithm based on Quinlan's ID3. In the proposed PP-ID3, objects are tested by linear projections of attributes instead of the attribute value itself. The relation between design components of T-shirt and adjective words "conspicuous" and "quiet" is analysed with PP-ID3.

Keywords: Projection Pursuit, ID3, Eigenvalue Method, Multidimensional Spline Function

1. はじめに

感性工学[1]では感性ワードで表される心理量と商品のデザイン要素との関連を数量化理論I類[2]を用いて見い出す．本研究では，感性データの解析手法としてニューロ・ファジィ射影追跡回帰[3]と決定木作成法であるファジィID3[4]を融合した射影追跡ID3を提案する．縞模様のTシャツに対する「派手」「地味」という感性ワードで表される心理量とTシャツのデザイン要素との関係を数量化するために一対比較実験を行い，収集されたデータを提案法によって処理する．Tシャツの縞模様を構成する要素として，線の太さ，線と線の間隔と線の色(明度)を取り上げ，それらと感性ワードで表現される心理量との関係を分析する．

2. 射影追跡ファジィID3

n次元の説明変量 $\boldsymbol{x}_j = (x_{1j}, \cdots, x_{nj})$ $(j = 1, \cdots, J)$ と応答変量z_jからなるデータの集合が与えられているとする．ある属性iでデータをn個のファジィ集合$B_k^i (k = 1, \cdots, n)$に分割した場合の第jデータがファジィ集合B_k^iに属する度合を$A_{ik}(y_{ij})$とする．本研究では説明変量の第i番目の射影y_iを属性iと考える．ファジィID3での決定木はファジィ推論ルールに相当しており各リーフがルール結論部に対応している[4]．データが属性iの属性値によって5個のファジィ集合に分かれるとした場合の決定木及びスプライン関数を図1に示す．第bルールの条件部をμ_bとし，結論部をw_bとすると，ファジィモデルの出力zは

$$z = \sum_{b=1}^{B} \mu_b w_b \tag{1}$$

$$\mu_b = \prod_{(i,k)\in Q_b} A_{ik}(y_i) \tag{2}$$

となる．ただし，Q_bはルートノードからリーフbに至るまでに選択された(i,k)の集合である．ファジィID3においてメンバーシップ関数$A_{ik}(y_{ij})$にB-スプラインを用いるとファジィモデルはスプライン関数である．説明変量の1回目の射影であるy_1軸上でn個のB-スプラインを用いたファジィモデルによる近似関数$z(y_1)$は

$$z(y_1) = \sum_{b=1}^{n} A_{1b}(y_1) w_b^1 \tag{3}$$

となる．z_jと$z(y)$との誤差の2乗和は

$$E^1 = \sum_{j=1}^{J} \{z(y_{1j}) - z_j\}^2 \tag{4}$$

となり，(4)式が最小になるように最小2乗法を用いてスプライン係数$w_b^1 (b = 1, \cdots, n)$を求める．回帰曲線を求めた後，1回目の射影

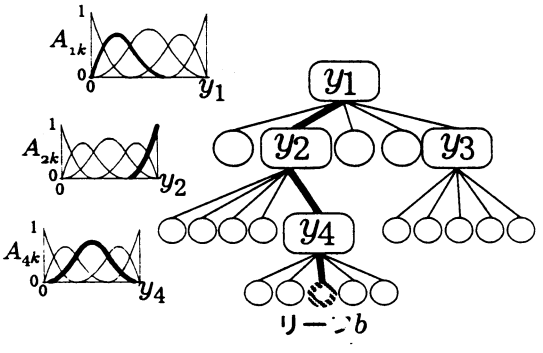


図 1: 決定木とスプライン関数

軸に関して分類したファジィ集合B_b^1毎の残差

$$E_b^1 = \sum_{j=1}^{J} \{z(y_{1j}) - z_j\}^2 A_{1b}(y_1) \tag{5}$$

を評価する．残差の大きいファジィ集合のデータに対して新たな射影を求め，その射影と応答変量の関係をスプライン関数を用いて表す．z_jと(1)式のファジィモデルの出力zとの誤差の2乗和は

$$E^i = \sum_{j=1}^{J} \{z - z_j\}^2 \tag{6}$$

となり，これを最小とするようにw_k^iを最小2乗法により求める．このE^iが事前に定めた値以下になるまで以上の手順を繰り返す．

3. 固有値法による一対比較データの射影

z_jの代わりにJ個のz_j相互の一対比較値C_{j_1,j_2}が与えられている場合に，射影追跡ID3の各ノードでの射影ベクトルの算出について述べる．クラスBを応答変量z_jの値の大きいデータ集合，クラスSをz_jの値の小さいデータ集合として，データがクラスB，クラスSそれぞれにf_{j_1}/F，g_{j_1}/Fなる度合だけ属しているとする．ただし，

$$f_{j_1} = \sum_{j_2=1}^{J} C_{j1,j2} \qquad (j_1 = 1, \cdots, J) \tag{7}$$

$$g_{j_1} = \sum_{j_2=1}^{J} (1 - C_{j1,j2}) \qquad (j_1 = 1, \cdots, J) \tag{8}$$

である．完全一対比較であるので$f_{j_1} + g_{j_1} = J - 1$であり，総比較回数$F$は

$$F = \sum_{j_1=1}^{J} f_{j_1} = \sum_{j_1=1}^{J} g_{j_1} = \frac{1}{2} J(J-1) \tag{9}$$

と表される．i回目の反復において射影ベクトルを$\boldsymbol{p}_i$とすると第j番

表 1: 1回目の射影ベクトルp_1

	赤	黄	緑
線の太さ	0.89	0.23	0.29
線の間隔	-0.35	-0.22	-0.13
色(明度)	0.26	0.94	0.94
	シアン	青	マゼンタ
線の太さ	0.39	0.86	0.41
線の間隔	-0.07	-0.45	-0.25
色(明度)	0.91	0.21	0.86

表 2: デザイン要素と応答変量との相関係数

	赤	黄	緑
線の太さ	0.708	0.402	0.367
線の間隔	0.392	0.345	0.263
色(明度)	0.527	0.801	0.860
	シアン	青	マゼンタ
線の太さ	0.474	0.748	0.482
線の間隔	0.183	0.321	0.437
色(明度)	0.837	0.383	0.713

目のデータの正射影は$y_{ij} = \boldsymbol{p}_i^T \boldsymbol{x}_j$となる．この$\boldsymbol{p}_i$を定めるためにニューロ・ファジィ射影追跡回帰[3]を用いる．

$$\sum_S \boldsymbol{p}_i = \lambda \sum_B \boldsymbol{p}_i \tag{10}$$

で表される固有値問題における最大固有値に対する固有ベクトルが求めるべき射影ベクトル$\boldsymbol{p}_i$となる．ただし，(2)式で表される各データのノードiへの所属度合いを考慮して

$$\sum_B = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^{J} f_j \mu_i (\boldsymbol{x}_j - \bar{\boldsymbol{x}})(\boldsymbol{x}_j - \bar{\boldsymbol{x}})^T \tag{11}$$

$$\sum_S = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^{J} g_j \mu_i (\boldsymbol{x}_j - \bar{\boldsymbol{x}})(\boldsymbol{x}_j - \bar{\boldsymbol{x}})^T \tag{12}$$

とする．

4. Tシャツに対する「派手さ」の数量化

提案の手法によりTシャツの縞模様のデザイン要素と「派手さ」という言葉で表される心理量との関係を分析する．Tシャツの縞模様は白地に色の付いた線を横に描いたものとし，Tシャツのデザイン要素は線の太さ，線と線の間隔および線の色(明度)の3要素とした．線の太さおよび間隔はそれぞれ1.25,2.50,3.75,5.00(cm)の4種類，明度は4,5,6の3種類，合計48種類の縞模様のTシャツを用いて一対比較実験を行った．線の色相として，赤，黄，緑，シアン，青，マゼンタを用いて，6種類の各色相毎に40名合計240名による一対比較実験から得られたデータを提案法により処理した．提案法により求まった各色相毎の1回目の射影ベクトルを表1に示す．また，数量化理論I類で処理した場合の「派手さ」と各デザイン要素との相関係数を表2に示す．線の色相が赤，青の場合は線の太さが「派手さ」に対して重要な要因であり，それ以外の色相では色の明度が重要であることが表1および表2より分かる．

線の色相が赤の場合に提案法により求まる散布図およびスプライン関数を図2に示す．1回目の射影の結果に対してデータを5つのファジィ集合に分け，ばらつきの大きいファジィ集合のデータに対して新たな射影軸を求めその軸上で応答変量を回帰する．1回目の射影軸上の第4番目のファジィ集合に対して再度射影を行った結果，得られた射影ベクトルは$\boldsymbol{p}_3 = (0.12, -0.22, 0.96)$である．新たな射影軸上での散布図を図3 に示す．この結果から線の幅が太いTシャツは明度が高くなると派手になると言える．

デザイン要素と「派手さ」との関係を決定木に表すと図4のようになる.「主に縞模様の線の太さによって派手さの度合いが決まり，

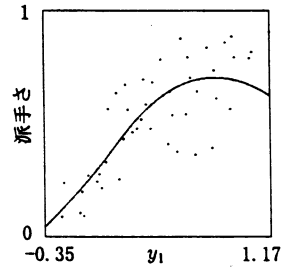


図 2: 「派手さ」と射影y_1の散布図

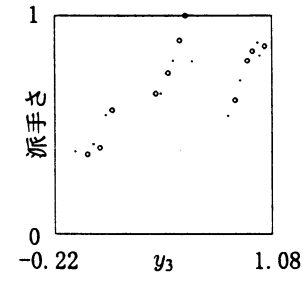


図 3: 「派手さ」と射影y_3の散布図

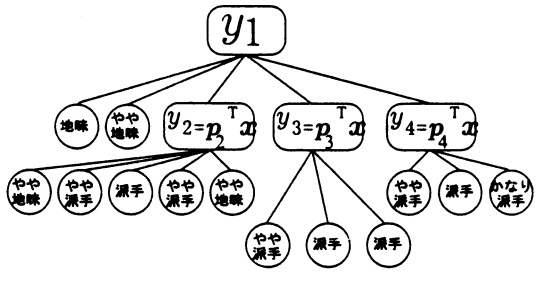


図 4: 得られた決定木

線が比較的太いTシャツでは明度が高くなればさらに派手になる」といえる．

5. おわりに

本研究では，製品のデザイン要素と心理量との関係を数量化する手法に射影追跡ID3を適用した．得られた結果は人間の直感ともよく合致し，従来の研究とも一致した．提案法では，1つの射影のみで心理量を表現できない場合に，データのある部分集合を対象として新たな射影によってデザイン要素と心理量の関連を数量化できる．

参考文献

[1] 長町三生:「感性工学」, 海文堂, (1989)

[2] 林知己夫 :「数量化ー理論と方法ー」, 朝倉書店, (1993)

[3] 三好哲也, 市橋秀友, 長坂一徳, 中尾圭介 : システム制御情報学会論文誌, Vol.9, No.7, pp.337-346,(1996)

[4] H.Ichihashi *et al.*: Fuzzy Sets and Systems, Vol.81, No.1, pp.157-167,(1996)

[問い合わせ先] 〒593 大阪府堺市学園町1-1

大阪府立大学工学部経営工学科 三好 哲也

TEL:0722-52-1161 FAX:0722-59-3340

E-mail: miyoshi@ie.osakafu-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

カラートラッカーを用いた手と指によるポインティングデバイス

A Pointing Device Using Hand and Fingers Equipped with Multi-color Tracker

○山川 あす香　早川 武　大谷 崇　三好 哲也　市橋 秀友

Asuka Yamakawa Takeshi Hayakawa Takashi Ohtani Tetsuya Miyoshi Hidetomo Ichihashi

大阪府立大学　工学部

College of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract: We have developed a pointing device that translates handicapped person's movements into direct movements of the computer's cursors with rectangular placement. The actual key press(click) is implemented by bending fingers. It replaces the desktop mouse or even the keyboard for people who can't use them. For the sensitivity tuning of the cursor movement, the coordinate transformation by the neurofuzzy adaptive modeling is employed. The click motion is replaced with bending fingers and recongnized by the neurofuzzy projection pursuit learning. A color trucker system for the measurement of the positions of fingers is used. The experimental study reveals that target tracking speed by the proposed rectangular placed multiple cursors is faster and the error rate was lower than the horizontally placed multiple cursors and the single point cursor.

1　はじめに

コンピュータはディスアビリティが困難と感じる活動を助ける道具として, 多くの可能性を持っている．ディスアビリティのためのパソコン入力装置として様々な製品が開発されている．HeadMaster(Prentke Romich Company)は，超音波センサーで頭の動きをスクリーン上のマウスカーソルの動きに対応させる装置であり, TRACKER(Madenta Communication inc.)はレーザーセンサーで顔などにつけた銀紙の位置を測定してマウスカーソルを表示する装置である．現在実用化されている装置はいずれもマウスカーソルが一つであり、マウス感度を小さくすると大きな動作が必要になり, 逆に感度を大きくすると位置決めが困難になる．

本研究ではカラートラッカー（エムテック社製）を用いて手指位置の計測を行うことにより，手を動かすことによるマウスカーソル操作を実現し複数のカーソルでのパソコンマウス入力が可能なシステムを提案する．指によるクリック動作の判別にはニューロ・ファジィ射影追跡回帰 [1] を応用する．

2　マルチカーソルポインティングデバイス

カーソルをアイコンの位置に移動する際の移動量を小さくするために正方形の頂点をカーソルとする．右手の母指，示指，中指, 小指，手掌の中心にマーカーを貼り手掌のマーカーに正方形を対応させる．4つのカーソルのうち左上をクリックする場合は中指を曲げる．右上をクリックする場合は示指を曲げる．右下をクリックする場合は母指を曲げる．左下をクリックする場合は小指を曲げる．

CCDカメラで手を撮影し, 画像内のマーカーの色を追跡しながら位置座標を計測する．カラートラッカーとパソコンがGPIBインタフェースボードによって接続されていて，転送されるデータによりリアルタイムでCRT画面上のカーソルが表示される．画面には文字を入力するためのオンスクリーンキーボードが表示され, 手の動きに合わせてカーソルが動きクリックやドラッグが行える．クリックの判別方法にはニューロ・ファジィ射影追跡回帰 [1] を応用している．

3　クリックの判別

n次元の説明変量$\boldsymbol{x}_j$と一次元の応答変量z_jからなるJ個のデータがあり，この説明変量と応答変量との関係をRBFネットワークに学習する．入力データを手掌のマーカーと4本の指先のマーカーとの距離とする．データの総数は250個であらかじめ被験者のクリック動作を計測した．

クリック状態（一つの指を曲げた状態）をクラスC, 非クリック状態をクラスDとする．yを単位ベクトル$\boldsymbol{p}=p_1,\cdots,p_n$により定まる直線への$\boldsymbol{x}$の正射影とすると

$$y=\boldsymbol{p}^T\boldsymbol{x} \tag{1}$$

となる．クラスC内の分散を小さくし，一方でクラスDのy_jが出来るだけクラスCの$\bar{y}$から離れるような$\boldsymbol{p}$を固有値問題の解として求める．yと，クリック状態を1その他を0とした応答変量$\mu(z_j)$との関係をRBFネットワーク $s_i(y)$ に学習する．学習後の計測データの射影とRBFの出力を図1に示す．クリックの判別基準は

$$q=\arg\max_i s_i(y) \tag{2}$$

$s_q(y)>0.5$；第 q カーソルのクリック状態

$s_q(y)\leq 0.5$；非クリック状態

とする．

4　操作性の評価実験

次の3つのカーソル配置の相違による比較を行った．

1) 一点型:従来のマウスと同様に1つのカーソルのみで，母指を曲げるとクリックされる．

2) 水平型:水平に配置された4点は右から母指，示指，中指，小指を曲げることによってクリックされる．

3) 矩形型:本研究での提案法でカーソルは矩形に配置される．

実験方法

被験者は健常者6名で，CRTの背景色は黒，カーソルは黄色，アイコンに相当する目標は赤で表示した．

実験手順

1. 被験者はCFF値の計測方法を事前に習熟した
2. 一点型，水平型，矩形型のカーソルのうちいずれかを20分間使用しクリック回数，誤り率を計測した．被験者にはできるだけ正確に早く作業するように指示した．作業の前後にＣＦＦ値を5回計測してその代表値（平均値）を求めた．各被験者は一日に一種類のカーソルについてのみ行った．
3. 計測終了後にアンケートを行った．

アンケートの結果を図5～7に示す．

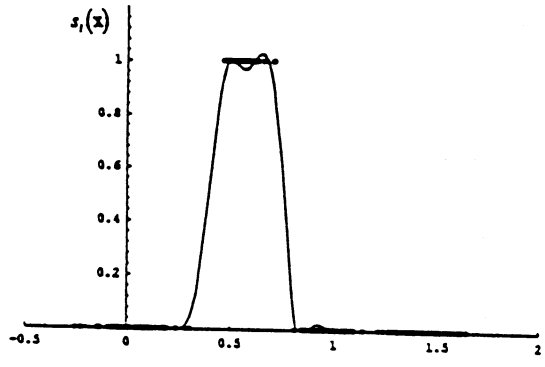


図1　一次元空間に射影後の計測データ

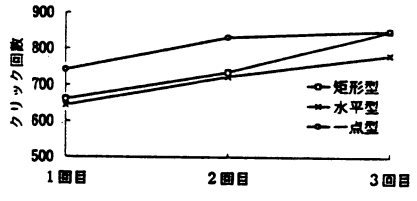


図2　クリックした回数(２０分間)

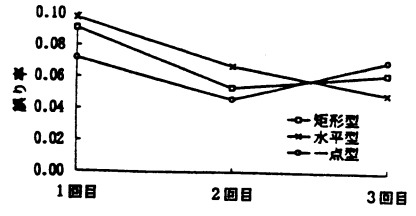


図3　クリックの誤り率

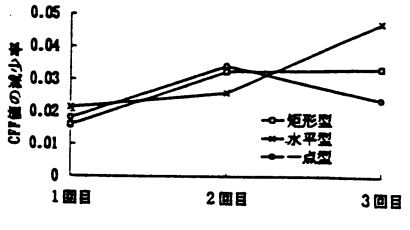


図4　CFF値の比較

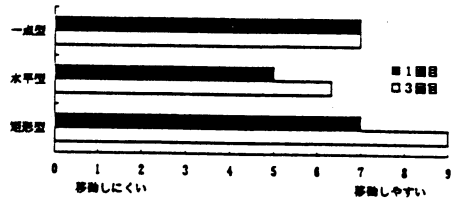


図5　カーソル移動の容易さ

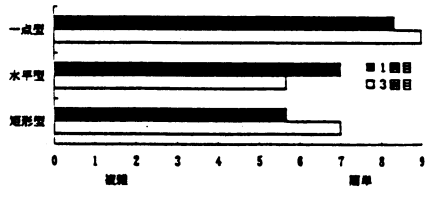


図6　クリックの容易さ

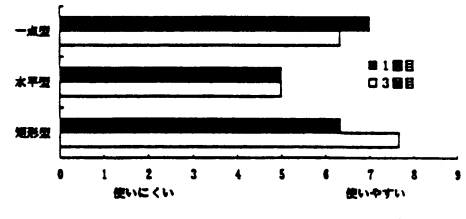


図7　総合評価

参考文献

[1] 三好, 市橋, 長坂, 中尾: システム制御情報学会論文誌, Vol.9, No.7, pp.337-346 (1996)

連絡先

〒593 大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学工学部経営工学科
市橋　秀友
TEL:0722-52-1161. FAX:0722-59-3340
E-mail:ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

ファジイネットワーク上のフロー問題
Flow Problem in Fuzzy Network

島田　文彦　　石井　博昭　　伊藤　健
Fumihiko Shimada　　Hiroaki Ishii　　Takeshi Itoh

大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract

The sharing problem is a method to find an equitable distribution of resouces. Its objective is to maximize the smallest value of a function of the flux to a each sink node, and it takes a weight for the sink node into account. In this paper, we introduce the existence possibilities of arks to the graph and define "the path reliabilities" by them. Then, we consider both criterion, that is, about the weights (in the original sharing probrem) and the reliabilities, and formulat、 a extended model of the sharing probrem as a bicriteria programming probrem.

1　はじめに

シェアリング問題は「輸送・配分問題」を解くネットワーク計画問題の一モデルであり、問題の性質上大元の情報に曖昧さが含まれる事も多い。そのために、曖昧な情報を考慮した解法も多く考えられてきた ([2])。本研究では「経路の安全性」を導入したシェアリング問題の拡張モデルを提案する。これは、はじめに経路の存在可能性が最高の弧のみを用いてシェアリング問題を解き、使用する弧の存在可能性の下限を下げながらその解を更新していく方法である。最大フローを求める方法としてプリフロー-プッシュ算法を用いたが、さらに計算量を減少させるために多少の変更を図った。

2　定式化

ノード集合 $V_0 = \{1, 2, \cdots, n\}$ 、アーク集合 $A_0 = \{(i,j) \mid i \neq j, (i,j) \in V_0 \times V_0\}$ で表されるネットワークを $G_0(V_0, A_0)$ とする。ここで、A_0 の各要素 (i,j) に容量 $c(i,j)$ 及び存在可能性 $0 \leq \mu(i,j) \leq 1$ が割り当てられている。V_0 には、供給点の集合 $S = \{s_1, s_2, \cdots, s_k\}$ と需要点の集合 $T = \{t_1, t_2, \cdots, t_l\}$ が含まれる。また、弧 (i,j) を流れるフローを $f(i,j)$ 、t_j に流れ込むフローを f_j とする。

以上のことより、次のような二目的シェアリング問題 **BSP** を提案する。

BSP:

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} \quad \min f_j/w_j \\ &\text{Maximize} \quad \min_{(i,j)\in A_F} \mu(i,j) \\ &\text{s.t.} \quad \sum_{i\in V_0-j} f(i,j) = \sum_{i\in V_0-j} f(j,i) \\ &\qquad\qquad (\, j \in V \cap \overline{S} \cap \overline{T}\,) \\ &\qquad 0 \leq f(i,j) \leq c(i,j) \end{aligned}$$

但し、 $w_j > 0$ をシンク t_j の重要度とし、$f(i,j) > 0$ である弧 (i,j) の集合を A_F と置く。

3　解法

最大フロー問題として解くために、$V = V_0 \cup \{s,t\}$ 、$A = A_0 \cup \{(s,s_i) \mid i = 1, 2, \cdots, k\} \cup$

$\{(t_j,t) \mid j=1,2,\cdots,l\}$ なる拡張ネットワーク $G(V,A)$ を考える。ここで、スーパーソース s を各ソース s_i にフローを流すソース、スーパーシンク t を各シンク t_j からのフローを受けるシンクとする。また、 $c(s,s_i)=\infty$ 、 $\mu(s,s_i)=\mu(t_j,t)=1$ （ $i=1,2,\cdots,k$ 、 $j=1,2,\cdots,l$ ）とする。

プリフロー-プッシュ算法は、プリフロー $x(i.j)$ 、距離 $d(i)$ 、残存量 $e(i)$ のパラメータを使用する方法である。$x(i,j)$ は非負の値で、$\sum_{\{j|(j,i)\in A\}} x(j,i)-\sum_{\{j|(i,j)\in A\}} x(i,j)=e(i)\geq 0$ 、（ $\forall i\in V_0$ ）を満たす。この式を満たしながら、 $d(i)$ の大きい点から小さい点へと枝ごとにプリフローを流し、最終的に全ての $e(i)=0$ になるように調整していく。

はじめは、 $A^0=\{(i,j)\in A \mid \mu(i,j)=1\}$ 、$c(t_j,t)=\infty$ とし、 (V,A^0) での最大フロー問題を解く。その時のフローの総量 F^0 に対して、BSP の第一の目標が最大になるように f_j を求め、その値を各シンクからの容量 $c(t_j,t)$ とする。ここで $x(t_j,t)<c(t_j,t)$ となるシンクでは $x(t_j,t)=c(t_j,t)$ とし、残りの容量を他のシンクに均等にまわす。もしそこで $x(t_j,t)>c(t_j,t)$ となるシンクが存在すれば、$e(t_j)=x(t_j,t)-c(t_j,t)$ 、 $x(t_j,t)=c(t_j,t)$ として再びプリフロー-プッシュ算法を用いる。この様に $c(t_j,t)$ を調整しながら、最終的に $\sum x(t_j,t)=F^0$ となれば終了する。

次に、存在可能性が大きい順に弧を追加し、最大フローを更新して行く。この時、前回のフロー、容量を最初の実行可能解とでき、効率化が図れる。

この様にして複数の解 $(W,\mu)=$ （ f_j/w_j の最小値，フローが存在している弧の存在可能性の下限）が求まるので、意思決定者は各自必要とする解を採用すればよい。

4 おわりに

ここでは、通常のシェアリング問題に対して、弧の存在可能性を考慮した拡張を提案した。対象となるネットワークを最大フロー問題として解くために拡張し、プリフロー-プッシュ算法を用いて解き、その解を基準に多目的問題の解を更新してゆくものである。また、計算の複雑さを軽減する方法も考慮している。なお、この研究は文部省科学研究費基盤研究 (C)(2)08680460 によるものであることを付記しておく。

参考文献

[1] D.Dubois & H.Prade, "*Fuzzy Sets and Systems*", Academic Press, New York (1980).

[2] M.Tada, " Studies on Fuzzy Combinatorial Optimization", 京都大学工学部博士論文 (1994)

連絡先

〒565　大阪府吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
応用物理学専攻
島田　文彦
TEL 06-877-5111 (Ext. 3641)
FAX 06-878-1385
e-mail shimada@ap.eng.osaka-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRE4-2

遺伝的アルゴリズムによるファジィ係数を伴う最小経路配分問題

Shortest Path Routing Problem with Fuzzy Coefficients Using Genetic Algorithm

玄 光男　井田 憲一　程 潤偉　金 鍾律

Mitsuo Gen　Kenichi Ida　Runwei Cheng　Jongryul Kim

足利工業大学 経営工学科

Dept. of Industrial & Systems Engg., Ashikaga Institute of Technology

Abstract

Network optimization problems have been given great attentions from researchers of many fields, such as network routing problems, network flow problems, network analysis problems, and so on. One of typical network problems is shortest path routing problem. In the shortest path routing problems, we have dealt with cost, distance, transit times, or others of interesting one as crisp values. But in the real-world network problems, there are many cases which are more appropriate to represent imprecise(fuzzy) than crisp numbers. Recently, genetic algorithms are used to solve many real-world problems and have received a great deal of attention about their ability as optimization techniques for network optimization problems. In this paper, we try to introduce triangle fuzzy number(TFN), in order to display fuzziness, into shortest path routing problem, using genetic algorithm with priority-based encoding method, which can potentially represent all possible paths in a graph. Finally, we try to demonstrate our approach by some numerical experiments which have imprecise informations

Key word : Genetic Algorithm(GA), Shortest Path Routing, Priority-Based Encoding Method

1 Introduction

Recently, we have given attention to network systems, such as LANs(Local Area Networks), WANs(Wide Area Networks), MANs(Metropolitan Area Networks), INTERNET, and so on. Among problems of these systems being larger, routing problem is one of the typical network optimization problems(for example, network routing problems, network flow problems, network analysis problems, etc.). Many practical routing algorithms are based on the notion of a shortest path method because it is simple and easy to understand. The idea is to build a graph of a network, with each node of the graph representing a terminal or computer and each edge of the graph representing a commuincation line. To choose a route between a given pair of nodes, the algorithm just finds the shotest path between them[7][8][9].

In the most general cases, the labels on the edges could be computed with a function of the distance, bandwidth, average traffic, transit time, communication cost, mean queue length, measured delay, or others of interesting one represented as crisp values. But in the real-world network problems, there are many cases which are more appropriate to represent imprecise(fuzzy) than crisp numbers. So, we employ TFN in order to express this fuzziness.

Genetic algorithm (GA) has received a great deal of attention regarding their potential as optimization techniques for network optimization problems and is often used to solve many real-world problems[1][2][3]. Recently Gen et al. [5] proposed the new encoding method for shortest path problems and solved some applications.

In this paper, we transform the original problem with fuzzy coefficients into crisp problem by the concepts of possibility and necessity proposed by Dubois and Prade[4]. The transformed crisp problem can be solved by using GA with priority-based encoding method[5]. Finally, we get a numerical experiment to demonstrate performances of the proposed method.

2 Shortest Path Routing Problem with Fuzzy Coefficients

An undirected graph $G = (V, E)$ comprises a set of nodes $V = \{v_i\}$ and a set of edges $E \in V \times V$ connecting nodes in V. Corresponding to each edge, there is a TFN $\widetilde{w}_{ij}$ representing the fuzzy cost from node v_i to node v_j. A path from node v_i to node v_j is a sequence of edges $(v_i, v_l), (v_l, v_m), \ldots, (v_k, v_j)$ from E in which no node appears more than once. A path can also be equivalently represented as a sequence of nodes $(v_i, v_l, v_m, \ldots, v_k, v_j)$. In the example given in Figure 1 , $(1,4), (4,3), (3,5)$ and $(5,6)$ make up a path

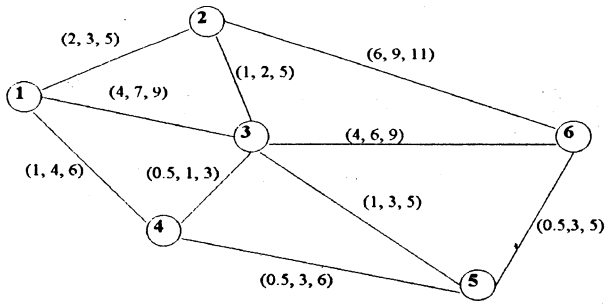


Figure 1: A simple undirected graph with 6 nodes and 10 edges

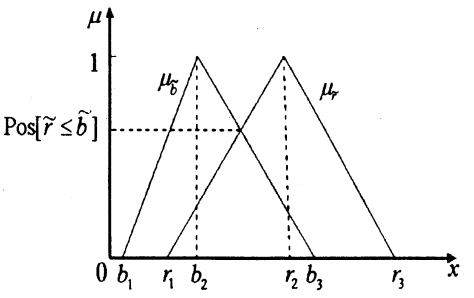


Figure 2: Indices of the relation between fuzzy numbers

from node 1 to node 6. The node representation is $(1,4,3,5,6)$. The problem is to find a path between two given nodes having minimum total cost. Let 1 denote the initial node and n denote the end node of the path. Let x_{ij} be an indicator variable defined as follows:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if edge } (i,j) \text{ is included in the path} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

2.1 The formulation of problem

The problem can be formulated as the following integer programming problems:

$$\text{min} \quad \tilde{c}(\boldsymbol{x}) = \sum_i \sum_j \tilde{w}_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_j x_{ij} \leq 2, \ \forall i \in V \tag{2}$$

$$\sum_{j \neq k} x_{ij} \geq x_{ik}, \ \forall (i,k) \in E, \ \forall i \in V' \tag{3}$$

$$\sum_j x_{1j} = \sum_j x_{jn} = 1, \ \forall i,j \in V \tag{4}$$

$$x_{ij} = x_{ji}, \ \forall (i,j) \in E \tag{5}$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \ \forall (i,j) \in E \tag{6}$$

where $\tilde{w}_{ij}$ mean the fuzzy coefficients from node i to node j and weights which are represented by TFN and $V' = V - \{1, n\}$. Constraints (2) and (3) together imply any node other than 1 and n has either 0 or 2 nonzero incident edges. Constraint (4) makes 1 and n the endpoints of the path.

2.2 The transformation of problem

The transformation method employed here is based on the concepts of possibility and necessity, that is, we make use of exceedance possibility which is one of four measures of possibility and necessity proposed by Dubois and Prade[4], and used as the index on comparision of fuzzy numbers. The fuzzy problem is reduced into the crisp problem by using the threshold value set by decision maker(DM). Consider the index for ranking two TFNs $\tilde{r}$ and $\tilde{b}$, which is denoted exceedance possibility. The exceedance possibility that $\tilde{r}$ is smaller than $\tilde{b}$ is defined as follows(see Figure2):

$$\text{Pos}[\tilde{r} \leq \tilde{b}] = \sup\{\min(\mu_r(u), \mu_b(v)) | u \leq v\}$$

, where Pos is an abbreviation of *Possibility*. And the above index is rewritten by two TFNs, $\tilde{r} = (r_1, r_2, r_3)$ and $\tilde{b} = (b_1, b_2, b_3)$ as follows:

$$\text{Pos}[\tilde{r} \leq \tilde{b}] = \begin{cases} 1, & r_2 = b_2 \\ \sigma, & r_2 \geq b_2, \quad r_1 \leq b_3 \\ 0, & r_1 \geq b_3 \end{cases}$$

where

$$\sigma = \frac{b_3 - r_1}{(b_3 - b_2) + (r_2 - r_1)}$$

Therefore, the objective function value is a TFN because of the extension principle, and is denoted as follows:

$$\tilde{c}(\boldsymbol{x}) = (c_1(\boldsymbol{x}), c_2(\boldsymbol{x}), c_3(\boldsymbol{x}))$$

where

$$c_t(\boldsymbol{x}) = \sum_i \sum_j \tilde{w}_{ijt} x_{ij}, \quad t = 1,2,3$$

And the conditional possibility distributed of the objective function $\tilde{c}(\boldsymbol{x})$ is obtained as follows:

$$\text{Pos}[\tilde{c}(\boldsymbol{x}) = c(\boldsymbol{x}) | \boldsymbol{x}]$$
$$= \begin{cases} \dfrac{c(\boldsymbol{x}) - c_1(\boldsymbol{x})}{c_2(\boldsymbol{x}) - c_1(\boldsymbol{x})} \equiv \theta_1, & c_1(\boldsymbol{x}) \leq c(\boldsymbol{x}) \leq c_2(\boldsymbol{x}) \\ 1, & c(\boldsymbol{x}) = c_2(\boldsymbol{x}) \\ \dfrac{c_3(\boldsymbol{x}) - c(\boldsymbol{x})}{c_3(\boldsymbol{x}) - c_2(\boldsymbol{x})} \equiv \theta_2, & c_2(\boldsymbol{x}) \leq c(\boldsymbol{x}) \leq c_3(\boldsymbol{x}) \end{cases}$$

From this equation, it can be noted that the objective function space

$$c_2(\boldsymbol{x}) \leq c(\boldsymbol{x}) \leq c_3(\boldsymbol{x})$$

is the largest when objective function is

$$\text{Pos}[\tilde{c}(\boldsymbol{x}) = c(\boldsymbol{x})] \equiv \theta_2,$$

because w_{ij2} and w_{ij3} are the largest among the triplets for the TFNs in the objective function. So, the objective is

$$\text{Pos}[\tilde{c}(\boldsymbol{x}) = c(\boldsymbol{x})] = \frac{c_3(\boldsymbol{x}) - c(\boldsymbol{x})}{c_3(\boldsymbol{x}) - c_2(\boldsymbol{x})} \equiv \theta_2$$

and decision space is

$$c_2(\boldsymbol{x}) \leq c(\boldsymbol{x}) \leq c_3(\boldsymbol{x})$$

Clearly, θ_2 is a nonlinear function. If the DM has a lower threshold value of α, the θ_2 is replaced by linear inequality $\theta_2 \geq \alpha$. This threshold can be take n any value as long as it lies in the range $0 \leq \alpha \leq 1$. According to the above two equations, the original problem is transformed into crisp one as follows:

$$
\begin{aligned}
\min \quad & c(\boldsymbol{x}) \\
\text{s. t.} \quad & \theta_2 \geq \alpha \\
& c_2(\boldsymbol{x}) \leq c(\boldsymbol{x}) \leq c_3(\boldsymbol{x}) \\
& \sum_j x_{ij} \leq 2, \ \forall i \in V \\
& \sum_{j \neq k} x_{ij} \geq x_{ik}, \ \forall (i,k) \in E, \ \forall i \in V' \\
& \sum_j x_{1j} = \sum_j x_{jn} = 1, \ \forall i,j \in V \\
& x_{ij} = x_{ji}, \ \forall (i,j) \in E \\
& 0 \leq x_{ij} \leq 1, \ \forall (i,j) \in E
\end{aligned}
$$

3 Genetic Algorithm

3.1 Representation

Here we employ the priority-based encoding method newly proposed by Gen, Cheng, and Wang[5].

3.1.1 Priority-Based Encoding

It is not easy to directly encode a path in a graph because of some difficulties, for instance, a path contains variable number of edges, the maximal number is $n-1$ for a n node graph and a random sequence of edges usually does not correspond to a path. So, we adopted an indirect approach to encode a path in a graph, that is, encode some guiding information for constructing a path, but a path itself, in a chromosome. The path is generated by sequential node appending procedure, beginning from the specified node 1 and terminating at the specified node n.

We give each node a priority with a random mechanism and add the one with the highest priority into path. In the priority-based encoding method, the position of a gene is used to represent node ID and its value is used to represent the priority of the node for constructing a path among nodes. A path can be uniquely determined from this encoding. Let us see an

1	2	3	4	5	6	locus: node ID
3	5	4	6	2	1	value: priority

Figure 3: Priority-based encoding

example of chromosome generated randomly as shown in Figure 3. Suppose we are going to find a path from node 1 to node 6. At the beginning, we attempt to find a node which is connected to node 1. Then we form the set of nodes available for next consideration and select the one with the highest priority among them. Repeat these steps until we obtain a complete path $(1,4,3,2,6)$. It is easy that any permutation of the encoding can always yield to a path.

3.1.2 Path Growth Procedure

Here we use a path growth procedure also proposed by Gen et al.[5], in order to generate a path from an arbitrary chromosome. The basic idea of path growth procedure is to generate a path from start node 1 to end node n by appending eligible edges into the path one by one. The edge added to path P is always the edge with the highest priority in the graph that extends the path from the end node.

The following implementation of path growth procedure is used in this paper.

Path growth procedure(a path from node 1 to n)

Step 1: Add node 1 to path P and let $i = 1$.

Step 2: Make the set of nodes $A(i)$ with all nodes adjacent to node i according to incidence matrix A.

Step 3: Select the node with highest priority from $A(i)$. If the node selected is k, add it to path P.

Step 4: Modify incidence matrix A by removing the incidence between node k and all other nodes in path P.

Step 5: If $k = n$, we obtain a complete path; otherwise, let $i = k$ and go back to Step 2.

3.2 Evaluation

The evaluation method which we employ here includes in the following steps:

- Convert chromosome to a path
- Calculate the objective value
- Convert the objective function's value to fitness

Since this problem is a kind of minimization problems, we use the following equation as the method to convert the original objective value to a fitness value in order to ensure that the fitter indiviual has a larger fitness vlaue:

$$eval = \frac{1}{(\text{objective value})}$$

3.3 Genetic Operators

The selection used here is the method combined the *roulette wheel* and *elitist* approach. The roulette wheel selection which one of the fitness-proportional method is used to randomly reproduce into new generation and the elitist method is employed to preserve the best chromosome for the next generation and overcome the stochastic errors of sampling.

We employed the position-based crossover proposed by Syswerda[6]. It takes some genes from one parent at random and fills the vacuum position with genes from the other parent by a left-to-right scan(see Figure 4).

And we used here swap mutation which simply select two positions at random and swap their contents(see Figure 5).

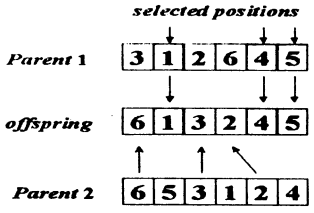


Figure 4: Illustration of the position-based crossover operator

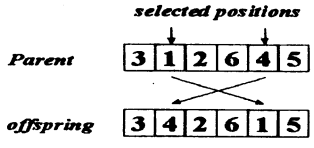


Figure 5: Illustration of the swap mutation operator

4 Numerical Examples

In our experiment, we used Pentium 133MHz PC and Implemented by C language for shortest path problem with fuzzy coefficients. As shown in Table 1, we employ the shortest path routing problem with 10 nodes and 18 edges as numerical example randomly generated. For the example, we set the parameters as $pop\_size = 10$, $p_C = 0.4$, $p_M = 0.1$, and $max\_gen = 50$.

Table 1: The Weights of Edges(Fuzzy Coefficients) $\widetilde{W}$

i	Edge	$\widetilde{W}$	i	Edge	$\widetilde{W}$
1	$1-2$	$(3,4,6)$	10	$5-6$	$(1,4,9)$
2	$1-3$	$(2,5,9)$	11	$5-7$	$(2,3,4)$
3	$2-3$	$(3,6,7)$	12	$5-8$	$(3,4,5)$
4	$2-4$	$(2,4,6)$	13	$6-8$	$(2,4,5)$
5	$2-5$	$(1,2,7)$	14	$7-8$	$(3,5,6)$
6	$2-7$	$(3,5,8)$	15	$7-9$	$(1,6,8)$
7	$3-5$	$(2,4,8)$	16	$8-9$	$(1,3,7)$
8	$3-6$	$(2,3,4)$	17	$8-10$	$(2,3,6)$
9	$4-7$	$(3,4,5)$	18	$9-10$	$(2,3,4)$

The proposed genetic algorithm has been well performed on the shortest path routing problems which we have mentioned in the Table 1. In Table 2, we display the result of experiment when $\alpha = 0$, $\alpha = 0.5$, and $\alpha = 1$. From Table 2, we know that $\alpha = 0.0$, i.e., the most pessimistic case represented the worst result and $\alpha = 1$, i.e., the optimist case represented the best result.

5 Conculsion

In this paper, we proposed the method which could slove the shortest path routing problem with fuzzy coefficients. First of all, we transformed the original problem with fuzziness into the crisp one. And we solved this crisp one using genetic algorithm with priority-based encoding.

Table 2: The Result of example

α	Route selected	Objective	Fitness
0.0	$1-2-7-4-10$	19	0.052632
0.5	$1-2-5-8-10$	17	0.058824
1.0	$1-2-5-8-10$	13	0.076923

Lastly, we employed numerical experiment to demonstrate our proposed method by a numerical experiment. And we got the result which is satisfactory.

References

[1] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.

[2] Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1994.

[3] Gen, M. & Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York, 1997.

[4] Dubois, D. and H. Prade. Ranking fuzzy numbers in the setting of possibility theory, *Information Sciences*, Vol.30, pp.183-224(1983).

[5] Gen, M., Cheng, R., and Wang, D. Genetic algorithms for solving shortest path problems, *International conference on evolutionary computation*, 1997(appear).

[6] Syswerda, G., Scheduling optimization using genetic algorithms, In Davis, L., editor, *Handing of genetic algorithm*, pp. 332-349, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.

[7] Cormen, T. H., C. E. Leiserson, and R. L. Rivest, *Introduction to Algorithms*, The MIT Press, 1990.

[8] Bertsekas, D. and R. Gallager, *Data Networks*, 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey, 1992.

[9] Tanenbaum, A. S., *Computer Networks*, 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey, 1989.

連絡先:〒326 栃木県足利市大前町268
足利工業大学 経営工学科
金 鍾 律
Tel: 0284-64-0605 ext.294
Fax: 0284-64-1071
e-mail: kjr@genlab.ashitech.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRE4-3

ニューラルネットワーク技法による2目的ファジィ最短経路問題の一解法

Bicriteria Shortest Path Problem with Fuzzy Coefficients using Neural Network Technique

玄　光男　　井田 憲一　　小淵 礼子

Mitsuo Gen　　Kenichi Ida　　Reiko Kobuchi

足利工業大学経営工学科

Dept. of Industrial & Systems Engg., Ashikaga Institute of Technology

Abstract

Neural Network technique(NN) is well-known as one of powerful computing tools to solve optimization problems. Due to the massive computing unit-neurons and parallel mechanism, neural network approach can solve the large-scale problem efficiently and optimal solution can be gained. In this paper, we propose a new neural network technique for solving bicriteria shortest path problem with fuzzy coefficients. The procedure and efficiency of this approach are shown with numerical simulations.

Key Words: Neural Networks, Fuzzy coefficients, Bicriteria Shortest Path Problem

1　はじめに

最短経路問題は，出発点から目的地まで行こうとするとき，どの経路を選べば最も効率よく行けるかという問題であり，各種の解法が提案されている [1].

さらに，現実問題として，単に最短距離だけを求めるだけでなく，到達時間やコストを同時に考慮した2目的最短経路問題がある．また，到達時間やコストは外的な要因によりファジィ数で表した方が適切な場合も多い.

一方，ニューラルネット技法は最適化問題の解法として注目されている．最近，このニューラルネットワークを用いてネットワークフロー問題を解く手法が Perfetti [3] により提案された．この手法はパラメータが少なく扱いやすいという利点があるが，収束速度が遅いという欠点も持ち合わせている.

そこで本論文では，収束速度が遅いという問題点を解決するために，収束速度を制御するパラメータを導入したニューラルネットワーク技法 [4] を用いて2目的ファジィ最短経路問題を解く新しい手法を提案する．また，ここで提案する手法と Perfetti の手法の比較実験を試み，提案する手法の有効性を確認する.

2　2目的ファジィ最短経路問題

m 個のノードと2つの目的関数を持つ2目的ファジィ最短経路問題 (Bicriteria Shortest Path Problem with fuzzy coefficient:f-BSP) は，次のように定式化することができる.

f – BSP :

$$\min \quad \tilde{z}_1(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} \tilde{c}_{ij}^1 x_{ij} \qquad (1)$$

$$\min \quad \tilde{z}_2(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} \tilde{c}_{ij}^2 x_{ij} \tag{2}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^{m} x_{ij} - \sum_{k=1}^{m} x_{ki} = \begin{cases} 1 & (i=1) \\ 0 & (i=2,3,\cdots,m-1) \\ -1 & (i=m) \end{cases} \tag{3}$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i,j = 1,2,\cdots,m \tag{4}$$

ここで，$\tilde{c}_{ij}^1$，$\tilde{c}_{ij}^2$はアーク (i,j) のそれぞれ第 1 目的関数と第 2 目的関数の三角型ファジィ係数である．ファジィ数のランキングには，次式のような Liou ら [5] の方法を用いる．

$$\hat{c}_{ij} = \frac{1}{2}[\alpha c_{1ij} + c_{2ij} + (1-\alpha)c_{3ij}] \tag{5}$$

ここで，三角型ファジィ数を$\tilde{c}_{ij} = (c_{1ij}, c_{2ij}, c_{3ij})$で表し，$\alpha \in [0,1]$ は意思決定者の楽観の度合いである．αは 1 に近いほど楽観的であり，0 に近いほど悲観的である．

このランキング法により，問題 f-BSP の目的関数は次式のように表される．

$$\min \quad \hat{z}_\alpha^1(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} \frac{1}{2}[\alpha c_{1ij}^1 + c_{2ij}^1 + (1-\alpha)c_{3ij}^1]x_{ij} \tag{6}$$

$$\min \quad \hat{z}_\alpha^2(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} \frac{1}{2}[\alpha c_{1ij}^2 + c_{2ij}^2 + (1-\alpha)c_{3ij}^2]x_{ij} \tag{7}$$

2 つの目的関数 (6),(7) を次のような 1 つの目的関数に変換する．

$$\hat{z}_\alpha(\boldsymbol{x}) = b_1 \hat{z}_\alpha^1(\boldsymbol{x}) + b_2 \hat{z}_\alpha^2(\boldsymbol{x}) \tag{8}$$

ここで，b_1と b_2は次の通りである．なお，$\hat{z}_\alpha^{1*}$，$\hat{z}_\alpha^{2*}$は各目的関数の正の理想解，$\hat{z}_\alpha^{1-}$，$\hat{z}_\alpha^{2-}$は負の理想解である．

$$b_1 = |\hat{z}_\alpha^{2-}(\boldsymbol{x}) - \hat{z}_\alpha^{2*}(\boldsymbol{x})| \tag{9}$$

$$b_2 = |\hat{z}_\alpha^{1-}(\boldsymbol{x}) - \hat{z}_\alpha^{1*}(\boldsymbol{x})| \tag{10}$$

したがって，2 目的ファジィ最短経路問題は次のような 1 目的の最短経路問題として再定式化することができる．

c − BSP :

$$\min \quad \hat{z}_\alpha(\boldsymbol{x}) = b_1 \hat{z}_\alpha^1(\boldsymbol{x}) + b_2 \hat{z}_\alpha^2(\boldsymbol{x}) \tag{11}$$

$$\text{s. t.} \quad r_1(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{m} x_{1j} - \sum_{k=1}^{m} x_{k1} - 1 = 0 \tag{12}$$

$$r_i(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{m} x_{ij} - \sum_{k=1}^{m} x_{ki} = 0, \quad i = 2,3,\cdots,m-1 \tag{13}$$

$$r_m(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{m} x_{mj} - \sum_{k=1}^{m} x_{km} + 1 = 0 \tag{14}$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i,j = 1,2,\cdots,m \tag{15}$$

3 ニューラルネットワークによるファジィ二目的最短経路問題

ここでは，c-BSP1 問題をニューラルネットワークにより解く手法を提案する．

ニューラルネットワーク技法を c-BSP 問題に適用するために，次のようなペナルティ関数 (エネルギー関数)$E(\boldsymbol{x},\kappa)$ を構成する．Perfetti の手法 [3] では，c-BSP 問題を次のようなペナルティ関数に変換することができる．

$$E(\boldsymbol{x},\kappa) = b_1 \hat{z}_\alpha^1(\boldsymbol{x}) + b_2 \hat{z}_\alpha^2(\boldsymbol{x}) + \frac{\kappa}{2}\left[\sum_{i=1}^{m}(r_i(\boldsymbol{x}))^2 + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}([x_{ij}]_-)^2\right] \tag{16}$$

ここで，$\kappa > 0$ はペナルティ・パラメータである．

さらに，エネルギー関数 (16) を次のような連立常微分方程式に変換する．

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t} = -\nabla_{\boldsymbol{x}} E(\boldsymbol{x},\kappa) \tag{17}$$

Perfetti 手法の問題点は，収束速度が遅いことである．そこで本論文では，連立常微分方程式に変換するときに，学習パラメータμを導入することを試みる．この学習パラメータの値は収束の早遅を制御することができ，その値を大きくとると収束が早くなり，小さくなると遅くなる．ただ，あまり大きくしすぎると高周波数を伴う電気回路となり，回路設計が難しくなるので注意が必要である [6].

本論文ではエネルギー関数 (16) を最小にするために，傾斜法を用いて次のような連立常微分方程式を作成する．

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t} = -\mu \nabla_{\boldsymbol{x}} E(\boldsymbol{x},\kappa) \tag{18}$$

式 (18) は次のように書き直すことができる．

$$\frac{\mathrm{d}x_{ij}}{\mathrm{d}t} = -\mu\left[\frac{b_1}{2}\left\{\alpha c_{1ij}^1 + c_{2ij}^1 + (1-\alpha)c_{3ij}^1\right\} + \frac{b_2}{2}\left\{\alpha c_{1ij}^2 + c_{2ij}^2 + (1-\alpha)c_{3ij}^2\right\}\right.$$

$$+\kappa\left\{\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial(r_i(\boldsymbol{x}))}{\partial x_{ij}}(r_i(\boldsymbol{x}))+[x_{ij}]_-\right\}\Bigg], \quad i,j=1,2,\cdots,m \tag{19}$$

ここで，$\kappa > 0$ はペナルティ・パラメータであり，$\mu > 0$ は学習パラメータである．$[x_{ij}]_-$は $\min\{0, x_{ij}\}$ である．

4 アルゴリズム

次に最短経路問題を提案手法で解くためのアルゴリズムを示す．

ステップ **1:** 与えられた 2 目的ファジィ最短経路問題を f-BLP2 問題に変換する．

ステップ **2:** 式 (9),(10) より，b_1 と b_2を求める．

ステップ **3:** 2 つの目的関数を式 (8) より 1 つの目的関数に変換する．

ステップ **4:** ニューラルネットワーク技法を用いてエネルギー関数 $E(\boldsymbol{x},\kappa)$ を作成する．

ステップ **5:** エネルギー関数 $E(\boldsymbol{x},\kappa)$ より連立常微分方程式 (式 (19)) を作成する．

ステップ **6:** パラメータμ,κと初期値 $x_{ij}(0)(i,j=1,2,\cdots,m)$ を設定する．

ステップ **7:** 補間法を用いて連立常微分方程式を解くことで，2 目的ファジィ最短経路問題の解を求める．

5 数値実験

図 1で与えられる 7 個のノードを持つネットワークにおいて，ノード 1 からノード 7 までの最短経路を求めることを考える．なお，各アークには表 1のようなファジィデータが与えられているとする [2].

図 1のような最短経路問題は f-BLP2 問題より次のように定式化される．

$$\begin{aligned}
\min\quad & \tilde{z}_1(\boldsymbol{x}) = (17,20,22)x_{12}+(13,15,17)x_{13}+(1,2,6)x_{24}\\
&\quad +(19,22,24)x_{25}+(2,4,6)x_{34}+(9,10,12)x_{36}\\
&\quad +(1,3,5)x_{45}+(5,8,10)x_{46}+(22,24,26)x_{57}\\
&\quad +(6,10,14)x_{67}\\
\min\quad & \tilde{z}_2(\boldsymbol{x}) = (10,11,12)x_{12}+(3,4,5)x_{13}+(8,10,11)x_{24}\\
&\quad +(8,9,10)x_{25}+(3,6,7)x_{34}+(12,13,19)x_{36}\\
&\quad +(7,9,12)x_{45}+(5,7,9)x_{46}+(4,5,7)x_{57}\\
&\quad +(8,9,11)x_{67}\\
\text{s. t.}\quad & x_{12}+x_{13}=1\\
& x_{24}+x_{25}-x_{12}=0\\
& x_{34}+x_{36}-x_{13}=0\\
& x_{45}+x_{46}-x_{24}-x_{34}=0\\
& x_{57}-x_{25}-x_{45}=0\\
& x_{67}-x_{36}-x_{46}=0\\
& -x_{57}-x_{67}=-1\\
& x_{ij}\geq 0,\quad i,j=1,2,\cdots,7
\end{aligned}$$

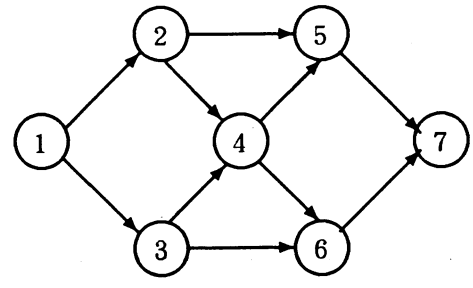


図 1: ネットワーク

表 1: コスト/時間のファジィデータ

$i-j$	コスト$\tilde{c}_{1ij}$	時間$\tilde{c}_{2ij}$
1-2	(17,20,22)	(10,11,12)
1-3	(13,15,17)	(3,4,5)
2-4	(1,2,6)	(8,10,11)
2-5	(19,22,24)	(8,9,10)
3-4	(2,4,6)	(3,6,7)
3-6	(9,10,12)	(12,13,19)
4-5	(1,3,5)	(7,9,12)
4-6	(5,8,10)	(5,7,9)
5-7	(22,24,26)	(4,5,7)
6-7	(6,10,14)	(8,9,11)

$\alpha = 0.5$ と設定した場合，この問題におけるそれぞれの理想解$\hat{z}^{1-}_{0.5}(\boldsymbol{x})$，$\hat{z}^{1*}_{0.5}(\boldsymbol{x})$，$\hat{z}^{2-}_{0.5}(\boldsymbol{x})$，$\hat{z}^{2*}_{0.5}(\boldsymbol{x})$ は，次のように求めることができる．

$$\hat{z}^{1-}_{0.5}(\boldsymbol{x}) = 35.00,\quad \hat{z}^{1*}_{0.5}(\boldsymbol{x}) = 45.75$$
$$\hat{z}^{2-}_{0.5}(\boldsymbol{x}) = 24.00,\quad \hat{z}^{2*}_{0.5}(\boldsymbol{x}) = 27.50$$

式 (9)，(10) より，$b_1 = 3.50, b_2 = 10.75$ となる．b_1と b_2を用いて c-BSP 問題へ変換する．

$$\begin{aligned}
\text{c}-\text{BSP}:&\\
\min\quad & \hat{z}_{0.5}(\boldsymbol{x}) = 154.0630x_{12}+51.6250x_{13}\\
&\quad +63.6875x_{24}+265.3120x_{25}+62.2500x_{34}\\
&\quad +160.0630x_{36}+64.6250x_{45}+101.6880x_{46}\\
&\quad +276.3750x_{57}+139.8750x_{67}\\
\text{s. t.}\quad & r_1(\boldsymbol{x}) = x_{12}+x_{13}-1=0\\
& r_2(\boldsymbol{x}) = x_{24}+x_{25}-x_{12}=0\\
& r_3(\boldsymbol{x}) = x_{34}+x_{36}-x_{13}=0\\
& r_4(\boldsymbol{x}) = x_{45}+x_{46}-x_{24}-x_{34}=0
\end{aligned}$$

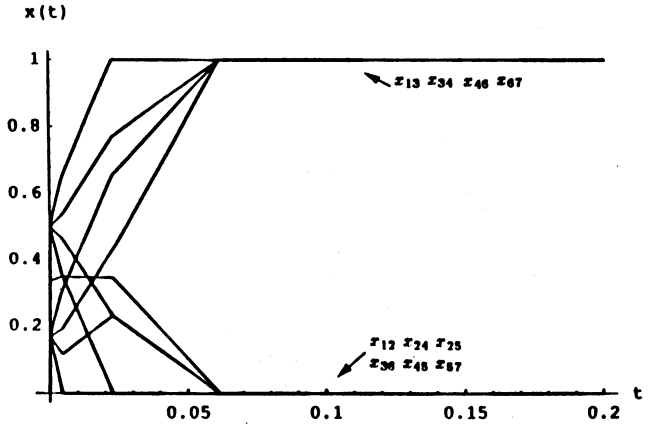


図 2: Perfetti 手法による解の収束過程

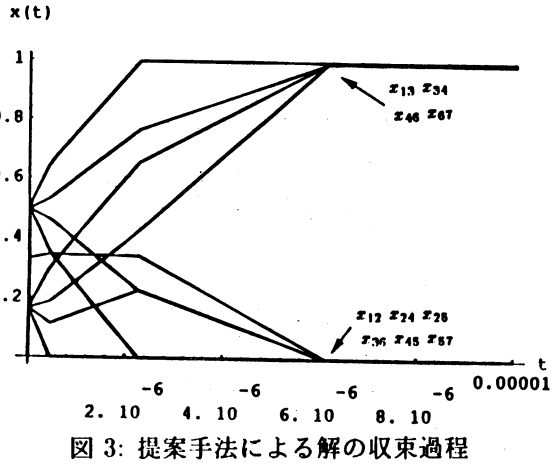


図 3: 提案手法による解の収束過程

$$
\begin{aligned}
r_5(\boldsymbol{x}) &= x_{57} - x_{25} - x_{45} = 0 \\
r_6(\boldsymbol{x}) &= x_{67} - x_{36} - x_{46} = 0 \\
r_7(\boldsymbol{x}) &= -x_{57} - x_{67} + 1 = 0 \\
x_{ij} &\geq 0, \quad i,j = 1,2,\cdots,7
\end{aligned}
$$

ニューラルネットワーク技法により，次のようなエネルギー関数を構成する．

$$
\begin{aligned}
E(\boldsymbol{x},\kappa) = {} & 3.5\hat{z}^1_{0.5}(\boldsymbol{x}) + 10.75\hat{z}^2_{0.5}(\boldsymbol{x}) \\
& + \frac{\kappa}{2}\left[\sum_{i=1}^{7}(r_i(\boldsymbol{x}))^2 + \sum_{i=1}^{7}\sum_{j=1}^{7}([x_{ij}]_-)^2\right]
\end{aligned}
$$

エネルギー関数を解くために傾斜法を用いて，次式のような連立常微分方程式を作成する．

$$
\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t} = -\mu\nabla_{\boldsymbol{x}}E(\boldsymbol{x},\kappa)
$$

Perfetti 法と提案手法の初期値を次のように設定する．

$$
\begin{aligned}
&\text{提案手法} \quad \mu = 10^4, \ \kappa = 1.4\times10^5 \\
&\qquad\qquad x_{ij} = 0, \ i,j = 1,2,\cdots,7 \\
&\text{Perfetti 手法} \quad \kappa = 10^5 \\
&\qquad\qquad x_{ij} = 0, \ i,j = 1,2,\cdots,7
\end{aligned}
$$

この問題の最短経路は $1 \to 3 \to 4 \to 6 \to 7$ となった．この解は，従来手法であるファジィネットワーク・シンプレックス法による解と一致している [2].

また，図 2と図 3より，収束時間は提案手法では約 6.0×10^{-6}秒，Perfetti 手法では約 0.06 秒で解に収束している．Perfetti 手法に学習パラメータ μ を導入したことで，明らかに収束速度が改善されている．ここでは，学習パラメータ μ を 1.4×10^5 と設定したが，この値よりも小さくした場合，収束速度は遅くなり，大きくしすぎると収束しない場合があった．

なお，実験には Pentiam 133MHz PC を用い，連立微分方程式を解くために *Mathematica*[7] を使用した．

6 おわりに

本論文では，ニューラルネットワークを用いて 2 目的ファジィ最短経路問題を解く手法を提案し，さらに Perfetti 手法の問題点を改善した．Perfetti 手法に学習パラメータを導入したことで，より早く最適解に収束した．また，提案する手法は，Perfetti 手法と比較して十分な精度を持つことが確認できた．

参考文献

[1] Bazaraa, M. S., Jarvis. J. & H. D. Sherali:*Linear Programming and Network Flows*, 2nd ed., Wiley, 1990.

[2] 井田 憲一, 玄 光男, 李 銀珍: "ファジィ係数を伴う二目的最短経路問題の一解法", 日本ファジィ学会誌, Vol.7, No1, pp.142-152, 1995.

[3] Perfetti, R. : "Optimization Neural Network for Solving Flow Problems", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol.6, No.5, pp.1287-1291, 1995.

[4] Cichocki, A. & R. Unbehauen : *Neural Networks for Optimization and Signal Processing*, John Wiley & Sons, 1993.

[5] Liou, T. S. and M. J. Wang: "Ranking Fuzzy Numbers with Integral Value", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 50, pp. 247-255, 1992.

[6] 井田 憲一, 玄 光男, 太田 幸雄, 大森 弘庶: "ニューラルネットワークによる線形計画問題の一解法", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-A, No.1, pp.297-311 1997.

[7] Skeel, R. D. & J. B. Keiper: *Elementary Numerical Computing with Mathematica*, McGraw-Hill, 1993 (玄 光男, 辻 陽一, 尾内俊夫 訳: *Mathematica* による数値計算, 共立出版, 1995).

連絡先： 〒 326 栃木県足利市大前町 268
足利工業大学 経営工学科 玄研究室
小淵礼子
Tel : 0284 − 64 − 0605ext.290
Fax : 0284 − 64 − 1071
e − mail : rkobuchi@genlab.ashitech.ac.jp

FRF1-1

生活計測のための柔軟な情報統合機構 ― 基本的考え方 ―

Flexible information fusion for macroscopic measurement of life states - Fundamental concepts -

中村和男，小池清之
Kazuo NAKAMURA , Kiyoyuki KOIKE

長岡技術科学大学 計画・経営系
Department of Planning and Management Science, Nagaoka University of Technology

Abstract : To improve quality of life corresponding to individual value, the future developed systems for supporting human living activities have to take the adaptability with the users' life style into account. In this context life states measurement systems will be essential. This paper proposes the fundamental concepts about multi-modal sensing systems and flexible information fusion mechanism for constructing intelligent measurement systems with aims of macroscopic understanding of individual life states and styles.

1.はじめに

近年、生活者の生活欲求のレベルが、安全性や健康性、便利性などの充足を前提により高次の快適性や精神的充実性、自己実現の方向へと向上してゆくとともに、社会の高齢化・少子化、女性の社会進出の急速な進展は生活者の自立的かつ自律的生活を要請してきており、それらを支える技術が期待されている。

一方、科学技術の展開は情報システムの高度化、広範囲への浸透をもたらしつつあり、生活場面への知的情報システムの導入も必至である。よって、知的情報技術を動員し個々人や個々の家庭の多様な実生活の様態を総合的にとらえ、それぞれに固有の生活価値に適合させつつ、生活の質的向上を支援するシステムが重要である。

本報告では、家庭における実生活様態を計測するための柔軟な情報統合化システムの概念を提案し、その知的情報処理機構を考察する。

2.生活計測システムの概念

(1) 生活計測システムのねらいと現状

生活計測のねらいは、家庭内や個室内での個あるいは家族としての生活者の心身状態や生活行動の場所、時間、質などの生活行動の状態、および住空間、設備機器、消費物資、エネルギー、メディア情報などの生活の場・状況の状態に関する諸要因の多面的実時間モニタリングを行い、それらから生活意味、ライフスタイルなどのマクロな生活様態を理解することである。

住宅での生活計測の現状は以下のようである。

(a)計測という手段はほとんどとられていない： 出現行動の多様さ、計測空間の狭さや構造的複雑さから、生活計測は技術的困難さを抱えている。その実態は、アンケート、ビデオ観察など記述的な把握が主体。

(b)限定的に行われている生活計測： HAやホームセキュリティで生活環境制御や生活安全のためのセンサーによる生活計測[2]が単項目毎に成されている。生活環境制御のための計測としては、温熱環境や空気質環境について積極的なセンシングが、生活安全のための計測としては、室内環境異常（熱，煙など）、住宅機器・施設異常（ガス漏れ、異常過熱など）、侵入者検知などが自動的になされている。

(2) 提案概念

生活計測のための技術開発研究のポイントとして、

- 自然な心身状態、生活行動を無意識下で計測
- パターン情報意味理解（センサ種別，時空間分布）
- 計測の文脈(Context)，行動自体が多様で個別的
- 生活行動、生活環境状態の質的分類の定義不明確
- 変容する生活行動形態に適応する計測システム
- 間接的・複合的センシングの効率的活用
- 計測システムの経済性を特に重視
- 生活行動の意味理解のための知識の活用
- 人間からの言語／非言語を通した応答も併用

これらによる計測システムの枠組みを図 1に示した。

◆各種センシング情報を統合的に取り込み融合化することで、計測事項の大局化・高度化を図る。

◆情報融合化機構は自己組織的に適正な構成を有するように調整されてゆけばよい。

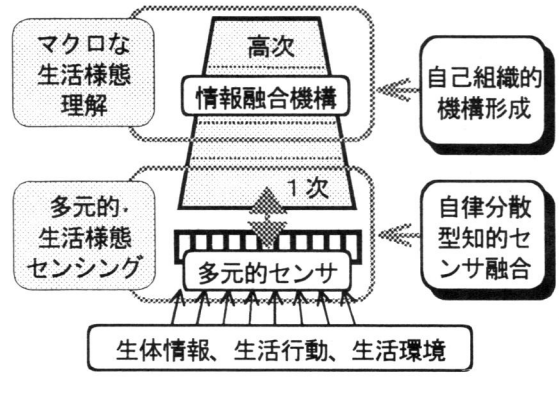


図 1 生活計測システムの全体的枠組み

3.多元的生活様態センシングシステム

(1) 多元的センシングシステムのねらい

一般に生活計測は次の二つに大別できる。

・生活環境の計測

・生活行動の計測

生活環境の計測では、センサの出力が直接生活環境の指標となる場合が多い。これに対し、生活行動の計測では生活行動を直接測るセンサは存在しない。そこで、生活計測では生活行動の計測に工夫が必要となる。本報告ではその一手法として多元的センシングシステムの導入を提案する。

(a)多元的センシングと直接的センシング

多元的センシングシステムとは、生活行動に付帯する計測項目を、多元的に収集するセンサシステムである。従って、多元的センシングシステムの計測結果は、その後の情報融合化機構を経て、初めて生活様態理解への手がかりを与える。この点が直接的なセンサと異なる点である。

(b)システムの経済性

このセンシング手法では、専用センサを開発せず既存のセンサを利用するので、経済的なシステム構築が期待できる。ローコストな既存のセンサを用いる分、情報融合化というソフトウェア的なサポートを行う点が特徴である。

(2) 提案概念

多元的センシングシステムと情報融合化機構を組み合わせる事により、生活者と住生活環境の計測を行う新たなシステムの構築が可能となる。情報融合には後述のようにいくつかのクラスがあるが、多元的センシングと1次融合化機構の組み合わせを、本報告では多元的生活様態センシングシステムと呼ぶ。

(a) 1次情報融合化

ここで1次融合を特に取り上げる理由は、環境計測の様な直接的計測項目は生活に関連した意味を持つのに対し、多元的センシング項目自体は1次融合化を施さないと同等に扱えないからである。

(b)高次情報融合化との関係

多元的生活様態センシングシステムの出力は、更なる高次情報融合化をもって、生活様態のマクロ理解を可能としなければならない。従って、センサの選定においては、生活行動の質的分類(衣・食・住・余暇・購買・交通・ｺﾐｭﾆｹｰｼｮﾝ／生命維持・空間・労作・情報)への関わりについて配慮する必要がある。

(c)計測に対する制限緩和

情報融合化は、生活の意味理解以外にも、絶対値測定の相対値測定化、分解能の緩和等、計測そのものへの効果も期待できるため、それらの探求適合性にも配慮する必要がある。

(d)言語／非言語を通した応答

更に本システムにおけるもう一つの重要なポイント

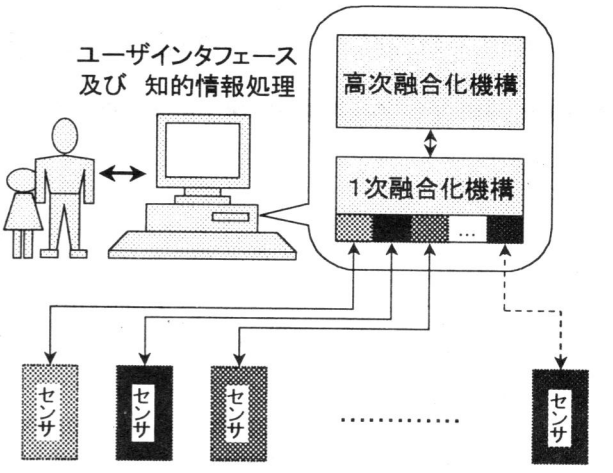


図 2 予備的検討システムの構成図

として、センサだけではなく人間からの言語／非言語を通した応答も併用する点を上げておく。生活シーンでは、機器が生活の一部として密着している例は数多く、機器との対話は別段否定すべきものではない。この点は工業計測と著しく異なる点であろう。

(3) 多元的生活様態センシングシステムの具体的提案

◆第1ステップ－予備的検討システム－

各種センシング情報を統合的に処理する為には、まず、生活に関わるセンシング情報を可能な限り多く収集する事が必要となる。最初のステップとしては、測定し得るありとあらゆる項目を先入観無しに計測することが重要である。

(a)システム構成

この段階でのシステム構成を図 2に示した。

各種センサと情報融合化及びセンサの制御を行うパーソナルコンピュータにより構成される。図 2でのセン

表1 多元的センシングシステムの計測内容 (例)

センシング項目	センサの方式	測定範囲
温 度	測温抵抗体	-20～+50℃
湿 度	静電容量式	0～100.0%RH
放射温度	赤外線検出方式	-50～+500℃
風 速	熱式ボールセンサ	0.05～10.00m/s
気 圧	空ごう伸縮	790～1040hPa
一酸化炭素濃度	定電位電解式	0～50ppm
二酸化炭素濃度	非分散型赤外線式	0～5000ppm
酸素濃度	ジルコニア式	0～25%
臭 い	熱線型焼結センサ	相対値評価 0～1000
人体検出	赤外線検出方式	5m，8ヶ所
機器作動	電流検出方式	動作検知 10ﾁｬﾈﾙ
騒 音	マイクロホン	2Hz～100kHz
振 動	加速度センサ	0.1～10G
色彩・色差・照度	Si フォトセル	0.01～299,000cd/m^2
pH (水質)	複合電極方式	0～14.00
導電率 (水質)	電気伝導率セル	0～1.999S/m
溶存酸素 (水質)	ガルバニ電池式	0～19.99mg/l
その他	超音波、紫外線、赤外線、放射線、等	

サは、校正された計測値を出力する計測器を意味する。

(b)センサの選定

先に、センサの選定においては生活行動の質的分類に配慮するとしたが、第１ステップではそれよりも広い範囲を計測する必要がある。また、生活環境に分類される項目は、生活者に向けられた測定ではないが、生活行動との因果関係があるかもしれないので、これらも同時に計測する。実際の計測内容の一例を表 1に示した。

(c)計測精度

それぞれの項目をでき得る限り高い精度で計測する必要がある。情報融合とそれらの知的情報処理により、各計測項目の生活行動に与える影響の度合いが明らかになれば、計測項目に課すべき精度が規定できる。しかし、このステップはその前の段階であるので、情報に取りこぼしが無いよう、基本的に市販の精度が規定された計測器を用いる。

(d)計測器等のインタフェース

計測器とパーソナルコンピュータ間の基幹のインタフェースはGPIB とし、更に RS-232C と GPIB のインタフェース変換器を用意した。

記録や制御は２台のパーソナルコンピュータで行うものとし、実稼働時の状況に応じ負荷分散が行える様配慮している。

(e)処理手順

得られたデータは基本的なフォーマッティング以外は行わず一旦記録媒体に記録する。データの融合化等の知的情報処理は専用に設けたワークステーションが分担する。

(f)併用計測器

・画像記録装置

この段階では、図 2の他に４ｃｈの画像記録装置も併用する。これは生活者の心身状態・生活行動を、間欠録画機能を用いて長時間(150 時間)にわたり録画するもので、記録内容の分析から計測機器出力の統合化の指針を得ようというものである。

最初の段階なので若干プライバシーを犠牲にしても、意味理解を優先させる方針をとる。

・音響記録・解析装置

音声及び人間活動に伴って発せられる音は、数少ない電子機器整合の良い信号であるので、音響環境も記録・解析手段を別システムとして用意している。

◆第２ステップ－実利用のための簡易システム化－

第１ステップのシステムは、規模が大き過ぎるため一般家庭への導入には無理がある。第２ステップとしては、第１ステップの分析結果に鑑み、実利用に耐えうるシステムとして多元センサ融合モジュールによる自律分散型センシングシステムの提案を行う。そのシステム構成の一提案を図 3に示した。

(a)多元センサ融合モジュール

第２ステップのシステム構成で最も特徴的な部分がこの多元センサ融合モジュールである。これは異なる何種類かのセンサ（センサ群）と１次融合化機構を一つのモジュールにしたもので、このモジュールを複数個異なる場所に設置し、時空間をパラメータとして高次融合化機構との間で通信を行う。第１ステップによりセンサの精度が緩和され、１次融合化機構も簡単なアルゴリズムが見い出されている事を前提としている。

センサ群としては検知特性がゾーン型とポイント型とが有り、それぞれの意味する生活行動は全く異なる事が予想されるが、これらは今後の検討課題である。

このようなモジュール化は、量産効果によりシステムのローコスト化に貢献すると考えられる。

(b)個別センサモジュール

他のセンサとの相関が少なく、一つのセンサで十分な１次情報を有するものは、個別センサモジュールとして設置する。このモジュールは単機能のセンサと通信インタフェースで構成される。生活環境センシングにこのモジュールの形態となるものが多い。

(c)ＬＡＮによるシステム化

パーソナルコンピュータの普及でＬＡＮ機材が低価格化し、入手し易くなった。そこで第２ステップでは、センサモジュール間及び高次融合化機構との間をＬＡＮで接続し、協調的融合処理を行う。

(d)対話型学習システムへの展開

センサモジュールの出力は、パーソナルコンピュータによりリアルタイムで高次融合化処理が行われる。この結果得られた多種の生活様態情報はユーザインタフェースを通じて生活者に提示される。

また、生活者からの応答がある場合は、ユーザインタフェースを介して高次融合化機構に情報がフィードバックされ、融合化機構の学習調整が図られる。

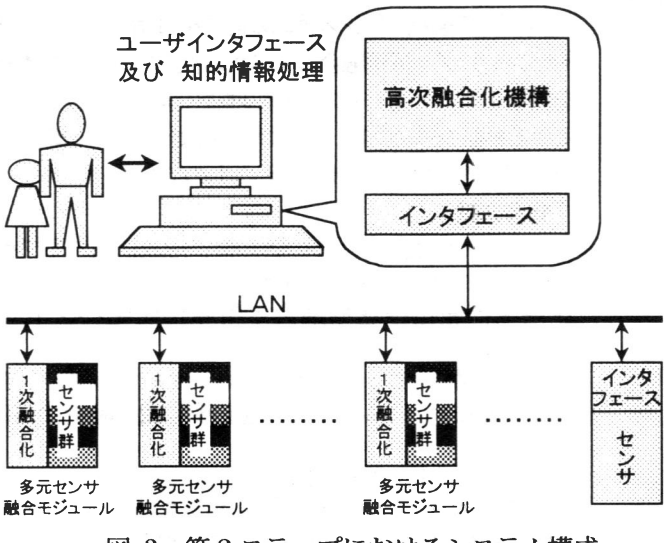


図 3　第２ステップにおけるシステム構成

4.生活様態理解のため情報融合化手法

(1) 情報融合化のねらいと手法の現状

本生活計測システムにおける情報融合機構は、生活行動や生活環境の状態に関する多元的なセンシング情報を駆使して、家庭におけるマクロな生活様態を生活意味を有する様々なレベルの要因によってとらえ、より高次には各人や家族としての固有のライフスタイルとして理解するためのものである。多元的センシング情報とそれら要因間の関係構造を情報融合化機構の中に埋め込むことができれば、生活様態を多面的に理解できたといえるであろう。

情報融合化は多元情報の統合と適切な尺度での値の出力、冗長な情報の縮約、欠損情報の補完や矛盾情報の緩和などを含んでおり、その手法の現状は一口にいえば融合機構が固いということである。代表的には、

・量的要因情報の線形荷重和とそれによる線形判別、
・質的要因情報の数量化Ⅱ類による判別
・ニューラルネットによる学習的パタン識別

があり、情報融合には重み関数による通常の積分（ルベーグ積分）が普通用いられるが、ときには論理型や確率論型（D&Sの証拠の理論も含む）なども用いられる。

(2) 提案概念

生活様態のマクロ理解のための学習的認知構造を、ファジィ積分と自己組織的エージェントネットによって柔軟にモデル化する。本手法の基本概念は、既に提案[1]しているが、各エージェントはいくつかのセンサや他のエージェントの出力を多面的に取り込んで情報融合した後、何らかの生活意味をもつ要因の状態を出力するとした。そして生活者との対話を活用しながら、センサ集合とエージェント集合の状態の組を種々経験的に学習することにより、それらエージェントがセンサや他のエージェントと自己組織的にネットワークを形成してゆくのである。

こうしたエージェントネットは生活様態のマクロ理解というねらいを考えると、図4のようにゆるやかな階層構造を有していると考えたい。先ず、諸センサからの入力の情報融合で人間の在・不在、位置、姿勢、運動、機器作動などの生活行動の要素的特徴や明るさレベル、色彩、騒音レベルなど生活環境の要素的特徴をとらえる１次レベルのエージェントクラスがあり、その上に２次レベルのクラスには、食事、くつろぎ、調理、就寝といった行為様態、室の温熱的快適度、照明の統合的色調、騒音の質、キッチンの調理器具活性などが含まれる。そして次第に高次レベルのクラスを形成して最上位では、家族の触れ合い度、エコロジー意識度、派手／落ち着き度、生活時間の型といったライフスタイルをとらえたい。

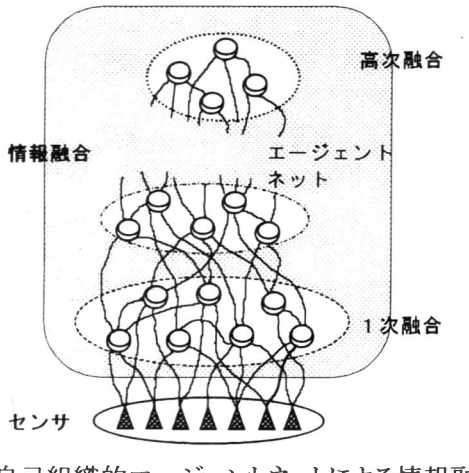


図4 自己組織的エージェントネットによる情報融合

(3) 手法の計算処理的な実現に向けて

各エージェントは先験的にあいまいな階層構造に位置づけておく。各エージェント k については入力としてセンサ出力 u あるいは他のエージェント出力 x を正規化したものを考え、それらの部分集合に対するファジィ測度 μ_k でショケ積分して生活意味のある要因状態を出力する。ただし、このファジィ測度については入出力の教師データセットに従って学習的に獲得してゆくものと考えている。u および x から抽出された入力情報集合をまとめて h と表して、出力は

$$x_k = (c)\int h d\mu_k = \sum_r \phi_k^r \cdot \mu_k^r$$

で求まる。ここに ϕ_k^r は h の成分値の大きい順に r なる番号付けをし、それと r+1 番目との値の差分を表している。学習的なファジィ測度の変更を

$$\Delta\mu_k^r = \{\phi_k^r / \sum_r \phi_k^r\}(x_k - \hat{x}_k)$$

とする。入力のセンサ出力や他エージェント出力の抽出においては、エージェント間のあいまいな階層構造や空間的位置関係を考慮するものとする。また、エージェント構造の縮約化には類似関係に基づくファジィ類似クラスの学習的形成と典型への代表化を導入する。以上の統合として柔軟な自己組織的エージェーントネット形成法の数理的表現を実現する。

5.まとめ

実生活様態の計測システムの構成を目指して、その多元的センシングと情報融合のシステム技術について基本概念を提案した。今後、その計算処理法の実現と実験システムによる検証を進めたい。なお本研究はＮＥＤＯの創造的産業技術開発促進事業に支援されたものである。

[参考文献]

1) 中村：外界理解のための認知構造形成に関するファジィモデル,第12回FSS,1996
2) 住宅情報化推進協議会：情報化住宅ハンドブック,1994
3) 扇原,大藪,木村：酸化スズ・ガスセンサを用いた独居人世帯モニタリング、北信越支部第22回研究会、1997

<連絡先>
〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1
長岡技術科学大学計画・経営系　中村和男
TEL (0258)47-9357　　FAX (0258)47-9350
Email　nakamura@pms.nagaokaut.ac.jp

FRF1-2

ガスセンサ出力による季節感の同定

Identification of seasonal-sense
using output of tin oxide gas sensor

○吉浦 真由美　　大薮 多可志
Mayumi YOSHIURA　　Takashi OYABU
富山国際大学
(Toyama University of International Studies)

Japan is going into the aging society rapidly. The population ratio of the old people is increasing. The old person's sense tends to dull with aging. Particularly, the sense of old person's body for temperature and humidity is remarkably dulled by aging and many kinds of detects of the person are occuring. In this study, we try to identify an indoor seasonal-sense by using the output of a tin oxide gas sensor and the degree of seasonal-sense is derived with a membership function. We can also detect the indoor disasters from the sensor output. With a degree of seasonal-sense, we can inform the information about seasonal clothes and indoor climate to the aged.

1.はじめに

日本においては、高齢化が進み老人人口の比率が急激に増加している。人は年をとるにつれ感覚機能が低下する。特に、温度・湿度に対する低下は著しい。そのため、多くの障害が老人の日常生活で生じており、老人の感覚機能の代行となり得る情報の提供が必要である。

本研究では、ガス漏れ警報器として使用されているガスセンサを用い、季節における室内の熱環境の情報を収集する。このガスセンサは多くの還元性ガスに反応する。このため、用いたセンサは居住空間における人間の活動に伴って発生するほとんどのガスを検知することも可能である。[1]これにより、室内における居住者の日常的なふるまいも検知できる。

このセンサは、温度や湿度によって抵抗値が変化する。本研究では、この特性を用いて季節感の同定を行う。温度と湿度の二つのパラメータから季節感は求めることができる。ここでは、ガスセンサ出力という一つのパラメータによって効率的に季節感を導出する。[2] 結果として、センサ出力により季節感を同定することが可能であることが明らかとなった。

本研究は、室内環境に関する様々な情報をガスセンサで収集し、人間に提供する研究の一貫として行ったものである。

2.実験方法

可燃性ガス検知用酸化スズ系ガスセンサ(CGS : Combustible Gas Sensor)の出力が季節によりどのように変化するか調べた。当該センサは日常生活により発生する様々なガスの有無により出力が変化する。このため、測定は、計測に供した部屋の空気清浄度が最も高い起床時とし、この CGS 値から季節感を導出する。測定点は立山町（富山県）と金沢市（石川県）である。両地点とも北陸地方である。本論文では立山での出力結果を掲載する。金沢での出力結果は、居住環境による変動があるものの同じ傾向を示している。

ガスセンサからの出力は次のようにして得られる。一般に、ガスセンサは還元性ガスが到来するとその素子抵抗(R_S)が減少する。この(R_S)の減少を、素子に直列に接続されている負荷抵抗 R_L の両端の電圧として取り出す。回路では、電源として直流 5V が印加されているため、出力は０～ 5V の範囲となる。

3.季節による CGS の出力結果

3.1 季節による CGS 出力

CGS 出力の１年間の推移を Fig.1 に示す。汚染ガスが少ない起床時の測定であるが、CGS の出力は季節変動があることがわかる。高温多湿である７月下旬から８月上旬にピーク値を示した山形の特性である。すなわち、CGS 出力(素子抵抗値)は温度と湿度により変化することが判る。

3.2 温度による CGS 出力

Fig.1 のグラフから、温度に対する CGS 出力を求めた。CGS の出力は先にも述べたように周囲温度と湿度の影響を受ける。結果としては、CGS 出力は温度の上昇に対して正の相関性があり、温度上昇が CGS 出力に影響を及ぼしていることが認められる。

湿度については、１年を通して 60%以上であったため顕著な影響は認められなかった。他の論文においても 60%以上の温度では、CGS 出力が余り変化しないことが報告されている。[3]

3.3 温・湿度による CGS 出力

温・湿度に対する CGS 出力を Fig.2 に示す。立山では比較的高湿度で推移するが、これは測定環境では近くに池や用水路があるためであると考えられる。この図では、夏期(7-8 月)の値が特性の上部に、冬季(12-3 月)の値が特性の下部に、春期(4-6 月)と秋期(9-11 月)は中央部にある。これより、各々の季節感を CGS 出力を用いてメンバーシップ関数で表せる。これを Fig.3 に示す。

3.4 快適度と CGS 出力

温・湿度の測定と同時に、体感による快適さも調べた。この快適さと CGS 出力は若干相関があることが分かった。本システムにおいて快適度が高いのは CGS の出力が 1.6 ～ 2.1V 位であり、快適度が高い時の CGS 値の範囲が限定される傾向にある。低い場合の CGS 出力はかなり広い範囲(0.8 ～ 2.5V 位)にある。

4.まとめ

酸化スズ系ガスセンサからの出力は温度

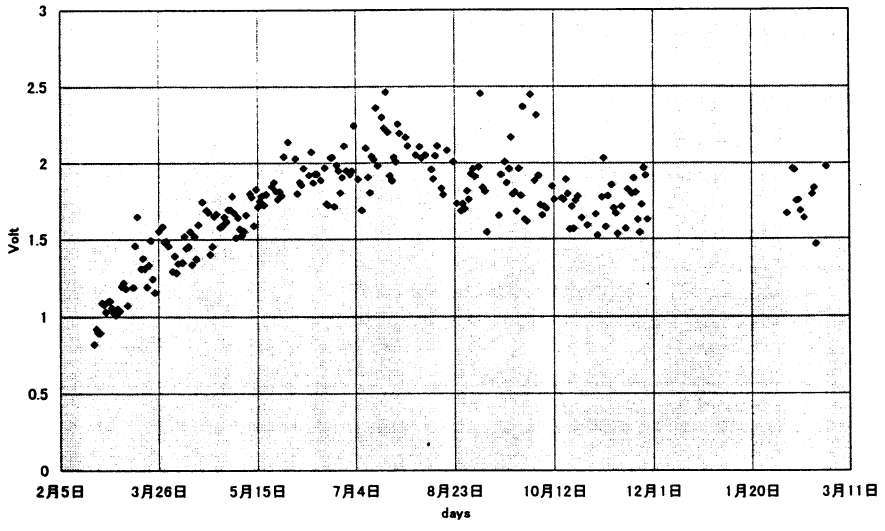


Fig.1 Outputs of CGS as a function of days.

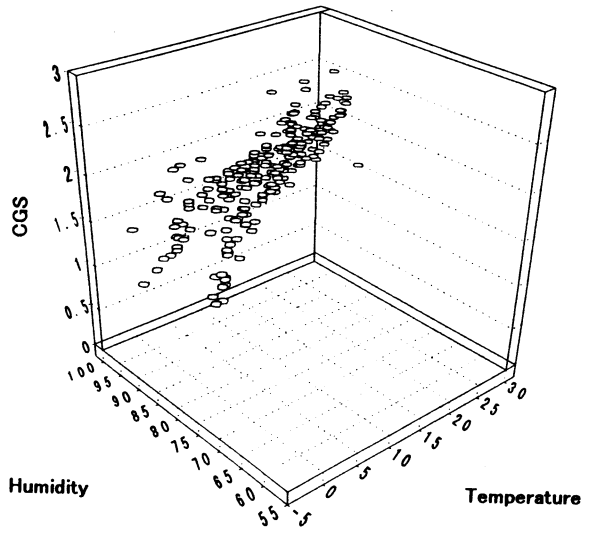


Fig.2 Outputs of CGS as a function of temperature and humidity.

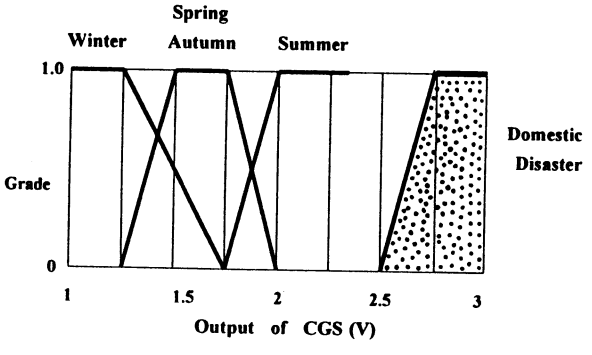


Fig.3 Membership functions for seasonal-senses.

や湿度により影響を受ける。室内環境においては、相対湿度が 60%以下になることはめずらしいため主に温度により影響を受ける。このことから、CGS 出力はより季節感を導出することを試みた。この時、簡単なメンバーシップ関数により導出することを試みた。

主に立山での結果について述べてきたが、金沢においても住環境の相違により若干の差異が認められたが、ほぼ同様な結果が得られた。相違点としては、Fig.2 に相当するグラフにおいて、CGS 出力の低い場合のプロットが４つのクラスターに分けられる傾向にあった。

謝辞：本研究の一部は、(財)富山県高等教育振興財団の助成を得て行われたことを記し感謝いたします。

参考文献

[1] 大薮、木村:"複数の酸化スズ系ガスセンサによる独居老人世帯モニタリング",電気学会論文誌 E,Vol.117E, No.6, 1997
[2] 吉浦、西川、大薮:"温・湿度による酸化スズ系ガスセンサ出力への影響と季節感の同定",日本 OR 学会第 14 回「意思決定と OR 研究集会」, 1996.11.22-23
[3] 吉村:"悪臭を伴う施設の環境モニタリングシステムの開発と環境教育への応用",電気化学協会 技術・教育研究懇談会 研究成果報告書, pp.27-32, 1997.3

[問い合わせ先]
〒 930-12 富山県大山町東黒牧 65-1
富山国際大学・大薮研究室
吉浦 真由美
TEL (0764) 83-8000
FAX (0764) 83-8008
e-mail : oyabu@tuins.ac.jp

FRF1-3

作業順序を考慮した人間の信頼性解析モデル

Human Reliability Analysis Model Considering Task Sequences

大森 明央
Akio OOMORI
筑波大学大学院理工学研究科
Master's Program in Science and Engineering,
University of Tsukuba

鬼沢 武久
Takehisa ONISAWA
筑波大学構造工学系
Institute of Engineering Mechanics,
University of Tsukuba

Abstract - This paper describes an analysis model of human reliability in which human reliability is expressed by natural language and its meaning is represented by a fuzzy set defined on the subjective unreliability [0,1]. The presented model considers sequences and dependencies among tasks especially. The model uses parametrized operations of fuzzy sets and the analysis results are represented by natural language.

1 はじめに

信頼性解析における、人間の信頼性をおおまかなものであるととらえて、言葉でそれを表現したほうが適切であるとの考え方がある[1)]。そこでは人間の信頼性を確率による数値ではなく言葉で表し、その言葉の意味をファジィ集合で表現している。また、解析にはこのファジィ集合を用い、解析結果も言葉で表現している。

本研究では、この考え方に基づいて人間の信頼性の解析を行うことにする。しかし、実際の問題を解析するときには、いくつか考慮すべき要素がある。ひとつは、従属性についてである。これは、ある作業でエラーすれば、続けて行う似たような作業でもエラーしやすくなるというものである。もうひとつは、作業間における順序についてである。実際の作業では、作業間に順序づけがなされていることが少なくない。そして、その順序を間違えることによって作業全体がエラーとなることもある。これらの要素を含めた解析モデルはかなり複雑になるが、いくら細かく分析してもそれだけ正確な解析結果が得られる保証はない。本研究では、従属性に加えて作業の順序関係も考慮した、おおまかな解析手法による人間の信頼性解析モデルについて述べる。

2 ファジィ集合による言葉の表現

解析モデルでは、言葉を用いて人間の信頼性を評価するが、その評価値は評価者の主観によるものであり、そこにはいくらかのあいまいさが含まれている。信頼性の評価と、評価に対するあいまいさというものを表現するために、ここでは (1) 式をメンバーシップ関数にもつファジィ集合を用いる。

$$F(x) = \frac{1}{1 + 20 \times |x - x_0|^{m_F}} \qquad (1)$$

ただし、$0 \leq x, x_0 \leq 1$であり、x_0, m_Fはパラメータである。パラメータx_0と「人間の信頼性評価に関する表現」の対応を表1に、パラメータm_Fと「人間の信頼性評価のあいまいさの表現」の対応を表2に示す。ここで、このファジィ集合を主観的不信頼性尺度とよぶことにする[3)]。なお、表1のクラス1、11に対応するファジィ集合には次のようなメンバーシップ関数を与えるものとする。

$$\text{「クラス1」} \quad F(x) = \begin{cases} 1 : x = 1 \\ 0 : x \neq 1 \end{cases} \qquad (2)$$

$$\text{「クラス11」} \quad F(x) = \begin{cases} 1 : x = 0 \\ 0 : x \neq 0 \end{cases} \qquad (3)$$

表1：人間の信頼性評価の表現とパラメータ

クラス	信頼性評価の表現	パラメータ (代表値)
1	人間の信頼性は全くない	−
2	人間の信頼性は非常に低い	0.9 − 1.0(0.95)
3	人間の信頼性は低い	0.7 − 0.9(0.8)
4	人間の信頼性はどちらかというと低い	0.55 − 0.7(0.625)
5	人間の信頼性は標準的である	0.45 − 0.55(0.5)
6	人間の信頼性はどちらかというと高い	0.3 − 0.45(0.375)
7	人間の信頼性は高い	0.2 − 0.3(0.25)
8	人間の信頼性はかなり高い	0.1 − 0.2(0.15)
9	人間の信頼性は非常に高い	0.05 − 0.1(0.075)
10	エラーはないに近い	0.0 − 0.05(0.025)
11	エラーは全くない	−

表2：人間の信頼性評価のあいまいさの表現とパラメータ

クラス	信頼性評価のあいまいさの表現	パラメータ
1	あいまいさは小さい	2.0
2	あいまいさは中程度である	2.5
3	あいまいさはやや大きい	3.0
4	あいまいさは大きい	3.5

あいまいさが小さいときのファジィ集合の例を図1に示す。横軸は、主観的不信頼度を表し、縦軸はそのグレードを表している。主観的不信頼度が0であるということは、対象となる作業で人間が全くエラーしないと評価されていることを、主観的不信頼度が1であるということは、対象となる作業で人間が完全にエラーすると評価されていることを意味している。また、その中間である0.5のときは、評価者の主観において標準的な不信頼度と評価されていることを意味している。縦軸のグレードとはその可能性を示しており、グレードが1に近ければ近いほどその可能性が大きいことを表している。

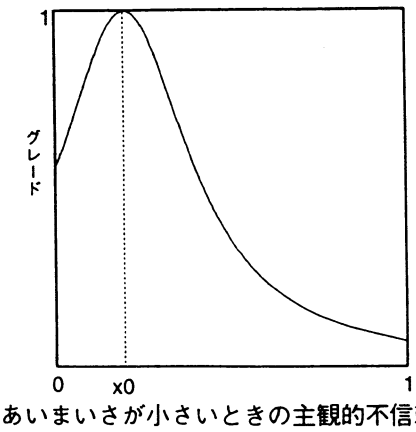


図1：あいまいさが小さいときの主観的不信頼性尺度

図1からわかるように、(1)式をメンバーシップ関数にもつファジィ集合では、$F(0) > 0, F(1) > 0$となっており、対象となる作業において、人間が全くエラーしない可能性も、完全にエラーする可能性も両方あることが表現できる。

3 主観的不信頼性尺度の演算

3.1 and 演算、or 演算

主観的不信頼性尺度を用いた信頼性解析において、その基本となる演算としてand演算、or演算を用いることにする。and演算には次のような演算式を用いる。

$$H(x,y) = \frac{1}{1+\left[\{(1-x)/x\}^{1/n_H} + \{(1-y)/y\}^{1/n_H}\right]^{n_H}} \tag{4}$$

ただし、$0 \leq x, y < 1$、$H(0,y) = H(x,0) = 0$であり、n_Hは非負のパラメータである。
or演算には次のような演算式を用いる。

$$G(x,y) = \frac{[\{x/(1-x)\}^{n_G} + \{y/(1-y)\}^{n_G}]^{1/n_G}}{1+[\{x/(1-x)\}^{n_G} + \{y/(1-y)\}^{n_G}]^{1/n_G}} \tag{5}$$

ただし、$0 \leq x, y < 1$、$G(1,y) = G(x,1) = 1$であり、n_Gは非負のパラメータである。なお、ここでのファジィ集合の演算には拡張原理[2]を用いている。

3.2 パラメータ n_H, n_G

いま、2つの作業A、Bがあるとする。この両方の作業でエラーしたときに作業全体でエラーとなる場合を、並列作業とよぶことにする。また、どちらか1つの作業でエラーしたときに作業全体でエラーとなる場合を、直列作業とよぶことにする。

並列作業全体の主観的不信頼性尺度を求める演算にはand演算を用いることになる。直列作業全体の主観的不信頼性尺度を求める演算にはor演算を用いることになる。

ここで、評価者が並列作業、直列作業の信頼性をどのように評価するかによって、(4)、(5)式のパラメータn_H, n_Gを決める。たとえば、並列作業において、作業A、Bの信頼性を「標準的」として、そのあいまいさを「中程度」とする。このとき、評価者が並列作業全体の信頼性を「やや高い」と評価すれば、この評価者は$n_H = 2.9$を選んだことになり、並列作業全体の信頼性を「標準的」と評価すれば、$n_H = 0.4$を選んだことになる。直列作業についても同様である。

したがって、解析対象作業をどう評価するかによって異なるパラメータn_H, n_Gを使うことになる。このように、パラメータn_H, n_Gを変化させることで、解析対象に評価者の主観を反映させることができる。このことが、and演算、or演算に(4)、(5)式を用いた理由のひとつである。

4 順序エラー

2つの作業間において作業を行う順序がきまっているとき、その順序を間違って作業をしてしまうと作業全体でエラーになるとする。ここで、このようなときの「作業の順序を間違うこと」を「順序エラー」とよぶことにする。

主観的不信頼性尺度の表現と同じように、順序エラーレベルの評価も言葉で表現する。言葉で表現された順序エラーレベルの意味と、その評価のあいまいさの表現の意味を(6)式をメンバーシップ関数にもつファジィ集合で表す。

$$S_E(s) = \frac{1}{1+20\times|s-s_0|^{m_{S_E}}} \tag{6}$$

ただし、$0 \leq s, s_0 \leq 1$であり、s_0, m_{S_E}はパラメータである。作業を順番どおりに行うことに対する人間の信頼性評価とパラメータs_0の対応を表1と同様に11段階で表現する。また、評価のあいまいさとパラメータm_{S_E}の対応には表2を用いる。

なお、「クラス1（完全に順序エラーが起こるとき）」、「クラス11（全く順序エラーが起こらないとき）」に対応するファジィ集合には、次のようなメンバーシップ関数を与えるものとする。

$$\text{「クラス1」} \quad S_E(s) = \begin{cases} 1 : s = 1 \\ 0 : s \neq 1 \end{cases} \tag{7}$$

$$\text{「クラス11」} \quad S_E(s) = \begin{cases} 1 : s = 0 \\ 0 : s \neq 0 \end{cases} \tag{8}$$

順序エラーを考慮した解析のand演算、or演算には(4),(5)式のHとGを用い、ファジィ集合の演算には拡張原理を使う。

順序を考慮しないときのある作業の主観的不信頼性尺度をF、この作業で順序エラーの起こりやすさを表すファジィ集合をS_Eとすると、順序エラーを考慮したときのこの作業における信頼性を

$$F' = G(F, S_E) \tag{9}$$

で求める。これは、この作業でのエラーは順序エラーが起こるか、または作業そのものでエラーが起こるかという考え方に基づいている。

5 従属性

5.1 2つの作業間の従属性

2つの作業間に従属性がある場合の従属性には、順序エラーと同じように、言葉で表現された従属レベルの意味と、その評価のあいまいさの表現の意味を(10)式をメンバーシップ関数にもつファジィ集合で表す[3]。

$$R(r) = \frac{1}{1+20\times|r-r_0|^{m_R}} \tag{10}$$

ただし、$0 \leq r, r_0 \leq 1$であり、r_0, m_Rはパラメータである。従属レベルの評価を言葉で表現したものを表3に示す。また、評価のあいまいさとパラメータm_Rの対応には表2を用いる。

表3：作業間の従属レベルの評価の表現

レベル	従属レベルの評価の表現
1	完全従属である
2	高い従属レベルである
3	中程度の従属レベルである
4	低い従属レベルである
5	ゼロ従属である

なお、完全従属、ゼロ従属に対応するファジィ集合には、次のようなメンバーシップ関数を与えるものとす

る。

$$\text{「完全従属」}\quad R(r)=\begin{cases}1:r=1\\0:r\neq 1\end{cases}\qquad(11)$$

$$\text{「ゼロ従属」}\quad R(r)=\begin{cases}1:r=0\\0:r\neq 0\end{cases}\qquad(12)$$

5.2 順序を考慮した従属性

従来の解析モデル[3]では、対象となる2つの作業の順序について「作業Aを先に行い、その後続けて作業Bを行う」という前提のもとに従属性が考慮されていて、解析の中に順序エラーが含まれていなかった。ここでは、順序エラーを考慮した従属性について述べる。

5.2.1 どちらかの作業を先に行う場合

作業Aを先に行う場合を例として考えてみる。作業の順序はA、Bの順であり、両方の作業でエラーすると作業全体でエラーとなる。作業A、Bの主観的不信頼性尺度をそれぞれF_A、F_Bとし、作業A、B間の従属性の評価を表すファジィ集合をRとする。and演算、or演算には(4)、(5)式のHとGを用い、ファジィ集合の演算には拡張原理を使う。

従属性について、完全従属でない限りいつも従属性があるとは限らないので、従属性がある部分と、ない部分とにわけて考えることにする。

(1) 従属性がある部分：作業全体の主観的不信頼性尺度は

$$F_1'=H(F_A,R)\qquad(13)$$

(2) 従属性がない部分：作業Aの主観的不信頼性尺度のうち、作業Bに影響を及ぼさない部分をF_A'とするとF_A'は

$$F_A=G(F_A',F_1')\qquad(14)$$

と表される。このとき、作業A、B全体の主観的不信頼性尺度は

$$F_1''=H(F_A',F_B)\qquad(15)$$

となる。

(1)(2)の両方の部分を考えた作業A、B全体の主観的不信頼性尺度は

$$F_1=G(F_1',F_1'')\qquad(16)$$

である。ここで、4章で述べた順序エラーを考慮すると、順序エラーを考慮した作業全体の主観的不信頼性尺度は

$$F_{S_E}=G(F_1,S_E)\qquad(17)$$

として求めることができる。作業Bを先に行う場合も同様にして考えることができる。

5.2.2 どちらの作業が先に行われてもかまわない場合

ここでは、作業Aを先に行った後に作業Bを行うときと、作業Bを先に行った後に作業Aを行うときの、どちらの場合も考慮した解析をする。このときは、作業間に順序関係がないので、順序エラーについて考慮する必要はない。

(1) 従属性がある部分：どちらの作業が先に行われてもかまわないのだから、作業全体の主観的不信頼性尺度は

作業Aが先に行われる場合：

$$F_{0A}'=H(F_A,R)\qquad(18)$$

作業Bが先に行われる場合

$$F_{0B}'=H(F_B,R)\qquad(19)$$

どちらの場合も考慮して

$$F_0'=G(F_{0A}',F_{0B}')\qquad(20)$$

となる。

(2) 従属性がない部分：作業A、Bそれぞれの主観的不信頼性尺度のうち、従属性によって相手に影響を及ぼす部分を除いた残りの部分は

$$F_A=G(F_A',F_{0A}')\qquad(21)$$

$$F_B=G(F_B',F_{0B}')\qquad(22)$$

のF_A',F_B'と考えられる。よって従属性がないと考えた場合の作業A、B全体の主観的不信頼性尺度は

$$F_0''=H(F_A',F_B')\qquad(23)$$

となる。

順序関係がないときの作業A、B全体の主観的不信頼性尺度は(20)(23)より

$$F_0=G(F_0',F_0'')\qquad(24)$$

となる。

6 解析結果の言葉による表現

解析後、得られたファジィ集合をFとする。表1、2に示した言葉の意味を表すファジィ集合をF_Sとする。F_Sは、(1)式をメンバーシップ関数にもつ。F、F_Sのα-カット[2]を$(F)_\alpha=(x_1(\alpha),x_2(\alpha))$、$(F_S)_\alpha=(x_{S1}(\alpha),x_{S2}(\alpha))$とする。ここで、ファジィ集合$F$と$F_S$の距離というものを(25)式のように定義する。

$$d=\int_0^1\left[\{x_1(\alpha)-x_{S1}(\alpha)\}^2+\{x_2(\alpha)-x_{S2}(\alpha)\}^2\right]^{\frac{1}{2}}d\alpha\qquad(25)$$

ファジィ集合Fとの距離dが最小となるようなF_Sのパラメータx_0,m_Fを参考に、表1、2から解析結果を言葉で表す。

7 解析例

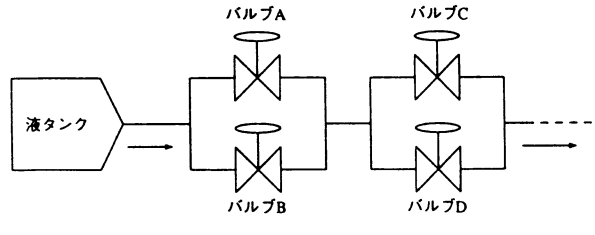


図2：解析対象モデル

図2のような作業について考える。これは、閉じているバルブを開いて、ある液をタンクから流し出す作業である。したがって、バルブAを開く作業とバルブBを開く作業の両方を失敗するか、バルブCを開く作業とバルブDを開く作業の両方を失敗すると、作業全体でエラーとなる。よって、バルブAとBの作業と、バルブCと

Dの作業がそれぞれ並列作業であり、この2つの並列作業による直列作業が全体の作業である。

ただし、個々の作業における信頼性の評価を「標準的」、各並列作業における従属レベルの評価を「低い従属レベル」とする。また、あいまいさの評価はすべて「中程度」、$n_H = 2.9, n_G = 1.0$とする。

ここで、バルブを開く順序として、A、B、C、Dの順に開くということが決まっているとき、次の2つの例を考える。

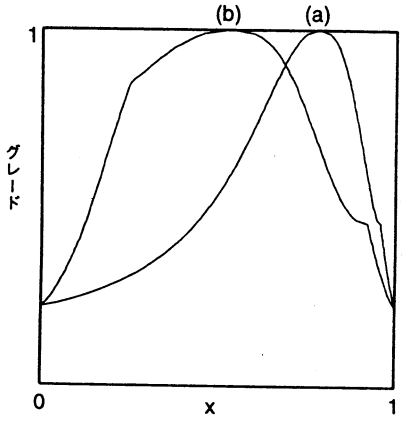


図3：解析結果の主観的不信頼性尺度

●状況 (a)

各バルブに、A、Bなどのラベルづけがされておらず、その形が似たようなものであるという状況を (a) として与える。このとき、バルブを開く順序を知っていたとしても、それを間違える可能性はある。そこで、並列作業において、作業を正しい順序で行うことに対する人間の信頼性の評価を「標準的」とする。また、直列作業においても同様に「標準的」とする。

この状況下で解析を行った結果が図3(a)であるが、この場合の作業全体に対する人間の信頼性はかなり低く評価されている。

●状況 (b)

(b) では、(a) の状況を改善し、各バルブに、開く順序と同じく1から4までラベルづけを行う。こうすることで、バルブを開く順序を間違える可能性は (a) に比べてかなり低くなる。これにより、並列作業での作業順序に関する人間の信頼性の評価を「かなり高い」とすることができる。直列作業においても同様に「かなり高い」とする。

この状況下で解析を行った結果が図3(b)である。(a) の場合に比べると、その評価が改善されていることがわかる。

また、解析結果の言葉による表現は

・(a) の場合

「この作業における人間の信頼性は低く、そのあいまいさは中程度」

・(b) の場合

「この作業における人間の信頼性は標準的であり、そのあいまいさはやや大きい」

となる。それぞれの言葉の意味を表す主観的不信頼性尺度を図4に示す。

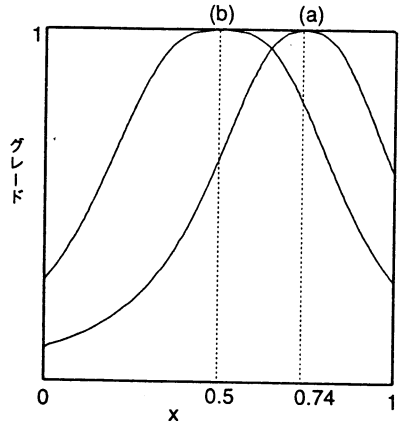


図4：解析結果の言葉による表現を表す主観的不信頼性尺度

8 おわりに

本研究では、人間が行う作業についてその信頼性を解析するとき、それが単独な作業でない限り、その作業間における従属性と、順序関係を考慮して解析を行うべきであるという考えに基づいて解析を行った。現実のモデルを解析するとなると、他にも考えられる要素はあるが、本モデルで考慮した要素で、解析のおおまかな部分を行うことができる。

参考文献

1) 林 喜男：人間信頼性工学 − 人間エラーの防止技術 −, 海文堂, 1984.

2) 本多中二, 大里有生：ファジィ工学入門, 海文堂, 1989.

3) 鬼沢武久：ファジィ理論を用いた人間の信頼性解析における従属性について, 人間工学, 30(4), 215 ～ 222, 1994.

連絡先

〒305 茨城県 つくば市 天王台 1-1-1
筑波大学 構造工学系 鬼沢研究室
大森 明央
Tel：0298-53-6188
Fax：0298-53-6471
E-mail：oomori@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRF1-4

MACROERGONOMIC APPROACH TO SAFETY ANALYSIS

A. R. ARREDONDO, J. WATADA and Y. YABUUCHI

Osaka Institute of Technology
5-16-1 Omiya Asahi-Ku OSAKA 535

Abstract

The objective of this research is to analyze safety in a factory from a macroergonomic viewpoint, wherein the variables of human relationship, safety behavior, safety conscience, human behavior and the relationship among them are employed in the analysis. People should not be taken as a member of a man-machine interface system as commonly is taken, but as a member of a social-machine interface system stressed in a macroergonomics. The fuzzy quantification analysis discussed in the paper is used to recognize quantitatively the latent structure under questionnaires obtained from workers. The following hypotheses of the study are inspected in the paper: (1) Human-relationship has relations with safety conscience, (2) Safety behavior has relations with safety conscience, and (3) The mental and physical reactions of workers has relations with the human relationship. The central aim is to measure the influence and importance of the safety conscience, safety behavior and the mental and physical reactions of a worker with the safety level in the working place.

1 Introduction

Mainly in the research on the causes of accidents, the analysis has been done by back-tracking the causes of the accidents. The explanatory descriptions of accidents are focused on the unusual events. In this case, usually just the abnormal situations are taken in consideration as causal factors. Willing to analyze the safety from a macroergonomic approach[5, 6, 7, 8], we should take into consideration a modification made by S. Salminen and T. Tallberg[2] of Rasmussen's SKR behaviour model[1, 3] for the classification of human errors. Errors are classified into the following four categories; (1) Skill-based error, (2) Rule-based error, (3) Knowledge-based error and (4) Technical fault. It is not sufficient only to recognize human error as the principal cause of accidents. It is necessary to identify the type of errors that commonly cause the accidents so that we can prevent from its occurence in the usual work environment. It was pointed out from other researches that mainly skill-based errors are the more common ones, but it is true that the tendency of the occurrence of a specific type of errors changes according the work task[2].

It is difficult to predict and model with accuracy human behavior. It is governed by constraints with policies of a company, characteristics of the work facilities, and the workers' own ability. These constraints must be respected by the workers for a successful work performance.

As a base of our study, we analyzed, as principals factors affecting safety, human relationship, safety behavior, safety conscience and human behavior using an analyzing tool of a questionnaire designed with this object, i.e., the fuzzy quantification analysis type II. The hypotheses given in this study are postulated as follows: (1) Human-relationship has relations with safety conscience, (2) Safety behavior has relations with safety conscience, and (3) The mental and physical reactions of workers has relations with human relationship. The central aim here is to inspect these hypotheses analyzing questionnaires.

2 Factory safety analysis

2.1 Questionnaires

Questionnaires were distributed in 5 electronic domestic factories at the Kansai area in Japan. The questionnaires were answered by 468 persons from the 5 factories, aiming to collect data about the execution of the safeties in the working place. It consists of 107 questions distributed and recollected within one week.

2.2 Analysis of the human relationship and safety conscience

Here we analyze the safety conscience of the workers and the relationship among the workers. The questions were divided into categories which are classified according measures of human relationship and behavior and conscience of human relationship.

With respect to the modification of behavior and human relationship. Every time when a superior gives an advice, talks to his/her subordinate, or there is a trouble, the human behavior is modified. The conscience level of human relationship differs among persons, some people feels solidarity, some people show a

mix of concern, and others have the intention of mutual understanding with another person.

91.4% of the workers answered on the question that they were taught and received information by their superior(s) about safety rules which they should follow. 90.0% in the total answered that they used to talk with their coworkers about it. It's very important to understand that in order to create a safety conscience on a worker it's highly recommended to develop communication among the worker, coworkers and superiors about the subject. The human behaviour is influenced at high rate by the conscience level of human relationship.

With the fuzzy qualification analysis type II we analyze the influence of the safety conscience with (1) Information about safety rules obtained from superior(s), (2) Superior(s) propose and improve the safety rules, (3) There is a solidarity conscience among the coworkers as shown in Table 1.

From the analysis, we can understand the importance of the human relationship with the workers safety level conscience. During the work performance, it's important to understand the behaviors modifications from the human relationship; as well as the safety conscience level of the worker in all occasions, his position toward safety rules, and the relationship among the worker, coworkers and superior(s) about the necessity of improvement of the safety rules.

2.3 Analysis of the human relationship with the physical and mental reaction

In general terms, the physical and mental reaction pulls up the reaction of stress and fatigue of the body, mind and spirit. For this reason we analyzed relationship among the physical and mental reactions with the human relationship.

Stress is felt by 46.5% of the workers who feel that they don't have a mutual understanding with their superiors, stress also is felt by 35.8% of the workers who answer that they don't feel solidarity with their coworkers, and 28.6% of the ones who answer that their superior don't correct them when they are showing an unsafe behavior. Fatigue is regarded to 44.7% of the workers who answer that they don't have a mutual understanding with their superiors, 33.1% of the ones who don't have a solidarity conscience with their coworkers, 27.0% of the ones who answer that their superior don't correct or call them when they show an unsafe behavior, and 25.1% of the ones who answer that their superior have a negative posture toward proposal and improvement of the safety rules.

Regarding feeling comfortable at work, the 81.0% of the workers who have troubles with mutual understanding with their superiors feel uncomfortable, as well as 73.2% of who answer that they have competition troubles with their coworkers, and 65.6% of the ones who have troubles working with some coworkers also feel uncomfortable at the working place. Regarding the workers' stress, the fuzzy quantification analysis type II was used to analyse the workers' stress and their influence with (1) The difficulties that the workers have at the working place, and (2) Problems for getting agreements among coworkers, as shown in Table 2.

Analyzing the Table, we can understand the relation existing between the human relationship and stress. The principals causes of stress in a indiscriminate way are (1) Competition among coworkers, (2) Problems with the intention of mutual understanding with the superior(s), and (3) The absence of solidarity conscience. For improving the human relationship and the laboral atmosphere, this factors must be taken with special care, and the superior(s) have a special role in its improvement.

2.4 Analysis on safety conscience and safety behavior

Here we analyze the relationship between the worker's safety conscience and safety behavior. Table 3 shows the workers conscience rate on safety behavior presented in (1) safety confirmation, (2) common work, and (3) repair works, in the total it can be seen that almost all the workers have a safety conscience.

From the previous analysis, when there is a safety conscience, the worker has a high tendency of showing a safety behaviour. In the behavior of safety confirmation the safety conscience high rate is mainly presented in all the workers activity environments, but concerning common work and repair works, the tendency rate decreases. Specially 'repair works' among those 3 types of work, is the one which presents the lowest conscience of safety behavior. The time used for making again or fixing some work, usually belongs to other activity. After all, the repair works due the occurrence of abnormalities on the system and equipment machinery do not occur too often, mainly they are human errors. With this situation, it is necessary to grasp a mental state condition of the worker in order to realize an accurate safety behavior.

Comparing the works types, when the work requires special strain and attention, it can be felt a higher rate of accurate performance. Just with this analysis interpretation the requirement of strain and attention in the task develops a desire tendency toward the worker's safety conscience.

Using the fuzzy quantification analysis type II for the analysis of safety conscience and safety behaviour.The principals influential factors that must be taken in consideration for the accuracy of the repair works when there is a trouble are: (1) The common safety conscience, (2) The report of disaster instances, and (3) The large quantity of production and the rework, present an influence on the safety conscience behavior as can be seen in Table 4.

The influence given to the principal factor during

Objective variable Q. Ways in which the worker obtain the conscience of safety There is conscience (+) There isn't conscience (-)		
Explanation variable	PCC	weight
Q.18 The information about safety rules are obtained from superior(s)?	0.056	0.138
Q.21 The superior(s) propose and improve the safety rules?	0.034	0.092
Q.53 Can feel a solidarity conscience in the working place?	0.021	0.061
Q.19 When an unsafe behavior is presented, the superior(s) call the attention of the worker?	0.018	0.037

Table 1: Analysis of the safety conscience by the fuzzy quantification analysis type II

Objective variable Q.45 Do you feel stress during your work? There is a feeling (+) There isn't a feeling (-)		
Explanatory variable	PCC	weight
Q.50 Do you have problems with your coworkers?	0.032	0.046
Q.56 Are there problems for getting agreements in the working place?	0.028	0.042
Q.51 Can you work very well with your coworkers?	0.020	-0.039
Q.53 Can you feel a solidarity conscience at the working place?	0.017	-0.033
Q.28 Are there special meetings in the working place?	0.015	0.023
Q.57 Is there an intention of mutual understanding with the superior?	0.009	-0.013

Table 2: Analysis of stress by the fuzzy quantification analysis type II

	Safety confirmation	Common work	Repair works
In behalf of the production quantity the importance of safety is not forgot	95.6%	86.9%	84.5%
The safety conscience is rather done than the production quantity	97.8%	89.3%	86.0%
The work of making the disaster report is satisfactory done	94.4%	88.4%	82.7%
The point of safety conscience is being made	96.6%	87.2%	82.6%
On work performance, strain and attention are needed	94.4%	86.0%	80.2%
The working hours are strictly restricted	94.3%	84.9%	79.1%
The accuracy of the work is strictly claimed	93.8%	85.2%	80.9%

Table 3: Safety conscience and behavior cross reference

Objective variable Q.12 Due machinery troubles how is directed the tendency of job repair? There is (+) There isn't (-)		
Explanatory variable	PCC	weight
Q.16 Commonly is there a safety conscience in the work performance?	0.095	-0.193
Q.15 The disasters reports from other places are taking in consideration on the work performance?	0.045	0.084
Q.10 When is needed a large production the safety precautions are pass to second term?	0.031	0.056
Q.11 The production quantity and quality are more important than the safety?	0.031	0.055
Q.92 Is there any hours restrictions in the work performance?	0.027	-0.044
Q.93 Is the accuracy of the strictly claimed in the work performance?	0.019	-0.030
Q.64 Is the strain and attention needed in the work performance?	0.015	-0.027

Table 4: Analysis of safety conscience-safety behavior by the fuzzy quantification analysis type II

repair works, is the same to the common work. The content of the usual work task of the workers is done with the needed strain, attention and conscience.

With the fuzzy quantification analysis type II, it is found out that the factor who has more influence in the safety behavior is having a conscience of safety during the work. There is a tendency in the workers of losing the safety conscience and developing an incorrect behavior; when, (1) The working hours are not strictly restricted, (2) When there is a large amount of work to be perform.

With the analysis of the safety conscience and safety behavior there is another problem that has to be taken in consideration, the restriction of the working hours that has and important relationship with the safety conscience.

As the analysis shows a strong influential factor on safety behaviour, safety conscience. The workers safety conscience goes along with their behavior, and this is reflected in the composition of their working hours, and the necessity of returning to their previous posture. The workers manager should be paying special attention in the needs of their workers as well as motivating them to correct their behavior.

3 Conclusion

For analyzing works from the macroergonomic perspective, the analysis of works must be performed not only using the machine interface and hardware as usually done, but also employing the relationship among workers. From the results of the analysis given in the previous sections, an important factor which affects on safety is the safety conscience of workers, because safety behaviour is influenced by the level of safety conscience of the workers. Physical and mental reaction as well as the fatigue and stress are highly connected with the human relationship as the result shows.

Hypothesis 1: 'Human relationship has relations with safety conscience' has been proved quantitatively. We learn that the safety conscience is acquired through communication and example among superiors and coworkers. Also it is important to point out that human relationship is one of the principal factors that influence human behavior and the posture toward safety rules.

Hypothesis 2: 'Safety behavior has relations with safety conscience' has been cleared by means of fuzzy quantification analysis type II the principal factor found out that affected the safety behavior is a safety conscience during the work. There is a tendency of showing an unsafe behavior when the working hours are not strictly restricted, and when due errors large amount of work have to be done with not enough time available for doing it.

Hypothesis 3: 'The mental and physical reaction of workers has relations with the human relationship' has been shown. We learn that the people who feel stress, fatigue and/or uncomfortable at work have the following characteristic in common. They have problems in mutual understanding with superior(s) and coworkers, competition among coworkers, troubles in working with some coworkers and the absence of solidarity conscience.

It can not be done in short period of time to improve these types of human relationship. There's must be policies and work procedures that stimulate solidarity conscience. The superiors have a key role for building the relationship among the subordinates.

As point out in the introduction, the more common type of errors as originated by erroneous skill-based behavior, one way to decrease the occurrence of this type of error on behalf of safety, is to induce a safety conscience in the community. The only way to react instantaneous with safety behavior in any situation, is to realize a safety conscience and knowledge of all the latent hazard in the environment.

From the result of our analysis, it was found out that the factors such as human relationship, safety behavior, safety conscience and human behavior affect safety. These factors need to be improved by the creation of an adequate environment that encourages them. The way of doing it is done by performing real communication.

References

[1] Rasmussen, J. 1990, *The role of error in organizing behaviour*, Ergonomics, 33 (10-11), 1185-1199

[2] S. Salminen and T. Tallberg 1996, *Human errors in fatal and serious occupational accidents in Finland*, Ergonomics, 39 (7), 980-988

[3] Rasmussen J. 1986, Information processing and human -machine interaction. North-Holland

[4] 和多田淳三 1996, マクロアーゴノミックスの観点からの安全性の分析 日本人間工学会 ODAM 研究会

[5] Brown, O. Jr. and H.W. Hendrick (ed.): Human Factors in Organizational Design and Management II, Proceedings of the Second Symposium held in Vancouver, B.C., Canada, 19-21, August, 1986.

[6] Hendrick H.W. and O. Brown Jr. (ed.): Human Factors in Organizational Design and Management I, Proceedings of the First Symposium held in Honolulu, Hawaii, 21-24, August, 1984.

[7] Hendrick H.W. 1987 *Macroergonomics: A concept whose time has come*, Human Factors Society Bulletin, 30(2).

[8] Hendrick H.W.1987, *Organizational Design in Handbook of Human Factors*(ed. by G. Salvendy), A wiley-Interscience Publication, John Wiley

Contact:

Junzo WATADA
Osaka Institute of Technology
Omiya 5-16-1, Asahi, Osaka 535
TEL 06-954-4327 (dial in)
FAX 06-952-6197
E-mail watada@dim.oit.ac.jp

FRF2-1

Japanese Sign Language Recognition System Using Image Processing

OZhixiong XU, Shoko NISHIMURA and Toru YAMAGUCHI

Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utsunomiya University

Abstract For people who are speech impaired and use Japanese Sign Language, it is helpful to develop an interactive Japanese sign language interface. T. Yamaguchi, M. Yoshihara etc. have proposed and realized a method for it. But it used only spatial motion features of different sign language and didn't think about the shape of hands. In this paper, we propose a method which employs skills of image processing to process and analysis simple shape of hands, and combine it with the method mentioned above. In our system, we also use FAMOUS (Fuzzy Associative Memory Organizing Unit System) get associative inference results. FAMOUS has robustness property. Our system is person independent with high recognition rate.

Keywords: image processing, chain-code, fuzzy associative memory.

1. Introduction

There are at least two possible applications for automatic classification of hand postures: Firstly, new man-machine interfaces may be devised; Secondly, the automatic translation of gesture based on natural languages is a long term work. In this paper, we discuss the latter.

It is difficult to communicate with people who are speech impaired and use sign language, because only few people can understand it. T. Yamaguchi, M. Yoshihara etc. have proposed and realized a method for it [1]. It uses only the features of spatial motion, i.e. the parameters of the route that the hands passes, and doesn't care about the shape of hands (called old system). We think that two kinds of features are important to decide which sign language it is. One is the route the hands pass (motion features), the other is the shape of the hands (static features). In this paper, we propose a method which employs image processing and combines it with the method of [1] (called new system).

2. System configuration

Fig.1 shows configuration of Japanese sign language Recognition System.

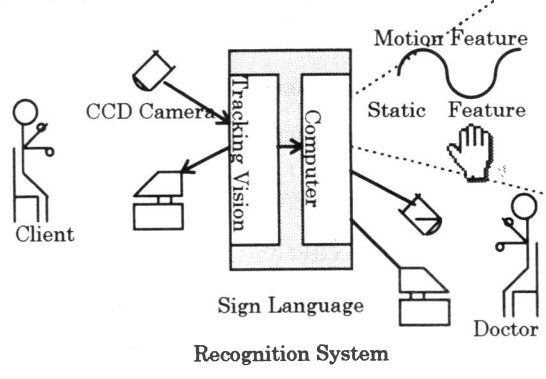


Fig. 1: System configuration

Video information is got from CCD Camera and sent to Tracking Vision.

Tracking Vision is a skin tracking hardware whose principle is based on the gray-lever of human being's skin and can track a number of blocks of skin at the same time. It transfers human's motion into two dimensional coordinate data, then send them to computer 30 times per second. We also get image data (eight bit gray-lever image) from it. Computer extracts motion feature points from the input coordinate data, and assigns fuzzy labels which stored in the associative memory to these points. Then associative inferences and image processing are carried out and recognition done. In this paper, we also call this procedure matching.

3. System introduction

3.1 Motion feature extractor part

This part receives two-dimensional coordinate data and extracts motion feature points ("Big mountain", "Big valley" etc.). See Fig.2.

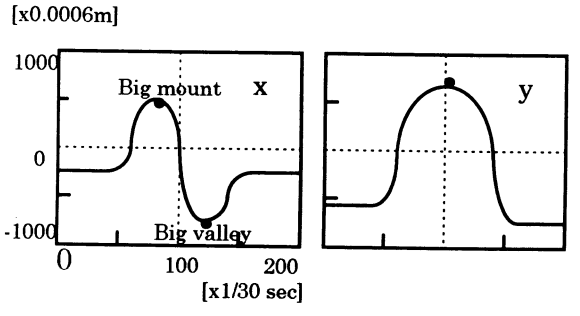


Fig. 2: time serial data of sign language "mount"

3.2 Associative inference part

This part carries out associative inference by FAMOUS [2]. Associative input is motion feature points, namely, "Big mount", "Big valley" etc. FAMOUS is an application system of fuzzy associative memories. Fuzzy associative inference has at least three good features:

(1) Fuzzy inference is possible even when input has noise.

(2) Continuity of input-output patterns is preserved in the associative memory, so approximate reasoning is possible.

(3) Inference by means of reverberation decreases fuzzy entropy, so it is easy to control fuzziness.

FAMOUS is composed of three layers: if-layer、rule-layer and then-layer. First layer is input layer, second layer creates membership function of fuzzy rules by unsupervised learning and third layer evaluates truth value of each rule. BAM (Bi-directional Associative Memories) are used between if-layer and rule-layer and between rule-layer and then-layer. Because it is difficult to recognize human's motions when a lot of sign language are stored in the associative memories, sign languages are divided into three subsets according to subject、object and predicative [1]. Sign languages is input to computer in the order of subject, object and predicative. Fig.3 shows associative memories which can recognize subjects ("I", "you", "we").

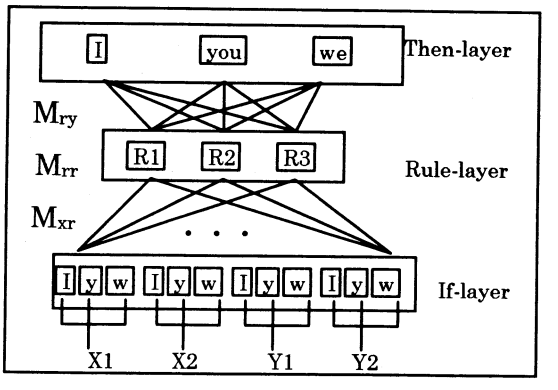


Fig. 3: associative memories

3.3 Static feature extractor part

This part we introduce image processing

method for simple features of hands such as number of fingers、main direction of hand、weight center of hand etc.

Suppose original gray-lever image be {img[i][j]} (i, j=1, 2, ..., N).

(1) Transfer gray-lever image {img[i][j]} into bi-valued image {bin[i][j]} (i, j=1, 2, ..., N) according to threshold $thres_0$. Namely,

$$bin[i][j]=\begin{cases}1, img[i][j] > thres_0\\ 0, otherwise\end{cases} \quad (1)$$

(2) Encode bi-valued image with four-direction chain-code method.

Suppose (i_0, j_0) be an arbitrary edge point of bi-valued image {bin[i][j]}. The edge image of {bin[i][j]} is encoded into four-direction chain-code (Fig.4, Fig.5, Fig.6, Fig.7):

$$A_n = a_1a_2\cdots a_n,\ a_i \in \{0, 1, 2, 3\},$$
$$i = 1, 2, \cdots, n. \quad (2)$$

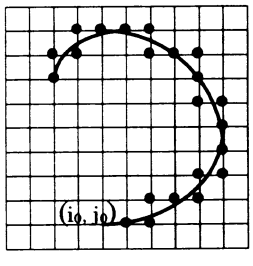


Fig. 4: edge curve of bi-valued image

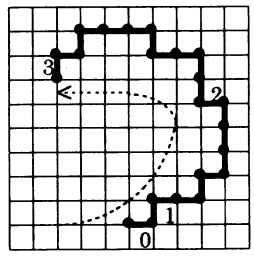


Fig. 5: four-direction chain-code of edge curve

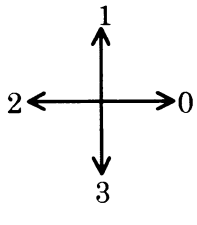


Fig. 6: Four-direction of chain-code

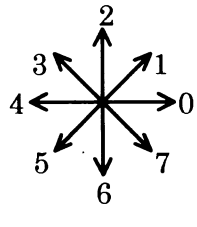


Fig. 7: Eight-direction of chain-code

Denote horizontal and vertical coordinate value of a_i as coo[i].x, coo[i].y, separately.

With chain-code, it is very easy to calculate weight centers of bi-valued image

(3) Find out four "corner" points of chain-code. (Fig.8)

According to the following formulae we can get four "corner" points of chain-code:

"lu", $(coo[i_1].x, coo[i_1].y)$, which satisfies:

$$coo[i_1].x + coo[i_1].y = \min_i \{coo[i].x + coo[i].y\} \quad (3)$$

"ld", $(coo[i_2].x, coo[i_2].y)$, which satisfies:

$$coo[i_2].x - coo[i_2].y = \min_i \{coo[i].x - coo[i].y\} \quad (4)$$

"ru", $(coo[i_3].x, coo[i_3].y)$, which satisfies:

$$-coo[i_3].x + coo[i_3].y = \min_i \{-coo[i].x + coo[i].y\} \quad (5)$$

"rd", $(coo[i_4].x, coo[i_4].y)$, which satisfies:

$$-coo[i_4].x - coo[i_4].y = \min_i \{-coo[i].x - coo[i].y\} \quad (6)$$

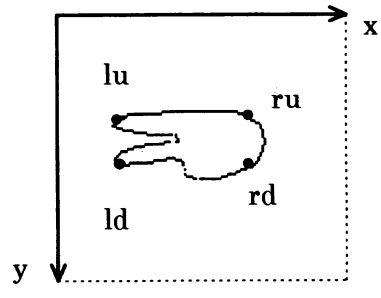


Fig. 8: four "corner" point of chain-code

(4) In four "corner" points, find out a point of the edge of palm (called "starting" point; for instance, "ru" and "rd" are "starting points).

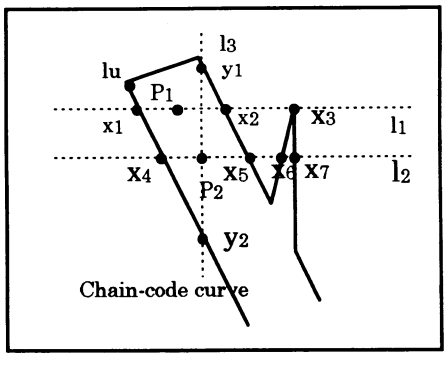


Fig. 9: P_1 is a right-down point of "corner" point "lu", the number of crossing points of horizontal scanning-line l_1 and chain-code curve (they are x1 x2 and x3) is 3, so select P_2 substituting P_1, the number of crossing points of horizontal scanning-line l_2 and chain-code curve (they are x4, x5, x6, x7) is 4. Calculate the distance between x4, x5

and between x_6, x_7, distance between x_4, x_5 is the maximum of horizontal direction. And at the same time, the number of crossing points of vertical scanning-line and chain-code curve (they are y_1, y_2) is 2, the maximum distance of vertical direction is the distance between y_1, y_2. This distance is greater than the one between x_4, x_5, so compare the latter with $thres_1$(constant). If it is greater than $thres_1$, then it is an edge point of palm. Otherwise it is an edge of finger and carry out the procedure for the other "corner" points, we can find at least one "starting" point.

(5) Calculate the Euclean distance from "starting point" to the other point of chain-code curve in the order of encoding of chain-code

A distance curve is got. But the curve has many local minima and maxima. "Peel" little "mount" and "fill" little "valley", the big main "mount" is the number of finger.

(6) Advantages:

- High recognition rate
- Real time processing
- Noise insensible
- Person independent
- Need little diskette、no database

(7) Disadvantages:

- Limited to six kinds of basic pattern
- Hand should not touch from each other or from other area of skin

If two fingers touch each other, it may be recognized as one finger only.

4. Experiment results

We made two experiments with five people. The result of new system is listed left, the result of old system is listed right. (Fig.10)

We can see from experiment results that those sign languages which using motion and static features have a average recognition rate 7.5% higher than using motion features only.

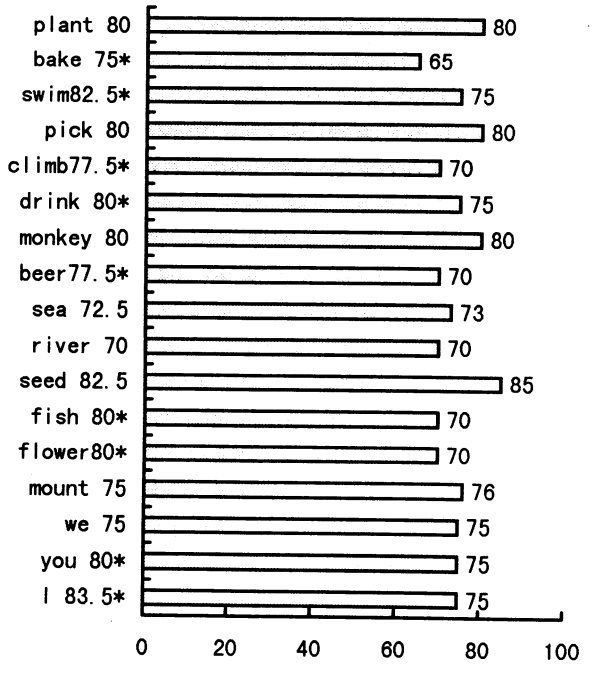


Fig. 10: the numbers of left with "*" mean using both motion features and static features, the other mean using only motion features because these sign languages have no static features (random), decided only by motion features.

5. Conclusion

In this paper, we introduce an image processing method for simple features of hands. And get a higher recognition rate of Japanese sign language.

Reference

[1] T. Yamaguchi, M. Yoshihara, M. Akita: Japanese sign language recognition system using information infrastructure, pp65-66, FUZZ-IEEE/IFES '95

[2] T. Yamaguchi, T. Takagi and T. Mita: Self-organizing control using fuzzy neural networks, INT. J. Control, 1992, Vol. 56, No. 2, 415-439.

FRF2-2

福祉指向インターフェイスにおけるスポッティング機能
Spotting for welfare-like interface

山口亨　○新井隆之　西村晶子　小俣寿之
Toru Yamaguchi　Takayuki Arai　Shoko Nishimura　Toshiyuki Omata

宇都宮大学 工学部 情報工学科
Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utsunomiya University

abstract

This paper proposes spotting method for welfare interface. Spotting method ready trigger – forecast of next gesture – and recognize from comparing trigger with gesture. The advantage of this method is able to recognize of gesture with a short time. This method apply to three experiment. It is that first is interface for robot, second is interface for sign language, third is interface of three dimension. Experimental show effectiveness of this method.

1　はじめに

情報インフラストラクチャの整備が進む中、知的産業システムを想定した研究が求められている。知的産業システムでは、人間と機械とのコミュニケーションに関わる部分は非常に重要な課題となっている。本研究では、福祉指向インターフェイスのコミュニケーション手段として、3I3(3D Intelligent Interactive Interface) を用いる。3I3では人間と機械とのコミュニケーションを人間の体表現によって行う。福祉指向インターフェイスでは人間の行動に対してのサポートや、状況に応じた提案などを行うことが目的となるため、人間の行う動作に対し即時に対応しなければならない。そのため、人間の動作に対する素早い認識・判断が必要となる。本研究では、福祉指向インターフェイスの体表現によるスムーズなコミュニケーション実現のため、スポッティング機能を実現する。

2　福祉指向インターフェイス

本研究では、Rasmussen のモデルに基づいた、図1のような福祉インターフェイスを想定している。この福祉インターフェイスでは、人間の体表現によって 3 D 仮想空間内での作業や、ロボットへの動作命令を行い、また、人間の状況に対応したサポートを行うことを目的としている。このインターフェイスを構成する基礎として、人間の動作の補助などの物質的なサポートを行うための 1) ロボット向インターフェイス、医者と患者のコミュニケーションのための 2) 手話インターフェイス、情報伝達手段としての 3) 3 D 仮想空間インターフェースを構築し、スポッティングの有効性を検証する。

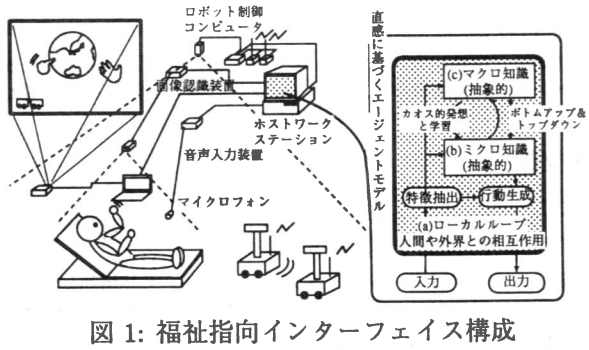


図 1: 福祉指向インターフェイス構成

3　スポッティング機能

スポッティング機能とは、人間の行うであろう動作を予測することで、人間が意図した動作が終わりきる前にその動作が何であるかを認識する機能である。

3.1　アルゴリズム

まず、直前に行われた動作から、頻度をもとに次に行われるであろう動作に関する情報をトリガとして準備しておく。

次に、人間の動作によって得られた特徴点とトリガの初期点を比較し、許容範囲である場合その特徴点を基準点とし、続いて得られる特徴点をトリガと比較する。トリガの条件に半数以上一致した時点で、推論へ以降する。

推論によって複数の結果が高い評価であった場合、似通ったルールに対する推論とみなし、さらに特徴点を得た上で推論を行い、高い評価が 1 つになるまで続ける。

推論結果が否定の動作であった場合、直前に行われた動作は間違いであったと判断し、頻度の修正を行う。通常の動作であった場合、直前の動作から認識された動作への頻度を上昇させる。

動作の認識の後、トリガを更新する。

3.2　動作予測

人間の行動は、大抵は前に行った動作を受けて行われる。よって、直前に行われた動作から、次に行われる動作を頻度から予測し、トリガを構築することで人間の動作が終了する前に、その動作が何であるかを判断できる。

3.3　トリガ

図 2にトリガの例を示す。トリガには、直前に行われた動作から次に行われると予測される動作の名前、始点・特徴点の範囲、及びその個数で構成される。

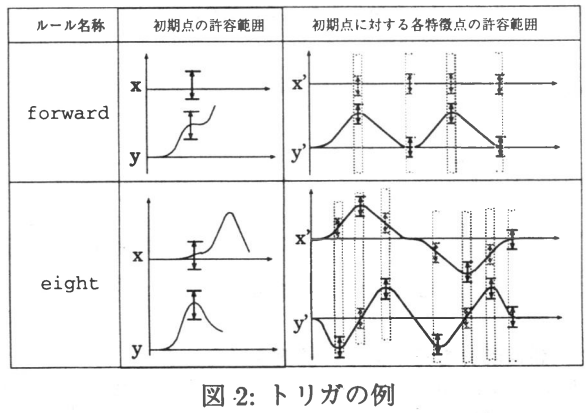


図 2: トリガの例

3.4　初期点の設定

特徴点が現れるたびに、トリガの各ルールに対し初期点であるか調べる。現れた特徴点が、トリガの保持する初期点の座標範囲に入っている場合、これを初期点とする。トリガのルールで初期点が見つかったものは、人間の動作がそのルールである可能性があると判断し、トリガの特徴点の比較を行う。特徴点との比較は初期点が見つかるまで常に行う。

3.5 トリガと特徴点の比較

初期点が定まったルールでは、続いて現れる特徴点をトリガと比較する。トリガーとの比較は、初期点を基準とした座標系で得た特徴点を許容範囲との比較で行う。得られた特徴点が許容範囲内でない場合、行われている動作は、そのルールの動作ではなかったと判断し、初期点の検索へ戻る。特徴点がトリガの半数以上を満たした場合、現れている特徴点で推論を行う。ただし頻度が低い場合は、より多くの特徴点を得るまで推論は行わない。

3.6 類似部分を持つ動作に対する推論

得られた特徴点からすべてのルールに対してファジィ推論を行う。すべての特徴点を得る前に推論を行うため、図3のように、部分的に似たルールがトリガに存在する場合、そのいずれであるか判断できない。これを解決するため、複数のルールで高い評価を得るものが存在した場合、それらのルールの似た部分で推論が行われたと判断し、高い評価を得るものが1つになるまで特徴点を取得し続ける。

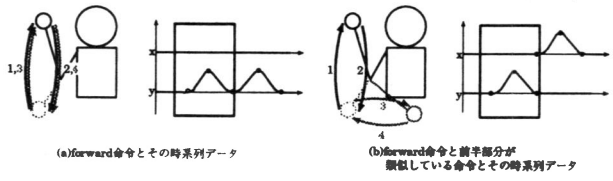


図 3: 類似部分を持つ動作

3.7 頻度

動作が認識された場合、直前に認識された動作からの頻度を上昇させる。頻度の上昇を、式(1),(2)に示す。ここで、$H(new)$は動作が認識された際に上昇した頻度$(0 \leq H(new) \leq 1)$、$H(old)$は認識される前の頻度$(0 \leq H(old) \leq 1)$、$H(up)$は頻度の上昇度である。γは$H(up)$の値を決める定数とする。本研究では$\gamma = 0.15$で行った。基本的に頻度の初期値は0.5としたが、ある動作に続いて現れることのない動作の頻度は0として行った。

$$H(new) = H(old) + H(up) \quad (1)$$

$$H(up) = (1 - H(old)) \times \gamma \quad (2)$$

4 動作例

4.1 注視による認識のタイミング

図4に、8の字の動作を行ったときの認識のタイミングを示す。注視が無いものに比べ、3つ特徴点が少ない時点で動作の認識が行われて、認識までの時間が短くなっている。これにより、動作から認識までのタイムラグが減少することになる。

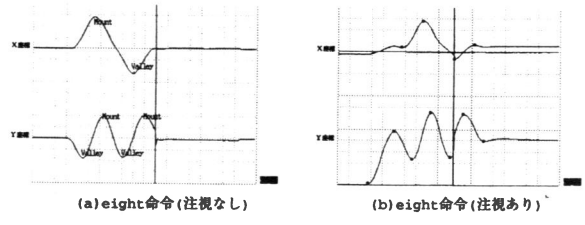


図 4: 8の字命令の認識

4.2 類似部分を持つ命令の認識タイミング

図5に、forward命令と、forward命令と前半が類似している命令tempの認識のタイミングを示す。知識に類似部分を持たない時にはforward命令は特徴点が3つで認識されている(a)のに対し、3番目の特徴点まで動作がほぼ同じ命令temp(c)を持つ場合、特徴点の範囲が大きく異なる4番目の特徴点に認識のタイミングが遅れている(b)。

4.3 連続動作の認識

図6に、「私は海で泳ぐ」という動作を続けて行った認識結果を示す。一動作ごとに安定状態にする必要がなく、動作を止めず連続で動作が認識され、より自然な認識が行われた。

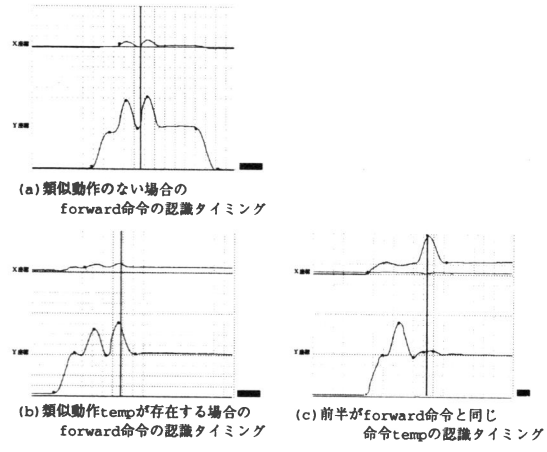


図 5: 類似部分を持つ命令の認識タイミング

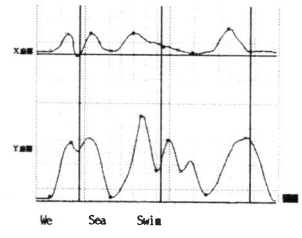


図 6: 連続動作の認識

4.4 手話動作における認識率

図7に、動作予測を行わない場合と行った場合の手話動作の認識率を示す。似た動作の誤認識が減るため、平均認識率が82.4%から85.3%へと上昇した。

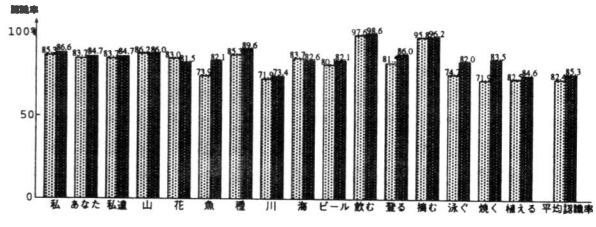


図 7: 手話動作の認識率

5 おわりに

本研究は、福祉指向インターフェイスにおけるスムーズなコミュニケーションの実現のため、スポッティング機能を実現し、基礎となる3つのインターフェイスを実現した。

参考文献

[1] 山口, 新井, 車谷, 西村, 小俣：動作指示に基づくインタラクティブインタフェイス, ITE'96 1996年テレビジョン学会映像メディア部門冬期大会講演予稿集, pp.59(1996)

[2] 岡 隆一：リアルワールド・コンピューティングと情報統合, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.1-7(1996)

[3] 野本, 木瀬, 小菅：類似事例検索のための相互出現頻度に基づくファジィシソーラス生成法, 日本ファジイ学会誌,Vol.8,No.6,pp.1134-1143(1996)

問い合わせ先

〒321 栃木県宇都宮市石井町2753
宇都宮大学工学部情報工学科山口研究室
新井 隆之
TEL 028-689-6259
E-mail:arai@sophy.infor.utsunomiya-u.ac.jp

FRF2-3

対話型遺伝的アルゴリズムのインターフェイス改善 -GA の高速化手法の提案-

Improvement of Interface for Interactive Genetic Algorithms -Proposal for Fast GA convergence-

印具 毅雄 * 高木 英行 ** 大崎 美穂 *

Takeo INGU* Hideyuki TAKAGI** Miho OHSAKI*

九州芸術工科大学 * 大学院, ** 音響設計学科

Kyushu Institute of Design, *Graduate School, **Dept. of Acoustic Design

Abstract: To make interactive GA practical, we have tried to reduce psychological/physical burden of human operators by improving human interface and GA convergence. This paper proposes a method that combines GA and modeling human evaluation to make GA convergence better. In this proposed method, a quadratic function is fitted to a solution space in each generation, and the best individual obtained from the approximated function is replaced with worst individual obtained from real fitness function. We evaluated how the proposed method can make convergence better through simulations using five fitness functions of DeJong and drawing faces system with interactive GA. The results show that the proposed method can make GA convergence better in four functions of DeJong and drawing faces task and at least does not make the convergence poorer.

1. はじめに

解探索の一手法である対話型 GA(遺伝的アルゴリズム) では、人間が評価系となり、提示された解候補に対して主観的な評価値を与えることを繰り返す。したがって対話型 GA は、評価関数をモデル化するアプローチでは扱うことが困難だった人間の好み、感性、コンセプトに基づいたアプリケーションに広く応用されている [1]。

しかし対話型 GA には、操作者の負担が大きいという問題点がある。特に、解候補や世代が複数の場合や解候補の印象の差が微妙な場合、操作者の負担が大きくなり評価が曖昧になってしまう。

そこで我々は、対話型 GA 操作者の心理的・肉体的負担低減に関する研究を行ってきている。負担低減には、人間が操作しやすいようにインターフェイス部分を改善するアプローチと、操作時間が短縮されるように GA 演算部分を改善するアプローチが考えられる。昨年度は、評価値入力インターフェイス改善として人間が楽に点数を与えられる入力方法を提案し、その有効性を示した [2, 3, 4]。

本研究では GA 演算部分の改善として収束の高速化手法を提案し、シミュレーション実験によってこの有効性を示すことを目的とした。提案手法によって GA の収束が速くなれば、対話型 GA 操作時の人間の負担低減だけでなく GA が応用される分野全般に貢献することが可能である。

2. 二次曲面あてはめによる GA 高速化手法の提案

対話型 GA では人間自体が評価系として組み込まれるので、心理空間上の人間の評価関数をモデル化する処理は含まれていない。人間の心理空間は非常に複雑でモデル化するのは難しいが、もし簡単な関数で近似的にモデル化し GA 演算と組み合わせることができれば、収束が速くなる可能性がある。

そこで我々は、対話型 GA の操作過程で得られる情報から探索空間を大局的にモデル化し、このモデルにおいて高い評価を得られる個体を生成して GA 演算に加える手法を提案する。

図 1 に提案手法の概要を示す。

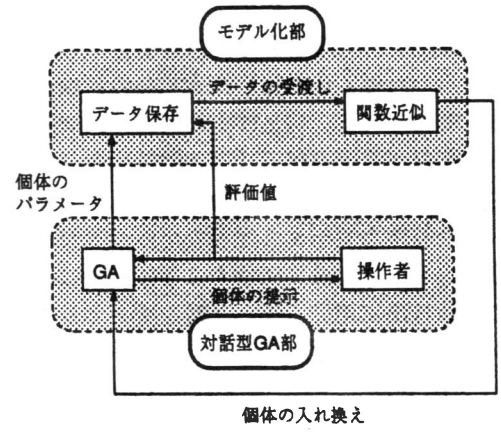


図 1:GA 収束の高速化のための提案システム

このシステムでは、GA が生成する個体のパラメータと操作者が入力する評価値を蓄えておき、そのデータに簡単な関数をあてはめて人間の評価をモデル化する。このモデルにおける最適解を求め、実際の評価系によって最も低い評価値を与えられた個体と入れ換えて、これらの個体を GA 演算に用いる。

提案システムのモデル化部では、最小二乗法によって探索空間に二次関数式 (1) を図 2 に示すようにあて

はめる。ただし式(1)において、x_iは個体を構成するパラメータ、$f(x_1, x_2, ..., x_n)$は評価値、cは定数である。近似する関数として二次関数を選んだのは、複雑な探索空間でも最適解付近の形状や大局的な形状は二次関数に近い場合が多いと考えたからである。

$$f(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{i=1}^{n} (a_i x_i^2 + b_i x_i) + c \quad (1)$$

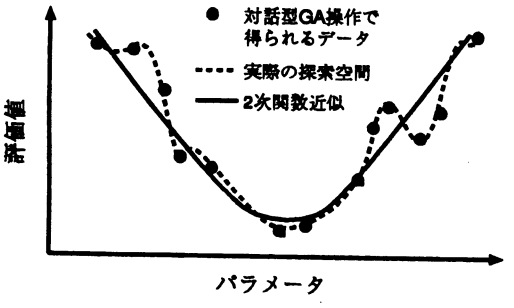


図2: 探索空間のモデル化

3. 実験

提案手法によりGA収束の高速化が可能であるか調べるために、従来のGAと提案手法でシミュレーションを行い収束状況を比較した。

まず実験Iにおいて、DeJongの5関数を用いてシミュレーションを行い提案手法がどのような探索空間に対して有効であるかを調べる。次に実験IIにおいて、実際のアプリケーションの一つとして対話型GAを組み込んだ似顔絵システムでもシミュレーションを行う。

探索空間に二次関数をあてはめる際にどのようなデータを用いればよいかは、探索空間の形状によって異なると考えられる。例えば大局的には二次関数とは異なる形状だが最適解付近は二次関数に近いような探索空間の場合、関数近似には全てのデータではなく評価値の高い優秀なデータを選んで用いた方がよいと考えられる。そこで、表1に示すようにあてはめる二次関数の係数算出に用いるデータ数を変えてシミュレーションを行うことにした。

その他の実験Iおよび実験IIの実験条件は、表2に示す通りである。

	使用するデータ数
提案手法1	全て
提案手法2	最小二乗法が適応できる最小データ数の2倍
提案手法3	最小二乗法が適応できる最小データ数の5倍
提案手法4	最小二乗法が適応できる最小データ数の10倍

表1: 最小二乗法に使用するデータ数

	実験I	実験II
パラメータ数	関数による	18
遺伝子コード化	ビットコーディング	ビットコーディング
選択方法	エリート戦略	エリート戦略
突然変異率	2%	3.33%
個体数	20	20
世代数	100	100
評価関数	DeJongの5関数	目標の顔との ユークリッド距離

表2: 実験I、実験IIの実験条件

GAの探索能力は初期乱数によってかなり異なるため、収束曲線を求める際は同じ条件ごとに10種類の初期乱数を用いたシミュレーションデータを平均した。さらに評価値の平均の差の検定を行い、従来のGAと各提案手法における収束曲線の間に差があるかどうかを定量的に調べた。

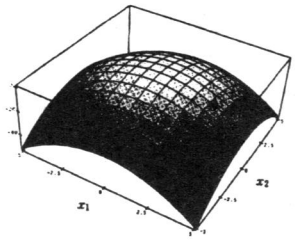
実験Iから得られた収束曲線とDeJongの評価関数の曲面を図3～図7に、実験IIから得られた収束曲線を図8にそれぞれ示す。ただしDeJongの関数の曲面図は、文献[5]より引用した。

4. 考察

実験Iの結果、今回のシミュレーションでF1、F4において本提案手法の効果が顕著に見られた。F4では同じ遺伝子でも評価されるごとに評価値が変わるため、通常のGAでは最適解を求めるのが困難である[3]。対話型GAは人間の評価の揺らぎからこのようなことが頻繁に起こるため、本提案手法は対話型GAに非常に有効であると考えられる。

F3では、近似に用いる個体数が多い条件(提案手法1、2)では収束が非常に速くなっている。F3は大局的には二次関数の一部に形状が似ているが局所的には細かい凹凸があるため、近似に用いる個体数が少ない条件では提案手法の高速化効果が小さくなったと考えられる。F5では、近似に用いる個体数が最も多い条件(提案手法1)においては提案手法と従来のGAの間に差はなく、個体数がより少ない条件(提案手法2、3、4)において収束が速くなった。様々なアプリケーションにおける実際の探索空間は、F3やF5のように凹凸を含み大局的もしくは局所的に二次関数に似た形状であることが多いと考えられる。したがって、本提案手法は勾配法では探索が困難な探索空間においても有効であると考えられる。

探索空間の一部が二次関数をさかさまにしたような形状になっているF2では、提案手法と従来のGAの間に収束の差がなくなっている。



(a) De Jong の F1

$-\sum_{i=1}^{3} x_i^2$

parabola

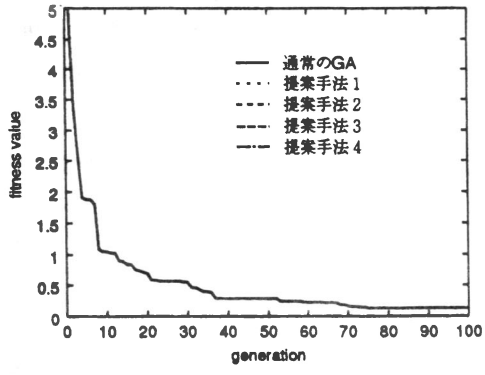
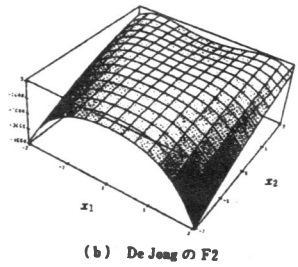


図 3: 実験 I の結果 (関数 F1 の曲面と収束曲線)



(b) De Jong の F2

$-\{100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2\}$

Rosenbrock's saddle

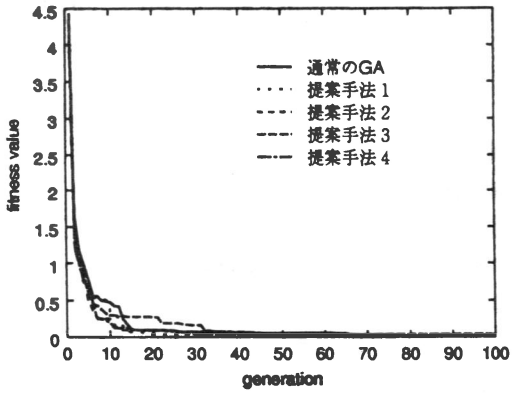
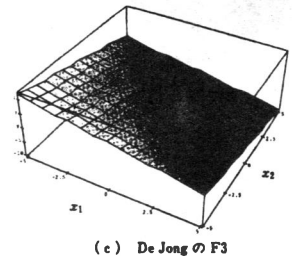


図 4: 実験 I の結果 (関数 F2 の曲面と収束曲線)



(c) De Jong の F3

$-\sum_{i=1}^{5} \lfloor x_i \rfloor$

step function

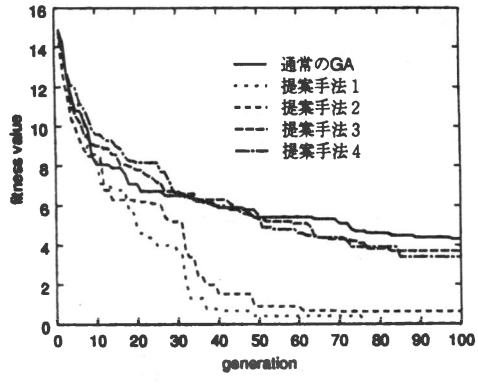
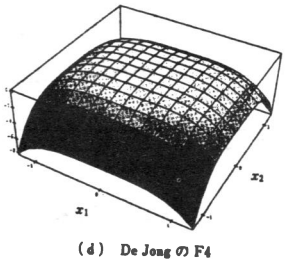


図 5: 実験 I の結果 (関数 F3 の曲面と収束曲線)



(d) De Jong の F4

$-\{\sum_{i=1}^{30} i x_i^4 + GAUSS(0,1)\}$

quadratic with noise

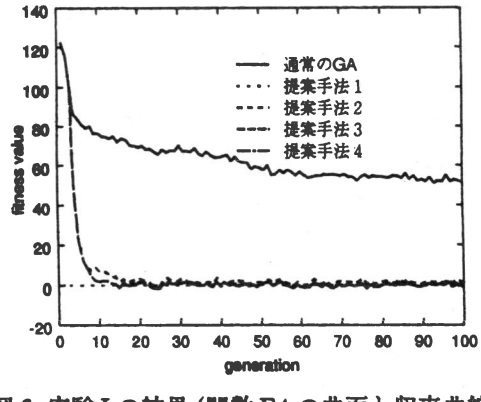
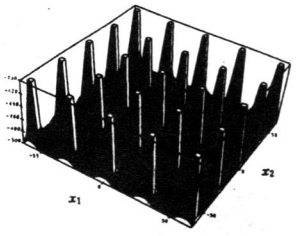


図 6: 実験 I の結果 (関数 F4 の曲面と収束曲線)



(e) De Jong の F5

$$-\left[\frac{1}{500}+\sum_{j=1}^{25}\frac{1}{j+\sum_{i=1}^{2}(x_i-a_{ij})^6}\right]^{-1}$$

Shekel's foxholes

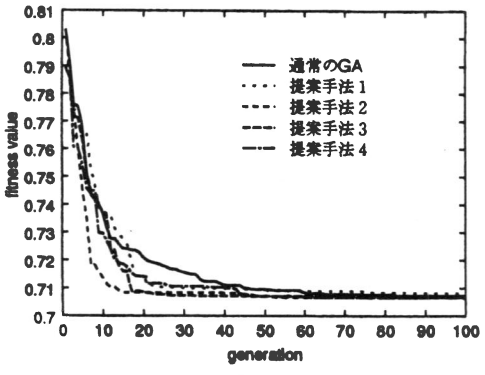


図 7: 実験 I の結果 (関数 F5 の曲面と収束曲線)

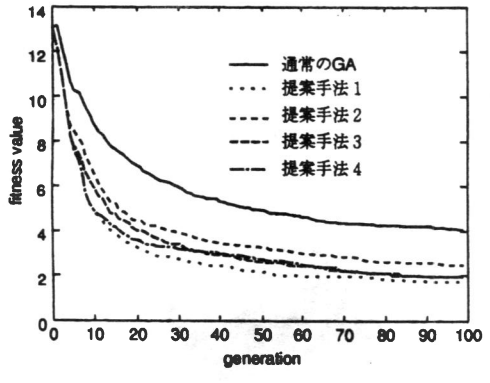


図 8: 実験 II の結果

このように二次関数があてはまりにくい探索空間では提案手法による収束高速化の効果は少ないと考えられる。

しかし今回用いたどの関数においても、提案手法によって従来の GA よりも収束が遅くなることはなかった。さらに、F2 以外の全ての関数で提案手法の効果が見られた。したがって本提案手法を用いれば、収束が悪くなることはほとんどなく収束が速くなる可能性が高いと言える。このことより、探索空間がどのような形状をしているか推測できないような場合にも本提案手法を適応することができると考えられる。

対話型 GA のアプリケーションの一つを用いた実験 II では、全提案手法において収束が非常に速くなっている。この実験では目標となる顔と生成された個体とのユークリッド距離を評価値としたため、探索空間が二次関数に近い形状となった。したがって実験 I における F1 のように提案手法の効果が大きく出たと考えられる。

以上をまとめると、本提案手法は探索空間が推測できないような場合においても適応できると考えられる。探索空間が二次曲面に大局的に近似できる場合非常に収束が速くなる。本提案手法は GA の解探索が困難な評価の揺らぎが生じる場合に有効と考えられる。

今後は対話型 GA において被験者実験を行い、人間が操作を行っても収束が速くなるのかを評価する予定である。

参考文献

[1] Aoki, K., Takagi, H., and Fujimura, N. , "Interactive GA-based Design Support System for Lighting Design in Computer Graphics," Int'l Conf. on Soft Computing (IIZUKA'96), World Scientific, Iizuka, Fukuoka, Japan, pp.533-536 (Sept. - Oct., 1996)

[2] Takagi, H. and Ohya, K. , "Discrete fitness values to improve human interface of interactive GA," IEEE 3rd Int'l Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'96), Nagoya, Aichi, Japan (May, 1996)

[3] Takagi, H. , Ohya, K. , and Ohsaki, M. , "Improvement of Input Interface for Interactive GA and its Evaluation," Int'l Conf. on Soft Computing (IIZUKA'96), Iizuka, Fukuoka, Japan, pp.490-493 (Sept./Oct., 1996)

[4] Takagi, H. , Ohya, K. , and Ohsaki, M. , "Improvement of Input Interface for Interactive Genetic Algorithms and its Evaluation," 12th Fuzzy System Symposium, Waseda,Tokyo, Japan, pp.513-516 (June, 1996)

[5] 伊庭 斎志, "遺伝的アルゴリズムの基礎 -GA の謎を解く-," オーム社, Tokyo, Japan, pp.17-18 (1994)

【連絡先】
〒 815
福岡市南区塩原 4 丁目 9-1
九州芸術工科大学音響設計学科
高木英行
Tel : 092-553-4555
Fax : 092-553-4569
E-mail : takagi@kyushu-id.ac.jp

FRF2-4

日本語によるC言語のプログラミング
C-Language Programming with Japanese Language

佐藤 健† 鬼沢 武久
Takeshi SATOH Takehisa ONISAWA
筑波大学構造工学系
(†現在、日本総合研究所)
Institute of Engineering Mechanics,University of Tsukuba
(†Currently, The Japan Research Institute, Limited)

Abstract- This paper aims at constructing a C-language programming support system with Japanese language. This system consists of a Japanese language input editor and a Japanese - C-language translator. A program is written by Japanese using the Japanese input editor. The Japanese program is analyzed one by one, and translated into a C-language program by the translator. A programming example is shown in order to confirm the validity of the presented system.

1 はじめに

現在のプログラミングは、人間がプログラム言語を学習してプログラムを作成し、コンピュータに解読させることによって成り立っている。これは人間にとってプログラム言語を学習する必要があり、コンピュータ本位の流れである。人間は成長過程において何らかの言語を学習する。その言語を使ってプログラミングができれば人間はもっと楽にプログラミングを行える。本論文ではプログラム言語ではなく、日本語でプログラムを作成するという人間本位のプログラミングを目指す。そのため、日本語入力によるC言語のプログラム作成のための支援システムを構築する。

2 プログラム作成支援システム

2.1 システムの概要

本システムは、日本語入力エディタ、日本語をC言語に変換するトランスレーターで構成されている。システムの概要を図1に示す。

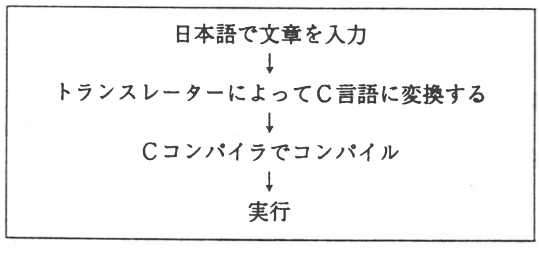


図1: システムの概要

2.2 日本語およびC言語表示エディタ

2.2.1 概要

本エディタは日本語でC言語に変換する文章を書くためのエディタである。日本語の表現方法は個人によって様々であるので、本論文では入力方法などに制限を設けてエディタを作成する。図2に示すように、本エディタは左右2つのエディタに分かれており、左側のエディタが「日本語表示エディタ」、右側のエディタが「C言語表示エディタ」であり、それぞれ日本語、C言語が表示される。エディタにはメインメニューとして、「セーブ」「全消去」「部分消去」「構文選択」「C言語への変換」「終了」の6つがある。「構文選択」には、「出力させる」「入力させる」「繰り返す」「仮定」「かっこを閉じる」「代入する」の6つのコマンドがあり、その各々についていくつかの項目に分かれている。

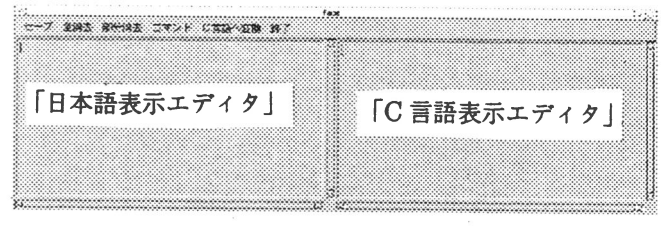


図2: エディタ

2.2.2 メインメニュー

この節では6つのメインメニューについて述べる。

- セーブ：エディタに表示された文章をファイルに保存させるコマンド
- 全消去：エディタに書かれた文章やプログラムを全て消去させるコマンド
- 部分消去：エディタに表示されている文章やプログラムを任意の範囲だけ消去させるコマンド
- 構文選択：このメニューが本エディタの主要部分である。日本語エディタ上で文章を作成していくためには、このメニューを選択し、その中から使用したいコマンドを選ぶ。表1に示すように、1つのコマンドは、さらにいくつかの項目に分かれている。そのうちのどれかを選択すると日本語入力のためのダイアログが表示される。空欄の部分に文字や数字を入力すると、「日本語表示エディタ」に入力した文章が表示される。この操作を繰り返すことによって日本語でC言語に変換する文章を作成することができる。

表 1: コマンドごとの項目

コマンド	項目
出力させる	出力
入力させる	整数の入力、小数の入力 文字列の入力
繰り返す	ある回数だけ繰り返す ある条件の間繰り返す
仮　定	第 1 分岐、第 2 分岐以上 ～以外ならば
かっこを閉じる	かっこを閉じる
代入する	代入する

* 出力させる：画面上やファイルに実際に出力させる数字や文字列を設定するときに用いるコマンド
* 入力させる：ユーザーに入力させる数字や文字列の設定、および入力された数字や文字列を取り込むことをするときに用いるコマンド
* 繰り返す：同じ処理を繰り返させるときに用いるコマンド
* 仮定：条件を設定するときに用いるコマンド
* かっこを閉じる：繰り返しや仮定の範囲を指定するときに用いるコマンド
* 代入する：変数に変数や数字を代入するときに用いるコマンド

例として「出力させる」の場合の入力例を図 3 に示す。図 3 の上部がダイアログであり、下部がこの入力の結果である。

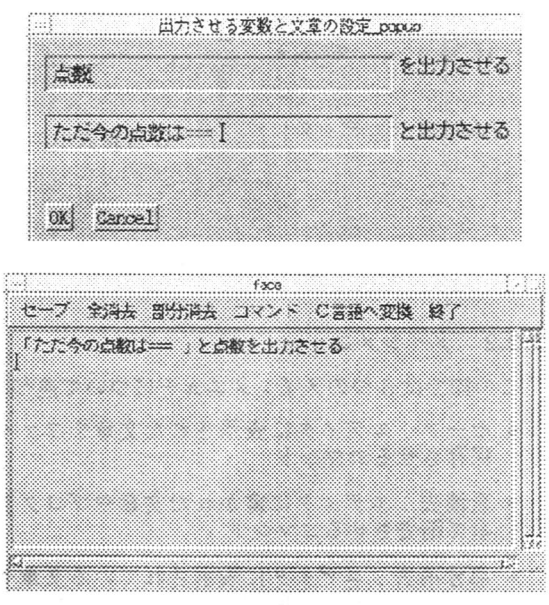


図 3:「出力させる」の入力例

- C 言語へ変換：エディタに書かれた日本語の文章を C 言語に変換させるコマンド
  このコマンドを選択すると、C 言語に変換された文章がエディタの右側の部分に出力される。変換の仕組み等に関しては 2.3 節で述べる。
- 終了：エディタを終了するコマンド

なお、ダイアログを用いなくても直接エディタに文字を書き込むことができるのでユーザーが手直しすることも可能である。

2.2.3　日本語入力時の制限

本システムでは、C 言語への変換を容易にするため、日本語入力にいくつかの制限を設けている。

★ 入力文章の形式の制限

表 1 に示すコマンドを用いて文章を作成するときに、入力文章の形式に制限があるため、制限の範囲内で書かれた文章しか C 言語に変換されない。

- 出力させる：入力文章を『～と～を出力させる』という形式に固定し、最初の～に、C 言語に変換して実行したときに補助的に出力させる文章が入り、後の～に、出力させたい数字や文字列が入る。
- 入力させる：入力文章を『～と～を入力させる』という形式に固定し、最初の～に、C 言語に変換して実行したときに補助的に出力させる文章が入り、後の～に、入力させたい数字や文字列が入る。
- 繰り返す　：回数の指定による繰り返しの場合は『～回繰り返す』という形式に固定し、～に回数が入る。条件による繰り返しの場合は『～が～の場合繰り返す』という形式に固定し、最初の～に、繰り返しの判定に用いる変数が入り、後の～の部分に、繰り返しの条件が入る。
- 仮定：第 1 分岐目の仮定の場合は『～が～ならば』、第 2 分岐目以降の仮定の場合は『また、～が～ならば』という形式に固定し、最初の～に、仮定の判定に用いる変数が入り、後の～に、判定条件が入る。
- 代入する　：入力文章を『～に～を代入する』という形式に固定し、最初の～に、代入する変数が入り、後の～に、代入する内容が入る。

★ 文字の大きさについての制限

仮名文字、漢字は全角文字で入力できるが、数字、演算記号は半角でしか入力できない。しかし、例外として、変数名として数字を使用するときは全角でも構わない。

★ 条件の入力についての制限

条件を表現するときには、「以上」「以下」「より大きい」「より小さい」「未満」「以外」のいずれかを用いる。

★ 演算式の入力についての制限

演算式は基本的には二項演算のみを考える。したがって、三項以上の演算式は二項演算を何回か繰り返し使う形で入力する。なお、括弧を用いた演算はここでは考えない。

2.3　トランスレーター

トランスレーターは、「構文および演算解析」と「変数ファイル」に分かれている。なお、本論文では変換後のプログラムに C++ を使用している。また、プログラムエラーについては、前節で述べている入力

制限の範囲内で正しく入力すれば、変換後のC言語のプログラムをコンパイルしたときにエラーは出ない。入力制限の範囲外の入力を行ったときのコンパイルによるエラー等はここでは考えない。

2.3.1 変換の方法

入力される文章は、表2に示す5つのコマンドによって入力された文章であるので、まず日本語の文章を1行ずつ読み取っていき、各々の文についてキーワード（表2）を認識させることによってコマンドを判定させる。そのあと、各々のコマンドごとの変換プロセスに従って変換していく。基本的に1行の文章をいくつかの単語に分けていくことにより変換を行う。

例として「出力させる」のコマンドで作成した文章の変換例を図4に示す。

表2：コマンドとキーワード

コマンド	キーワード
出力させる	出力させる
入力させる	入力させる
繰り返す	繰り返す
仮　定	ならば
代入する	代入する

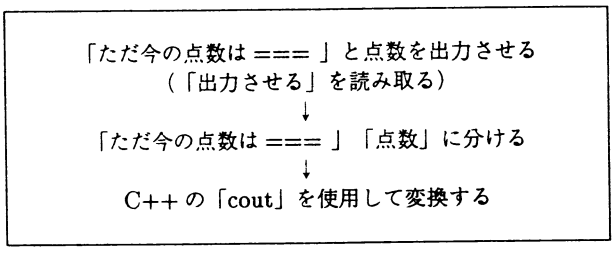


図4：「出力させる」の変換例

2.3.2 変数の割り当て

変換時に変数を割り当てるために「変数ファイル」を作成する。これは1行に型、文字列、変数番号を順に書き込むようになっている。「型」には、int（整数）、float（小数）、char（文字列）の3つのうちのいずれかが入る。「変数番号」には0以上の整数の値が入る。「変数ファイル」の例を図5に示す。この場合、「回数」という文字列は、型がint（整数）で、変数番号が0であるのでC言語に変換したときの変数は例えば「a0」となり、「合計」という文字列は、型がint（整数）で、変数番号が1であるのでC言語に変換したときの変数は「a1」となる。

日本語の文章をC言語に変換しているときに文字列が出てきたらこのファイルを検索し、ファイル内にその文字列が検索できればその情報を使用し、検索できなければファイルにその文字列を追加して新しい変数番号を与えることによって変数の割り当てを行う。

```
int 回数 0
int 合計 1
```

図5：変数定義ファイルの例

2.3.3 四則演算の処理

二項演算は「数字＋演算記号＋数字」、「文字列＋演算記号＋数字」、「文字列＋演算記号＋文字列」のいずれかで入力されるので以下のように処理をする。

Step.1 入力文章を「演算記号の前」、「演算記号」、「演算記号の後」の3つの文字列又は数字に分ける。

Step.2 「演算記号の前」、「演算記号の後」の各々について文字列ならば「変数ファイル」を調べる。「変数ファイル」内にその文字列が見つかれば、その文字列の変数番号を取り込み、取り込んだ番号をその文字列と置き換える。「変数ファイル」に文字列がなければ新しく変数番号を割り当て、その番号を取り込んで文字列と置き換える。また、数字ならばその数字をそのまま用いる。

Step.3 この時点で、二項演算の項は「数字」と「変数番号」だけであらわされるのでこのままC言語に変換する。

変換例を図6に示す。この場合、まず、Step.1 に従って入力文章を「数字1」、「+」、「数字2」に分ける。その後、Step.2 に従い、「数字1」、「数字2」を変数ファイルで探し、変数ファイルに変数があればその変数を使用し、なければ新しい変数を作成する。この後、計算式に変換する。

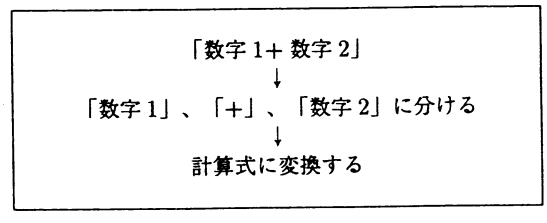


図6：四則演算の変換例

以上のプロセスで日本語の文章をC言語に変換することができる。図7に「出力させる」のコマンドで作成した文章をC言語に変換したものを示す。

```
< 入力文章 >
「ただ今の点数は === 」と点数を出力させる
                ↓
< C言語 >
int a0;
cout << "ただ今の点数は ===" << a0 << '\n';

< 変数ファイル >
int 点数 0
```

図7：「出力させる」のC言語への変換例

3 実行例

この章では、本研究で作成したシステムを用いた日本語入力のプログラムのシミュレーション例を示し、考察を行う。

3.1 1から10まで足し算するプログラムの作成

簡単な例として、1から10まで足し算するプログラムを作成する。このプログラムを作成するには「出力」「繰り返し」「代入」の解析が必要になってくる。

まず、日本語エディタで入力した文章を以下に示す。この文章は文章入力の制限に従って入力した文章である。

＜ 日本語の文章 ＞

```
回数に 1 を代入する
合計に 0 を代入する
「回数」が 10 以下の間繰り返す
[
  合計に合計 + 回数を代入する
  回数に回数 +1 を代入する
]
「1 から 10 までの和は ==  」と合計を出力させる
-----------------------------------------
```

この文章を、トランスレータを用いて1行ずつC言語に変換していく。1行目、2行目に「回数」「合計」という文字列が出ているのでそれを変数ファイルに書き込み、変数の定義をした後、「代入する」の変換を行っている。3行目は「条件による繰り返し」である。「回数」を変数ファイルから読み込んでその変数を使用して変換している。5行目、6行目は、「合計」「回数」を変数ファイルで探した後「代入する」「四則演算」の変換を行っている。最後の行も同様に「合計」を変数ファイルから読み込んで「出力する」の変換を行う。

以下に変換後のC言語のプログラム、ならびに変数ファイルを示す。

＜ C言語 ＞

```
#include <iostream.h>
int main()
{
  int a0;
  int a1;
  a0=1;
  a1=0;
  while(a0 <= 10)
  {
    a1=a1+a0;
    a0=a0+1;
  }
  cout << "1 から 10 までの和は ==  " << a1 << '\n';
}
```

＜ 変数ファイル ＞

```
int 回数 0
int 合計 1
-----------------------------------------
```

これをCコンパイラを使用してコンパイルした後、実行させた結果を以下に示す。

＜ 結果 ＞

```
1 から 1 0 までの和は ==  55
```

3.1.1 考察

この例は簡単な短いプログラムであるが、日本語の文章を1行ずつ読み込んでキーワードを認識し、そのキーワードに応じて「変数割り当て」「代入」「四則演算」「出力」の変換がうまくできていることが確認された。また、変換後のC言語のプログラムがCコンパイラでコンパイルできていることが確認された。

紙面の都合上、実行例としては「1から10まで足し算するプログラム」のみ示した。それ以外に、入力された身長の高さを分類するプログラムや、倒れたピンの数を入力し、ボーリングの点計算をするプログラムについても実行した。

4 結論

本研究では、日本語を入力するエディタ、日本語をC言語に変換するトランスレータを用いて日本語によってC言語のプログラムを作成するための支援システムの構築を目的とした。入力事項に制限を設けたが、その制限の範囲内で日本語を1行ずつ読み込んでC言語に変換していくことができた。実行例の結果によって、入力制限の範囲内で、C言語を用いなくてもアルゴリズムを知っていれば日本語でプログラムが作成できることが確認された。

今後の課題としては以下のようなものが挙げられる。

- システム全体を対話型にする。
- C言語の標準ライブラリを使えるようにする。
- 現在はメイン関数しか作れないので、複数の関数を使用しても変換できるようにする。
- 複雑な演算も変換できるようにする。
- 入力方法での制限を少なくしていく。
- 曖昧な言語表現をファジィ集合を用いて対応できるようにする。

参考文献

[1] 中田育男：" コンパイラ"、産業図書 (1993)

問い合わせ先：
〒 305 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学構造工学系
鬼沢 武久
Tel:0298-53-5060　　Fax:0298-53-6471
E-mail:onisawa@esys.tsukuba.ac.jp

FRF3-1

集計オペレータとしてのファジィ測度-ショケ積分モデル
Fuzzy Measure Choquet Integral Model as an Aggregation Operator

高萩栄一郎
Eiichiro TAKAHAGI
専修大学商学部
SENSHU UNIV.

We study properties of the fuzzy measure Choquet integral model as an aggregation operator. This operator have the intermediate value between t-norm and t-conorm and satisfy idempotence law, monotoneity, generalized commutative law, generalized De Morgan's law and Kleene's law.

1 はじめに

ファジィ測度-ショケ積分モデル(FMCI モデル)は，パラメータξを変化させることにより，最大値，平均値，最小値およびその中間の評価が可能であることを示した[5]．そこで，FMCIモデルを集計オペレータとして見，図1のt-conormとt-normの中間の平均化ファジィオペレータとして考えられる．

ファジィオペレータについては，[2],[3],[4]などで，研究されている．本稿ではそれらの研究と対比し，FMCIモデルがどのような性質を持っているのかを検討する．

本稿では，2項オペレータ，多項オペレータ，等重み，重み付きなどについて別々に検討していく．証明は重複する部分が多いので，§7にまとめて記載する．

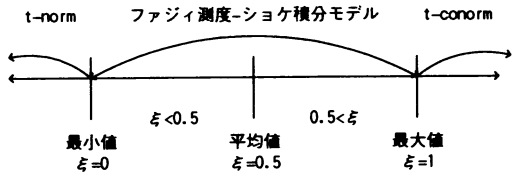


図 1: ξと集計方法

2 ファジィ測度-ショケ積分モデル

n個の入力項目の集合$X=\{1,2,\ldots,n\}$があるとする．集計される値は，$h(1),h(2),\ldots,h(n)$とする．このとき，最大値，平均値，最小値などの集計方法で，$h(1),h(2),\ldots,h(n)$を集計する．集計関数fを$z=f(h(1),h(2),\ldots,h(n))$とする．この集計関数にファジィ測度-ショケ積分モデルを使う．

ファジィ測度とショケ積分の定義式を以下にあげる．

$$\mu : X \to [0,1] \tag{1}$$

$\forall A,B \subset X$に対して，もし$A \supset B$ならば

$$\mu(A) \geq \mu(B) \tag{2}$$

$$\mu(\emptyset) = 0 \tag{3}$$

$$\mu(X) = 1 \tag{4}$$

$$z = (\mathrm{C})\int h d\mu \equiv \int_0^{+\infty} \mu(\{x; h(x) \geq \alpha\}) d\alpha + \int_{-\infty}^{0} [\mu(\{x; h(x) \geq \alpha\}) - \mu(X)] d\alpha \tag{5}$$

ファジィ測度の割当方法	集計方法
$\mu(A)=1, \forall A \in 2^X \setminus \{\emptyset\}$	最大値(max)
$\mu(A)=\frac{\lvert A\rvert}{n}, \forall A \in 2^X$	平均値(average)
$\mu(A)=0, \forall A \in 2^X \setminus \{X\}$	最小値(min)

表 1: ファジィ測度と集計方法

例えば，$n=3, h(1) \geq h(2) \geq h(3) \geq 0$の場合，

$$\begin{aligned} z &= f(h(1),h(2),h(3)) = (\mathrm{C})\int h d\mu \\ &= (h(1)-h(2))\mu(\{1\}) + (h(2)-h(3))\mu(\{1,2\}) \\ &+ h(3)\mu(\{1,2,3\}) \end{aligned} \tag{6}$$

となる．このとき，表1のように，ファジィ測度の割当方法により，最大値，平均値，最小値の集計が可能である．($|A|$は，集合Aの要素の数) さらに，次のような双対なファジィ測度割当関数χを使うことにより，これらの中間の評価を行うことができる．

a) $\chi : [0,1] \times [0,1] \to [0,1]$

b) $\chi(\xi,0)=0, \chi(\xi,1)=1, \forall \xi \in (0,1)$

c) $\xi \in (0,1)$のとき，$\chi(\xi,u)$は，uに関して強意に単調増加な連続関数

d) $u \in (0,1)$のとき，$\chi(\xi,u)$は，ξに関して強意に単調増加な連続関数

e) $\xi \in (0.5,1)$ならば，uに関して，狭義凹関数

f) $\xi \in (0,0.5)$ならば，uに関して，狭義凸関数

g) $\xi=1$ならば，$\chi(\xi,u)=1, \forall u \in (0,1]$

h) $\xi=0$ならば，$\chi(\xi,u)=0, \forall u \in [0,1)$

i) $\lim_{\xi \to 0}\chi(\xi,u)=0, \lim_{\xi \to 1}\chi(\xi,u)=1, \forall u \in (0,1)$

j) $\chi(0.5,u)=u, \chi(\xi,0.5)=\xi$

k) $\chi(\xi,u)=1-\chi(1-\xi,1-u)$(双対性)

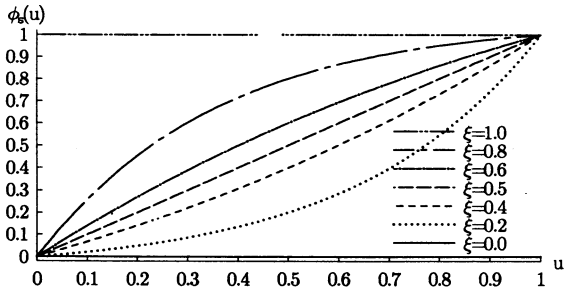


図 2: ϕ_s変換

このような双対なファジィ測度割り当て関数の例として，ϕ_s変換[7]がある．

$$\phi_s : [0,1] \rightarrow [0,1],\ s \in [0,+\infty] \tag{7}$$

$$\phi_s(u) = \begin{cases} [u] & \text{if } s=0 \\ u & \text{if } s=1 \\ 1-[1-u] & \text{if } s=+\infty \\ (s^u-1)/(s-1) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

where $[u] = \begin{cases} 1 & \text{if } 0<u\le 1 \\ 0 & \text{if } u=0 \end{cases}$

$$\chi(\xi,u) = \phi_s(u), s = ((1/\xi)-1)^2 \tag{9}$$

このとき，各入力項目の重みを$w_1, w_2, \ldots, w_n, w_i > 0$としたとき，$A$のファジィ測度を

$$\mu(A) = \chi(\xi, \frac{\sum_{i\in A} w_i}{\sum_{i\in X} w_i}), \forall A \in 2^X \tag{10}$$

で割り当てる．

これにより，図1のように，ξを変化させることにより，最小値と平均値の中間の集計，平均値と最大値の中間の集計などさまざまな集計方法を実現できる．

3 等ウエイト2項演算子

本節では，2入力で，等ウエイトの場合を考える．

$$U_\xi(a,b) = (\mathrm{C})\int h d\mu, h(1)=a, h(2)=b,$$
$$\mu(\{1\}) = \mu(\{2\}) = \chi(\xi, 0.5) \tag{11}$$

この場合，次のような単純な計算式になる．

$$U_\xi(a,b) = \xi\{\max(a,b) - \min(a,b)\} + \min(a,b) \tag{12}$$
$$a,b \in [0,1], \xi \in [0,1]$$

この演算子が$\forall a,b,c,\xi \in [0,1]$でどのような性質を持つのか検討してみる．

まず，U_ξと$U_{1-\xi}$は，双対な論理演算になっている．

$$U_\xi(a,b) = 1 - U_{1-\xi}(1-a, 1-b) \tag{13}$$

そこで，U_ξと$U_{1-\xi}$を*and*と*or*に対応させ，いくつかの論理演算の法則が成りたっているか検討する．また，否定は，$\sim a = 1-a$とする．

1. $U_\xi(a,a) = a$（べき等律）
2. $U_\xi(a,b) = U_\xi(b,a)$（交換律）
3. $a \le a', b \le b'$ならば$U_\xi(a,b) \le U_\xi(a',b')$(単調性)
4. $1 - U_{1-\xi}(a,b) = U_\xi(1-a, 1-b)$(ド・モルガン律)
5. $U_\xi(a,1-a) \ge U_{1-\xi}(b,1-b), \forall \xi \in [0.5,1], a,b \in [0,1]$(クリーネ律)

ξに関する単調性を満たす．

$$\xi_1 \ge \xi_2 \rightarrow U_{\xi_1}(a,b) \ge U_{\xi_2}(a,b) \tag{14}$$

結合律$(U_\xi(a, U_\xi(b,c)) = U_\xi(U_\xi(a,b),c))$，吸収律$(U_{1-\xi}(a, U_\xi(a,b)) = a$は，一般には成り立たない．また，最小元，最大元は存在しない．分配法則$(U_\xi(a, U_{1-\xi}(b,c)) = U_{1-\xi}(U_\xi(a,b), U_\xi(a,c)))$も一般には成立しない．

4 等ウエイトの多項演算子

本節では，n入力に拡張する．

$$U_\xi(a_1, a_2, \ldots, a_n) = (\mathrm{C}) h d\mu \tag{15}$$

$$h(i) = a_i, \mu(A) = \chi(\xi, \frac{|A|}{n}) \tag{16}$$

4.1 入力の変量の数が一定の場合

Yager[3]が示したn入力のオペレータ$M : [0,1]^n \rightarrow [0,1]$が平均化オペレータであるための条件は，

(1) M(a,...,a)=a (べき等律)

(2) Mは，各変数に対して単調増加(単調性)

(3) 変数の順番に無関係（一般化交換律）

である．FMCIモデルでは，この(1)〜(3)とξに関する単調性，一般化ド・モルガン律(式(17))は，成り立つ．

$$1 - U_\xi(a_1, \ldots, a_n) = U_{1-\xi}(1-a_1, \ldots, 1-a_n) \tag{17}$$

また，クリーネ律に対応して，

$$U_\xi(a_1, \ldots, a_n) \ge U_{1-\xi}(b_1, \ldots, b_n) \tag{18}$$
ただし，$\xi \in [0.5,1], \sum a_i = 1, \sum b_i = 1$

が成立している．

4.2 入力の変量の数が可変の場合

Yager [3],[4]は，多入力の集計オペレータを下記のようなbag オペレータとして定義している．

bag(multi-set) とは，集合Xの重複を許す要素の集まりである．集合と同様に要素の順番は意味は持たない．a,b,c,bからなるbag Aを$A = \langle a,b,c,b\rangle$とかく．また，$B = \langle a,c,g,h\rangle$との和$D$は，$D = A \oplus B = \langle a,b,c,b,a,c,g,h\rangle$となる[4]．本モデルのオペレータ$U_\xi$は，一般化交換律を満たしているので，bap オペレータとして扱うことができる．FMCIモデルをbag オペレータの形にすると，

$$V_\xi(\langle a_1, a_2, \ldots, a_n\rangle) = (\mathrm{C}) h d\mu \tag{19}$$

$$h(i) = a_i, \mu(A) = \chi(\xi, \frac{|A|}{n}) \tag{20}$$

となる．そして，同様に，べき等律，一般化交換律，単調性，ξに関する単調性，一般化ド・モルガン律を満たす．

5 多項演算子（重み付き）

5.1 入力の変量の数が一定の場合

入力値への重みも含めた，多入力のオペレータとして扱う．変量の数nとその重み$w_1, w_2, \ldots, w_n, (w_i > 0, \forall i)$を固定して考える．重みをオペレータの肩字で表す．

$$U_\xi^{(w_1,w_2,\ldots,w_n)}(a_1, a_2, \ldots, a_n) = (\mathrm{C}) \int h d\mu \tag{21}$$

$$h(i) = a_i, \mu(A) = \chi(\xi, \frac{\sum_{i\in A} w_i}{\sum_{i\in X} w_i}) \tag{22}$$

べき等律，単調性，ξに関する単調性，一般化ド・モルガン律を満たす（一般化交換律は満たさない）．

5.2 入力の変量の数が可変の場合

§4.2と同様に，bag mappingを使う．

$$V_\xi : R^{I\times I} \to I, \tag{23}$$

$$V_\xi(\langle(w_1, a_1), \ldots, (w_n, a_n)\rangle) = (\mathrm{C}) \int h d\mu \tag{24}$$

$$h(i) = a_i, \mu(A) = \chi(\xi, \frac{\sum_{i\in A} w_i}{\sum_{i\in X} w_i})$$

とする．この場合，べき等律，一般化交換律，ξに関する単調性は成り立つ．また，a_iに限れば，単調性，一般化ド・モルガン律は，成り立つ．

$$a_i \geq b_i, \forall i \text{ ならば } V_\xi(\langle(w_1, a_1), \ldots, (w_n, a_n)\rangle) \geq V_\xi(\langle(w_1, b_1), \ldots, (w_n, b_n)\rangle) \tag{25}$$

$$1 - V_\xi(\langle(w_1, a_1), \ldots, (w_n, a_n)\rangle) = V_{1-\xi}(\langle(w_1, 1-a_1), \ldots, (w_n, 1-a_n)\rangle) \tag{26}$$

重みは，すべて定数倍してもよい．$\alpha > 0$に対して，

$$V_\xi(\langle(w_1, a_1), \ldots, (w_n, a_n)\rangle) = V_\xi(\langle(\alpha w_1, a_1), \ldots, (\alpha w_n, a_n)\rangle) \tag{27}$$

となる．次にショケ積分の性質から，$a_1 = a_2$ ならば

$$V_\xi(\langle(w_1, a_1), (w_2, a_2), (w_3, a_3), \ldots, (w_n, a_n)\rangle) = V_\xi(\langle(w_1 + w_2, a_1), (w_3, a_3), \ldots, (w_n, a_n)\rangle) \tag{28}$$

となり，bagの要素の統合や分割が可能である．

この性質を利用することにより，重みの意味がはっきりする．$w_i, \forall i$を整数とする．(w_iが有理数であれば，すべてを定数倍することにより整数化できる．)すると，

$$\begin{aligned} & V_\xi(\langle(w_1, a_1), \ldots, (w_n, a_n)\rangle) \\ = \; & V_\xi(\langle(\overbrace{(1, a_1), \ldots, (1, a_1)}^{w_1\text{個}}), \ldots, \overbrace{(1, a_n), \ldots, (1, a_n)}^{w_n\text{個}})\rangle) \\ = \; & U_\xi(\overbrace{a_1, \ldots, a_1}^{w_1\text{個}}, \ldots, \overbrace{a_n, \ldots, a_n}^{w_n\text{個}}) \end{aligned}$$

となる．したがって，重みは，入力の数を表している．たとえば，$n = 3, w_1 = 1, w_2 = 3, w_3 = 5$であれば，$a_1$が1入力，$a_2$が3入力，$a_3$が5入力あることを示している．

6 最後に

同様な平均化オペレータとして，Dyckhoffら[1]の

$$U_\rho^{(w_1,\ldots,w_n)}(a_1, \ldots, a_n) = (\sum_{i=1}^{n} w_i a_i^\rho)^{1/\rho} \tag{29}$$

がある．$\rho = \infty$でmax，$\rho = 1$で算術平均，$\rho = 0$で幾何平均，$\rho = -1$で調和平均，$\rho = -\infty$でminになる．今後，このようなオペレータと比較していきたい．

7 付録(証明等)

本節では，特に断りがない限り，以下のようにする．

- $a_1 \geq a_2 \geq \ldots \geq a_n$
- $u_i = w_i/(\sum w_i)$ したがって $\sum u_i = 1$

7.1 ϕ_s変換がχの性質を満たすこと

- a),b),g),h),j) 定義より明か
- c):uに関して，偏微分する．($u \in [0,1], s > 0$)

$$\frac{\partial \phi_s(u)}{\partial u} = \frac{s^u \log(s)}{-1+s} > 0 \tag{30}$$

- d):グラフ(図2)で見る限り，成立．(未証明)
- e),f):uに関して，2回偏微分する．

$$\frac{\partial^2 \phi_s(u)}{\partial u^2} = \frac{s^u \log(s)^2}{-1+s} \tag{31}$$

$\xi > 0.5$ならば，$s \in (0,1)$より，負．また，$\xi < 0.5$ならば，$s > 1$より正．

- i) [7]を参照
- k):s_1をξに，s_2を$1-\xi$に対応させ，次のようにϕ_{s_1}とϕ_{s_2}が双対な関係にあることを示す．

$$s_1 = ((1/\xi) - 1)^2, s_2 = ((1/(1-\xi)) - 1)^2 \tag{32}$$

$$\phi_{s_1}(u) = 1 - \phi_{s_2}(1-u) \tag{33}$$

$$\text{すなわち,} \phi_{s_1}(u) + \phi_{s_2}(1-u) = 1, \forall \xi, u \in [0,1] \tag{34}$$

(1) $\xi = 1$の場合
$s_1 = 0, s_2 = +\infty$より，$u \neq 0$ならば，$\phi_{s_1}(u) = 1, \phi_{s_2}(1-u) = 0$より，$\phi_{s_1}(u) + \phi_{s_2}(1-u) = 1$．また，$u = 0$ならば，$\phi_{s_1}(u) = 0, \phi_{s_2}(1-u) = 1$より，$\phi_{s_1}(u) + \phi_{s_2}(1-u) = 1$.
(2) $\xi = 0$の場合．(1)と同様に証明可能
(3) $\xi = 0.5$の場合
$s_1 = 1, s_2 = 1$より，$\phi_{s_1}(u) = u, \phi_{s_2}(1-u) = 1-u$．よって，$\phi_{s_1}(u) + \phi_{s_2}(1-u) = 1$.
(4) $\xi \in (0, 0.5) \cup (0.5, 1)$の場合．

$$\begin{aligned} & \phi_{s_1}(u) + \phi_{s_2}(1-u) \\ = \; & \frac{s_1^u - 1}{s_1 - 1} + \frac{s_2^{1-u} - 1}{s_2 - 1} \\ = \; & \frac{s_1^{u-1}(s_1 s_2) - s_1^u - s_2 + s_2^{-u}(s_1 s_2) - s_2^{1-u} - s_1 + 2}{s_1 s_2 - s_1 - s_2 + 1} \\ & (s_1 s_2 = 1, s_1^{u-1} - s_2^{1-u} = 0, s_1^u - s_2^{-u} = 0 \text{ より}) \\ = \; & 1 \end{aligned}$$

7.2 共通の性質

7.2.1 一般化べき等律

$$
\begin{aligned}
& V_\xi(((w_1,a),\ldots,(w_n,a))) \\
= \ & \{\textstyle\sum_{i=1}^{n-1}\phi_{s_1}(\sum_{j=1}^{i}u_j)(a-a)\}+\phi_{s_1}(1)a \\
= \ & a
\end{aligned}
$$

(この性質は，正規性を保つファジィ測度で成立)

7.2.2 一般化交換律

ショケ積分の定義により，一般化交換律は成り立つ．

7.2.3 単調性

$a_i \geq b_i, \forall i$ ならば，

$$
U_\xi^{(w_1,\ldots,w_n)}(a_1,\ldots,a_n) \geq U_\xi^{(w_1,\ldots,w_n)}(b_1,\ldots,b_n) \qquad (35)
$$

を示す．まず，$a_i = b_i, \forall i \in X \setminus \{j\}, a_{j-1} \geq a_j \geq b_j$の場合を考える．

$$
\begin{aligned}
& U_\xi^{(w_1,\ldots,w_n)}(a_1,\ldots,a_n) - U_\xi^{(w_1,\ldots,w_n)}(b_1,\ldots,b_n) \\
= \ & \chi(\xi,u_1)(a_1-a_2)+\ldots+\chi(\xi,\textstyle\sum_{i=1}^{j-1}u_i)(a_{j-1}-a_j) \\
& +\chi(\xi,\textstyle\sum_{i=1}^{j}u_i)(a_j-a_{j+1})+\ldots\chi(\xi,1)a_n \\
- \ & [\chi(\xi,u_1)(b_1-b_2)+\ldots+\chi(\xi,\textstyle\sum_{i=1}^{j-1}u_i)(b_{j-1}-b_j) \\
& +\chi(\xi,\textstyle\sum_{i=1}^{j}u_i)(b_j-b_{j+1})+\ldots\chi(\xi,1)b_n] \\
= \ & \{\chi(\xi,\textstyle\sum_{i=1}^{j}u_i)-\chi(\xi,\sum_{i=1}^{j-1}u_i)\}(a_j-b_j) \\
& (\chi(\xi,\textstyle\sum_{i=1}^{j}u_i)\geq\chi(\xi,\sum_{i=1}^{j-1}u_i)\text{ より}, \\
& \text{またはファジィ測度の単調性より}) \\
\geq \ & 0
\end{aligned}
$$

$a_j > a_{j-1} \geq b_j$となるa_jに対しても，上記のプロセスを繰り返し適用することで，1つの項に関する単調性を得られる．1つの項にたいして大小関係がわかれば，大小関係の推移性より全体の単調性が得られる．

7.2.4 ξに関する単調性

$\xi_1 \geq \xi_2$とする．

$$
\begin{aligned}
& U_{\xi_1}^{(w_1,\ldots,w_n)}(a_1,\ldots,a_n) - U_{\xi_2}^{(w_1,\ldots,w_n)}(a_1,\ldots,a_n) \\
= \ & \textstyle\sum_{i=1}^{n}[\{\chi(\xi_1,\sum_{j=1}^{i}u_j)-\chi(\xi_2,\sum_{j=1}^{i}u_j)\}\{a_i-a_{i+1}\}] \\
& (\text{ただし}, a_{n+1}=0) \\
& (\xi_1\geq\xi_2\text{より}\chi(\xi_1,\textstyle\sum_{j=1}^{i}u_j)\geq\chi(\xi_2,\sum_{j=1}^{i}u_j)\text{なので}) \\
\geq \ & 0
\end{aligned}
$$

7.2.5 クリーネ律

$\xi = 0.5$のとき，平均値になる．したがって，$U_{0.5}(a_1,\ldots,a_n)$は，$\sum a_i = 1$のとき，$a_1,\ldots,a_n$の平均値$1/n$になる．ξの単調性より，$\xi \geq 0.5$ならば，$U_\xi(a_1,\ldots,a_n) \geq 1/n$．同様に，$(1-\xi) \leq 0.5$なので，$U_{1-\xi}(b_1,\ldots,b_n) \leq 1/n$．よって，$\xi \geq 0.5$ならば，$U_\xi(a_1,\ldots,a_n) \geq U_{1-\xi}(b_1,\ldots,b_n)$．

7.2.6 双対なオペレータ（一般化ド・モルガン律）

この性質は，χの双対性に依存している．

$$
\begin{aligned}
& 1 - V_{1-\xi}(((w_1,1-a_1),\ldots,(w_n,1-a_n))) \\
= \ & 1-\textstyle\sum_{i=n}^{1}[\{\chi(1-\xi,\sum_{j=n}^{i}u_j)\}\{(1-a_i)-(1-a_{i-1})\}] \\
& (\text{ただし}, a_0 = 1) \\
& (\chi(\xi,u) = 1-\chi(1-\xi,1-u)\text{を適用すると}) \\
= \ & 1-\textstyle\sum_{i=1}^{n}[\{1-\chi(\xi,\sum_{j=1}^{i-1}u_j)\}\{a_{i-1}-a_i\}] \\
= \ & 1-\textstyle\sum_{i=1}^{n}(a_{i-1}-a_i)+\sum_{i=1}^{n}\chi(\xi,\sum_{j=1}^{i-1}u_j)(a_{i-1}-a_i) \\
= \ & 1-a_0+a_n+\chi(\xi,\textstyle\sum_{j=1}^{0}u_j)(a_0-a_1) \\
& +\textstyle\sum_{i=2}^{n}\chi(\xi,\sum_{j=1}^{i-1}u_j)(a_{i-1}-a_i) \\
= \ & a_n+\textstyle\sum_{i=1}^{n-1}\chi(\xi,\sum_{j=1}^{i}u_j)(a_i-a_{i+1}) \\
= \ & V_\xi(((u_1,a_1),\ldots,(u_n,a_n))) \\
= \ & V_\xi(((w_1,a_1),\ldots,(w_n,a_n)))
\end{aligned}
$$

7.2.7 bagの分割，統合

$$
\begin{aligned}
& a_i = a_{i+1}\text{ならば} \\
& V_\xi(((w_1,a_1),(w_2,a_2),(w_3,a_3),\ldots,(w_n,a_n))) \\
= \ & \chi(\xi,u_1)(a_1-a_2)+\ldots+\chi(\xi,\textstyle\sum_{j=1}^{i}u_j)(a_i-a_{i+1}) \\
& +\chi(\xi,\textstyle\sum_{j=1}^{i+1}u_j)(a_{i+1}-a_{i+2})+\ldots+\chi(\xi,1)a_n \\
= \ & \textstyle\sum_{k=1}^{i-1}[\chi(\xi,\sum_{j=1}^{k}u_j)(a_k-a_{k+1})] \\
& +\chi(\xi,\textstyle\sum_{j=1}^{i}u_j)(a_i-a_{i+1})+\chi(\xi,\sum_{j=1}^{i+1}u_j)(a_{i+1}-a_{i+2}) \\
& +\textstyle\sum_{k=i+2}^{n}[\chi(\xi,\sum_{j=1}^{k}u_j)(a_k-a_{k+1})] \\
= \ & V_\xi(((w_1,a_1),\ldots,(w_{i-1},a_{i-1}),(w_i+w_{i+1},a_i+1), \\
& (w_{i+2},a_{i+2}),\ldots,(w_n,a_n)))
\end{aligned}
$$

参考文献

[1] H.Dyckhoff and W.Pedrycz, Generalized Means as Model of Compensative Connectives, Fuzzy Sets and Systems 14, 143-154,1984.

[2] D.Dubois and H.Prade, A Review of Fuzzy Set Aggregation Connectives, Information Science, 69, 85-121,1985.

[3] R. R. Yager, Connectives and Quantifiers in Fuzzy Sets, Fuzzy Sets and Systems 40, 39-75,1991.

[4] R. R. Yager, MAN and MOM Bag Operators for Aggregation, Information Science, 69, 259-273,1993.

[5] 高萩栄一郎, 重みと相互作用を表す関数によるファジィ測度の割り当て, 第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 日本ファジィ学会,949-952, 東京,1996.

[6] 向殿政男,「ファジィ論理」(講座ファジィ 4), 日刊工業新聞社,1993.

[7] 塚本弥八郎, 不確実性を伴う意思決定問題のファジィ測度論による分析,「ファジィ理論と人文社会科学」(講座ファジィ 14), 日刊工業新聞社,1994.

[問い合わせ先]
高萩栄一郎 (専修大学商学部)
E-MAIL:takahagi@isc.senshu-u.ac.jp
〒214-80 川崎市多摩区東三田2-1-1 FAX:044-911-1241

FRF3-2

ファジィ測度によるFCR法 -逆FCR法の存在，多項目への拡張-
An FCR method using fuzzy measure

高萩栄一郎
Eiichiro TAKAHAGI
専修大学商学部
SENSHU UNIV.

FCR-method using fuzzy measures is an integration method to concurrent rating scores for exclusive items. The two scores, $\alpha, \beta, \alpha+\beta \neq 1$, are integrated to one score using the inverse mapping of the Tukamoto's ϕ_s transformation and ξ that indicate the degree of "fitting the two items or not." Lastly, we show the existence of the inverse FCR-method and the extension method to many items.

1 はじめに

ファジィ多項目並列評定法(FCR法:Fuzzy-set Concurrent Rating Method)は，小田ら[1][2]により提案されたものであり，図1のような2項目並列に表明された評定値(β, α)を足して1になる値(統合値b, a)と「どちらともいえる－どちらともいえない」の値(ξ)を求める方法である．ξは，図2のように，1に近づけば,「どちらといえる」，0に近づけば,「どちらともいえない」ことを意味する．また，逆の変換，逆FCR法を提案し，また3項目以上の変換も考察する．

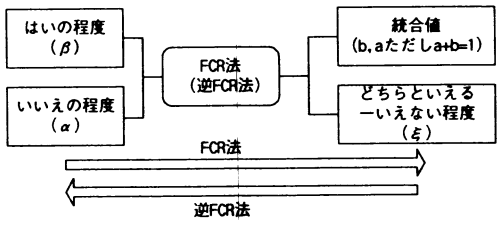


図 1: 本手法の概略

以下では，$\alpha, \beta, a, b, \xi \in (0,1)$で考察する．0と1を含む場合は，別途議論する．また，bを統合値と呼び，$b = T(\beta, \alpha)$という関数で求めるものとする．このような関数Tは，いろいろ存在するが，ここでは，ファジィ測度による方法のみを使う（他の方法および比較は，[7]を参照）．また，どちらとも言える－言えないの度合いξは，$\xi(\beta, \alpha)$で求めるものとする．

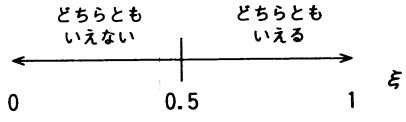


図 2: ξの意味

2 ファジィ測度によるFCR法

「はい」と「いいえ」の程度の和が1にならないものを扱うので，$\mu(\{\text{はい}\}) = \beta, \mu(\{\text{いいえ}\}) = \alpha$とおき，$\mu\{\text{はい}, \text{いいえ}\} = 1$と考えれば，多くの場合，

$$\mu(\{\text{はい}\}) + \mu(\{\text{いいえ}\}) \neq \mu(\{\text{はい}, \text{いいえ}\}) = 1 \quad (1)$$

となる．これは，ファジィ測度である．ファジィ測度の相互作用(FCR法では,「どちらともいえる-いえない」の度合い)を表すものとして，λファジィ測度を用いる．

$$\mu(\{\text{はい}, \text{いいえ}\}) = \mu(\{\text{はい}\}) + \mu(\{\text{いいえ}\}) + \lambda\mu(\{\text{はい}\})\mu(\{\text{いいえ}\})$$

$$-1 < \lambda < 0 \quad \mu(\text{はい}) + \mu(\text{いいえ}) > 1 \quad (2)$$

$$\lambda = 0 \quad \mu(\text{はい}) + \mu(\text{いいえ}) = 1 \quad (3)$$

$$0 < \lambda \quad \mu(\text{はい}) + \mu(\text{いいえ}) < 1 \quad (4)$$

(2)で「どちらともいえる」(3)で定和状態，(4)で「どちらともいえない」ことを示している．したがって，

$$\lambda = \frac{1-\alpha-\beta}{\alpha\beta} \text{ または } \quad s = \lambda + 1 \quad (5)$$

を「どちらともいえる－いえない」の度合いにすることができる．a, bを求めるには，塚本[5]のϕ_s変換を使い，

$$\phi_s : [0,1] \to [0,1],\ s \in [0, +\infty] \quad (6)$$

$$\phi_s(u) = \begin{cases} [u] & \text{if } s = 0 \\ u & \text{if } s = 1 \\ 1 - [1-u] & \text{if } s = +\infty \\ (s^u - 1)/(s-1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{where } [u] = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 < u \leq 1 \\ 0 & \text{if } u = 0 \end{cases}$$

$\alpha = \phi_s(a), \beta = \phi_s(b)$ となるa, bを求める．ϕ_s変換は，

$$\phi_s(c) = \phi_s(a) + \phi_s(b) + \lambda\phi_s(a)\phi_s(b) \quad (8)$$

$$\forall a, b, c \in (0,1), a + b = c, \forall \lambda \in (-1, +\infty)$$

という関係が成り立っているのでλファジィ測度に対応している．したがって，ϕ_s変換の逆関数[5]を用い，

$$\phi_s^{-1} \ : \ (0,1) \to (0,1) \quad (9)$$

$$\phi_s^{-1}(v) = \begin{cases} \frac{\log(1-v+s\times v)}{\log(s)} & s \neq 1 \text{ のとき} \\ v & s = 1 \text{ のとき} \end{cases} \quad (10)$$

$$(T(\beta, \alpha) =) b = \phi_s^{-1}(\beta),\ a = \phi_s^{-1}(\alpha) \quad (11)$$

として，a, bを求める．sやλは，$s \in [0, +\infty)$や$\lambda \in [-1, +\infty)$に値を取るので扱いにくいので次のようにする．

$$\xi(\beta, \alpha) = 1/(1 + \sqrt{\lambda + 1}) = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1-\alpha-\beta}{\alpha\beta} + 1}} \quad (12)$$

3 ファジィ測度によるFCR法の性質

1. 強意の単調性

$\alpha^1 = \alpha^2, \beta^1 > \beta^2$ならば$T(\beta^1, \alpha^1) > T(\beta^2, \alpha^2)$

$\alpha^1 < \alpha^2, \beta^1 = \beta^2$ならば$T(\beta^1, \alpha^1) < T(\beta^2, \alpha^2)$

2. 対称性

$$T(\beta,\alpha)=b \text{ならば} \quad T(\alpha,\beta)=1-b \tag{13}$$

3. 等値応答

$$T(\beta,\beta)=0.5,\forall\beta\in(0,1) \tag{14}$$

4. 定和応答

$$T(\beta,1-\beta)=\beta,\forall\beta\in(0,1) \tag{15}$$

5. 双対性

$$T(\beta,\alpha)=1-T(1-\beta,1-\alpha),\forall\alpha,\beta\in(0,1) \tag{16}$$

強意の単調性は，βが増大またはαが減少すれば，統合値は増大するという性質である．

対称性は，αとβを入れ換えたとき，統合値は，$1-b$になるという性質である．

等値応答は，$\alpha=\beta$を与えたとき，統合値bが0.5になるかという性質である．

定和応答は，$\alpha+\beta=1$を与えたとき，すなわち，定和的な値を与えたとき，$\alpha=a,\beta=b$になるかという性質である．別の言い方をすれば，$\alpha+\beta=1$と答えさせたときの拡張になっているかという性質である．

双対性は，αやβが，0付近の扱いと，1付近の扱いが同じであるかを意味している．この性質は，ϕ_s変換の双対性$\phi_{1/(1+\sqrt{\xi})}(u)=1-\phi_{1/(1+\sqrt{1-\xi})}(1-u)$による（なお，[6][7]では，この性質を対称性と呼んでいる）．

4 逆FCR法の存在

通常のFCR法とは逆に，$a,b(a+b=1)$とξを与え，α,βを求めることを考える．すなわち，逆FCR法とは，定和的な回答(a,b)と，「どちらともいえる－いえない」の度合いξを与え，α,βを求めることである．しかしながら，必ずしも，[4]のファジィ推論によるFCR法，単純スコア法，逆転項目法では存在しない[7]．

各FCR法の逆が存在するか否かは，各FCR法で人が回答していると仮定したとき，すべてのa,b,ξをαとβで表現できるか否かを示している．

各手法の逆が存在するかいなかは，FCR法の関数gを

$$g:(0,1)\times(0,1)\to(0,1)\times(0,1) \tag{17}$$

$$g(\beta,\alpha)=(T(\beta,\alpha),\xi(\beta,\alpha)) \tag{18}$$

としたとき，gの逆関数g^{-1}が存在するか否かである．具体的には，関数gが全単射であるか否かである．全単射であれば，すべてのa,b,ξをαとβで表現できる．

ファジィ測度による方法は，ϕ_s変換とϕ_s^{-1}変換が逆写像の関係になっているので，成り立っている．

5 多項目への拡張

前節までは，「はい」，「いいえ」の2項目であった．本節では，n項目へ拡張する．例えば，ある対象を評価するとき，n個の$(0,1)$で回答したとき，合計が1になるように変換し，なお，「どれともいえる-いえない度合い」ξを求めるものである．

$\beta_i\in(0,1),i=1,\ldots,n$を足して1にならない回答とし，$b_i\in(0,1),i=1,\ldots,n,\sum_i b_i=1,\xi\in(0,1)$とする．

$$z=\phi_s^{-1}(\beta_1)+\phi_s^{-1}(\beta_2)+\ldots+\phi_s^{-1}(\beta_n) \tag{19}$$

$\phi_s^{-1}(\beta)$は，sに関して強意に単調増加であるので，sを適当に変化させることにより，$z=1$となるsを求めることができる．

ξは，すべての項目の「どれともいえる-いえない度合い」であって，個別の2項目の「どちらともいえる-いえない度合い」を表すことはできない．

場合	β	α	b	a	ξ
a	$\beta=1$	$\alpha=1$	0.5	0.5	1
b	$\beta=1$	$\alpha\in(0,1)$	1	0	1
c	$\beta=1$	$\alpha=0$	1	0	0.5
d	$\beta=0$	$\alpha\in(0,1)$	0	1	C
e	$\beta=0$	$\alpha=0$	0.5	0.5	0

表 1: βまたはαが0または1のときのb,a,ξ

6 0と1の問題

前節まで，$\beta,\alpha,\xi\in(0,1)$として扱ってきた．α,βが0または1のとき，どのようなb,a,ξを割り当てるべきか表1に示す．ただし，β,αが逆になる場合は，b,aを入れ換えればよいので，省略した．

b, c, eは，それぞれ極値を取ったもので，自然なものであろう．しかし，aの場合，$\beta=\alpha,\beta\to1$としたものである．これは，$\beta=1,\alpha\to1$としたときの値$(b=1,a=0,\xi=1)$とは，異なる．eも同様の問題を持つ．

人間の表現に関してあいまいさがある場合，0と1のクリスプな表現を排除して，$(0,1)$の開区間で考えた方がよいのではないだろうか？ すなわち，$(\beta=1,\alpha=0)$，$(\beta=0,\alpha=1),(\beta,\alpha\in(0,1))$の3つの場合に分けて考えるのである．前2つが，クリスプな場合で，最後の1つがファジイな場合である．

7 おわりに

ファジィ測度によるFCR法は，§3の性質や逆FCR法の存在，多項目への拡張が可能な方法である．[7]で示した，ファジィ推論による方法，単純スコア法，逆転項目平均法は，どれかを満たさない．特に，逆FCR法の存在は，その中でもファジィ測度による方法のみが満たす．しかしながら，§6のように，$[0,1]$に拡張したとき問題がおこる．

参考文献

[1] 小田哲久，ファジィ多項目評定法の特徴について，日本経営システム学会誌，Vol.12,No.1,pp.23-32,1995.

[2] 林文俊，小田哲久,「ファジィ理論による性格特性5因子モデル(FFM)の検討,心理学研究, Vol.66, No 6,401-408,1996.

[3] 小田哲久,「FCR法(ファジィ多項目並列評定法）の心理学的応用」，第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,133-136,東京,1996.

[4] 小田哲久,「FCR法(ファジィ多項目並列評定法）の原理とその応用」，3学会共催研究発表会(JSQC第53回中部支部14回)発表要旨,81-84,名古屋,1996.

[5] 塚本弥八郎，不確実性を伴う意思決定問題のファジィ測度論による分析,「ファジィ理論と人文社会科学」(講座ファジィ 14)，日刊工業新聞社，1994.

[6] 高萩栄一郎,ファジィ測度によるFCR法(ファジィ多項目評定法),第1回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論文集,大阪,41-44,1996.

[7] 高萩栄一郎,さまざまなFCR法の特徴と比較,第7回ワークショップ講演論文集,日本ファジィ学会ノンエンジニアリングファジィ研究会,蒲郡,60-63,1997.

[問い合わせ先]

高萩栄一郎 (専修大学商学部)

E-MAIL:takahagi@isc.senshu-u.ac.jp

〒214-80 川崎市多摩区東三田2-1-1 FAX:044-911-1241

FRF3-3

ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分と微分形式の積分

Multilinear Fuzzy Integral of Vector Valued Functions and Integral of Differential Forms

松下　裕
Yutaka Matsushita
清水建設(株) 和泉研究室
Izumi Research Institute, Shimizu Corporation

Abstract: In this paper, we first characterize the multilinear fuzzy integral of vector valued functions as a multilinear form with the measure and the attainment degrees of attributes estimated by the different coordinate systems. Next, we express it by the summation of the integrals of differential forms on a bounded closed domain in order to clear up that the value is not dependent on selections for a coordinate system (Proposition 4.1). In result, it follows that the functional corresponding to this fuzzy integral can be extended to a map of a cartesian product of several differential form spaces to a smooth function space (Corollary).

1. はじめに

ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分は，多重線型効用関数を特徴づける写像をベクトル変数に拡張したものであり，当然，積分値は座標に依存しない量である[1]。しかし，これを(4)式で表した場合，このことが見えにくくなる。本稿では，ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分をユークリッド空間中の有界閉領域上の微分形式の積分の和として表示することにより，この問題の解決を図るとともに，このファジィ積分に対する一つの拡張を試みる。

2. ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分

属性全体の集合を$N=\{1,...,n\}$とし，Nの部分集合を$I=\{i_1,\cdots i_r\}\,(i_1<\cdots<i_r)$ $J=\{j_1,\cdots j_r\}\,(j_1<\cdots<j_r)$とする；また，$V$を実数体$\boldsymbol{R}$上の$n$次元ベクトル空間，$V^*$を$V$の双対空間とする；$(e_1,\cdots,e_n)$を$V$の基底，$(e_1^*,\cdots,e_n^*)$をその双対基底とする。

定義 2.1. 集合関数$\mu: 2^N\to[0,\infty)$が次を満たすとき，μを2^N上のファジィ測度という:

(i) $\mu(\varnothing)=0$.

(ii) $A,B\in 2^N, A\subseteq B \Rightarrow \mu(A)\le\mu(B)$.

μのメビウス反転μ^Mは以下で定義される:

$$\mu^M(A):=\sum_{B\subseteq A}(-1)^{|A-B|}\mu(B).$$

多重線型効用関数を特徴づける写像

$$\Phi(h_1,\cdots,h_n)=\sum_{i=1}^n h_i g_{\{i\}}+\cdots$$
$$+\sum_{|I|=r}h_{i_1}\cdots h_{i_r}g_I+\cdots+h_1\cdots h_n g_N$$

が各変数h_iに関して単調増加関数であるならばそのときに限り，各係数g_Iはファジィ測度μのメビウス反転$\mu^M(I)$と等しくなる[1]。ここで，$(h_1,\cdots,h_n)$をN上の単純関数$h_1\chi_{\{1\}}+\cdots+h_n\chi_{\{n\}}$と同一視すれば，汎関数$\Phi$は単純関数のファジィ積分として表示される。

定義2.2. 実数値単純関数の多重線型ファジィ積分とは次で表示されるものである：

$$(ML)\int f d\mu:=\sum_{I\subseteq N}f^p(I)\mu^M(I),\quad f^p(I)=\prod_{i\in I}h_i.$$

さらに，Φは，その特徴的な性質を保存したままでベクトル変数の写像$\hat{\Phi}$に拡張される[1]:

$$\hat{\Phi}(v_1,\cdots,v_n)=\left\langle\sum_{i=1}^n v_i\middle|\sum_{j=1}^n g_{\{j\}}e_j^*\right\rangle_1+\cdots$$
$$+\left\langle\sum_{|I|=r}v_{i_1}\wedge\cdots\wedge v_{i_r}\middle|\sum_{|J|=r}g_J e_{j_1}^*\wedge\cdots\wedge e_{j_r}^*\right\rangle_r+\cdots$$
$$+\left\langle v_1\wedge\cdots\wedge v_n\middle|g_N e_1^*\wedge\cdots\wedge e_n^*\right\rangle_n,\qquad(1)$$

ここに，右辺第2段は$\wedge_r V$ (rベクトル空間)と$\wedge^r V$ (r形式の空間)の間の内積であり

$$\left\langle v_{i_1}\wedge\cdots\wedge v_{i_r}\middle|e_{j_1}^*\wedge\cdots\wedge e_{j_r}^*\right\rangle_r=\det\left(e_{j_s}^*(v_{i_t})\right)$$

で定義される。これは，ベクトル$v_{i_1},\cdots,v_{i_r}$で張られるr次元平行面体の$(e_{j_1}^*,\cdots,e_{j_r}^*)$方向の体積である。従って，$g_J e_{j_1}^*\wedge\cdots\wedge e_{j_r}^*$は体積測度と解釈される。

例 2.1. Vの基底として

$$(v_1,\cdots,v_n)=(f_1,\cdots,f_n)^t(h_1,\cdots,h_n)\ ^{1)}\qquad(2)$$

となるものを選定し，内積の表示に基底$(e_1,\cdots,e_n)$，$(f_1,\cdots,f_n)$のいずれを用いても値が変わらないことを示す。両者の間には，n次の正則行列Pにより，$(f_1,\cdots,f_n)=(e_1,\cdots,e_n)P$なる関係があるものとする。このとき，双対基底間には，$(e_1^*,\cdots,e_n^*)=(f_1^*,\cdots,f_n^*)^tP$

1) 記号^{t}は転置行列を表す記号。以下多用する。

なる関係があるから，

$$f_{i_1}\wedge\cdots\wedge f_{i_r}=\sum_{j_1<\cdots<j_r}\det(P_{J,I})e_{j_1}\wedge\cdots\wedge e_{j_r},$$

$$e^*_{j_1}\wedge\cdots\wedge e^*_{j_r}=\sum_{i_1<\cdots<i_r}\det(P_{J,I})f^*_{i_1}\wedge\cdots\wedge f^*_{i_r}$$

が成り立つ。従って，$v_{i_1}\wedge\cdots\wedge v_{i_r}=h_{i_1}f_{i_1}\wedge\cdots\wedge h_{i_r}f_{i_r}$ より，$\left\langle v_{i_1}\wedge\cdots\wedge v_{i_r}\middle| g_J e^*_{j_1}\wedge\cdots\wedge e^*_{j_r}\right\rangle_r=\det(P_{J,I})h_{i_1}\cdots h_{i_r}g_J$ であるから，いずれの基底でも値は変わらない。ただし，$\det(P_{J,I})$ は，$P=(p_{ij})$ において，要素の行，列の番号をそれぞれ集合 J,I から取り出して作った r 次の小行列式である。任意の基底に対しても，同様にして内積の値は変わらないことが示される。結果として，拡張された写像 $\hat{\Phi}$ は基底に依存しないことが分かる。

例2.1より，この写像の意味は属性の達成度および(体積)測度を実数値関数として計測するとき，両者の座標が異なる場合の多重線型式ということになる；実際，(2)式より属性の達成度は基底 $(f_1,\cdots,f_n)$ の線型結合で表されるが，(1)式より測度は基底 $(e^*_1,\cdots,e^*_n)$ の線型結合で表される。実数変数の多重線型式は両方の基底が互いに他の双対基底になっている場合である。

順序づけられたベクトルの組 $(v_1,\cdots,v_n)$ は対応 $(v_1,\cdots,v_n)\mapsto v_1\chi_{\{1\}}+\cdots+v_n\chi_{\{n\}}$ により N 上のベクトル値単純関数 v と見なせるから，$\hat{\Phi}$ は v の汎関数となり，$\hat{\Phi}$ も Φ と同様にしてファジィ積分表示できる。これを**ベクトル値単純関数の多重線型ファジィ積分**と呼ぶ。以下，ベクトル値関数と(2)式の関係を説明し，このファジィ積分を簡単な式で表示する。

$(v_1,\cdots,v_n)$ を基底 $(e_1,\cdots,e_n)$ を用いて

$$(v_1,\cdots,v_n)=(e_1,\cdots,e_n)\begin{bmatrix}\xi_{11}&\cdots&\xi_{1n}\\ \vdots&&\vdots\\ \xi_{n1}&\cdots&\xi_{nn}\end{bmatrix}\quad(\xi_{ij}\in\boldsymbol{R})\qquad(3)$$

と行列 $X=(\xi_{ij})$ で表示する。ここで，(2)式を用いれば，行列 X は P により $X=P'(h_1,\cdots,h_n)$ と表される。すなわち，属性の達成度のベクトル表示は，$(f_1,\cdots,f_n)$ の線型結合を $(e_1,\cdots,e_n)$ で表すために必要としたものである。行列 X を用いれば，このファジィ積分は定義2.2と同様な形で表示される：

$$(ML)\int v\,d\mu:=\sum_{I\subset N}v^{\rho}(I)\mu^{M}(I),\quad v^{\rho}(I)=\sum_{|J|=r}\det\left(X_{I,J}\right),\qquad(4)$$

ここに，$\det(X_{I,J})$ の意味は例2.1と同様である。

しかし，(4)式右辺の表示ではこのファジィ積分の値が基底の選択に依存しないことが見えなくなる。実際，基底を変換したとき，それに伴い各行列式の値は変わるが，メビウス反転の値は変わらない。(ただし，(3)式の行列を V 上の線型変換 φ と対応させれば，(i.e., $\varphi(e_i)=v_i$ とする) 線型変換の行列式は基底の変換に関して不変だから，この問題は解決される。)

3. R^n 上の微分形式 [2]

$\boldsymbol{R}^n$ の点 p の座標を $(x_1,\cdots,x_n)$ とする；$C^\infty(\boldsymbol{R}^n)$ を $\boldsymbol{R}^n$ 上の C^∞ 級の関数全体の集合とする。いま，点 p に対して $(dx_{i_1}\wedge\cdots\wedge dx_{i_r})_{1\le i_1<\cdots<i_r\le n}$ を基底とする r 形式全体の空間を $\wedge^r T^*_p\boldsymbol{R}^n$ とする。その元は次のように書ける：

$$\omega_p=\sum_{i_1<\cdots<i_r}f_I(p)dx_{i_1}\wedge\cdots\wedge dx_{i_r}.$$

各係数 $f_I(p)$ が p の関数として C^∞ 級であるような r 形式値関数 ω を $\boldsymbol{R}^n$ 上の r 次の**微分形式**という。これらの元全体がなす空間を $A^r(\boldsymbol{R}^n)$ とすると次のようになる：

$$A^r(\boldsymbol{R}^n)=\{\ \omega\mid \boldsymbol{R}^n\to\bigcup_{p\in\boldsymbol{R}^n}\wedge^r T^*_p\boldsymbol{R}^n,\ C^\infty\text{級写像}\ \}.$$

例3.1. $\boldsymbol{R}^n$ 上の微分形式として，0次のもの $=\boldsymbol{R}^n$ 上の C^∞ 級関数 f，1次のもの $=$ その全微分 df である。

点 p を始点とするベクトル全体の空間を $T_p\boldsymbol{R}^n$ $(=\boldsymbol{R}^n)$ と書いて**接空間**と呼び，その元を点 p における**接ベクトル**と呼ぶ。これは

$$X_p=a_1\frac{\partial}{\partial x_1}+\cdots+a_n\frac{\partial}{\partial x_n}$$

と表示され，C^∞ 級関数 f に対する $(a_1,\cdots,a_n)$ 方向の微分という意味をもつ。実際，次のように記述できる：

$$X_p(f)=a_1\frac{\partial f}{\partial x_1}(p)+\cdots+a_n\frac{\partial f}{\partial x_n}(p).$$

φ を $\boldsymbol{R}^n$ から $\boldsymbol{R}^n$ への微分同相写像とし，$q=\varphi(p)$, $q=(y_1,\cdots,y_n)$ とする。このとき $T_p\boldsymbol{R}^n\to T_{\varphi(p)}\boldsymbol{R}^n$ の線型写像を

$$d\varphi_p\left(\frac{\partial}{\partial x_1},\cdots,\frac{\partial}{\partial x_n}\right)=\left(\frac{\partial}{\partial y_1},\cdots,\frac{\partial}{\partial y_n}\right)\begin{bmatrix}\frac{\partial y_1}{\partial x_1}&\cdots&\frac{\partial y_1}{\partial x_n}\\ \vdots&&\vdots\\ \frac{\partial y_n}{\partial x_1}&\cdots&\frac{\partial y_n}{\partial x_n}\end{bmatrix}$$

で定義する。ここに $J(y/x)=(\partial y_i/\partial x_j)$ はヤコビ行列である。これを写像 φ の p における**微分**という。

例3.2. φ の微分は1変数関数の微分の概念の拡張である。1変数関数の微分は $dy=f'(p)dx$ のように微小要素 dx に対する線型写像であるが，$d\varphi_p$ も次に示すように微小要素に対する線型写像である：

$$\begin{pmatrix}dy_1\\ \vdots\\ dy_n\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}\partial y_1/\partial x_1&\cdots&\partial y_1/\partial x_n\\ \vdots&&\vdots\\ \partial y_n/\partial x_1&\cdots&\partial y_n/\partial x_n\end{bmatrix}\begin{pmatrix}dx_1\\ \vdots\\ dx_n\end{pmatrix}.$$

$d\varphi_p$ を用いて，線型写像 $\varphi^*: \wedge^r T^*_{\varphi(p)}\boldsymbol{R}^n \to \wedge^r T^*_p\boldsymbol{R}^n$ を

$$\left\langle X_{i_1}\wedge\cdots\wedge X_{i_r}\middle|\varphi^*(\omega(q))\right\rangle_r = \left\langle d\varphi_p(X_{i_1})\wedge\cdots\wedge d\varphi_p(X_{i_r})\middle|\omega(q)\right\rangle_r \quad (5)$$

で定義する。なお $X_{i_r}\in T_p\boldsymbol{R}^n$ $(i=1,...,r)$ である。これより $A^r(\boldsymbol{R}^n)$ から $A^r(\boldsymbol{R}^n)$ への外積に対する準同型写像 φ^* が誘導される。$\varphi^*\omega$ を φ による引き戻しと呼ぶ。実際，$\omega_1, \omega_2\in A^r(\boldsymbol{R}^n)$ に対して

$$\varphi^*(\omega_1+\omega_2)=\varphi^*(\omega_1)+\varphi^*(\omega_2),$$
$$\varphi^*(\omega_1\wedge\omega_2)=\varphi^*(\omega_1)\wedge\varphi^*(\omega_2)$$

が成り立つ。なお，φ^* は次のように局所表示される：

$$\varphi^*\omega(p)=\sum_{j_1<\cdots<j_r}\sum_{i_1<\cdots<i_r} f_J(q)\det J(y/x)_{J,I}\,dx_{i_1}\wedge\cdots\wedge dx_{i_r} \quad (6)$$

n 次元の微分形式 $f_N(q)dy_1\wedge\cdots\wedge dy_n$ の積分を

$$\int_{\boldsymbol{R}^n}\omega = \int_{\boldsymbol{R}^n} f_N(q)\,dy_1\cdots dy_n \quad (7)$$

で定義する。この値が座標の取り方に依存しないことを示す。前と同様に微分同相な座標変換 φ が与えられているとする。このとき，右辺の積分に関しては変数変換の公式から

$$\int_{\boldsymbol{R}^n} f_N(q)\,dy_1\cdots dy_n=\int_{\boldsymbol{R}^n} f_N(\varphi(p))\left|\det J(y/x)\right|dx_1\cdots dx_n$$

が成り立つ；微分形式に関しては引き戻しにより

$$\varphi^*\omega(p)=f_N(\varphi(p))\,\det J(y/x)\,dx_1\wedge\cdots\wedge dx_n$$

が成り立つ。従って，φ が座標系の向きを変えない変換であるならば，$\int_{\boldsymbol{R}^n}\omega = \int_{\boldsymbol{R}^n}\varphi^*\omega$ となり，(7)式の定義により積分の値は変わらないことが分かる。ここに，座標系の向きとは，例えば3次元のとき，右手系を正とすると左手系が負になるということである。

例 3.3. 微分形式の積分は有界閉領域 D 上でも定義される。この場合，引き戻しとの関係は

$$\int_{\varphi(D)}\omega = \int_D\varphi^*\omega$$

となる。また，$\varphi(D)$ 上の積分は $A^n(\boldsymbol{R}^n)$ の双対空間の元と見なせるから，$\int_{\varphi(D)}\omega=\langle\varphi(D),\ \omega\rangle$ と記すことができる。このとき，上の関係は次のようになる：

$$\langle\varphi(D),\ \omega\rangle=\langle D,\ \varphi^*\omega\rangle. \quad (8)$$

4. 写像 $\hat{\Phi}$ の微分形式の積分による表示

最初に，$\boldsymbol{R}^n$ の座標系に対応する基底として $(e_1,\cdots,e_n)$, $(f_1,\cdots,f_n)$ を選んだときの微分形式および座標変換の表示について考える。このように"まっすぐな"座標系を選んだ場合，局所的な座標系と元の大域的な座標系との間に区別は無くなるから，接ベクトルを記述する基底間に次の対応が成り立つ：

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1},\cdots,\frac{\partial}{\partial x_n}\right)\leftrightarrow(e_1,\cdots,e_n),\left(\frac{\partial}{\partial y_1},\cdots,\frac{\partial}{\partial y_n}\right)\leftrightarrow(f_1,\cdots,f_n).\ \mathbf{A}$$

同様にそれらの双対基底についても次が成り立つ：

$$(dx_1,\cdots,dx_n)\leftrightarrow(e_1^*,\cdots,e_n^*),\ (dy_1,\cdots,dy_n)\leftrightarrow(f_1^*,\cdots,f_n^*).\ \mathbf{B}$$

従って，$\boldsymbol{R}^n$ 上の微分形式 $f_I(q)dy_{i_1}\wedge\cdots\wedge dy_{i_r}$ $(\forall q\in\boldsymbol{R}^n)$ は $f_I(q)f_{i_1}^*\wedge\cdots\wedge f_{i_r}^*$ と書ける。$\boldsymbol{R}^n$ 上の座標変換 φ を，座標系に対応する基底の変換によって

$$\varphi:(e_1,\cdots,e_n)=(f_1,\cdots,f_n)\,Q \quad (9)$$

で表せば（Q：正則行列），双対写像 $\varphi^*:(\boldsymbol{R}^n)^*\to(\boldsymbol{R}^n)^*$ は

$$\varphi^*:(f_1^*,\cdots,f_n^*)=(e_1^*,\cdots,e_n^*)\,{}^tQ \quad (10)$$

で表される。ここで，基底の対応 **A**, **B** より，φ とその微分 $d\varphi$ との間に次の対応を考えることができる：

(9)式 $\leftrightarrow d\varphi_p\left(\frac{\partial}{\partial x_1},\cdots,\frac{\partial}{\partial x_n}\right)=\left(\frac{\partial}{\partial y_1},\cdots,\frac{\partial}{\partial y_n}\right)J(y/x)$.

(10)式 $\leftrightarrow d\varphi_q^*(dy_1,\cdots,dy_n)=(dx_1,\cdots,dx_n)\,{}^tJ(y/x)$.

従って $J(y/x)\equiv Q$, $\varphi\equiv d\varphi_p$, $\varphi^*\equiv d\varphi_q^*$ $(\forall p,q\in\boldsymbol{R}^n)$ となる。

上の対応より，ベクトル値関数を双対空間 V^* の基底 $(e_1^*,\cdots,e_n^*)$ で，測度を V の基底 $(e_1,\cdots,e_n)$ で表現する；結果として，(1)式は次のように書き直される：

$$\hat{\Phi}(v_1^*,\cdots,v_n^*)=\sum_{j=1}^n g_{(j)}\left\langle e_j\middle|\sum_{i=1}^n v_i^*\right\rangle_1+\cdots$$
$$+\sum_{|J|=r} g_J\left\langle e_{j_1}\wedge\cdots\wedge e_{j_r}\middle|\sum_{|I|=r} v_{i_1}^*\wedge\cdots\wedge v_{i_r}^*\right\rangle_r+\cdots$$
$$+g_N\left\langle e_1\wedge\cdots\wedge e_n\middle|v_1^*\wedge\cdots\wedge v_n^*\right\rangle_n. \quad (1)'$$

補題 4.1. 向きを保つ座標変換のみを許すならば，

$$\left\langle e_{j_1}\wedge\cdots\wedge e_{j_r}\middle|v_{i_1}^*\wedge\cdots\wedge v_{i_r}^*\right\rangle_r=\int_{D_J}v_{i_1}^*\wedge\cdots\wedge v_{i_r}^*$$

と表示できる。ただし，D_J は $0\le x_{j_1}\le 1,\cdots,0\le x_{j_r}\le 1$ によって得られる r 次元立方体である。

証明 例3.3より右辺は $\left\langle D_J,\ v_{i_1}^*\wedge\cdots\wedge v_{i_r}^*\right\rangle$ と記述できる。そこで，これと左辺の内積が一致すること，およびこれらが向きを保つ座標変換に関して不変であることを示す。まず，内積の左変数の対応については

$$D_J\leftrightarrow e_{j_1},\cdots,e_{j_r}\ \text{の張る}\ r\ \text{次元平行面体}$$

とする。次に，右変数 $v_{i_1}^*\wedge\cdots\wedge v_{i_r}^*$ は，基底 $(f_1^*,\cdots,f_n^*)$ を(2)式と同じように選べば $v_{i_1}^*\wedge\cdots\wedge v_{i_r}^*=h_{i_1}f_{i_1}^*\wedge\cdots\wedge h_{i_r}f_{i_r}^*$ と表示できる。いま，任意の $q\in\varphi(D_J)$ に対して

$$\omega(q)=h_{i_1}\cdots h_{i_r}f_{i_1}^*\wedge\cdots\wedge f_{i_r}^*=h_{i_1}\cdots h_{i_r}dy_{i_1}\wedge\cdots\wedge dy_{i_r}$$

とおく。このもとに両方の内積を計算すれば良いが，このままでは左，右変数の基底が互いの双対基底となっていないので，(6)式によりこれらを引き戻して

$$\varphi^*(\omega(q)) = h_{i_1}\cdots h_{i_r}\sum_{k_1<\cdots<k_r}\det(Q_{I,K})\,e^*_{k_1}\wedge\cdots\wedge e^*_{k_r}$$
$$= h_{i_1}\cdots h_{i_r}\sum_{k_1<\cdots<k_r}\det(Q_{I,K})\,dx_{k_1}\wedge\cdots\wedge dx_{k_r}$$

とする。従って，各内積の値は

$$\left\langle e_{j_1}\wedge\cdots\wedge e_{j_r}\middle| h_{i_1}\cdots h_{i_r}\sum_{k_1<\cdots<k_r}\det(Q_{I,K})\,e^*_{k_1}\wedge\cdots\wedge e^*_{k_r}\right\rangle_r$$
$$= \det(Q_{I,J})\,h_{i_1}\cdots h_{i_r},$$

$$\left\langle D_J,\ \varphi^*(\omega(q))\right\rangle = h_{i_1}\cdots h_{i_r}\int_{D_J}\sum_{k_1<\cdots<k_r}\det(Q_{I,K})\,dx_{k_1}\cdots dx_{k_r}$$
$$= \det(Q_{I,J})\,h_{i_1}\cdots h_{i_r}$$

となり両者は一致する。また，(5), (8)式から明らかに

$$\left\langle e_{j_1}\wedge\cdots\wedge e_{j_r}\middle|\varphi^*(h_{i_1}f^*_{i_1}\wedge\cdots\wedge h_{i_r}f^*_{i_r})\right\rangle_r$$
$$=\left\langle\varphi(e_{j_1})\wedge\cdots\wedge\varphi(e_{j_r})\middle|h_{i_1}f^*_{i_1}\wedge\cdots\wedge h_{i_r}f^*_{i_r}\right\rangle_r$$

$$\left\langle D_J,\ \varphi^*(h_{i_1}f^*_{i_1}\wedge\cdots\wedge h_{i_r}f^*_{i_r})\right\rangle=\left\langle\varphi(D_J),\ h_{i_1}f^*_{i_1}\wedge\cdots\wedge h_{i_r}f^*_{i_r}\right\rangle$$

が成り立つから，両内積は座標変換に関して不変である。なお，両内積の右辺左変数の対応は前と同様に

$\varphi(D_J)\leftrightarrow\varphi(e_{j_1}),\cdots,\varphi(e_{j_r})$ の張る r 次元平行面体

と考えれば良い。 □

この補題を(1)′式の各項に用いれば次が得られる：

命題4.1. 座標系の向きを保つ座標変換のみを許すならば，(1)′式の写像 $\hat{\Phi}$ は次のように表示できる：

$$\hat{\Phi}(v^*_1,\cdots,v^*_n)=\sum_{j=1}^n g_{(J)}\int_{D_{(J)}}\sum_{i=1}^n v^*_i+\cdots+$$
$$\sum_{|J|=r}g_J\int_{D_J}\sum_{|I|=r}v^*_{i_1}\wedge\cdots\wedge v^*_{i_r}+\cdots+g_N\int_{D_N}v^*_1\wedge\cdots\wedge v^*_n.$$

系．上の表示において $\hat{\Phi}$ の各変数 v^*_i $(i=1,\ldots,n)$ を $x\in D_N$ の関数とすることができる。すなわち，$\hat{\Phi}$ を N 上のベクトル値単純関数 v^* の汎関数から，一次微分形式全体の空間の直積 $A^1(D_N)\times\ldots\times A^1(D_N)$ から $C^\infty(D_N)$ への写像に拡張できる。なお，D_N 上の一次微分形式を $v_j(x)=\xi_{1j}(x)dx_1+\cdots+\xi_{nj}(x)dx_n$ $(\xi_{ij}(x)\in C^\infty(D_N)\ (i,j=1,\ldots,n))$ とすれば，拡張された写像の表示に現れる r 次の微分形式は次のようになる：

$$v_{i_1}(x)\wedge\cdots\wedge v_{i_r}(x)=\sum_{j_1<\cdots<j_r}\det\left(\xi_{ij}(x)\right)_{J,I}dx_{j_1}\wedge\cdots\wedge dx_{j_r}.$$

証明　補題4.1の表示は，曲線座標系のように $\boldsymbol{R}^n$ の基底が空間の点 x の関数の場合でも，微小領域でなら成り立つ。そして，(7)式右辺の多変数関数の積分とはこのような微小平行面体の体積とこの小領域の点での関数の値との積の総和の極限であるから，D_N 上の一次微分形式 $v_j(x)$ たちの組に対して $\hat{\Phi}$ を上のように拡張できる。実際，基底を $(e_1,\cdots,e_n)$ とし $\xi_{ij}(x)$ を D_N 上の定数関数とすれば，拡張した $\hat{\Phi}$ を元に帰着できる。写像の値が C^∞ 級関数になることは明らかである。 □

命題4.1の $\hat{\Phi}$ において，係数 g_J $(J\subseteq N)$ をファジィ測度 μ のメビウス反転で表せば，$\hat{\Phi}$ はファジィ積分として表示される。これが向きを保つ座標変換に関して不変な表示であることは先の説明から明らかである。

定義4.1. N 上のベクトル値単純関数の多重線型ファジィ積分は次のように記述される：

$$(ML)\int v\,d\mu:=\sum_{j=1}^n\mu^M(\{j\})\int_{D_{(j)}}\sum_{i=1}^n v^*_i+\cdots$$
$$+\sum_{|J|=r}\mu^M(J)\int_{D_J}\sum_{|I|=r}v^*_{i_1}\wedge\cdots\wedge v^*_{i_r}+\cdots$$
$$+\mu^M(N)\int_{D_N}v^*_1\wedge\cdots\wedge v^*_n.$$

ただし，任意の $J\subseteq N$ に対して，D_J は $0\le x_{j_1}\le 1,\cdots,$ $0\le x_{j_r}\le 1$ で得られる r 次元立方体である。

5. ま と め

本稿では，ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分を，測度と属性の達成度が異なる座標系で評価される場合の多重線型式として特徴づけ，その表示方法として，積分値が座標系に依存しないことを明示するために，微分形式の積分によるものを示した(命題4.1)。さらにこの結果から，このファジィ積分を一次微分形式全体の空間の直積から滑らかな関数空間への写像に拡張した(命題4.1系)。これについて若干解説を加える。いま，属性の結果の集合を $X=X_1\times\ldots\times X_n$ とし，$D_N=X$ と見なせるものとする。このとき，写像が定める関数は結果 $(x_1,\ldots,x_n)\in X$ に対する総合評価値を与えるものである。これは，例えば，属性の達成度の評価に曲線座標系を用いる場合などに有効と考えられるが，具体的な展開については今後の課題としたい。また，定義4.1よりベクトル値関数の多重線型ファジィ積分についてストークスの定理の適用が予想されるが，これも今後の課題とする。

参考文献

[1] 松下　裕：多重線型効用関数の拡張とそのファジィ積分表示，日本ファジィ学会誌 Vol. 7 (1995) pp.602 - 611.

[2] 森田茂之：微分形式の幾何学 1，岩波講座 現代数学の基礎 (1996).

問い合わせ先

〒 100　東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 27F
清水建設(株) 和泉研究室
松下　裕
Tel : 03-3508-8101　　Fax : 03-3508-2196
E-mail：yutaka@ori.shimz.co.jp

ファジィ測度同定法に関する考察

Studies on identification of fuzzy measures

岩本 直子*　　中森 義輝**

Naoko Iwamoto　　Yoshiteru Nakamori

*三菱電機(株)　　**甲南大学

Mitsubishi Electric Co.　　Konan University

Abstract- This paper considers the modeling of subjective evaluation by using the fuzzy measures. Two identification methods are compared and evaluated: one is the convex quadratic programming approach and the other is the iteration procedure proposed by Grabisch.

1　はじめに

人間がある対象を評価するとき，それに関係する複数の属性の個別評価を統合し総合評価をする。近年，このような主観評価のモデリングに対して，属性間の相互作用を表現できるファジィ測度を用いた研究がなされている。

筆者らもアンケート結果のような主観評価データから被験者の主観評価構造を読むためのものさしとしてファジィ測度を適用し，その同定法として２乗誤差の和を最小化する凸２次計画問題を線形相補性問題に帰着し*Lemke*法で解く方法を用いてきた[1]。しかし，この方法では一意的に解が求まる反面，ノイズの影響を強く受けてしまったり，モデル作成時に一度も使われない測度についての扱いがわかりにくいなどの欠点がある。

本論文では，凸２次計画法による同定法と*Grabisch*によって提案されている学習的にファジィ測度を同定していく方法[2]を比較し，それぞれの利点・欠点について考察する。

2　ファジィ測度同定法について

複数の個別評価値とそれらの総合評価値からなるデータセットからファジィ測度を同定する２つの方法について説明する。

2.1　同定法１(*Lemke*法による方法)

まず，凸２次計画問題に帰着するファジィ測度同定法[3]について説明する。m を個別評価項目数，g を求めるべきファジィ測度ベクトル，X を*Choquet*積分モデルのファジィ測度の係数となるデータマトリックス，η を評価者 i の総合評価点を第 i 要素とする列ベクトル，$p = 2^m - 1$ を同定するファジィ測度の個数，$q = m \times (2^{m-1} - 1)$ をファジィ測度の単調性を表す制約条件の数，$A \in R^{q \times p}$ を制約行列とする。

$$D = \frac{1}{2} X^\top X, \quad c = -X^\top \eta \tag{1}$$

とすると，ファジィ測度同定問題は制約条件

$$Ag \geq 0, \quad g \geq 0 \tag{2}$$

の下で目的関数

$$J(g) = \frac{1}{2} g^\top D g + c^\top g \tag{3}$$

を最小化する $g \in R^p$ を求める問題に帰着する。

*Kuhn-Tucker*の条件から，ある $v \in R^q$ が存在して，

$$Dg - A^\top v + c \geq 0, \quad Ag \geq 0, \quad g \geq 0, \quad v \geq 0$$

$$g^\top (Dg - A^\top v + c) = 0, \quad v^\top Ag = 0$$

を満たすものを求めることになる。さらに，

$$\lambda = Dg - A^\top v + c, \quad \theta = Ag$$

$$w = \begin{bmatrix} \lambda \\ \theta \end{bmatrix}, z = \begin{bmatrix} g \\ v \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} c \\ 0 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} D & -A^\top \\ A & 0 \end{bmatrix}$$

という記号を導入すると，

$$w = q + Mz, \quad z^\top w = 0, \quad w \geq 0, \quad z \geq 0 \tag{4}$$

と表わされ，$w = q + Mz$ の非負解 w, z のうち相補性の条件 $z^\top w = 0$ を満たす線形相補性問題を解くことと同値になる。この線形相補性問題を*Lemke*法で解きファジィ測度 g を同定する。

2.2　同定法２(*Grabisch*による方法)

*Grabisch*の提案する同定法[2]について説明する。アルゴリズムは以下の２つのステップからなる。

Step1: 第 i 番目の評価者によるデータ $\{ h_1^i, h_2^i, \cdots, h_m^i, e^i \}$ が与えられたとき，*Choquet*積分モデルによるモデル誤差をパラメータとして，モデル式で使われた測度について単調性を満たすように勾配法で修正する。ここで，$h_1^i, h_2^i, \cdots, h_m^i$ は個別評価値，e^i はその総合評価値である。

Step2: Step1で修正されなかった測度に対して，その測度をラティス構造における近隣の測度から等距離になるように修正する。

Step1は複数組得られているデータ全てに対して行い，これらのデータを何回も用いて修正することにより，学習的にファジィ測度を同定する。また，Step2も数回繰り返し，より平衡状態になるように修正する。

3 実例による比較

文献[5]の「意思決定支援システム」に紹介されている例を用いて2つの同定法の比較を行う。

家を購入する際に複数の物件から所望の条件をもっとも満たす物件を選ぶ場合を考える。評価項目は S_1: 価格, S_2: 通勤時間, S_3: 広さの3つである。物件1〜4に対する各々の項目の評価値は以下のようであるとする。

	価格(S_1)	通勤時間(S_2)	広さ(S_3)
物件1	0.82	0.40	1.00
物件2	0.82	0.50	0.90
物件3	0.82	0.60	0.80
物件4	0.82	0.70	0.70

ここで次のようなファジィ測度を仮定する。

$$g(\{S_1\}) = 0.50 \quad g(\{S_1, S_2\}) = 0.50$$
$$g(\{S_2\}) = 0.25 \quad g(\{S_1, S_3\}) = 0.50$$
$$g(\{S_3\}) = 0.25 \quad g(\{S_2, S_3\}) = 1.00$$

ただし，$g(S) = 1.00$, $S = \{S_1, S_2, S_3\}$ である。物件1から4に対する総合評価値は次のようになる。

$$\text{物件}1 = 0.655, \quad \text{物件}2 = 0.680$$
$$\text{物件}3 = 0.710, \quad \text{物件}4 = 0.760$$

上のサンプルデータから*Lemke*法による方法と*Grabisch*の方法によりファジィ測度を同定すると表1のような結果になる。これとさきに仮定した測度を比較すると，$g(\{S_2\}), g(\{S_1, S_2\}), g(\{S_2, S_3\})$ の結果が最初に仮定したファジィ測度と異なっていることがわかる。これらの測度はモデル作成時に使われなかった測度であり，同定法によってこの値の同定のされ方が違っているといえる。

表1　2つの同定法による結果

	Lemke	Grabisch
$g(\{S_1\})$	0.500	0.500
$g(\{S_2\})$	0.000	0.336
$g(\{S_3\})$	0.250	0.250
$g(\{S_1, S_2\})$	1.000	0.696
$g(\{S_1, S_3\})$	0.500	0.500
$g(\{S_2, S_3\})$	0.250	0.652
$g(S)$	1.000	1.000

4 おわりに

同定法1による方法では同定する際に修正パラメータを必要としないため，一意的に最適解が求まるが，モデル作成で使われなかった測度の同定のされ方があいまいである。また，同定法2による方法では，2.2節のStep1で修正されなかった測度に対する同定のされ方は明快であるが，修正パラメータの定め方によって同定される測度が変わってくる。この違いによってファジィ測度の解釈，*Shapley*値にどれくらい影響があるかということについても考えたい。

参考文献

[1] 中森・岩本・内藤：ショケ積分モデルによる都市環境主観評価構造の分析. 環境科学会誌, Vol.8, No.1, pp.11-24, 1995.

[2] M.Grabisch: A new algorithm for identifying fuzzy measures and its application to pattern recognition. Proc. the 4th FUZZ-IEEE, pp.145-150, Yokohama, March 20-24, 1995.

[3] 室伏：ファジィ測度とファジィ積分. 応用のためのファジィ理論の基礎, 日本ファジィ学会, pp.62-73, 1994.

[4] C. E. Lemke : Bimatrix equilibrium points and mathematical programming. *Management Science* , Vol.11, pp.681-689, 1965.

[5] 深海・米田：ファジィ技術の先端的応用, 日刊工業新聞社, pp.40-42, 1993.

連絡先: 岩本直子
三菱電機(株) 設計システム技術センター
〒661 尼崎市塚口本町8-1-1
Tel:06-497-7454　Fax:06-497-7468
E-mail: iwamoto@dpe.mdl.melco.co.jp

FRF4-2

人間の評価モデルにおけるファジィ測度の調整

Adjustment of Fuzzy Measures in Human Evaluation Process Model

鬼沢武久† 杢屋銑一‡

Takehisa ONISAWA† Sen'ichi MOKUYA‡

† 筑波大学構造工学系 Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba

‡ 筑波大学理工学研究科 Master's Program in Science and Engineering, University of Tsukuba

（現在、セイコーエプソン株式会社、Currently, SEIKO EPSON CORPORATION）

Abstract－This paper is concerned with proposing an algorithm of adjustment of identified fuzzy measures so that a fuzzy measure and fuzzy integral model is fit for human evaluation process. The adjustment is performed by the use of linguistic terms. The algorithm considers superadditivity or subadditivity of fuzzy measures. The evaluation of human facial expressions is shown in order to confirm the validity of the presented algorithm.

1．はじめに

ファジィ測度、ファジィ積分の概念が提案[1]されて以来理論的な研究がすすめられる一方、人間の評価プロセスなど多属性対象の主観的評価のモデル化の応用に用いられている[2]。

ファジィ測度、積分が多属性対象の評価プロセスのモデル化に応用されるとき、アンケート調査などで得られた入出力データをもとにして、ファジィ測度が同定されることが多く、そのアルゴリズムも提案されている[3,4]。しかしこういった研究の多くでは、ファジィ測度・積分モデルの出力値とデータ値の二乗誤差を最小にするようファジィ測度を同定しているが、同定されたファジィ測度が評価者に適合しているかどうかの検証がされていない。

そこで本稿では、同定されたファジィ測度をファジィ測度・積分モデルに使用し、その出力値を見てファジィ測度を調整してゆくことを考え、評価者により近い評価モデルの構築を試みる。

2．ファジィ測度、ファジィ積分

2．1 ファジィ測度

ここでは応用的側面からファジィ測度を考えるのでXを有限集合とし、$P(X)$をXのべき集合とする。このとき、ファジィ測度は次の性質

$$g(\phi)=0,\ g(X)=1$$
$$A\subset B\subset X \ \Rightarrow\ g(A)\le g(B) \tag{1}$$

をもつ集合関数$g: P(X) \to [0, 1]$として定義される。

2．2 ファジィ積分

本稿ではファジィ積分としてChoquet積分[5]を用いる。関数$f: X \to [0, 1]$のChoquet積分は次式で定義される。

$$(c)\int f(x)dg=\int_0^1 g(\{x|f(x)>\alpha\})d\alpha \tag{2}$$

関数fが

$$f(x)=\sum_{i=1}^{n-1}(h_i-h_{i+1})\chi_{X_i}(x) \tag{3}$$

のような単関数で表されているとすると、このfのChoquet積分は

$$(c)\int f(x)dg=\sum_{i=1}^{n-1}(h_i-h_{i+1})g(X_i) \tag{4}$$

で定義される。ただし、$h_1\ge h_2\ge.....\ge h_n$, $X_1\subset X_2\subset....\subset X_n$で、$\chi_{X_i}(x)$は$X_i$の特性関数である。

3．評価プロセスのモデル

3．1 人間の評価プロセスのモデル化とファジィ測度の同定

多属性評価プロセスのモデル化としては、図1に示すように、各属性の評価hを各属性の主観的重要度gによって重み付けを行い、総合的な評価を行う。ファジィ測度の同定とは、図1に示された評価プロセスのモデル化で各属性の評価値を入力値とし、モデルの出力値とデータ値との誤差を最小にするようにファジィ測度gを求めることである。本研究では

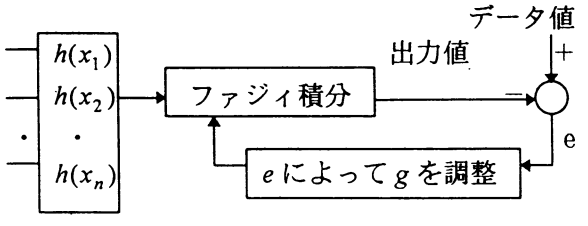


図1 ファジィ測度同定モデル

菅野積分について研究されたファジィ測度同定アルゴリズム[3]と Choquet 積分について研究された同定アルゴリズム[4]とを組み合わせて用いている。

3．2　顔表情の評価例

応用例として、ファジィ測度・積分を用いて図2に示すように人間の感情から顔表情を再現するプロセスをモデル化する。

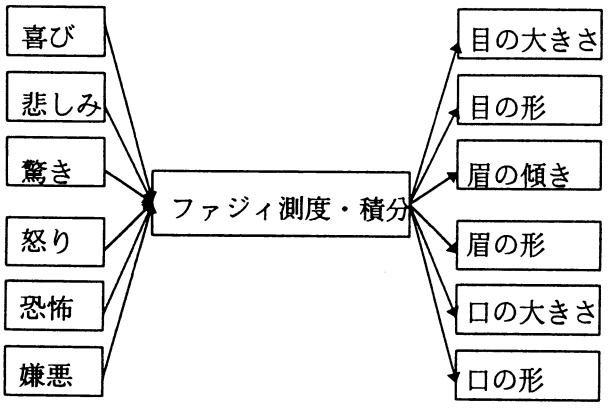


図2　感情から顔表情の生成

感情としては、喜び、悲しみ、驚き、怒り、恐怖、嫌悪の基本感情[6]を考え、顔表情を作るための顔の部位として、目の大きさ、目の形、眉の傾き、眉の形、口の大きさ、口の形の6つを考える。ファジィ測度を同定するためのデータは、図3に示すような

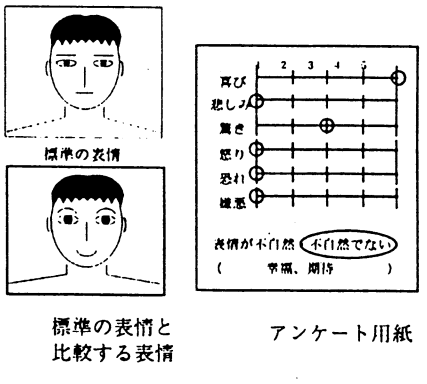
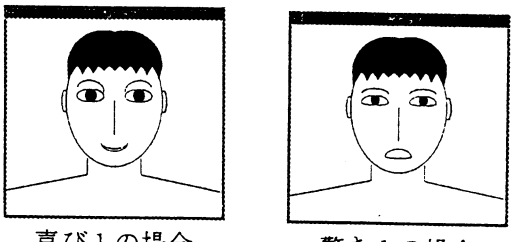


図3　アンケート形式

アンケート調査を行って集めている[7]。無感情であると考えられる表情と顔の各部位の位置を変えた表情を比べて、その顔表情からどんな感情をどの程度感じられるかを記入してもらうものである。このアンケートによって216種類の表情について27人分（延べ83人）のデータが得られ、ファジィ測度の同定に用いられている。

アンケート用紙に記入されたそれぞれの評価値1～5を[0, 1]の数値に変換している。また、顔の6つの部位に関する情報も[0, 1]に置き換えている。こうして得られた420セット×顔の部位6種類のデータを使い、入力値を感情の評価値、顔の部位に関する情報を出力値として、Choquet 積分によるファジィ測度を同定する。この際、顔の部位情報に対してマイナス要因になると思われる感情の評価値については、例えば、悲しみに対する目の大きさ、目の形などは$1-h$と反転させて同定を行っている。

同定されたファジィ測度を用いて、喜びの感情だけが1の評価で残りの感情の評価が0の場合、驚きの評価だけが1の評価で残りの感情の評価が0の場合の顔表情の例を図4に示す。喜び、驚きの表情が生成されているが、喜びについて言うと、口をもっと開けて笑う表情を強調した表情になる方が自然であると思われるし、驚きに関しても口を大きく開けて、目をもっと見開く表情の方がより自然になると思われる。これは必ずしも同定されたファジィ測度値が個々の評価に適合した値になっていないためと考えられる。



喜び1の場合　　驚き1の場合

図4　生成された顔表情の例

4．同定されたファジィ測度の調整

4．1　調整方針

同定されたファジィ測度を調整するにあたり、同定されたファジィ測度の構造はある程度その評価者の評価構造を反映しているものとする。この考えのもとに、（1）言葉により直観的な操作で調整が行える、（2）同定されたファジィ測度の優加法性、あるいは劣加法性の性質を考慮することで、ファジィ測度の構造の特徴を活かすことを考える。

4．2　調整アルゴリズム

ファジィ測度の性質を考慮しない調整の仕方として以下の式による調整が考えられる。

○ファジィ測度を増加させる場合

$$g'(E_i) = g(E_i) + (1-z) \times word \qquad (5)$$

○ファジィ測度を減少させる場合

$$g'(E_i) = g(E_i) + z \times word \qquad (6)$$

ただし、iはhの値を降順に並べ替えた場合の評価属性の番号であり、zはファジィ測度・積分モデルの出力値である。出力値が大きい場合は、ファジィ

測度を小さく増加させ、大きく減少させる。出力値が小さい場合は、ファジィ測度を大きく増加させ、小さく減少させることをねらっている。また *word* の値は、表1に示すように言葉に数値を対応させたもので、言葉によるで調整をねらいとしている。

表1　*word* と数値の対応

言　葉	数　値	言　葉	数　値
かなり大きく	+0.5	かなり小さく	-0.5
大きく	+0.3	小さく	-0.3
すこし大きく	+0.1	すこし小さく	-0.1

これらの式にファジィ測度の性質を組み込んで下式を考える。

○ファジィ測度を増加させる場合

$$g'(E_i) = g(E_i) + (1-z) \times word \times (1 + a(E_i)) \quad (7)$$

○ファジィ測度を減少させる場合

$$g'(E_i) = g(E_i) + z \times word \times (1 + a(E_i)) \quad (8)$$

ただし、$E_i \subset E_i'$ に対して $g(E_i) \leq g(E_i')$ を満たさねばならないため、$g(E_i) > g(E_i')$ となった場合には、$g(E_i') \leftarrow g(E_i)$ のような調整を行う。ここで $a(E_i)$ は次式で定義されるものである。

$$a(E_i) = \frac{h_i - h_{i+1}}{\max_i h_i} \times \frac{g_{ave,i} - \min_i g_{ave,i}}{\sum_i (g_{ave,i} - \min_i g_{ave,i})} \quad (9)$$

ただし、$g_{ave,i}$ はファジィ測度の優加法性、劣加法性の性質を考慮したもので、次式で定義される。

$$g_{ave,i} = \begin{cases} g(E_i) - \dfrac{\sum_{j=1}^{k} \sum_{l} g(E_i^{jl})}{k}, & |E_i| \neq 1 \\ 0, & |E_i| = 1 \end{cases} \quad (10)$$

ただし、$g(E_i^{jl})$ は、$E_i^{jl} \subset E_i$ なる集合 E_i^{jl} のファジィ測度値、k は E_i を互いに素に分割する集合 (E_i^j) の組み合わせの数、l は E_i^j を構成する集合 (E_i^{jl}) の番号である。$g_{ave,i}$ の意味は、$g(E_i)$ と $E_i^{jl} \subset E_i$ なる E_i^{jl} のファジィ測度値の和の平均値との差をみることで、$g(E_i)$ の優加法性の程度をみている。したがって E_i の要素数が1の場合は $g_{ave,i} = 0$ としている。$a(E_i)$ は、各属性の評価で大きな値を占めているほど大きな値になり、また、ファジィ測度の優加法性の程度が一番低い（劣加法性の程度が一番高い）部分（$\min_i g_{ave,i}$ に相当）を基準として、優加法性の程度が高いほど大きな値になる。

4．3　再調整の制限

ファジィ積分では、異なった入力パターンでも同じファジィ測度を使用する場合が出てくる。したがって、続けてファジィ測度を調整する場合、同じ測度を何度も調整し、その増減を何度も繰り返すことが起こり得、いつまでたっても収束しないことが考えられる。そこで一度調整したファジィ測度に対しては次式に示すようにその変動幅に制限を加えることにする。

○ファジィ測度を増加させる場合

$$g'(E_i) = g(E_i) + \alpha^m \times (1-z) \times word \times (1 + a(E_i)) \quad (11)$$

○ファジィ測度を減少させる場合

$$g'(E_i) = g(E_i) + \alpha^m \times z \times word \times (1 + a(E_i)) \quad (12)$$

ただし、$\alpha \in [0, 1]$ で、m はその測度が前回までに何回調整されたのかを示す調整回数である。

4．4　調整結果

調整アルゴリズムを3章で示した顔表情の評価に応用した例を示す。なお、$\alpha = 0.6$ に設定している[8]。3章で得られた喜び 1.0 の表情にについて、「眉の傾きを少し小さく」、「口の大きさを大きく」とした場合の表情を図5に示す。図4に比べると笑いの自然さが出ていると思われる。また、その他の顔の部位の表情にはあまり影響を与えていないことがわかる。

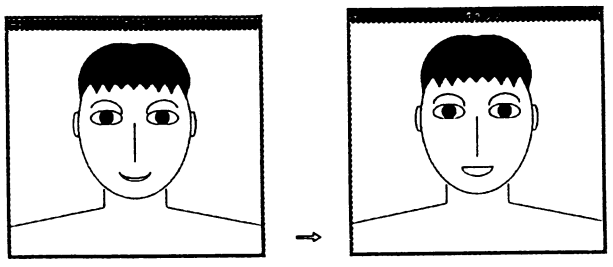


図5　調整された喜びの表情

次に、表2に示すように様々な表情を続けて調整し、調整済みの表情への影響の例を図6に示す。

表2　表情の調整

表情番号	感情の評価	表情の調整程度
No.1	驚き　0.25 怒り　1.0	目の大きさ：小さく 目の形：大きく 眉の形：少し大きく 口の大きさ：小さく
No.2	悲しみ 1.0 恐れ　0.5 嫌悪　0.25	目の形：小さく 眉の傾き：大きく 眉の形：小さく 口の形：小さく

表2　表情の調整（つづき）

表情番号	感情の評価	表情の調整程度
No.3	喜び　0.75 驚き　0.5	目の大きさ：大きく
No.4	悲しみ 0.5	目の大きさ：かなり大きく
	驚き　0.5	眉の形：小さく
	怒り　0.25	口の大きさ：かなり大きく
	嫌悪　0.5	口の形：小さく
No.5	喜び　1.0 驚き　0.5	目の形：少し小さく 口の大きさ：かなり小さく 口の形：小さく

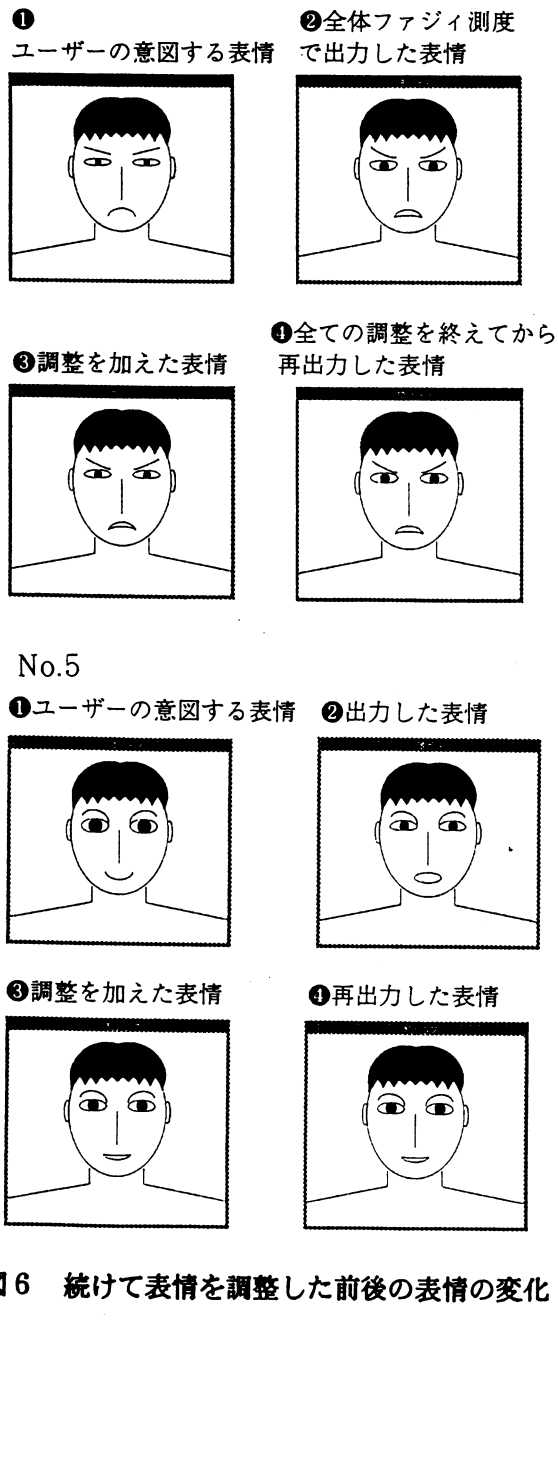


図6　続けて表情を調整した前後の表情の変化

なお、①はアンケートに答えた時の表情、②は同定されたファジィ測度を用いて作成した表情、③は表2に示す各表情番号に対応する表情の調整を入力した後に調整されたファジィ測度を用いて作成した表情、④はNo.1～No.5のすべての調整を終えた後のファジィ集合を用いて作成した顔表情である。言葉による調整のため、細かい数値を気にすることなく、直感的な操作によって調整を行うことができる。また、自然な表情に修正されており、他の顔部位の調整による影響も少なく、調整アルゴリズムが有効に働いていることが確認される。

5．おわりに

本稿では、ファジィ測度・積分を用いた評価モデルにおいて、アンケートデータなどから同定されたファジィ測度を、評価者に適合するように調整するアルゴリズムを提案した。調整アルゴリズムの方針は、言葉による調整が行えること、同定されたファジィ測度の構造は維持することである。特に後者の方針では、ファジィ測度特有の優加法性、劣加法性の性質を考慮してある。また、何度も調整するファジィ測度に対しては、その回数に応じて増減の幅を減少させる工夫を行い、発散することを防いでいる。このアルゴリズムを顔表情の評価に適用して、その有効性を視覚的な面からも確認した。

参考文献

[1]M.Sugeno:Theory of Fuzzy Integrals and Their Applications, Doctoral Dissertation, T.I.T., 1974.
[2]K.Tanaka and M.Sugeno:A Study on Subjective Evaluation of Printed Color Images, Int'l J. of Approximate Reasoning, Vol.5, No.3, pp.213-222, 1991
[3]K.Ishii and M.Sugeno:A Model of Human Evaluation Process Using Fuzzy Measure, Int'l. J. of Man-Machine Studies, 22, pp.19-38, 1985
[4]森勉、室伏俊明：ファジィ測度・Choquet積分を用いた評価モデルの解析、第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.207-212, 1989
[5]日本ファジィ学会編：講座ファジィ3　ファジィ測度、日刊工業新聞社, 1993
[6]伊藤正男、梅本守、山鳥重、小野武年、往住彰文、池田謙一：認知科学6　情動、岩波書店、1994
[7]北崎幸子、岩田満、鬼沢武久：顔の表情モデル、第5回日本ファジィ学会ノンエンジニアリングファジィワークショップ講演論文集、pp.80-84, 1995
[8]杢屋銑一、鬼沢武久：ファジィ測度の同定と調整、日本ファジィ学会関東支部第8回ワークショップ論文集、pp.16-24, 1997

連絡先：〒305　つくば市天王台1－1－1
筑波大学構造工学系　鬼沢武久
TEL　0298 53 5060　FAX　0298 53 6471
E-mail: onisawa@esys.tsukuba.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRF4-3

一般化したファジィ積分の評価問題への応用

An Application of Generalized Fuzzy Integral to the Evaluation Problem

今岡　春樹
Haruki IMAOKA

奈良女子大学　生活環境学部
Faculty of Human Life and Environment, Nara Women's University

First, a generalized fuzzy integral which encompasses Sugeno integral, Choquet integral and opposite-Sugeno integral by using only one parameter of Frank's t-norm is proposed. Next, an example of subjective evaluation test is shown and is discussed, in which the sportiness and the elegancy of some clothing were evaluated. In the evaluation of sportiness, many students used Choquet integral. On the other hand, as for the elegancy, various evaluation models i.e. Sugeno integral, Choquet integral and opposite-Sugeno integral appeared. This approach will be useful in the application field of the multi criteria evaluation problem.

１．はじめに

ファジィ積分の応用として，評価問題が多く取り扱われている．通常，評価問題ではファジィ測度をパラメータとし，そのパラメータ同定を行いながら，評価者の評価構造を分析する．しかし，ファジィ積分には菅野積分やショケ積分など数種類の積分が提案されており，どの積分モデルを評価問題に適用するのが良いのかというモデル同定の問題が残されていた．そこで，唯一のパラメータｑを用いて，菅野積分と逆菅野積分を両端とし，ショケ積分を中央とする一般的なファジィ積分の表現方法を提案する．

実際の評価問題の分析にあたっては，このｑをモデルパラメータとし，通常のパラメータであるファジィ測度と同時に同定する．この同定されたパラメータ及びモデルパラメータは，個人差が見られるのが普通である．ここで，個人差をパラメータ空間で分析するのか，あるいはモデルパラメータ空間で分析するのかという問題が生じてくる．

そこで，衿・袖・下衣それぞれ７種類を用意し，その組み合わせの中から１００種類の全体衣をランダムに抽出し，評価実験を行った．評価にあたっては，エレガントさとスポーティさの２種類を用いた．従って２つの用語それぞれについて，３つの部分評価点とその全体評価点が，各個人について１００のデータが得られた．得られたデータについて，６つのパラメータ及び１つのモデルパラメータを同定した．この同定結果を考察する．

２．一般化したファジィ積分

菅野積分，ショケ積分，逆菅野積分は，有限の場合，一般化して次式で表現できる．

$$a_1 \bullet \mu_1 + \{(a_2 \bullet \mu_2) - (a_1 \bullet \mu_2)\} + \cdots + \{(a_n \bullet \mu_n) - (a_{n-1} \bullet \mu_n)\}$$

,where $a_1 \leqq a_2 \leqq \cdots \leqq a_n$, $\mu_1 \geqq \mu_2 \geqq \cdots \geqq \mu_n$.

ここで，２項演算の差が積分モデルを意味し，フランクのｔ－ノルムで記述できる．

$$x \bullet y = \frac{1}{q} \ln\left[1 + \frac{(e^{qx}-1)(e^{qy}-1)}{(e^{q}-1)}\right]$$

, where $-\infty \leqq q \leqq \infty$.

モデルパラメータｑが－∞で菅野積分($x \wedge y$)，０でショケ積分($x \cdot y$)，＋∞で逆菅野積分($x+y-1 \vee 0$)となる．

ファジィ積分は一種の平均演算と見なすことができる．ショケ積分と比較すると，菅野積分はより中央の値を平均として算出する．一方，逆菅野積分は，ショケ積分よ

り両端の値を平均として算出する．すなわち，菅野積分はよりあいまいな評定を下し，逆菅野積分はより明確な評定を下す傾向がある．

３．評価問題への適用

女子大生４４名を対象に，衿・袖・下衣それぞれ７種類を部分評価点とし，１００種の全体衣を全体評価点とし，５段階評価させた．評価用語は，エレガントさとスポーティさの２種類である．刺激はＯＨＰで示した．

同定すべきパラメータは，ファジィ測度６個，及びモデルパラメータ１個の合計７種類であり，ファジィ測度の単調性を不等号制約条件とする最小２乗法を用いた．なお，モデルパラメータは±∞を便宜上±５０とした．

４．結果と考察

単純集計の結果得られた，最もエレガントな衣服と最もエレガントでない衣服を図１に，最もスポーティな衣服と最もスポーティでない衣服を図２に示す．この結果から妥当な評定がなされていることがうかがえる．

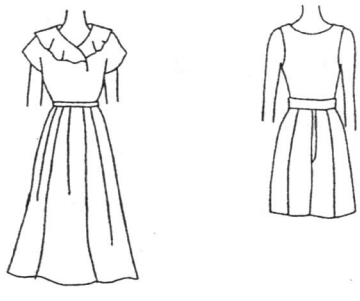


図１　エレガントな／でない衣服

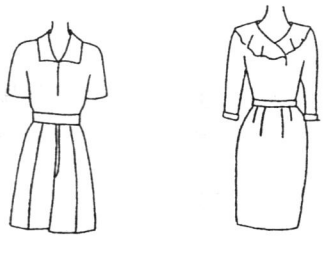


図２スポーティな／でない衣服

モデルパラメータの同定結果を図３に示す．この結果は興味深い．すなわち，スポーティという評価用語は，ショケ積分的であり，評価モデルの分布が自然である．一方，エレガントという評価用語は，多様であり，最頻値を見ると菅野積分的である．

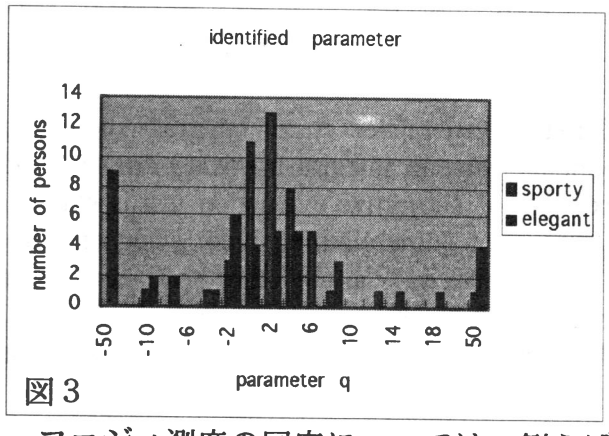


図３

ファジィ測度の同定については，例えばμ（｛袖｝）は，袖が満点，衿と下衣が零点の組み合わせに対する全体の評価点と解釈できる．しかし，このままでは個人の分類は複雑であるので，次のような分類方法を考えた．部分評価の合計は最大３である．ここで，部分評価の合計が１と２の組み合わせを考え，その中で最大の全体評価を与える組み合わせを求める．このようにすると，スポーティさでは，全体の３６％が，（衿，袖，下衣）について，（０，０，１）→（1/2，1/2，１）のパターンを示した．エレガントさで最も多かったのが，全体の１４％で，（1/3，1/3，1/3）→（2/3，2/3, 2/3）のパターンを示した．

５．おわりに

一般化したファジィ積分は，菅野積分，ショケ積分，逆菅野積分を含んでいる．評価問題への応用として，モデル同定とパラメータ同定が同時に行えるのが特徴である．衣服の評価問題に応用した結果，評価用語のモデルパラメータの分布による特徴抽出，評価者のファジィ測度による分類が行えた．

問い合わせ先：６３０　奈良市北魚屋西町
奈良女子大学　生活環境学部　今岡春樹
tel 0742-20-3465 fax 0742-20-3464

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRF5-1

選択における不確実性の変容

Variations of Uncertainty in Selection

塚本弥八郎

Yahachiro Tsukamoto

名城大学短大部

Dept. of Economics and Commerce, Junior College, Meijo University

[Abstract] The uncertainty possessed by a basic probability assignment in the evidential theory may be decomposed into three indices having the different meanings, that is, nonspecificity, conflict and confusion. The author has presented a variation between nonspecificity and conflict[2,1996]. Such variations will not only occur with information acquirement or loss, but also with the changes in observer's attention. In this paper, we consider mainly the variation between conflict and confusion. This will be discussed by a rather complicated problem, that is, decision making in selecting the elective school subjects by university students.

1 はじめに

証拠理論における三つの不確実さの指標を使うと、情報の出入りや注意力の変化に伴う不確実さの変容について考察することができる。不特定性と不一致性との間の移り変わりの例については[文献 2] に述べた。本稿では、不一致性と混迷性との間の変容について、とくに、大学生の選択科目の選択の場合の意思決定問題を用いて考察する。

2 基礎理論

証拠理論でのエントロピーの議論では、基本割当(BPA)の分布の不確実さの種類とそれらの大きさの定め方を問題とする。X を有限集合とすると、基本割当、$m(\cdot)$、はつぎの集合関数である。

$$m : 2^X \to [0,1]$$

$$\sum_{A \subseteq X} m(A) = 1, \quad m(\varnothing) = 0$$

$F \equiv \{A \subseteq X \mid m(A) > 0\}$ のことを焦点要素、また、(F, m) を単に証拠という。不特定性、不一致性、混迷性および全不確実さをそれぞれ N, E, C, T で表わし、次式のように定義する。ただし、対数の底はすべて2とする。

$$N = \sum_{A \in F} m(A) \log |A| \qquad (1)$$

$$E = -\sum_{A \in F} m(A) \log Pl(A) \qquad (2)$$

$$C = -\sum_{A \in F} m(A) \log (m(A) / Pl(A)) \qquad (3)$$

$$T = N + E + C \qquad (4)$$

本稿では、証拠の表記法を以下のように定める。$m(A) = a, m(B) = b, m(X) = c$ のときには、$A^a B^b X^c$ のように、また、a, b, c が同じときには $(ABX)^a$、さらに、$a = 1$ のときは1を省略する。

3 例題

今、ある一つの案があって、それを採用した方がいいという根拠も、それを否定する理由も定かでない。

$X = \{yes, no\} \equiv \{y, n\}$ とおく。

証拠の在り方によって、不確実さの指標が変化する様子を表1に示す。証拠、(F, m)、の分布は表1の右欄に与えられているが、すぐ上に述べた表記法に注意すれば基本割当がどんなものかが分かる。

表1で、ケース1はあらゆる不確実さがない確定状態に対応する。ケース2は何の証拠もあがっていない証拠理論でいう未知の状況である。ケース3は採用、不採用両者について少し議論が持ち上がってきたところである。ケース4では、採用側の議論がやや強くなってくる。ケース5は、最も不確実さが大きくなる分布に対応する。

表１　指標の変化

ケース	T	N	E	C	(F, m)
1	0	0	0	0	$y \underline{or} n$
2	1	1	0	0	X
3	1.91	0.33	0.39	1.19	$(ynX)^{1/3}$
4	1.75	0.25	0.71	0.79	$y^{1/2}(nX)^{1/4}$
5	2	0.5	0.62	0.88	$(yn)^{1/4}X^{1/2}$
6	1	0	1	0	$(yn)^{1/2}$
7	1.5	0.5	0	1	$(yX)^{1/2}$
8	1.58	0.67	0	0.92	$y^{1/3}X^{2/3}$

ケース６では対立が明確化し、排他的な分布、すなわち、確率分布の場合で、混迷さも、不特定さも消滅する。逆に、ケース７では排他性が消え、混迷性がかなり高くなる。ケース８と同様に、ファジィの場合に対応し、後者は、ファジィの場合で最大の不確実さの値をとるケースとなる。

正規のファジィ集合と基本割当との間には１対１対応の関係があり、証拠理論での不確実さの指標を用いて、有限集合を全体集合とする正規ファジィ集合の不確実さを考察することができる[塚本、3, 1997.3]。

4　選択科目における選択の不確実さ

消費者行動の分析などでのエントロピー・モデル [4]では、エントロピーが大きい程、自由意思による自由勝手な選択ができ、マクロにはそのようなﾋﾞﾍｲﾋﾞｱがとられているという解釈がなされている。しかし、選択肢の数があまりにも多いと何を選んだら良いか迷う度合も大きくなる。

ここでは、学生が選択科目を決定するときの状況を考えながら、 不一致性と混迷性がどのように変るかについて述べる。

[例題２]　３科目中２科目以上選択で、 $X = \{a, b, c\}$ とする。この問題では不特定性の考慮は不要である。まず、白紙の状況での基本割当を $((ab), (bc), (ca), X)^{1/4}$ とすると、不一致度、$E = 0$ と、混迷度、$C = 2$ を得る。不特定性は勘定に入れないので、この２ビットが最大の不確実さとなる。いま、かりに、一科目 $\{c\}$ だけは決めたとして残りの不確実さについて考えると表２を得る。この表では、 $X = \{a, b\}$ である。ケース１は３科目すべてを取ろうとする気持ちがあって、混迷度が大きいが、ケース３ではどちらか一つは捨てるという決定をした場合で、１ビット分の不一致度だけが残る。

表２　２科目中１科目以上

ケース	BPA	T	E	C
1	$(abX)^{1/3}$	1.58	0.78	0.80
2	$(ab)^{3/8}X^{2/8}$	1.565	1.1	0.47
3	$(ab)^{1/2}$	1	1	0

[例題３]　10科目中正確に５科目選択の場合

選び得る科目のすべてのグループについて等分布を仮定し、１科目決める度に変化する不一致度と混迷度を表３に示す。

表３　10科目中５科目選択の場合

ケース		E	C	T
4	10科目中５科目	0.01	7.97	7.98
5	9——4	0.10	6.88	6.98
6	8——3	0.29	5.52	5.81
7	7——2	0.93	3.46	4.39
8	6——1	2.58	0	2.58

まだ何も考えないうちは、約８ビットの不確実さがほとんど混迷度により占められている。ケース６あたりから、不一致度が増してきて、最後の段階では混迷性は消え、どれか一つという確率的状況となる。

参　考　文　献

1. 塚本：証拠理論におけるエントロピーの最近の研究、第４回東海ファジィ研究会講演論文集、pp1-14, 1966　(蒲郡)
2. 塚本：計測過程での不確実さの内容の変遷、第一回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論文集、pp27-28, 1966　(大阪工大)
3. 塚本：DS 理論における不確実さの変容、第５回東海ファジィ研究会講演論文集, 1997
4. 国沢清典：エントロピー・モデル、日科技連、OR ライブラリー14、1986

問合わせ先：　名古屋市天白区塩釜口 1-501　名城大学　塚本弥八郎　E-mail：tukamoto@meijo-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRF5-2

”ファジィ”のある確率的見方と考察

A Probability Theoretic View of "Fuzzy" with subsequent Discussions

間淵重昭
Shigeaki Mabuchi
大阪学院大学
Osaka Gakuin University

Abstract

When people consider things they seem to deal with objects by more vague or flexible images than membership functions(MF), and they leave the object as vague until a situation forces them to act, in which case the vague object becomes crisp. By viewing human thinking process in this way its probabilistic description seems more suited. Then we seek to model the process by employing formerly proposed concept of ground set and probabilistic interpretation of MF[3], and ascertain that the previously derived results of various set operations are also available. With this setting some of controvercies raised in relation to fuzziness and probability are diccussed and explained.

1 はじめに

ファジィ理論と確率論の間には、ときにさまざまな議論が提議される。たとえば IEEE Transaction on Fuzzy Systems, Vol. 2, No. 1 (Feb. 1994) はその特集号である。その論争の中心はファジィ理論派が確率では表現できない不確定さがあるというのに対し、確率論派は確率ですべて処理できるという点にある。ここでは問題をそのような対立的な形で取りあげるのでなく、人間の思考過程をイメージしながら、確率的取扱いも取り込んで、人間の思考にみられるあいまいさの扱い方について考え直してみる。

人間は言葉でものを考えるとき、メンバシップ関数（以下ＭＦ）よりもっとぼんやりしたイメージで考えていて、何らかの行動に移るときに始めて明確にするという見方をとると、この過程はむしろ確率的事象に似ているといえる。そこでこのような見方に立って設定した対象を、既に提案した根拠集合の考え方を適用して考察する。そして”ファジィ”と確率論にかかわるいくつかの問題に対してこの立場からの解釈を示す。

2 確率による”ファジィ”の表現

確率事象とファジィ集合の主たる相違点は、前者における不確定さが、確定のための条件が整えば除去可能であるのに対し、後者の場合は、集合の境界のあいまいさという形の不確定さがどうしても消えないという点にある。しかし、人が何らかの決断を下して行動に移るという段階では、非ファジィ化がなされ、あいまいさが消えることに気づく。人間の思考、決断の過程をこのようにみると、その確率事象的なとらえ方も可能に思える。

つまり人間は物事の区分けをぼんやりとした、しかもしばしば移動可能な境目で考えていて、必要に迫られない限り明確にしない。必要に迫られて決定されるクリスプな境は主観的に定められるが、ある程度の理屈づけと同時にランダム的傾向も伴っているように見受けられる（表１）。以下ではこの定式化を考える。

表１．　確率と”ファジィ”の対応関係

確率	事前 不確定	事後 確定	事前資料 確率事象の性質にもとづく確率分布
ファジィ	決断前 ファジィ	決断後 クリスプ	決断前の判断資料 脳内データ、文脈、...にもとづくＭＦ

2.1 単純モデル

議論の対象となる全体集合Xの中の境界のはきりしない部分集合（ファジィ部分集合）Aと要素$x(\in X)$を考える。この一つの簡単な表し方として、Xを実数直線上で考え、Aをその上での凸ファジィ集合として、Aの境界の存在位置が確率分布$f_A(x)$をなすものとする。このAの左（右）側境界の確率分布を$f_A^L(x)$（$f_A^R(x)$）とすると

$$f_A(x)=\begin{cases} f_A^L(x), & x\in B_L(A)=[x_L,x_{cL}] \\ f_A^R(x), & x\in B_R(A)=[x_{cR},x_R] \end{cases} \quad (1)$$

と書ける。ここで$B_L(A)$（$B_R(A)$）はAの左（右）側境界を表す。このとき(x_{cL},x_{cR})はAのあいまいさのない部分であり、これをクリスプ部分と呼ぶ。またx_L、x_Rも確定値と考える。

この表現を通常のファジィ集合のMF表現$\mu_A(x)$に対応させると次のようになる。

$$\mu_A(x)=\begin{cases} 0, & x<x_L \\ \int_{x_L}^{x} f_A^L(x)dx, & x_L\le x\le x_{cL} \\ 1, & x_{cL}<x<x_{cR} \\ 1-\int_{x_{cR}}^{x} f_A^R(x)dx, & x_{cR}\le x\le x_R \\ 0, & x_R<x. \end{cases} \quad (2)$$

最もおおまかには、xの4個の確定値さえ決めればファジィ集合Aは規定できたとし、$f_A(x)$は特に決めなくてもよいとする。この場合、一つの凸ファジィ集合Aはこの4組文字で表すことができる：

$$A=(x_L,x_{cL};x_{cR},x_R). \quad (3)$$

2つのファジィ集合の集合演算は、基本的にはそれぞれの境界の確率分布fの確率計算によって求められる。その際クリスプ部分においてはfを1とおけばよい。但し一般式の整理された形での表現については、なお検討を要する。

次に、行動に移る段階においては、境界がクリスプに決められることになるが、その決定には確率的な傾向が強いとみて、その決まり方は確率分布$f_A(x)$で表されるとする。但し同時に何がしかの根拠を持った決定でもあるとして、$f_A(x)$にしたがって決まるどの値からもできる限り離れていないような値に決まるとする。ここでは$\hat{x}-x$の自乗平均を最小にするような値$\hat{x}$をそのような値とすると、これは確率分布$f_A(x)$における平均に等しく、同時にこれはこの分布の重心でもある。つまりこれは$f_A(x)$をMFとみたとき、その重心をその非ファジィ化とする場合に一致する。

同様の考え方によれば(3)で表されるファジィ集合Aの単一値化は、境界をクリスプ化した区間の中央値にきまる。

2.2 モデルの精密化

ここではこれまでの議論を精密化して、特に$f_A(x)$の形を特定化することを考える。考察の対象となっている状況の下で$x\in X$がAに属すか否かを判断するための材料要素の集まりを想定し、この全体を根拠集合$G_A(x)$（xは以下では適宜省略する）と呼ぶ。この中で$x\in A$を支持する要素の集まりを肯定集合$G_A^a(x)$とし、各要素の重み（重要度）も考慮した集合の大きさ$m(G_A^a)$を評価し、この根拠集合全体の大きさ$m(G_A)$に対する相対割合を考える。この割合が大きいほど$x\in A$である程度が大きいと考える。この割合は$x<x_L$では0であり、境界$[x_L,x_{cL}]$の中で区間$[0,1]$の値をとる。この値はx_{cL}に近ずくとき増大傾向にあり$x=x_{cL}$で1になる。逆にxがx_{cR}からx_Rに至る間で傾向として1から減少しx_Rで0になる。つまりこの値は上述の境界の存在確率密度の累積確率に相当するとみなされる。ここではこれを$x\in X$、Aから導かれる根拠集合$G_A(x)$の上で定まる確率$P(A;x)(\equiv\mu_A(x))$とし、$x\in A$の程度を表すMFの確率解釈とする†。$P(A;x)$と$f_A(x)$の関係は、上記により(2)の形で表せる。

† [3]、[4]ではこれを「条件付」確率としたのは、これがxの確率でないことを示す意味で言ったものであるが、$P(A|x)$の記法とともに誤解を招きやすいので上のように改める。

次に$x\notin A$を支持する要素の集まりを否定集合$G_A^n(x)$とすれば、肯定集合の場合と同様に扱える。また最初に述べたファジィ集合の境界のあいまいさを考えるとき、実際に$P(A;x)$の値、特に、$m(G_A^a)$、$m(G_A^n)$の値などがはっきりと決められるものとは考えにくい。この点を考慮して以下では根拠集合G_Aの中に不確定部分を考え、これを不明集合$G_A^u(x)$とする。さらに矛盾部分として$G_A^c=G_A^a\cap G_A^n$を考え、これが空でないことも許す。このように設定するとG_A^aは$G_A^a\ominus G_A^c\equiv G_A^{aL}$ないし$G_A^a\cup G_A^u\equiv G_A^{aU}$の幅をもち、この間で変動しうるとする。この変動が（主観）確率的に生ずると考えれば、$P(A;x)$の値も$[0,1]$の上で、確率的に与えられるとされる。すなわちタイプ2のファジィ集合を考えた形になる（次節参照）。

以上をまとめて$P(A;x)$にかかわる関係式を示すと

$$P(A;x)\equiv P(A^a;x):=m(G_A^a)/m(G_A), \quad (4)$$

$$P(A;x)+P(A^n;x)+P(A^u;x)-P(A^c;x)=1, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P(A^{aL};x)+P(A^{c};x) &= P(A^{aM};x), \\ P(A^{aM};x)+P(A^{u};x) &= P(A^{aU};x) \end{aligned} \tag{6}$$

$$P(A^{aL};x) \le P(A;x) \le P(A^{aU};x). \tag{7}$$

$$\begin{aligned} P(A\cap B;(x,y)) &= P(A;x)P(B|A;(x,y)) \\ P(A\cup B;(x,y)) &= P(A;x)+P(B;y) \\ &\quad -P(A;x)P(B|A;(x,y)) \end{aligned} \tag{8}$$

$$P(A^{n};x) = 1-P(A;x)-P(A^{u};x)+P(A^{c};x) \tag{9}$$

である [4]。ここで $P(B|A)$ は条件付確率に相当する条件付ＭＦを表す。

2.3 タイプ２ファジィ集合の形式のＭＦ

$P(A^{aL})$、$P(A^{aM})$、$P(A^{aU})$ を使ってあいまいな $P(A)$ の値（p とおく）のＭＦを表すことができる [4]。これは確率密度関数の形に修正することも可能で、本論の立場からはこの方が望ましいといえる。上記により得られた p はその値があいまいであるＭＦを表していて、それによって規定されるファジィ集合の集合演算は、(5)-(9) とそれらにもとづいて導かれる諸演算式によって定まるので [4]、これらの系によってタイプ２ファジィ集合の形のＭＦを持つファジィ集合の演算がすべて可能となることがわかる。

3 "ファジィ"と確率にかかわる問題について

3.1 不明確な対象の確率表現

不明確な対象（A とする）を確率で表現することについては、Dubois、Prade[1] は確率では対象のクリスプ性を想定していることに難点があるとしている。Kosko[2] は不完全な楕円を例にあげて、考えられる楕円状の図形集合の上で不完全楕円が楕円である確率を求めると常に 0 となってしまうとし、対象にかかわる全体集合の濃度の問題を指摘している。

上の議論は、いずれもある要素 x が A に属す確率を定めようとしているが、本論では対象 A にかかわる全体集合とは異なる、$x \in A$ か否かを判断するための根拠集合の上で確率を考えるので、上記の指摘は該当せず、指摘のような問題は生じない。この場合例えば John is as tall as he is old という文 [1] も、Tall と Old の根拠集合上でそれぞれを支持する肯定集合の割合がちょうど同じだということで説明がつく。

Dubois、Prade はまた不完全楕円を楕円とみるか否かの問題にからんで、これを（真の楕円への近さの）評価問題と（真の楕円とみなして行動するか否かの）決定問題に分けて考えるべきだとしているが、これは本論で、決断が必要になるまでは判断はあいまいのままにしておくという考え方に対応する。Dubois、Prade は、「ときにはあまりに早急に決定することはない」といっているが、本文では最終段階まであいまいのままにしておくという立場をとる。

本論によれば、楕円の問題は対象図形よりもむしろ、判断する人が与えられた判断状況において、楕円ということをどの程度厳密にとるかに、より多く依存してくる。すなわちその程度によって肯定集合の相対的大きさが変わってくる。非常に厳密に考える人にとっては、ほとんどの現実的な楕円のＭＦは 0 となる。

3.2 接近中の正体不明の飛行機の問題

標記のような飛行機に対して発砲すべきか否かという問題である。これは Dubois、Prade のいう評価問題と決定問題に分けて扱うのが適切と考えられる例である。本論によれば、敵機である程度の見当（ＭＦの見積り）はあいまいさを残したまま、発砲の決断に移る。最終決断は、ＭＦ見積りの根拠集合の内容により、またある種のランダムさを伴って、主観でなされる。しかしこの種の問題では、人は行動に移るとき、その行動をとったときととらなかったときの効果とか価値もあわせて考えるのが普通である。つまり最終決断には程度の差はあれ、一種の効用判断もからむことに気づく。但しそのような価値判断の問題は切り離して扱うのが適当と考える。

3.3 排中律と矛盾律について

人間の思考過程のなかでは、排中律と矛盾律が成立しないことが珍しくないことから、ファジィ集合演算においてこれらの法則が成り立たない点が、ファジィ理論のよい点であるといわれている。これに対し [3]、[4] では、これらが成り立つ場合とそうでない場合を区別して扱うべきで、常に成立しないというのは演算則の誤用の結果生じた誤解であることを示唆している。ここではそのことを「模造リンゴはどの程度リンゴか？」という問題を通して説明する。

ある対象物 x がリンゴ A と呼ばれるためには、その対象物がリンゴと同様の成分でできていて、外観がリンゴとよく似ていることとする。詳しくは、4 種の成分 $u_1,...,u_4$ を取りあげ、これを $x \in A$ 判断のためのリンゴの成分に関する根拠要素とし、外観に関しては根拠要素 $u_5,...,u_8$ を考えることとする。これらはそれぞれ色、形、大きさ、触感と想定する。そしてこれ

ら要素の重み m_A を次のように割り当てたとする。

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8
m_A	2	2	1	2	2	1	1	1

この中でリンゴの含む成分に対応する要素は u_1, u_2 で u_3、u_4 は模造リンゴの成分に対応するものとする。また $u_5, ..., u_8$ については、リンゴかどうかの判断要素として適切とみられるので

$$G_A(x_1) = \{u_1, u_2, u_5, u_6, u_7, u_8\}$$

となる。考察対象（リンゴ）x_1 についてはこれらすべての $u \in G_A(x_1)$ について x_1 が確かにリンゴと呼べるということを支持していると考えられるので $G^a_A(x_1) = G_A(x_1)$ で、したがって $P(A; x_1) = m(G^a_A)/m(G_A) = 9/9 = 1$ を得る。

模造リンゴ x_2 については成分に関しては u_3, u_4 が該当するが、これらはリンゴのもつ成分と異なるとすると、これらは $x_2 \in A$ の否定集合の要素である。外観については模造リンゴがうまくできていて u_5, u_6, u_7, u_8 すべて $x_2 \in A$ を支持しているとすると、これらは肯定集合を構成する。このとき次のようになる。

$$G_A(x_2) = \{u_3, ..., u_8\};$$

$$G^a_A(x_2) = \{u_5, u_6, u_7, u_8\}, \quad G^n_A(x_2) = \{u_3, u_4\},$$

$$G^u_A(x_2) = G^c_A(x_2) = \emptyset;$$

$$P(A; x_2) = m(G^a_A)/m(G_A) = 5/8 = 0.625,$$

$$P(A^n; x_2) = m(G^n_A)/m(G_A) = 3/8 = 0.375,$$

$$P(A^u; x_2) = P(A^c; x_2) = 0$$

ここで $P(A \cap A^n) = \min(P(A), P(A^n)) = 0.375$ となって矛盾律は成立しないと思われる。しかし根拠集合の構成からすれば $G^a_A(x_2) \cap G^n_A(x_2) = \emptyset$ であり、$P(A^n|A; x_2) = 0$ だから $P(A \cap A^n; x_2) = P(A; x_2)P(A^n|A; x_2) = 0$ となり、矛盾律が成立する。また排中律も成立することもわかる。。

しかしできの悪い模造リンゴ x_3 で次のような場合をとりあげると、事情は変わってくる。すなわち u_3, u_4 については x_2 と同じだが、その色はリンゴの色といえるかどうかわからないので u_5 は不明集合の要素となる。形、大きさ、触感については x_3 はリンゴによく似ているので u_6, u_7, u_8 は肯定集合の要素である。但し触感についてはリンゴと違うともいえそうなので、これも否定集合の要素となり得る。結局 u_8 は矛盾集合を形成することとなる。こうして x_3 については

$$G_A(x_3) = G_A(x_2); \quad G^a_A(x_3) = \{u_6, u_7, u_8\},$$

$$G^n_A(x_3) = \{u_3, u_4, u_8\}, \quad G^u_A(x_3) = \{u_5\},$$

$$G^a_A(x_3) \cap G^n_A(x_3) = \{u_8\} = G^c_A(x_3).$$

$$P(A; x_3) = 3/8, \quad P(A^n; x_3) = 4/8,$$

$$P(A^u; x_3) = 2/8, \quad P(A^c; x_3) = 1/8$$

となる。この場合 G^c_A、G^u_A が空でないために

$$P(A \cap A^n; x_3) = P(A^c; x_3) = 1/8,$$

$$P(A \cup A^n; x_3) = 1 - P(A^u) = 6/8$$

で矛盾律、排中律は成り立たない。結局矛盾律、排中律はメンバシップの判断にそれぞれ矛盾や不明の部分があるとき成り立たなくなることが確認された。

4 考察

人間の思考過程の類推からファジィ集合に対する確率的見方の可能性をを見いだし、既に提案されていた根拠集合とMFの確率解釈を、この見方のモデル化に適用して、上記見方の記述が可能なことを確かめた。また得られていたファジィ集合の演算などの諸結果 [4] もそのまま使えることがわかった。さらにこの考え方にもとづいて、これまで提議されていた確率とファジィネスに関するいくつかの議論について、両者の対立的な形ではない説明をつけることができた。

参考文献

[1] D.Dubois and H.Prade, Fuzzy sets–a convenient fiction for modeling vagueness and possibility, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems* 2, 1 (Feb. 1994) 16-11.

[2] B.Kosko, The probability monopoly, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems* 2, 1 (Feb. 1994) 32-33.

[3] S.Mabuchi, An interpretation of membership functions and the properties of general probabilistic operators as fuzzy set operators–Part I, *Fuzzy Sets and Systems* 49(1992) 271-283.

[4] S.Mabuchi, An interpretation of membership functions and the properties of general probabilistic operators as fuzzy set operators–Part II, *Fuzzy Sets and Systems*, to appear.

連絡先： 〒564 吹田市岸部南 2-36-1
大阪学院大学 経営科学部
間淵重昭
Tel:06-381-8434.
E-mail:mabuchi@center.osaka-gu.ac.jp

FRF5-3

ファジィ確率分布関数の提案

A proposal of fuzzy probability distribution function

加藤 裕一
Yuichi Kato
島根大学総合理工学部
Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane Univ.

山口 静馬
Shizuma Yamaguchi
山口大学工学部
Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ.

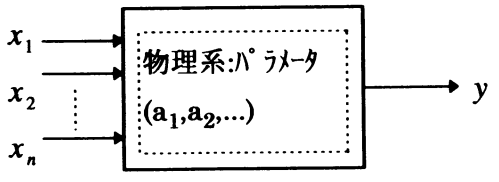
Abstract: This paper presents an expression to predict a probability distribution function in situations given vaguely and/or in conditions not completely specified. Concretely, the distribution function contains fuzzy numbers as its parameters in order to express the vagueness, so that its probability measure becomes fuzzy. This paper presents the meaning of the function and one of the simple applications for use by showing an example of fuzzy normal distribution function.

1．はじめに

着目する物理量（出力変数）を与えられた状況で予測・評価するためには，対象とする出力変数と因果関係にある全ての変数とその関係を洗い出し，「不適合性の原理」等の指針に従いモデル化して入出力関係を記述する必要がある（図1参照）。入力変数が不規則に変動する場合は，出力変数も不規則に変動する。また，一般に設定された状況から入力変数やシステムパラメータが取る値や変域を正確に設定できず，過去の同様な状況から類推あるいは専門家の主観的意見から，大略的な値を利用して目的の変量を予測することもしばしばである。

本報告は，このような“あいまいな”状況で出力変数が確率的に変動する分布の予測問題を考察する。具体的にはこのような問題の定式化の第一歩として，通常の確率分布関数の枠組みを与えて，分布を規定するパラメータをファジィ数で与えるモデルーファジィ確率分布関数－を考察する。特に本報告では，確率・統計分野で広い適用範囲を持つ正規分布を取り上げて，ファジィ確率分布関数の意味・解釈・一応用例を示す。

2．ファジィ正規確率分布関数



$$y = f(x_1,x_2,...,x_n:a_1,a_2,...)$$

図1 システムのモデル

確率的不確実性をモデル化し定量化する一つの表現は，確率分布関数を利用することである。一方想定される状況が“あいまいな”場合では，分布関数を明瞭に規定できない。把握できるのは，過去の事例等からだいたいの平均や変動幅程度であろう。ここでは，平均・標準偏差がファジィ数で与えられる正規分布を考察する。平均μ，分散σ^2の正規分布において，事象E(x)={x|-∞ <X< x}の確率は次式で与えられる。

$$\Pr ob\{E(x)\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{x}\exp\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\}dx$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\frac{x-\mu}{\sigma}}\exp\{-\frac{x^2}{2}\}dx = G(\frac{x-\mu}{\sigma})$$

ここで，G(x)は標準正規分布関数である。以下ではμ，σが夫々ファジィ数$\tilde{a}$,$\tilde{b}$の可能性分布関数$\tilde{a}(x)$,$\tilde{b}(x)$に従う場合（$\mu\sim\tilde{a}(x)$，$\sigma\sim\tilde{b}(x)$と記

す）での$G((x-\mu)/\sigma)$を考察する。簡単化のために，次の三角型ファジィ数を仮定する。

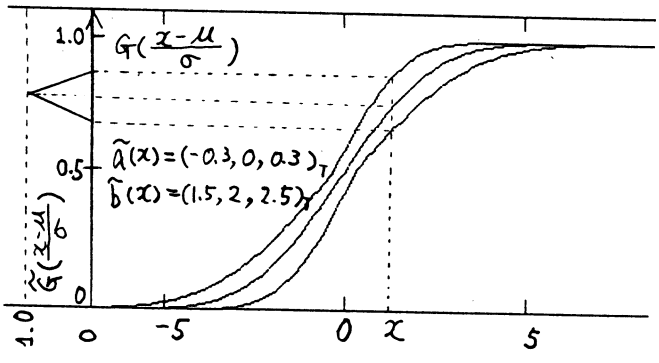


図 2 ファジィ確率分布関数の一例

$\tilde{a}(x) = 0(x \le a_1, x > a_3),$
$= (x-a_1)/(a_2-a_1)(a_1 < x \le a_2),$
$= (a_3-x)/(a_3-a_2)(a_2 < x \le a_3),$
$= (a_1, a_2, a_3)_T$

$\tilde{b}(x) = 0(x \le b_1, x > b_3),$
$= (x-b_1)/(b_2-b_1)(b_1 < x \le b_2),$
$= (b_3-x)/(b_3-b_2)(b_2 < x \le b_3),$
$= (b_1, b_2, b_3)_T$

従って，（x－μ）/σは近似的に次の三角型ファジィ数に従う。

$$(x-\mu)/\sigma \sim (\frac{x-a_3}{b_3} \wedge \frac{x-a_3}{b_1}, \frac{x-a_2}{b_2}, \frac{x-a_1}{b_1} \vee \frac{x-a_1}{b_3})_T$$

G(x)は，$-\infty < X < \infty$ で単調増加であるから G((x-μ)/σ)は次の可能性分布に従う。

$$G((x-\mu)/\sigma) \sim \vee_{\{\mu,\sigma | G((x-\mu)/\sigma)\}} \tilde{a}(\mu) \wedge \tilde{b}(\sigma)$$

$$\fallingdotseq (G(\frac{x-a_3}{b_3}) \wedge G(\frac{x-a_3}{b_1}), G(\frac{x-a_2}{b_2}), G(\frac{x-a_1}{b_1}) \vee G(\frac{x-a_1}{b_3}))_T = \tilde{G}(\frac{x-\mu}{\sigma})$$

図２に $G(\frac{x-a_3}{b_3}) \wedge G(\frac{x-a_3}{b_1})$，$G(\frac{x-a_2}{b_2})$，$G(\frac{x-a_1}{b_3}) \wedge G(\frac{x-a_1}{b_1})$ 並びに $\tilde{G}(\frac{x-\mu}{\sigma})$ の一例を示す。同図より $\tilde{G}(\frac{x-\mu}{\sigma})$ はだいたいの Prob{E(x)} を表現していることが分かる。

3．利用例

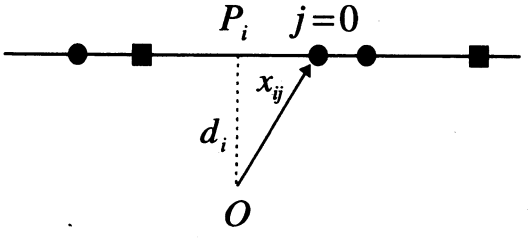


図3 第 i 車線の道路状況

道路騒音のレベル分布予測問題への簡単な利用例を示す。図３に示す道路状況：多くの車種・車両が多車線上を走行している，で第 i 車線車線より d_i 離れた地点での騒音の音の強さ I 並びにレベルは大略次式で与えられる。

$$I = \sum_i \sum_{j=-\infty}^{\infty} \frac{I_{ij}}{2\pi(d_i^2 + x_{ij}^2)}, \quad L = 10\log_{10} I / I_0,$$

ここで，$I_0=10^{-12}$[w/m^2]，I_{ij} は第 i 車線第 j 車両の出力パワー，x_{ij} は第 i 車線第 j 車両と点 P_i との距離で伝播環境は半自由空間を仮定している。多くの予測問題では大略の交通量[台/h]，大型車混入率程度が与えられ騒音レベルLの従う分布を予測する必要がある。与えられた問題はかなり“あいまい”であるが，過去の観測経験から(1)流量が大のときはその分布形状はガウス分布に近く，(2)大略の基本統計量（平均・分散）は設定条件から算定できる。図４に一例を示す。同図から騒音の指標である大略の L_{50} や一般に L_α，あるいは L_{eq} を知ることができる。

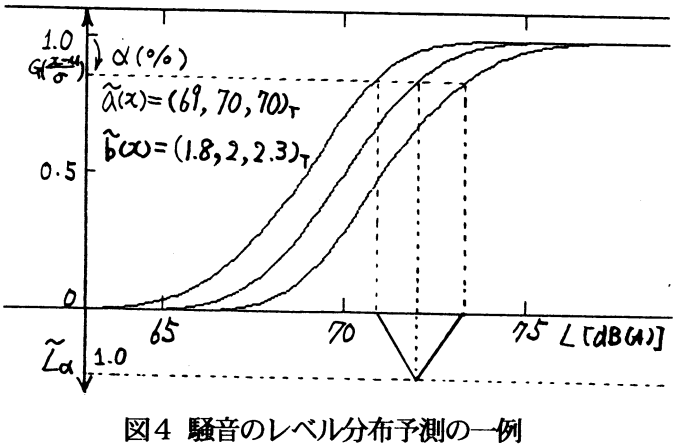


図４ 騒音のレベル分布予測の一例

問い合わせ先：〒690 松江市 西川津町 1060 島根大学 総合理工学部 数理・情報システム 加藤裕一
Tel.(0852)32-6470 Fax.(0852)32-6489 , Email: ykato@cis.shimane-u.ac.jp

FRS1-1

感性検索システムへの取り組みについて

松下電器産業株式会社 中央研究所 ○今中 武,三浦 康史,九津見 洋,小澤 順

Our Studies on KANSEI Retrieval System

Takeshi IMANAKA, Kouji MIURA, Hiroshi KUTSUMI and Jun OZAWA
Central Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

Abstract: In this paper, we discussed KANSEI retrieval system. Users can retrieve their favorite data simply by "joyful" or "useful" etc. We think the method to define individual KANSEI user model is one of the most important issues to realize KANSEI retrieval system. The KANSEI user model is constructed for computing the degree of KANSEI(i.e. the degree of joyfulness) based on individual KANSEI. We introduced two different methods to construct the user model and discussed their features. Moreover, we described our ideas for the future work in KANSEI engineering.

1．はじめに

近年、インターネットの普及など、高度情報化時代を迎えつつあり、一般のユーザに対しても大量の情報が提供される傾向にある。このような状況では、ユーザにとって興味のある情報を探し出すのに多大な時間と労力が必要になる。この結果、どんなに有用な情報を提供しても、情報が十分に活用されないという問題が発生する。

従来より、必要な情報を探し出す方法としてＳＱＬなど問い合わせ言語による方法、キーワードのＡＮＤ，ＯＲで情報を絞り込んでいく方法などがあった。しかしながら、より多くの人が日常生活において気軽に情報を利用しようとする状況では、このようなデータ検索手法は必ずしも使いやすいものとは言えない。したがって、感性工学利用による人に優しいインタフェースを備えた検索システム実現が有効であると考えている。筆者らは「楽しい」、「派手な」など日常用いる感性的な言葉に基づいて情報検索ができる感性検索システムの研究開発に取り組んでいる。

2．感性検索システムに対する考え方

近年、各種学会において「感性」が取り上げられ、中でも計算機処理を前提にした取り組みが盛んになってきている[4]。筆者らも、このような取り組みの一つとして、図１に示すようにユーザと感性的な面で同じ応答をするモデル（以降では簡単のために感性処理モデルと呼ぶ）を検索システム内に実現することに取り組んできている。このような検索システムでは、あたかもユーザの感性を持った代理人（エージェント）が、例えばそのユーザにとって「とても面白い」情報だけを検索し、提示してくれるようなことが実現する。このようなシステムを実現する上での重要な技術課題の一つは、いかにユーザの感性処理モデルを計算機上で実現するかである。

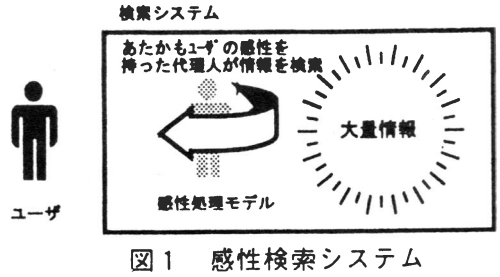


図１　感性検索システム

筆者らは、感性処理モデルを実現する上で、感性情報が持つ、1)曖昧性、2)非線形性、3)個人差を扱う必要があると考えた。1)は、感性情報を日常的に用いる際に、「非常に楽しい」、「少しはらはらする」など程度があり、その程度は曖昧なものであるといった点である。2)は、情報を特徴付ける複数の属性値に対して、感性情報は非線形であるという点である。例えば、複数の属性間のバランスや関わり合いにより、全体として「美しさ」などを感じる。3)は、感性情報には、本質的に個人差があるという点である。すなわち、感性処理モデルの実現には、上記３つの特徴を扱うことのできる情報処理手法を新たに導入する必要がある。

また、実際に、より広い対象領域で検索システムを構築しようとすれば、感性処理モデルで扱う属性が容易に記述できる場合と、記述困難な場合があることを考えておかなければならない。例えば、不動産情報を見て、お買い得か否かは、間取り、立地条件、値段など一般的にデータ属性としてすでに利用されている属性から一応の判断が可能である。しかしながら、例えば映画などでは、出演者やタイトルなどデータとして容易に準備できる属性だけから「感動する」かどうか、さらに感動する度合いまでは殆ど判らない。したがって、実問題に対して検索システムを構築していくことを前提にすれば、感性処理モデルの実現方法も多様な対象領域の中で考えていく必要がある。

3．感性処理モデルへの取り組み例

ここでは、感性処理モデル実現への２つのアプローチについて述べる。１つ目は、データから感性情報を計算する手法である（算出法によるモデル化と呼ぶ）。２つ目は、別の評価者の感性情報をユーザ向けに変換する手法である（変換法によるモデル化と呼ぶ）。以下、それぞれについて述べる。

・算出法によるモデル化

算出法によるモデル化の概念図を図２に示す。具体例として、データベース中のデータの属性値を入力とするファジィ結合演算子やニューラルネットワークを用いたものがある。いずれの手法においても、

ファジィやニューラルネットワークによる非線形演算の利用により、感性処理モデルの非線形性を実現している。また、メンバーシップ関数や重み演算により曖昧性を扱っている。個人差の処理については、予めサンプルデータに対する個人の感性情報を入力させ、この結果を用いて結合演算子の学習、ニューラルネットワークの学習を行うことにより対処している。算出法によるモデル化により、例えば不動産情報のデータベースに対して、「ゆったりした間取り」などの条件で検索する事が可能になっている。

算出法によるモデル化では、データ属性の準備が容易なデータベースのみを対象とするため適用範囲が限られるという欠点がある。しかしながら、データ属性を上手く選定すれば比較的精度良くモデル化できる可能性がある [1] 。

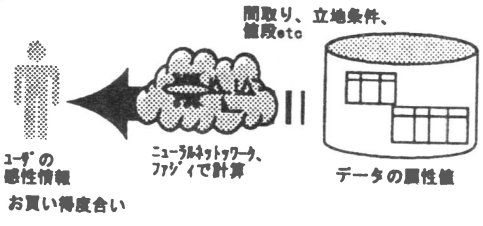


図2　算出法によるモデル化の概念図

・変換法によるモデル化

変換法によるモデル化の概念図を図3に示す。このモデル化では、まずデータに対して「感動する」度合いなどの評価値をつけてデータベースにデータを登録するデータ登録者を決める。次に、予め少数のサンプルデータに対してユーザとデータ登録者の両方が感性情報を入力しておき、両者の間で感性情報の差異の傾向を学習する。この傾向は、ファジィでモデル化されており、検索時にデータ登録者の感性をユーザの感性に変換する際に用いる。これにより、データ登録者が評価点をつけたデータベースであってもユーザの感性に合わせて検索を行うことができる。ユーザとデータ登録者との差異の傾向は非線形であり、その非線形性はファジィを用いて扱っている。また、個人差についてはサンプルデータからの学習により対処し、さらに曖昧性については検索時に、厳密な値の一致でなくファジィマッチングを用いることにより処理している。この考え方に基づいたシステムは、インターネット上で運用中である(http://town.hi-ho.or.jp/kansei/)[3]。

変換法によるモデル化では、データ属性の準備が困難な対象領域についても適用可能であるといった柔軟性がある。しかしながら、データベース構築時のデータ登録者の労力が大きい、算出法によるモデル化に比べて精度が悪くなる傾向があるなどの問題がある。

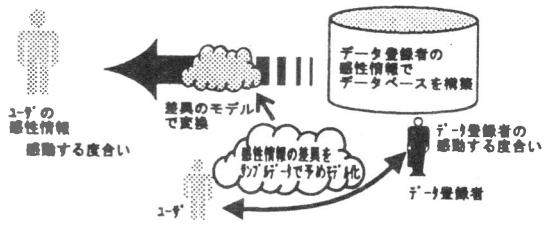


図3　変換法によるモデル化の概念図

4　今後の取り組み

現在まで、感性処理モデル実現のための計算機処理手法を主な研究対象としてきた。これは、筆者らが従来よりファジィ、ニューラルネットワーク、人工知能などに基づくソフトコンピューティングの研究を行ってきたことと、この分野の技術と感性処理モデルの実現が関連していると考えたからである。しかしながら、本稿で論じてきた感性情報の特徴以外にも、計算機処理困難な特徴がまだ沢山あると考えている。今後は、これらの特徴と性質を明らかにしながら、その処理アルゴリズムを開発し、工学的に役立てていく取り組みの必要性を感じている。このため、心理学的側面からの考察、心理計測的側面からの実験などによる研究との連携が重要と考えている。また、感性工学の関わる対象領域は幅広く、各研究機関の連携など多数の研究者による感性工学への取り組みが今後必要になると感じている。

謝辞

研究を進める中で、ディスカッションをして頂いた立命館大学の長沢伸也教授に感謝いたします。

5　参考文献

[1]林，内藤，若見:"最急降下法を用いた学習型ファジィ結合演算子の提案"，日本ファジィ学会誌，Vol.5,No.5,pp.1132-1141(1993).

[2]今中，曽我，上原，豊田:"感覚的情報を扱うためのPrologとニューラルネットワークの結合",人工知能学会誌,Vol.6,No.2,pp.260-270(1991).

[3]三浦，小澤，今中，恒川:"フィーリング検索サービス",日本ファジィ学会誌,Vol.8, Vol.6, pp.1036-1038(1996).

[4]長沢伸也:"感性情報処理と感性工学",第12回ファジィシステムシンポジウム,pp.733-736(1996).

[5]Wakami, N., Naito, E., Ozawa, J. and Hayashi, I.:"Fuzzy Retrieval System Employing Fuzzy Connectives with Learning Functions and Query Networks",FUZZ-IEEE/IFES '95,Vol.1,pp57-64(1995).

[連絡先] 〒619-02 京都府相楽郡精華町光台3丁目4番地　松下電器産業(株)　中央研究所　今中　武
Tel:0774-98-2531, Fax:0774-98-2581
E-mail:imanaka@crl.mei.co.jp

FRS1-2

富士通における「印象の工学」の研究について

Our Research on "Impression Engineering" at Fujitsu

大沢　光
Mitsuru OSAWA
富士通・感性技術推進部
KANSEI Information Technology Department, FUJITSU LIMITED

"Impression Engineering" represents our intention of realization of engineering application related impression that man feels. It concerns the problems about impression, especially its measurement, its analysis, its modelling and its application. Fujitsu researches not only application problems but also fundamental problems, and holds "Impression Engineering" Workshop for exchange of information between researchers as one of our social contribution.

1．「印象の工学」のこと

「印象の工学」は、人が感じる「印象」を、工学的に応用しようという意図を表す言葉である。研究対象は、製品や空間のデザインのほか、景観、音楽、人の顔、動作、文章、企業のイメージなど、人が印象を感じる“すべて”であり、「感性工学」とは、発想・技術ともに、近い関係にある。敢えてその違いをいえば、「印象の工学」では、研究対象を、比較的に馴染みやすい「印象」に限定して、その計測・分析などの問題点の解決や“からくり”の解明などをめざしていることであろうか。

2．「感性技術推進部」のこと

「感性技術推進部」は、１９９１年３月に、通産省の産技プロ「人間感覚計測応用技術」の受託研究をきっかけに発足した。スタッフは、筆者＋研究アシスタント２名＋協力スタッフ４名である。現在は“明後日”の技術を検討する先行技術調査室（本部レベル）に属し、「印象の工学」の基礎研究のほか、応用研究にも、重点をおくようになっている。

3．「研究課題と成果」のこと

（１）「印象の計測」では、いろいろと問題点の多い「ＳＤ法」に代わるあるいはこれを補完する方法として、自由記述をベースに、特徴と印象を申告させる「自由申告法」（図１）などを開発した[1]。

（２）「印象の分析」では、従来の解析的な方法に代わって、遺伝的アルゴリズムを利用して、誤判別数や誤判別率を最小化できる、新しい「判別分析」（図２）などを開発し[3]、さらに、ほかの多変量解析の方法の問題点の解決をめざしている。

（３）「印象のモデル化」では、対象の仕様や特徴と印象の間の隠れている“構造的な”関係を見つけ、仕様や特徴と印象を互いに翻訳できる心理感覚モデルを構築するための「同時関係分析法」（図３）を開発した[1][2]。また、任意の画像の特徴量を抽出して、これと印象の申告の有無などを、判別分析などによって対応付ける方法（図４）を試みて、まずまずの結果を得つつある。

（４）「印象の応用」では、同時関係分析法によって構築した心理感覚モデルを組み込んで、自然言語で会話でき、印象によって製品のデザインの検索ができる「売り子システム」（図５）を試作した[1][2]。このほか、製品の３次元のモデルに作り、これに加工や変形を加えて、新しいデザインをつくり出し（図６）、その結果に対する印象を評価し、これを繰り返して、希望（印象）に合ったモノのデザインを作ることができる“能動的な”「デザイン支援システム」（図７）を開発しつつある。さらに、製品のデザインに、希望を入力すると、システムが、これに対応した加工や変形を加えられる“自律的な”システムも、検討している。

4．「ワークショップ」のこと

社会貢献の１つとして、「印象の工学」に関心を持つ研究者の間の情報交換などを目的に、「印象の工学」ワークショップを主催している。１９９６年１０月３１日（木）～１１月１日（金）の第１回目（印象'96)は、「印象はどのように測ればよいか」をテーマに、３件の特別講演と１５件の研究発表と質疑を行った。第２回目（印象'97)は、「印象はどのように分析すればよいか」をテーマに、１９９７年８月２８日（木）～２９日（金）に行われる。詳細は、ホームページ（http://fujisan.gmsnet.or.jp/impression/index.html）に“すべて”掲載してあり、ここで、「印象'96」の模様を“読み”“聞く”ことができる（図８）。

【文献】 [1]大沢光：第５章「感性工学」は“センスのよい”コンピューターを実現できるのだろうか、大沢光ほか著『感性・人間・コンピューター』、富士通経営研修所、１９９５年７月

[2]大沢光：印象の工学的応用としての「デザイン支援システム」の構築のための技術、繊維学会誌、第５２巻８号、１９９６年８月

[3]大沢光：遺伝的アルゴリズムを利用した「判別分析」の開発、日本心理学会第６１回大会論文集、１９９７年９月（投稿済）

≪連絡先≫〒211-88　川崎市中原区上小田中4-1-1
（本160）　☎(044)754-3277　fax(044)754-3837
e-mail=osawa@sysrap.cs.fujitsu.co.jp

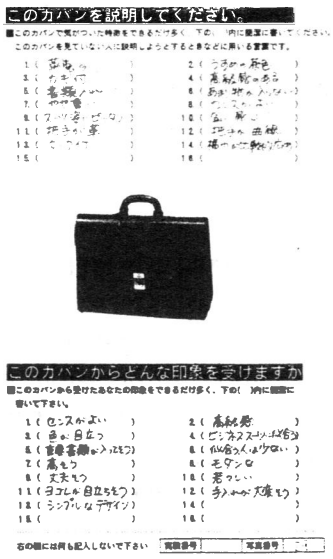
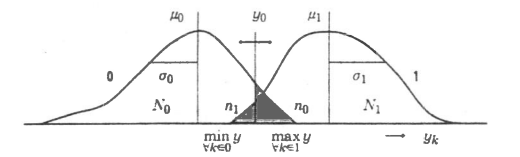


図 1



判別式 ① $y_k = \sum_{\forall i} a_i x_{ik}$ ② $y_k = \sum_{\forall i} a_i x_{ik} + \sum_{\forall i,j} b_{ij} x_{ik} x_{jk}$

③ $y_k = \left| \sum_{\forall i} a_i x_{ik} + b \right|$ ④ $(u_k,\ v_k) = \left(\sum_{\forall i} a_i x_{ik},\ \sum_{\forall j} b_j x_{ik} \right)$ ……

判別目的 ×① $\frac{(\mu_0-\mu_1)^2}{N_0\sigma_0^2+N_1\sigma_1^2} \longrightarrow maximize$ ○② $n_0+n_1 \longrightarrow minimize$

◎③ $max(n_0, n_1) \longrightarrow mimimize$ ◎④ $max\left(\frac{n_0}{N_0}, \frac{n_1}{N_1}\right) \longrightarrow mimimize$

その他(データの性格) $n_0 \longrightarrow (1-\alpha)n_0$

図 2

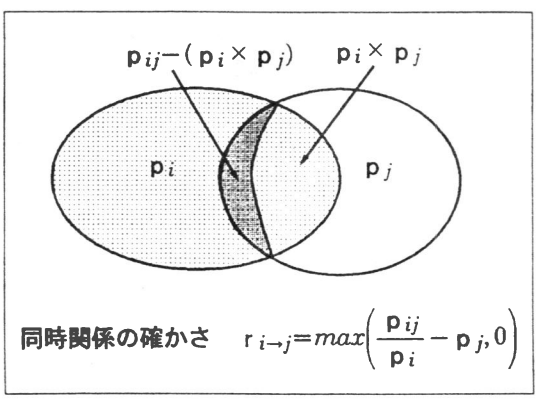


図 3

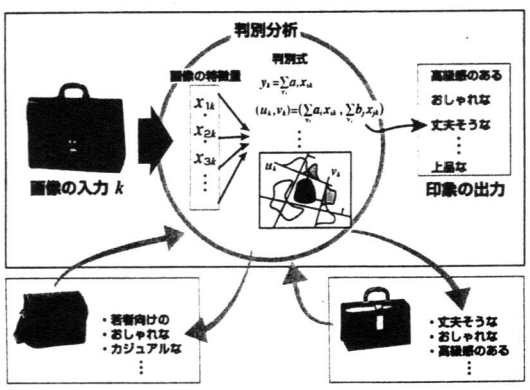


図 4

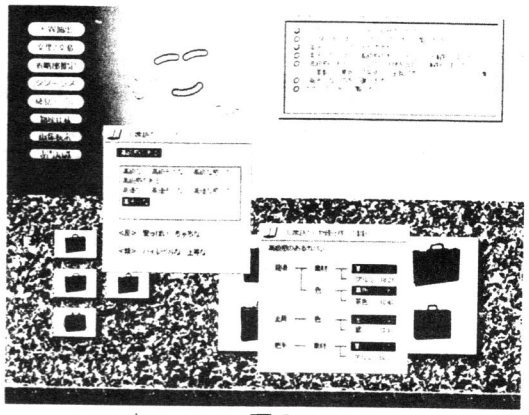


図 5

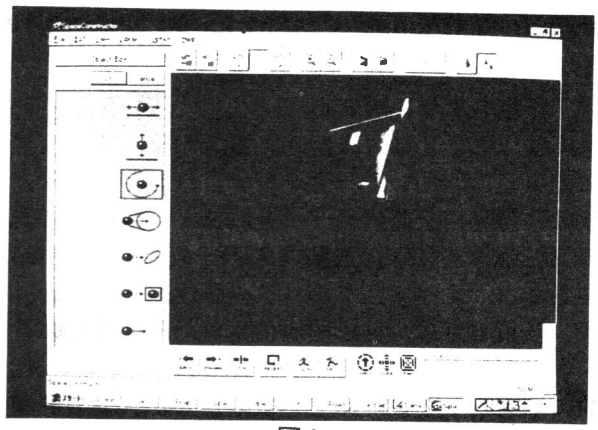


図 6

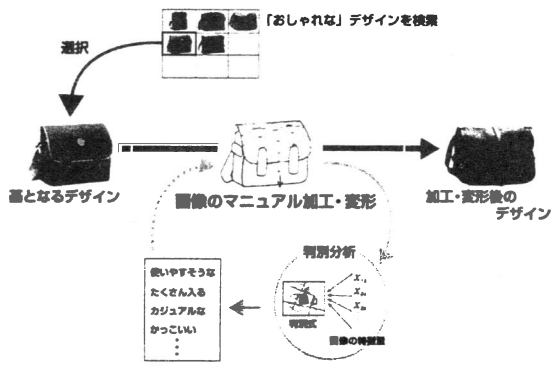


図 7

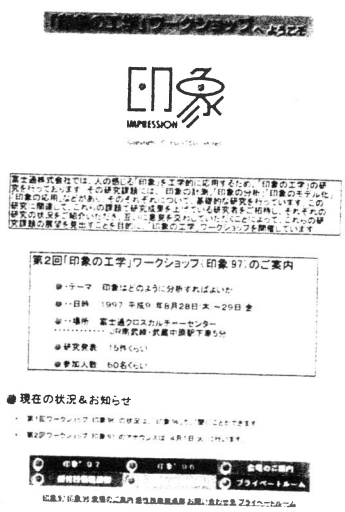


図 8

FRS1-3

日立製作所中央研究所における感性情報メディア研究

Research Activities of Kansei Media in HITACHI Central Research Lab.

北 原 義 典
Yoshinori Kitahara

(株) 日立製作所 中央研究所
Central Research Laboratory , HITACHI, Ltd.

In this paper, research activities of Kansei media in our laboratory are introduced. Our purpose is to propose tools to help beginners use various functions needed to produce Kansei media contents. The functions of these tools are handling video data, making 3D animation, coordinating colors, editing narration and composing music. Some of them have been already commercialized.

1. はじめに

ここ数年、ＰＣを中心としたマルチメディア情報機器の市場が急速に伸び、さらにＣＤ－ＲＯＭ、ＭＯをはじめとする大容量記憶装置の普及も相まって、ユーザが手軽に画像や音声を自由に扱える環境が現実のものとなり、ユーザが論理情報だけでなく感性情報を自由に扱える環境を提供することが必要になってきている。このような状況の下、従来、大学を中心に行なわれていた感性情報処理研究が、民間企業においても、取り上げられるようになってきた。

本稿では、弊社中央研究所における感性情報メディアの研究の取り組みについて紹介する。

2. 感性と感性情報

増山[1]、野呂[2]、長町[3]、長沢[4]等の定義を総合すれば、感性とは感覚、感情、気分を感じる性質やそのエネルギーであるということになろう。

感性は、あくまでも主観的な認識であり、「暖かい」「楽しい」といった形容語で表現されることが多い。これを我々は感性表現語と呼んでいる。感性表現語は、形容詞、形容動詞だけでなく、名詞＋（「調」、「的」、「風」）等で表現されることもある。

「感性情報」とは、情報処理の観点からの、上述の感性の総称であり、この感性情報を担うメディアを我々は「感性情報メディア」と呼んでいる。 従来の情報処理分野では、メディアを対象としたとき、その論理情報のみを扱い、これらに含まれる感性情報は、無視ないし廃棄されていた。すなわち、例えば画像認識で言えば、その画像にどんな物体が含まれているのかを問題にし、それがどんな雰囲気をもった画像であるかということはあまり問題にされない。また、音声認識では、どんな音韻系列であるかを問題にし、どんな感情をもって発話されたかは重要視されない。音声合成では、音韻明瞭度を問題にするが、柔らかい声とかはずんだ声にするということは二の次になっているのが現状である。しかしながら、情報の本当に意図するところを汲み取ったり伝えたりするためには、感性情報の抽出や生成が必要となる。従来、感性情報処理や感性工学の応用では、自動車、家、家具、下着などのハード設計における感性デザインが盛んに行なわれてきたが、今後はソフト面でも、感性処理応用が期待される。

3. 当研究所における感性情報メディアの研究

当所における感性情報メディアの研究は、エンドユーザの感性演出の支援、すなわちプロでない一般の人が、音楽を作ったり、アニメを作ったり、映像を作ったりする作業をサポートする環境の提供を目標とすることを基本的な考えとしている。現在、エンドユーザのための

（1）映像作成支援技術
（2）アニメーション作成支援技術

（3）配色支援技術
（4）ナレーション付与支援技術
（5）音楽作成支援技術
の研究を行なっている。

3．1　映像制作支援技術

映像は、シナリオ、シーン、カットといった構造をもっている。この構造に基づいたハンドリングを行なえば、映像編集は簡単化される。当研究所では、エンドユーザのための映像の制作・検索技術を開発している［5］。まず、編集については、映像の時間・空間構造を把握できるようなインタフェースを実現するため、自動的にカットを分割し、カットの継続時間を立体の奥行きとして一覧できるようにした（図1）。カットの自動分割は、フレーム間で色彩ヒストグラムの相関値を用いて行なう。その他にも、カメラワークの自動検出によってズームアップ直後の映像を見つけたり、手振れ補正を容易にした。カメラワークの自動検出は、フレーム間の分割画像への対応づけを行ない移動量を求めることによって行なう。

映像検索では、色の組み合わせを手掛かりにオブジェクトを検出する機能や、代表フレームのマッチングによるシーンの検出機能などを開発した。

以上の編集・検索支援機能のいくつかは、パソコン用ソフトとして製品化されている。

3．2　アニメーション作成支援技術

自分で絵を描きたい、アニメーションを作りたいというニーズはエンドユーザにおいても強い。特に、3Dアニメーションは、従来、プロフェッショナルが制作するものという印象が強かった。当研究所では、CGキャラクタに動作を付けて、アニメーションを簡単に作ることができるツールを開発した［6］。CGキャラクタのモデリングは、ドロー系ソフトで描いた2次元図形を3次元多関節構造体に変換する手法［7］により行なう。この変換は、色彩情報を含む2次元のベクトルデータと、厚みや厚み形状等の属性を記述した文字データとから、互いに親子関係をもった3次元部品の群を作り出すものである。アニメーションは、各キーフレーム毎に、ポインティングデバイスを用いて、モデルの動きを設定し、フレーム間で補間することによって行なう。その他、喜怒哀楽に関する語を指定することにより顔の表情を付けたり、音声データに合わせて口形を動かしたり、アニメ風レンダリングに変換する等の機能がある（図2）。本ツールは、パソコン用ソフトとして製品化されている。

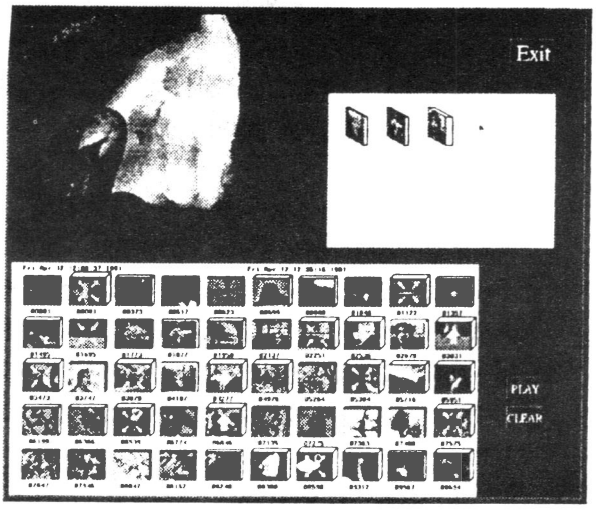


図1　映像時間軸編集インタフェース

3．3　配色支援技術

配色は、デザイナでない一般ユーザが頭を悩ます作業の1つである。当研究所が提案する配色感性テスタは、配色に関する認知心理的デザイン原則を評価関数化して適性度を自動判定する機構である[8]。

本システムでは、色彩Pと色彩Qとの間の配色の適正度を、例えば、以下の評価関数F（P，Q）により算出する。

$$F(P,Q)= \alpha f1(P,Q)+\beta f2(P,Q)+\gamma f3(P,Q)$$

サブ関数f1、f2、f3は

$$f1(P,Q) = 1-|Hp\cdot Hq|$$
$$f2(P,Q) = |Vp-Vq|$$
$$f3(P,Q) = |Cp-Cq|$$

のように定義しておく。α、β、γは定数であり、Hp、Vp、Cpは色彩Pの、Hq、Vq、Cqは

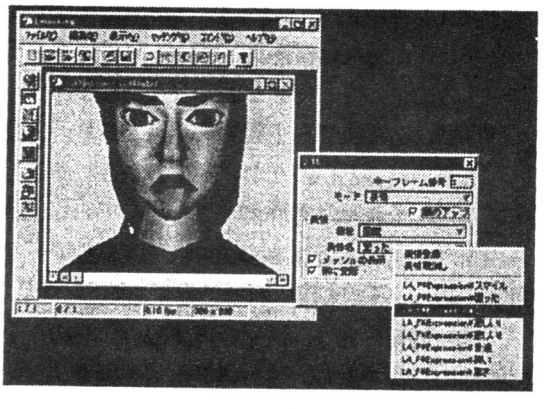


図2　感性語からの表情付与インタフェース
（日立APS社「Little Actor」）

色彩Qの各々色相（ベクトル表現）、明度、彩度を表す。また、Ｈｐ・ＨｑはＨｐ、Ｈｑの内積を表す。同式では、配色適正度の値が大きいほど色彩Ｐと色彩Ｑとの間の配色の整合性が高く視認性が高いことを示す。評価関数は、各種デザイン原則に応じて設定することができる。

評価関数により算出された配色適正度の値はある閾値で分類され、その結果に応じてパタンを対応させたアイコン（信号機等）を表示する。

本システムでは、さらに、上式による評価値がある閾値よりも小さい場合には、その理由をユーザにテキストで提示するアドバイス表示機能をもたせる。これは、サブ関数ｆ１、ｆ２、ｆ３について、各関数の値を閾値によって分類したコメントを格納させておき、各関数の評価値に応じて表示するものである。このアドバイス表示機能により、ユーザは、配色に関する知識を習得できるようになっている。

３．４　ナレーション付与支援技術

一般に、素人がナレーション付与を行なう際には、(a) 原稿を棒読みしがちである、(b) 制限時間で原稿を読上げることは困難、(c) クリアな発声、雰囲気に合わせた発声には訓練が必要、のような問題点がある。当研究所では、ユーザが発声した音声をクリアで、韻律の強弱に富んだナレーションに声質加工し、制限時間に適合するように時間伸縮を行なう技術を開発している［８］。システムは、録音した音声を、ユーザが入力した感性表現語に適合したナレーションに声質加工する。そのためのルールを表１に示す。ルール中の韻律成分は各々独立に制御する。韻律成分の最適解の組み合わせは、遺伝的アルゴリズムの考え方により求める［９］。また、プレゼンテーションなどの制限時間に合わせて発話速度の伸縮を行なうこともできる。発声された音声をピッチを変えることなく時間伸縮する方法には、無音区間を伸縮する方法、母音定常部を伸縮する方法等がある。また、簡単な予備実験から、音声全体長の５％以内であれば線形に一様伸縮しても聴取者には時間の伸縮および音韻性の劣化はほとんど知覚されないことがわかっている。したがって、図３のように、時間差比率をϕ(=(T-t)/t)としたとき、

（１）$|\phi| \leqq 0.05$ であれば
ユーザ音声をϕ倍にＴＤＨＳの改良方式［１０］を用いて一様伸縮する。

（２）$0.3 > |\phi| > 0.05$ であれば
無音区間および母音定常部を各々$\phi/2$の比率分の間引きや挿入によって伸縮させる。無音区間および母音定常部は、音声パワー、継続時間長により自動的に検出する。

表１　ナレーション変換のための制御ルール

特徴				感性表現語		
				クリアな	落ち着いた	はずんだ
韻律情報	ピッチ情報	静的特徴	平均ピッチ	全体的に数%上昇	全体的に数%下降	全体的に数十%上昇
		動的特徴	ピッチパタン	ﾀﾞｲﾅﾐｯｸﾚﾝｼﾞを拡大	ﾀﾞｲﾅﾐｯｸﾚﾝｼﾞを拡大	ﾀﾞｲﾅﾐｯｸﾚﾝｼﾞを拡大
	パワー情報			・子音部をやや上昇 ・無声子音のバズバーを除去	全体的にやや抑制	全体的にやや拡大
	時間構造			やや圧縮	やや伸長	やや圧縮
スペクトル情報	静的特徴		平均スペクトル包絡	中域（3～4kHz）のレベルを上昇	—	—
	動的特徴		ホルマントパタン	・時間軌跡の振れ幅を拡大 ・各時刻内のﾀﾞｲﾅﾐｯｸﾚﾝｼﾞを拡大 ・第３ﾎﾙﾏﾝﾄの最大値を上昇	—	—

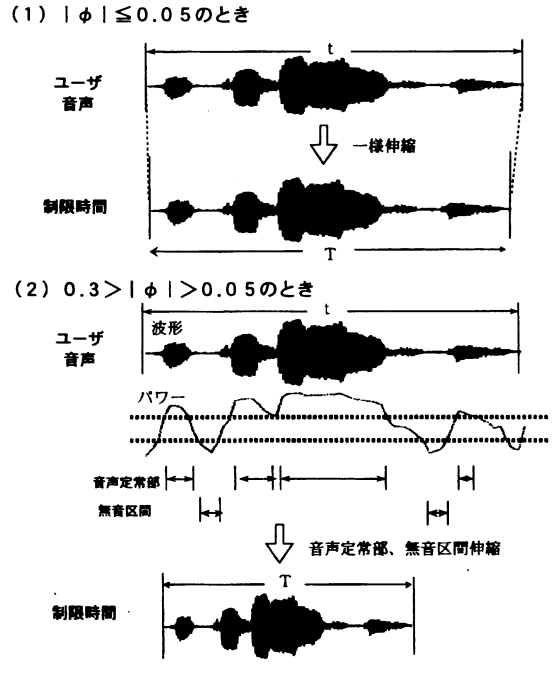


図３　ナレーション音声の時間伸縮

なお、|φ|≧0.3の場合には、無理に音声を伸縮せずに、文章の修正および再入力を要求するコメントをユーザに提示する。

3．5 音楽作成支援技術

素人ユーザが、プレゼンテーションコンテンツ作成時などにBGM付与を行なう際の主な問題点は、(a) 所望の雰囲気や画像に適合した音楽を選択できない、(b) 画像やナレーションとの時間整合をとることが極めて困難、(c) 既存の音楽を使用すると著作権や版権の問題が付随する、等である。(a) は、感性表現語と対応させた音楽データベースを利用することでサポートできる。(b) および (c) については、単なる音楽検索ではなくて、音楽を生成することによって問題が解決される。当研究所では、ユーザが入力したプレゼンテーションの雰囲気（感性表現語）に適合した音楽を、リズム、コード(和音)、メロディより合成する技術を開発した［11］。まず、感性表現語をキーとしたリズムパタンDBを検索し条件に適合したリズムパタンを選択する。コードデータも、予め500曲の既存曲を感性表現語によって分類したDBからコード遷移パタンを選択する。次に、音階遷移確率モデルをアークにもつマルコフモデルを用いてメロディパタンを生成する。最後に、これらのパタンより楽曲を合成する。生成過程を図4に示す。本方式により生成された音楽は、電子アルバムソフト等の製品で使用されている。

4．まとめ

以上、中央研究所における感性情報メディアの研究についての取り組みについて紹介してきた。当研究所では、エンドユーザの感性演出の支援に力点を置き、研究開発を進めている。今後、マルチメディア時代に向けて、パーソナル化、多様化指向が強まり、感性情報処理技術の用途は、大きく広がっていくものと思われる。しかしながら、人間の最も人間たる部分である感性の工学的処理にはおのずと限界があろう。産業応用では、この限界を知っておくことが必要である。

謝辞 議論頂いた当研究所宮武孝文氏、新井清志氏に深謝いたします。

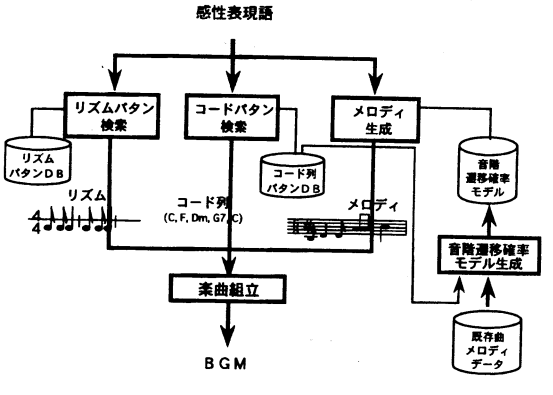


図4 BGM自動生成方法

参考文献

［1］増山：感性と軽量化、品質、21（2）（1989）
［2］野呂：エルゴノミクスと感性、日科技連第34回官能検査セミナテキスト（1991）
［3］長町：感性工学と新製品開発、第20回官能検査シンポジウム報文集（1990）
［4］長沢：感性品質とファジーの活用、第2回ｴﾙｺﾞﾉﾐｸｽｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ報文集（1991）
［5］宮武：認識技術を利用した知的映像ハンドリング、精密工学会画像応用技術研究報告、Vol.11、No.5（1997）
［6］小川：簡単、安い、楽しい！超低価格3次元CGソフトが続々登場、NIKKEI COMPUTER GRAPHICS（1996）
［7］新井、堀井：二次元ドローデータによる三次元多関節構造体のモデリング、情処研報、96-CG-79-3（1996）
［8］北原、長谷川；ユーザのマルチメディア感性演出支援方式の提案、信学技報、HC94-95（1995）
［9］佐藤、安藤、北原；進化的計算を用いた韻律係数フィッティングによる声質変換に関して、第12回HIｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ、2506（1996）
［10］森田、板倉：自己相関法による音声の時間軸での伸縮方式とその評価、信学技報、EA86-5（1986）
［11］長谷川、北原：マルチメディア感性演出支援ｼｽﾃﾑにおけるBGM自動生成方法の提案、第11回HIｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ、2241（1995）

問い合わせ先：
東京都国分寺市東恋ケ窪1-280
（株）日立製作所 中央研究所
北原義典
0423-23-1111 kitahara@crl.hitachi.co.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRS1-4

日本ファジィ学会における感性工学研究

Studies on Kansei Engineering in SOFT

中森 義輝

Yoshiteru Nakamori

甲南大学 理学部 応用数学科

Department of Applied Mathematics, Konan University

Abstract: Kansei Engineering offers important research problems to the Japan Society for Fuzzy Theory and Systems. This paper tries to survey research activities in the past, present and future, related to Kansei Engineering in this society.

1. はじめに

感性工学の発想と諸問題は，日本ファジィ学会に対して今後ますます重要な研究課題を提供するものと思われる。本発表では，日本ファジィ学会における感性工学への取り組みについて総括と展望を試みる。

2. 感性工学とファジィ理論

感性工学は人間の感性やイメージを物理的なデザイン要素に翻訳して，感性にあった商品を設計するテクノロジーである[1]。つまり，感性情報処理を製品設計支援などに応用する方法論である。感性情報処理という大きな枠組みの中では多変量分析法と位置づけられている[2]。すなわち，心理学，人文社会科学において広く用いられてきた統計的分析手法を感性情報処理のために使うもので，感性情報の記述方式としては感性ワードを用い，感性ワードと物理的特徴の間の写像関数を求める。

この文脈においては，日本ファジィ学会において感性工学を直接扱った研究は少ない。

一方，文部省科学研究費補助金時限付き分化細目の「感性工学」では，感性の計測と定量化手法の開発，感性と生理的指標の対応，感性情報処理，材料・製品・生活空間における感性評価と開発支援，マンマシーンインタフェースの認知工学的解析等を含むものとしている。

この文脈においては，日本ファジィ学会での研究は「全部」感性工学といえる[3]。

第1の文脈における感性の表現は形容詞を中心とする感性ワードである。それは，対象・状況・個人によって使用法が異なるものである。言葉の曖昧性の数量化こそファジィ理論誕生の動機であると著者は理解している。さらに，曖昧な言葉と製品とのソフトな対応関係を求めることが第1の文脈における感性工学の目的であるとすれば，まさにファジィ学会で行われている研究のすべてが関係しているという第2の文脈につながる。

3. ファジィシステムシンポジウムにおける発表から

日本ファジィ学会においても数年前から感性情報処理の応用研究が盛んになってきている。第11回と第12回のファジィシステムシンポジウムにおける発表タイトルからひろってみよう。

感性情報処理に関しては，九州工業大学矢鳴虎夫研究室の「主観に基づいた感情処理を用いた対話システム」「感情イメージコードを用いた詩の自動生成に向けて」，玉川大学菅野直敏研究室の「ファジィによる色彩表現」，筑波大学鬼沢武久研究室の「感性を反映させた音色の生成」「絵で表現される対象物の関係理解」，広島工業大学玉野和保氏の「絵画による情報表現とその光学処理法」，秋田公立美術工芸短期大学中津山幹男研究室の「色相のファジィモデリング」，山口大学山口静馬研究室の「感覚量の曖昧性と文脈効果を考慮した変動刺激音に対する心理応答予測」「ファジィ理論による音声聴取時の有色外来雑音に対する心理的評価」などの研究があげられる。

感性工学手法に関係するものとしては，インテック・システム研究所の「感性的な言葉による工芸品画像の検索手法について」，清水建設松下裕氏らの

「室内空間の高さに対する評価プロセスのファジィ積分モデル－階層型モデルによる意識構造分析」，筆者の研究室の「感性評価データのファジィ距離空間について」「連想記憶による感性とデザインのファジィ対応モデル」などがある。

タイトルに直接表現されていなくても感性情報を扱っている論文は上記以外にも数多くある。また，京都工芸繊維大学吉川歩氏らの「ファジィ集合を用いたカテゴリー評定尺度図設計システム」，愛知工業大学小田哲久氏の「ファジィ多項目並列評定法の心理学的応用」などの基礎的研究が数多くある。

4. ファジィ学会への期待

感性は主観的・状況依存的であり，感性の記述・表現は多義的・曖昧になりやすい[4]という特徴は，ファジィ学会が追い求めてきた対象そのものである。感性の表現，推論，総合に対してそれぞれファジィ集合，ファジィ論理，ファジィ測度という道具が用意されている。以下では，長町三生氏の提唱された感性工学の文脈に沿って，ファジィ学会が検討すべき課題を整理してみる。

4.1 感性情報のファジィ構造

人間が物理的対象に対して心に抱く感性を表現する言葉，例えば「落ち着いた感じ」「華やかな雰囲気」などの感性表現群のファジィ距離空間を構成し，曖昧性，個人差を考慮した感性情報の構造化を行うことが１つのテーマである。

この研究は，顧客の好みにあわせた製品の製造販売をはじめとする，感覚的評価を取り扱う問題の解決に寄与することが目的である。個人差のある質的データを因子分析などの多変量解析により分析すれば，ある程度の傾向をつかむことが可能であるが，個性や感性の違いを扱うことは困難である。

4.2 感性とデザインとのファジィ対応

感性表現とデザインとの対応モデルは数量化理論，正準相関分析など線形関係を抽出する統計手法を用いることが多い。したがって，人間の曖昧で非線形かつ非加法的な感性データを巧みに扱っているとは言いがたい。人間の曖昧で非線形な感性データを巧みに扱うためにはファジィ論理やファジィ測度の利用が有効であろう。

4.3 感性表現からデザインのファジィ推論

なかば量的に測定された感性データと質的に測定されたデザインデータの対応関係を表現するモデルは数量化理論やニューラルネットで構築されることが多い。数量化理論を用いた場合，感性表現の入力に対して，アイテムごとにカテゴリーウェイトの最も大きいカテゴリーを選択したデザインを候補とすることが考えられる。

しかし，評価の高い商品サンプルでもデザイン要素を１つ変更するだけで台無しになることもあれば，逆に，１つのデザイン要素の変更で見違えるようになるなど，評価は不連続である。また，複数の感性表現を入力したときの競合状況をどのように取り扱うかという課題もある。ニューラルネットを用いれば何となくわかったような入出力関係が得られるが，納得できるいくつかの部分的な関係をメンバシップ関数で統合化する方法が筆者の好みである。

5. おわりに

大沢光氏の言葉[5]を引用すれば，「人間の高次な心理感覚の特性は，複雑・相対的・曖昧・非線形である上に，時間的に変化し，また，本質的にデータが欠けていることである。しかし，データは欠けていても，要因と要因の間の関係は確かにあるわけで，そういったものを扱えることが非常に重要である」。これは日本ファジィ学会の社会への貢献の方向を指し示しているとともに，学会設立の原点であるといえる。今後，感性工学研究が大いに進展することを期待したい。

参考文献

[1] 長町三生：感性工学．海文堂，1989.

[2] 辻三郎編：感性の科学 -感性情報処理へのアプローチ-．サイエンス社，1997.

[3] 長沢伸也：感性工学の現状と動向．第１回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論文集，pp. 1-4，1996.

[4] 井口征士他：感性情報処理．オーム社，1994.

[5] 大沢光他：感性・人間・コンピューター．富士通ブックス，1995.

連絡先：

中森 義輝

〒658 神戸市 東灘区 岡本 8-9-1

甲南大学 理学部 応用数学科

Tel: 078-435-2533 Fax: 078-452-5507

Email: nakamori@center.konan-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRS2-1

感性工学をこう考える
A Thought on Kansei Engineering

森　典彦
Norihiko MORI

東京工芸大学芸術学部デザイン学科
Tokyo Institute of Polytechnics, Faculty of Arts, Department of Design

Abstract: Taking the point of view in design, the structure of human sensitivity (Kansei) is investigated, and a thought on Kansei engineering is introduced. The fact that the resemblance existing among Kansei words can be explained not as nearness in the multi-dimensional Kansei words space but as 'family-relations' in that space, is worth notice and is suggestive for originating new design.

1．はじめに

デザインの立場から感性の問題および感性工学について議論する。

したがって人が人工物・人工環境などの対象の属性に対して惹起する感性を扱い、対象のない（はっきりしない）幸福感といった感性は除く。

また感性は感受性であるとして対象の属性からの刺激を受けて惹起されるものとする立場もあるが、デザイナーの感性で、というときのように対象に働きかけて新しく作る動機についてもここでは感性の面から論ずる。一般に工学は技術を伴ってもの作りに係わるゆえに感性工学ももの作りを目的の一つとしている。その同じ目的を手段は何であれ達成しようとする行為がデザインである。

2．感性の構造

怒り・悲しみなどの感情はそのまま身体に現れるが、感性は身体に現れず脳内に現れる認知的あるいは心理的状態または機能である。脳内のそのことを直接生理的に調べることができない以上、感性の表現は言語という概念記号によらざるを得ない。また人は言語表現によって自分の感性の内容を認識する。

感性の言語表現は、３つの特徴によって構造化される。そのうちの２つは

1) 言語表現は、対象の属性からの物理的刺激が感覚を通して惹起するものと、対象を言語表現した上で記憶にあるその意味が惹起するものとの２系統があって、感性の表現は前者に相当する。
2) 感性の言語表現は階層構造を持ち、下位階層から上位階層への因果関係によって結ばれる。

である。上記1)、2)を図１に模式的に示す。［1］ただしここで形態要素は対象の属性であり、認知要素は人が視覚によって知覚した単位であり、イメージ語は視覚に基づく心象語であり、例示した感性表

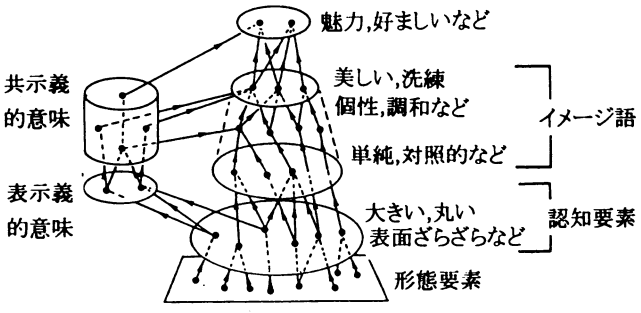


図１　意味(左側)と感性(右側)の階層構造模式図

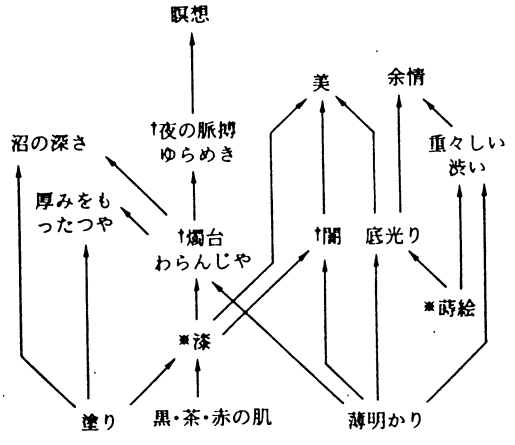


図２　文芸作品における視覚的感性語の構造化
谷崎潤一郎「陰翳礼讃」より，薄明かりの漆器について作成．ただし※は名義的意味を，†は暗示的意味を表す語

現語は視覚関連に限っている。ここで形態要素だけは物理的概念であって人は知り得ず、人が知り得る外界の姿は認知要素である。またこのような構造はアンケート調査やプロトコル調査から見出すことができるが文芸作品からでも抽出できる。図２はその例である。［2］

３つ目の特徴は

3) 結果となる上位の一つの言語は、原因となる下位概念集合の一つの部分集合にだけ対応するのではなく、部分集合族 family of sets に対応する。

上記3)を図３に模式的に示す。

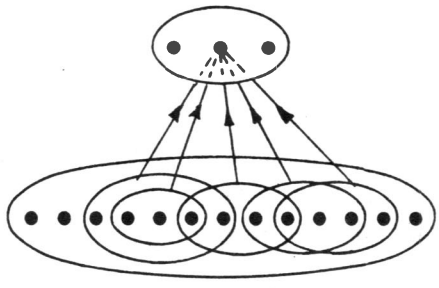


図３　原因となる部分集合族

上記3)に関して少し詳しく考察しよう。

L.Wittgenstein はゲームという 言語に対応する下位階層概念集合の構造（これは図１でいえば左側の意味構造）を考察し一般的形式に敷衍した。彼は言語の類似は通常考えられているような距離的親近度によるのではないとし、「それらは互いに沢山の異なった仕方で類似し」「それらに共通なものは見ないが類似性、関連性を見、それらの全系列を見る」「われわれは互いに重なったり、交叉したりする複雑な類似性の網の目を見、大まかな類似性や細部の類似性の網の目を見ている」「このような類似性を「家族的類似性」というコトバによる以外うまく特徴づけることができない」という。［3］

つまり図３のような構造をいっている。ここでいう家族的類似性 family resemblance はいわば縁で繋がった関係を意味しているので「類縁関係」と呼ぶことにする。このように部分集合族の要素は互いに類縁関係にあるのであって、通常の意味の親近関係にあるのではないことに注意する。

類縁関係は図１における右側の感性語についてもいえることを実証した例がある。「RV 的な」という対象のイメージに対応する認知要素の集合族は互いに類縁関係を持つ。図４に示す。

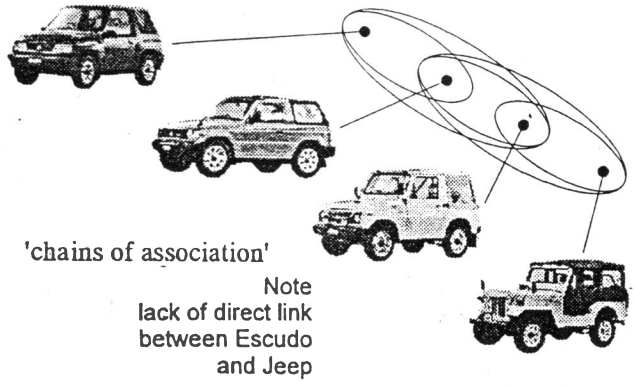


図４　RV 的なイメージに対応する認知要素の集合族。文献［4］の fig.5.5 より抜粋

図３は階層内の要素はカテゴリカルな言語であるが各言語の因果関係へのあてはまりが程度問題である場合も多い。このときに因果関係に係わる言語の一つの組み合わせパタンは、その階層の全言語数を次元数とする多次元のベクトルとして多次元空間内の一点として表すことができるので、図３の類縁関係は図５のように表せる。ここでは通常の親近関係も比較のために示した。

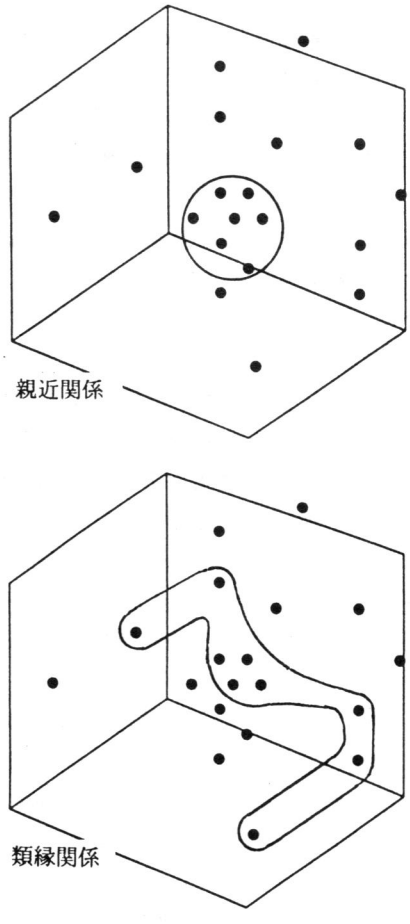


図５　多次元空間で表した親近関係と類縁関係

以上言語表現構造の特徴 3)は、感性語群において多次元ユークリッド距離という親近度で分類したり、誤差を測ったりすることに対して問題を投げかけている。

3．感性工学

工学は最終的には人間にとって有用なものを作り出すのが目的であるから感性工学における感性は人間にとって価値ある感性が関心事である。感性工学は、図１の感性の階層構造の形態要素を対象の属性

	対象の認知的属性 x (m 個)	感性価値 y (n 個)
ｻﾝﾌﾟﾙ	$(x_1)_1, \cdots, (x_m)_1$ $(x_1)_2, \cdots, (x_m)_2$: : :	$(y_1)_1, \cdots, (y_n)_1$ $(y_1)_2, \cdots, (y_n)_1$: : :

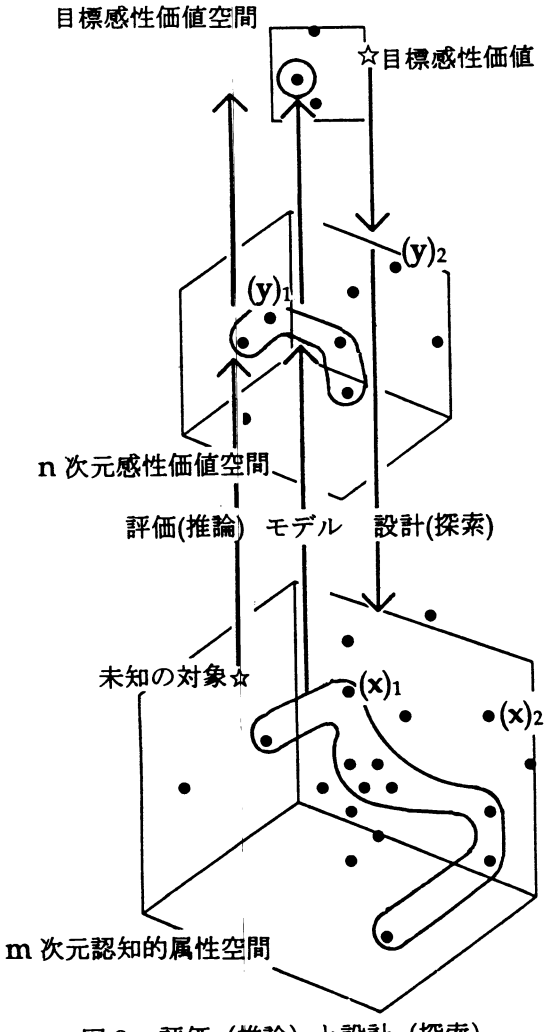


図６　評価（推論）と設計（探索）

に、イメージを感性価値と一般化した上で、最下位層の情報から上位層の情報を導き、その知識を使って上位層の概念から最下位層の情報を得ようとする過程の工学である。すなわちその過程は図６に示すように２つに大別される。評価（推論）と設計（探索）とである。

ここで設計はなぜ推論でないのか。図６における物の属性空間から感性価値空間への関係はたとえ積極的な動機が人にあったとしても感覚器を通しての物理的な因果関係であるに違いなく、特別な場合を除き、いわゆる遡言不可能性が支配する。［5］推論を順推論といい、その逆を逆推論といえば逆推論は一般に不可能であって不完全あるいは部分的な解を探索することになる。［6］こうして設計は探索である。

感性工学における評価の方法は、対象とする物の集合より、属性パタンが既知である複数の物をサンプルとし、各サンプルの属性パタンと感性価値に関する評価パタンとの組を因果関係のデータとして、ニューラルネットワーク、ファジイ推論、または属性の独立性が保たれている場合は回帰モデルなどにより、属性が未知の物の属性パタンを推論する。

感性工学における設計の方法すなわち解の探索の方法は、

1)　基本的に全領域探索
2)　効率的な部分探索

に分かれる。

1)は物の属性が形態要素のような場合は一般に属性数が多く、全組み合わせパタン数は厖大となって時間的に不可能であるからなんらかの情報圧縮の方法を採らなくてはならない。その一つにニューラルネットワークの５層恒等写像モデルを使う方法がある。図７に示す。

すなわち恒等写像モデルを使って属性パタンを学習した後にその中間層を取り出せば、これは低次元に圧縮された非線形属性空間であるから全領域の探索が不可能ではなくなることに着目したものである。この空間上で満足な解が得られたら再び恒等写像モデルを使って現実の属性パタンとして取り出せばよい。［7］

2)は GA(遺伝的アルゴリズム)などが研究レベルで試みられている。

いずれの場合も解の候補が目標とする感性価値パタンをどの程度満足したかは上記の評価の方法を使う。つまり探索の都度、順推論する。それは理想のパタンに対する親近度（感性価値空間におけるユー

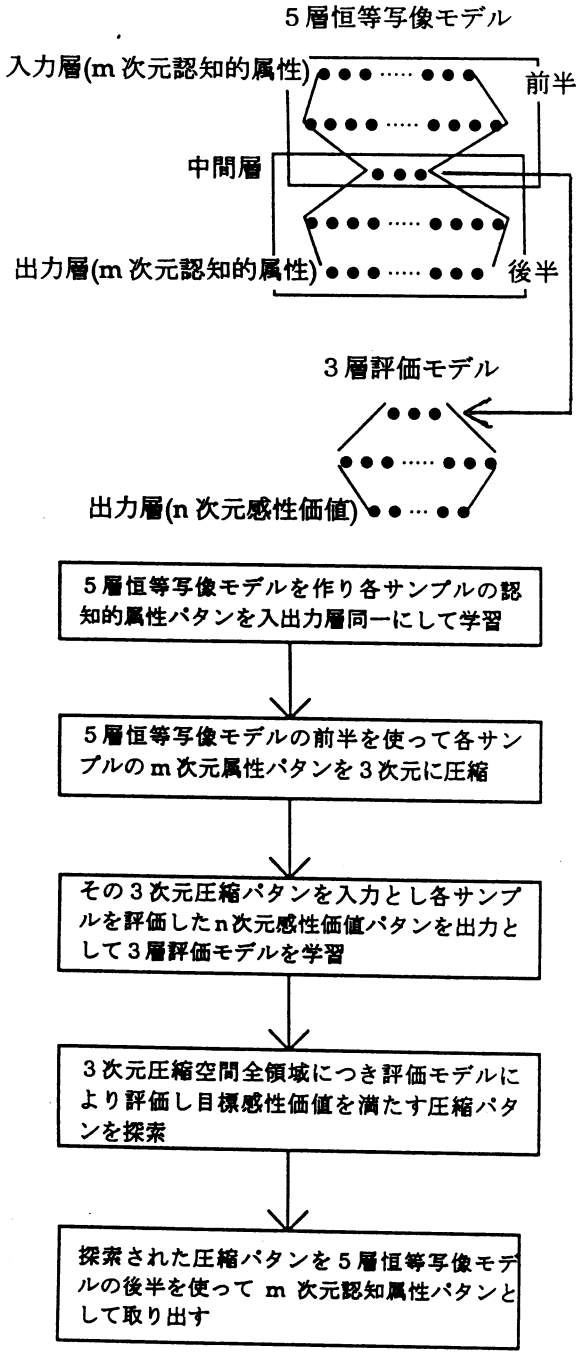


図7　恒等写像モデルによる情報圧縮と解の探索

クリッド距離の逆数など）ではなく、類縁関係で評価されなければならない。理想のパタンに対して類縁関係で連結しているが親近関係では遠い（親近度が低い）ような解候補は、属性パタンも典型解から遠い傾向にあると思われ、意外性のある解、あるいは独創的な解となる可能性がある。

4．おわりに

複雑な感性の構造を調べ、感性工学の考え方を述べ、方法を概観した。いままで注目されることの少なかった感性の概念間の類似関係を考察して親近関係というより類縁関係として捉えるべきことを導き、デザインで重要な創造性に繋がる設計支援に言及した。

デザインの立場からの今後の問題は、本論文の方法で求められる解候補は、認知的な形態仕様であって形ではない。このことが技術設計と異なる。技術設計でも認知的属性仕様を物理的仕様に変換しなければならないがさほど複雑ではない。しかし認知的形態仕様を形に変換するためには物理的仕様に変換することのほかに具体的な形を確定するときに発生する自由度の膨張をどう押さえ込むかについてもう一つのブレークスルーが必要である。

参考文献

[1] 森典彦，美しさを解読する，応用数理 Vol.5, No.3, 69, 1995

[2] *ibid.*, 68

[3] Wittgenstein, L., Philosophische Untersuchungen, I, 65-67, 1953, 邦訳, L.ヴィトゲンシュタイン, 坂井秀寿・藤本隆志訳, 論理哲学論考, PP275-277, 法政大学出版局, 1968

[4] Shackleton, J. p., The Application of a Prototype Theory Framework to the Modeling of Product Perception and the Emergence of New Product Groups, pp58, 千葉大学学位申請論文, 1996

[5] 渡辺慧・渡辺ドロテア, 時間と人間, PP227-238, 中央公論社, 1979

[6] 森典彦編, 左脳デザイニング, 2-4, 海文堂, 1993

[7] 原田利宣. 森典彦. 恒等写像モデルを応用した多様解, デザイン学研究 103, 51-58, 1994

[8] 田慕玲, 森典彦, 目標イメージに適する自動車の形態を探索するデザイン支援システム, デザイン学研究 108, 1-10, 1995

連絡先　164 東京都中野区本町 2-9-5
東京工芸大学芸術学部デザイン学科
森　典彦
tel.03-3372-1321　fax.03-3372-1330

FRS2-2

感性工学をこう考える
ー人間の感性をデザインに造り込む技術ー

長町　三生
Mitsuo Nagamachi

国立呉工業高等専門学校
Kure National Institute of Technology

Kansei Engineering was founded by M. Nagamachi at Hiroshima University more than 20 years ago. Since then, this technology has been researched in terms of Psychology, Ergonomics as well as Artificial Intelligence including Fuzzy Set Theory, and applied to industries of Automobile, Construction Machinery, Construction, Home Electric Appliance, Costume and so forth. Nowadays, there emerged many new products developed through technology of Kansei Engineering. The Kansei Engineering is well known in Japan, Korea, U.S.A. as well as in Europe.

1。はじめに

感性工学（Kansei Engineering）は、約２０年前に広島大学にて創設された人間工学に基づいた新製品開発技術である。

当時企業はモノを作れば作るほど売れる時代であり、研究者であり企業コンサルタントであった筆者はそれを疑問に思い、いずれは良い品質の製品しか売れなくなり、その次には感性を表わす製品しか売れなくなる、の想像した。この思いを受けて研究を始めたのが感性工学の始まりである。

2。感性とは何か

新版心理学事典（平凡社）をみると、

・sense 感覚、感覚器官
・sennsation 感覚
・sensitivity 感受性、敏感性
・sensory system 感覚系

と記述されており、学問的には「感性」という用語はない。広辞苑第２版（岩波書店）で感性を引くと、

感性＝外界の刺激に応じて感覚・知覚を生じる感覚器官の感受性（sennsibility）
＝感覚によってよび起こされそれによって支配される体験

と定義されている。前者は感覚の程度、つまり感受性を指しており、感覚にともなう感情を述べているので、我々が考えている感性に少し近いといえる。日本人や韓国人、つまり漢字圏の人びとが感性の英語訳としてsensibility, sennsibleをよく用いる。Websterによると

・sensibility: the ability to receive sensation
: refined sensitiveness of emotion and taste
: a woman of sensibilities 思慮深い女
・sensible: capable of perceiving, perceiving to the mind, understandable

など”物わかり”の様な使い方をするので、この用法は使用しないほうがよい。以前にも英語圏の人びとにきつく注意されたことがある。

感性工学で取り扱う”感性”とは、これから出現する製品に対する期待感であり願望である。住居であれば、自分が新しく持ちたい住宅は、『外から見て大きく見えて、なかは広々していて、ゆったりした感じの家、ただし費用はほどほど』といったような感じの表現を感性という。自動車であれば、『外観は今にも走りそうな感じで、インテリアは割合と豪華で、それでいて隣の彼女の腕に触れやすそうな感じ、ただし値段はそう高くない。』これらの感性を具体的に大きさや形で表現できる人もいるわけで、そのような人は具体的にデザイン（設計レベル）で表出する。

したがって、感性工学での”感性”とは、『モ

ノに対するその人がもつフィーリングやイメージのことであり、換言すればモノにたいする心理的期待感であり感情』である。感性はすべての感覚レベルをこえた統合的な感情である。英語で表現すれば、感性とはpsychological feeling and image on the coming productである。したがって、ひとことで英語で表現するワードがないので、英語圏の人びとのアドバイスにしたがって、現在"kansei"という言葉を使っており、kansei およびKansei Engineering は欧米ではすでによく知られている。

3。感性工学とは何か

感性工学（Kansei Engineering）とは、感性を工学の世界で技術的に取り扱う学問である。感性はすでに定義したように、感性はモノと対する心理的感情である。これを工学で取り扱うとは、感性を工学の世界へ写し変えることであり、すなわち感性を工学の世界へ写像することであり、『人が持つモノに対する心理的感情やイーメジをモノの設計に翻訳する技術』のことをいう。

このように考えると、感性工学には次のような課題が存在する。

（1）感性をどのように捉え、数値化するか。

（2）設計へ感性を写像するまえに、設計をどう捉えるか。

（3）設計の特性と感性との関係をどのように表現するか。

（4）感性の設計への翻訳技術にどのような工学的技術を適用するか。

感性にもっとも近いのは心理学であるが、感性が非常に曖昧なものであるがために、心理学でさえ感性をこれまで科学的に取り扱うことをしなかった。したがって、感性工学をやろうとする者が感性の科学的把握手法を研究せざるをえないのである。医学をベースとして臨床心理学や人間工学を研究してきたこともあって、学生時代に発表されたOsgood & Suci のSD尺度をつかって統計分析を行うこと、脳波や皮膚電位を用いた生理心理的分析手法などが考えられた。感性工学に手を出すまえに、いづれの手法も多くに経験をもっていたので、容易に両手法を使って研究をすることができた。

ところが、生理的指標は多くの研究者が魅力を感じるのに反して、思うような結果は得られない。このような経験を積んで、結局SD法が最も有効であるとの結論に達したのである。

Spearmanの直弟子であった古賀行義がいた広島文理大の流れをくむ広島大学は因子分析研究のメッカであったことから、多変量解析や官能検査に身じかであったことから、感性工学に多変量解析をどんどん使用してきた。実際には、林式の数量化理論だけではなくてAHP、MDS、双対尺度法等いろいろな統計手法がつかえる。

ただ、これら統計学を使うものすべてが正規分布を想定しており、感性は正規分布でなかったり非線形の特性をもっていることから、本来これらの統計手法は使えないという問題点が存在する。

ともかく、このような苦しみと経験を積み重ねて、大量生産をめざす新製品開発には数量化理論をもちることで良い、との結論をだしてこれまでかなりの数の新製品を世の中に排出することができた。

4。感性工学手法

別の観点からみて、これまでに開発した感性工学手法は以下のとおりである。

（1）Category Classification

これは、最初に感性工学に基づいて「製品コンセプト」を決めたあとに、設計のアイテムの物理特性の設定に至るまで、製品コンセプトを小さく分解していく、という手法である（第1類）。物理特性から人間工学やその分野の技術を使って最終的に設計が完了する。成功例として自動車、家電、女性用下着などの製品がある。

（2）Kansei Engineering System

これはコンピュータを用いてもっと効率良く進めるための手法であり、エキスパート手法を用いている。ものによってはかなり複雑なシステムである。感性ワードの入力に始まり、ワードのデータベースと知識ベースを用いて推論を実行し、デザイン候補を決定し、それを図示する。

感性から設計に至り、その結果を見てデザイナーが自分なりの発想をしてスケッチをコンピュータシステムに入力する。すると同じシステムが働いてデザイナーの発想の診断をする。これを、Hybrid Kansei Engineering Systemという。

（3）Mathematical Modeling

これは数学的モデルを構築して感性工学に用い、

これが感性的結果を導出する。カラーコピーマシン、言葉の診断などの成功例がある。

（4）**Virtual Kansei Engineering**

これは感性工学とVirtual Realityとを結合指せた、世界でも珍しい技術である。感性工学をつかって推論をしてユーザの感性に該当する映像を決定し、その映像の中で疑似体験をする。ユーザが気にいれば商談が成立する。前述したように、感性は非線形特性をもつ。ここにファジィ集合論、GA, ART-SSSなどを利用する必要性があり、非線形性を意識しなくても使えるとよい。

感性工学に関する文献

（1）著　書

1。感性工学（長町三生著）、海文堂出版、1989. 11.30.

2。快適科学（長町三生編）、海文堂出版、1992. 3.5.

3。感性商品学一感性工学の基礎と応用（長町三生編）、海文堂出版、1993.9.25.

4．企業研究会編、新商品開発実例集一商品開発のためのマーケテイングと研究・技術開発（浦川卓也、長町三生、星野隆三）、企業研究会刊、1995.

5。感性工学のおはなし（長町三生著）、日本規格協会、1995.

6。感性人間工学（李舜尭、長町三生）、養英閣、1996.

（2）研究論文

1．情緒工学の研究（長町三生、瀬沼　勲、岩重律子）、人間工学、10（2）、121-130、1974.

2．室の雰囲気に関する感情分析（長町三生）、人間工学、13（1）、7-14、1977.

3．室内照明の情緒工学的研究（長町三生、伊藤宏司、福場良之、辻　敏夫、田淵義彦、入枝輝昭）、人間工学、21（5）、265-272、1985.

4．知識工学手法によるインテリア・コンサルテーシヨン・システムの開発（長町三生、伊藤宏司、福場良之、辻　敏夫、川本浩史）、人間工学、22（1）、1-8、1986.

5．情緒工学とその応用（長町三生）、人間工学、22（6）、316-324、1986.

6．感性の評価と情緒工学（長町三生）、日本機械学会誌、91（838）、955-961、1988.

7．知識工学に基ついた服飾デザイン・コンサルテーシヨン・システムの研究（長町三生、伊藤宏司、辻敏夫、千野高保）、人間工学、24（5）、281-289、1988.

8．自動車の感性工学的アプローチ（長町三生）、自動車技術、43（1）、94-100、1989.

9．自動車の感性工学（長町三生、金田吉生、松島加代子）、自動車研究、11（1）2-6、1989.

10. An image technology expert system and its application to design consultation (M. Nagamachi), International Journal of Human-Computer Interaction , 3(3), 267-279, 1991.

11. A study on an improvement of the manual mode in an advanced teleoperator system (Soon Yo Lee, Mitsuo Nagamchi & Koji Ito) , Advanced Robotics, 5 (3), 233-256, 1991.

12. 感性工学とその方法（長町三生）、経営システム、2（2）、1992.

13. 言葉の響きに関する感性工学（長町三生）、日本音響学会誌、49（9）、638-644、1993.

14. 人工知能の人間工学への応用（石原茂和、長町三生）、人間工学、30（6）、359-366、1994.

15. 感性工学におけるデザインの特徴抽出機構（柏木宏一、松原行宏、長町三生）、Human Interface, 9(1), 9-16, 1994.

16. GMMに基づく感性工学システムのルール同定（真鍋浩二、松原行宏、長町三生）、Human Interface, 9(1), 17-22, 1994.

17. ミニ建機の色彩と感性（中田国昭、岩田照久、長町三生）、Human Interface、9(1), 23-26, 1994.

18. イメージスライドを用いた温熱環境評価手法の検討（増田智紀、西川向一、長町三生）、Human Interface, 9(1), 27-32,1994.

19. 感性工学を利用したキッチン疑似体験システム（榎本範子、沢田一哉、野村淳二、長町三生）, Human Interface, 9(1), 77-84, 1994.

20. Kansei Engineering: A new ergonomic consumer-oriented technology for product development (Mitsuo Nagamachi), International Journal of Industrial Ergonomics, 1 (1),3-12,1995.

21. An automatic builder for a Kansei Engineering expert system using self-organizing neural

networks (Shigekazu Ishihara, Keiko Ishihara, Mitsuo Nagamachi & Yukihiro Matsubara), International Journal of Industrial Ergonomics, 15 (1), 13-24, 1995.

22. Dvelopment of a design support system for office chairs using 3-D graphics (Tomio Jindo, Kiyomi Hirasago & Mitsuo Nagamachi), International Journal of Industrial Ergonomics, 15 (1), 49-62, 1995.
23. A fuzzy rule induction method using genetic algorithm (Toshio Tsuchiya, Tatsushi Maeda, Yukihiro Matsubara and Mitsuo Nagamachi), International Jouranal of Industrial Ergonomics, 18 (2-3), 135-145, 1996.
24. Hybrid kansei engineering system and design support (Yukihiro Matsubara and Mitsuo Nagamachi), International Journal of Industrial Ergonomics, Special Issue; Kansei Engineering and Comfort, 19(2), 81-92, 1997.
25. An analysis of kansei structure on shoes using self-organizing neural networks (Sigekazu Ishihara, Keiko Ishihara, Mitsuo Nagamachi and Yukihiro Matsubara), International Journal of Industrial Ergonomics, Special issue; Kansei Engineering and Comfort, 19(2), 93-104, 1997.
26. Kansei Engineering: A study of perception of vehicle interior image (Chitoshi Tanoue, Kenji Ishikawa and Mitsuo Nagamachi), International Journal of Industrial Ergonomics, Special issue; Kansei Engineering and Comfort, 19(2), 115-128, 1997.

（3）国際会議関係論文

1. A study of kansei rule generation using genetic algorithm (T.Tsuchiya, Y.Matsubara & M.Nagamachi), Symbiosis of Human and Artifact, 191-196, 1995.
2. arboArt: Art based hierarchical clustering and its application to questionnaire data analysis (S.Ishihara, K.Ishihara, M.Nagamachi & Y.Matshubara), IEEE International Conference on Neural Networks, 1995.(C.Frasson, G.Gauthier & A.Lesgold (Eds.),139-147, 1996.)
3. Virtual kansei engineering and an approach to business (M.Nagamachi, Y.Matsubara, J.Nomura, K.Sawada and T.Kurio]. Human Factors in organizational Desihn and Management-V, 3-6, 1996.
4. Neural networks approach for kansei analysis on milk carton design (S.Ishihara, K.Ishihara; M.Nagamachi and Y.Matsubara], Human Factors in Organizational Design and Management-V, 7-10, 1996.
5. A study of kansei engineering as a method for evaluating the thermal environment [K.Nishikawa, Y.Hirasawa and M.Nagamachi], Human Factors in Organizational Desihn and Management-V, 13-16, 1996.
6. A development of kansei engineering system for designing automobile interior space [T.Tsuchiya, Y.Matsubara and M.Nagamachi], Human Factors in Organizational Design and Management-V, 19-22, 1996.
7. Intelligent training system for power plant operator on virtual reality environment [Y.Matsubara, M.Nagamachi, T.Kurisu, H.Shibuya and Y.Usagawa], Human Factors in Organizational Design and Management-V, 147-150, 1996.
8. Simulation of self-organizing processes in working groups using neural networks [S.Ishihara, K.Ishihara and M.Nagamachi], Human Factors in Organizational Design and Management-V, 370-373, 1996.
9. Kansei engineering and implementation of human-oriented product design [M.Nagamachi], Manufacturing Agility and Hybrid Automation-I, 77-80, 1996.
10. Kansei virtual reality technology and evaluation on kitchen design [Y.Matsubara and M.Nagamachi], Manufacturing Agility and Hybrid Automation-I, 81-84, 1996.

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRS2-3

感性工学をこう考える

What is KANSEI Engineering

清水義雄
SHIMIZU Yoshio

信州大学繊維学部感性工学科
Department of KANSEI Engineering
Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University

ABSTRACT

It is said that the 21st century is a information era. However, it is difficult to image it clearly. In order to have a clear image and to have a perspective of a information age, it is necessary to consider the history of human being and get the essence of information. The big five revolutions have occurred in human history, and we are going to have the sixth revolution now. This revolution is the secondary spiritual revolution named KANSEI Information revolution.

Our industrialized society will be developed according to a prince of symbiosis and happiness. Symbiosis is realized by approving or accepting each other, and we think that a basic ability of approving or accepting is KANSEI. KANSEI is defined as the complex ability of combining the reception and the transmission of information and KANSEI engineering plays an important role.

KANSEI Engineering is defined as the total technologies that are based on the natural sciences, the social sciences, the humanities and arts.

1 古き流れ新しき風

21世紀は情報の時代と言われるが、情報の時代のイメージをつくることは難しい。ベルリンの壁の崩壊で二極対立の冷戦構造は終結した。しかし、冷戦構造によって保たれていた均衡が崩れ、アフリカや東欧社会主義国などいたる所で混乱が生じている今、次世紀を生き抜いていくには、情報時代の明瞭な指針を作らなければならない。そのためには、歴史に学び新しい時代を予測する知恵を得ることが重要である。

歴史上の大きな革命は、図1に見られるように、人類の発生、農業革命、都市革命、精神革命、科学技術革命の5つである。そして今、6つ目の革命が始まろうとしている。この革命をここでは、第二次精神革命と呼ぶ。2500年前の第一次精神革命が、一次元的な思想の世界を目指し、権力を求めて突き進むのに大きな役割を果たしたのに対して、今おこりつつある精神革命は、豊かで多次元的である。第一

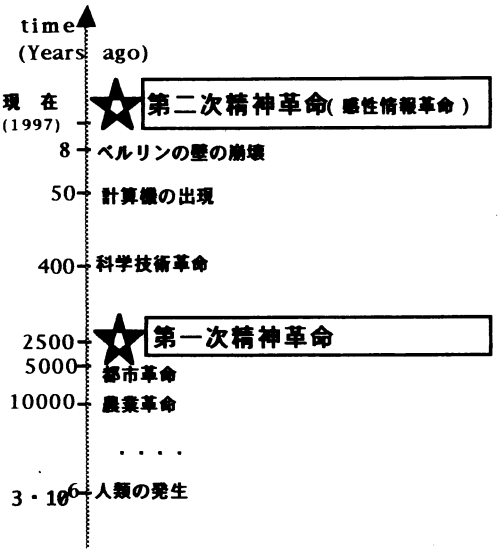


図1人類の文明史(感性革命の時代)

次精神革命は、人類に考えること・想像すること即ち抽象化能力の偉大さに目覚めさせた。これは、一神教的宗教観や演繹的思考方法の哲学を形成したが、結局のところこの思考能力は、領土の奪い合

いを促進し、巨大国家の形成を成し遂げた。また、約4百年前に起こった近代科学技術革命は、現在に至るまで飛躍的な物質生産技術を開発し続け、領土争奪戦を支えてきた技術である。有史以来このかた、社会の基本原理は、自由と競争原理であった(図2)。しかし、ベルリンの壁の崩壊によって冷戦構造が解消した現在、互いに奪い合う空間がもはや無いことに気がつかざるを得ない。そればかりか隣人の息づかいと自分の息づかいが同一空間で行われており、空間を競争原理によって奪い合うことなどということは、もはや不可能なことに気づかされる。

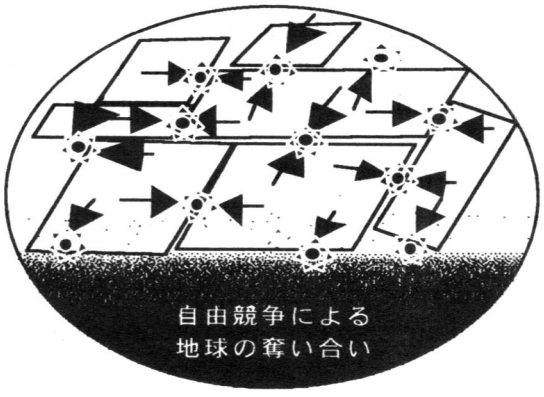


図2　自由と競争による奪い合い

地球的規模という言葉は、もはや非常に大きいという意味を示さなくなり、代わりに、どのような国の人でも同時に同じ事件を見たり聞いたりすることができ、互いに影響を及ぼし合う程の大きさの、何十億と言う人間を乗せた宇宙船としての地球のイメージが定着してきた。自由競争原理の流れは、ベルリンの壁の崩壊で流れる方向を失い、今や新しい風によって人々は動き始めた。

2　情報化時代と感性

2.1　感動の時代

「21世紀はどのような時代?」と聞かれたら、「情報化時代」と多くの人が答えるだろう。しかし「情報化時代ってどのような時代?」と聞かれたら、即座に答えられる人は少ない。マルチメディアやインターネットが話題になり、溢れる情報に溺れてしまいそうな毎日ではあるが、情報化時代の日々の生活では、物事を深く考え、生活を楽しみ、知らない人々と出会ってたくさんの感動を味わえる人生でありたいと願う。

情報は、情(感情や心)を報ずる(知らせる)と記すように、他の人に自分の考えや心を伝えることだから、情報化社会とは互いの心を通い合わせることによって互いに認め合い自己実現を図り、互いの幸福を高め合う社会であって欲しい。

2.2　共生幸福潮流

新しい風による人々の動きは、図3に示すように、地球の物理的空間に対して直交している縦の流れである。この流れは、多様な価値の共存空間の流れであり、共生幸福潮流である。共生幸福潮流は、人々の互いの心の流れであり、互いの幸福を高め合う流れである。即ち、情報化社会は、共生幸福潮流によって達成される。

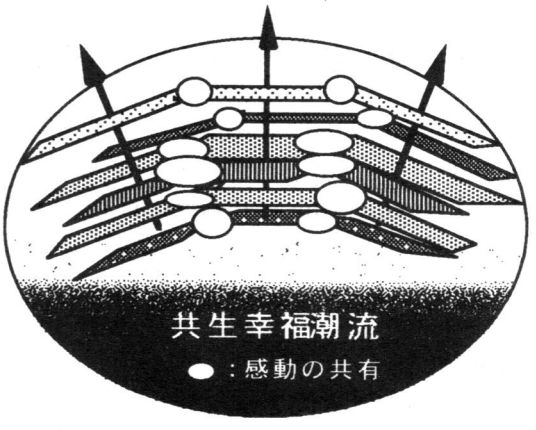


図3　共生による幸福情報空間の発展

2.3　感性とは何か

感性という言葉が現在どのように用いられているかを新聞の最近の紙面(1994，95年)より探ってみた。感性本来の感受性の意味として用いられている例は、意外と少ない。それに対して最も多いのが、創造する、作るあるいは表現の手段・方法として感性を用いている例である。例えば、「英知と感性ですばらしい町づくりを」、「新しい哲学と感性で共生の町・高崎を築いていきたい」などという使用例が目立つ。創造性の意味として、文学や映画作品などでの用例も多い。「・・監督の感性が光る映画」、「鋭い感性がキラリと光る紙面」など限りなく続く。

また、全体を概観する物の見方考え方、生き方等の意味としても用いられる。「女

性の感性を生かしたソフトな接客で」、「個人が自分の感性を基準として生活を楽しむ」の例が多い。

以上からも分るように、感性は感受性、知覚・認知の能力や特定な情報を濾過したり抽出したりする受信能力を意味するが、一方では、考えや生き方、表現や提案さらには創造性など発信の能力をも意味している。従来の辞書の意味と比べて、非常に積極的である。

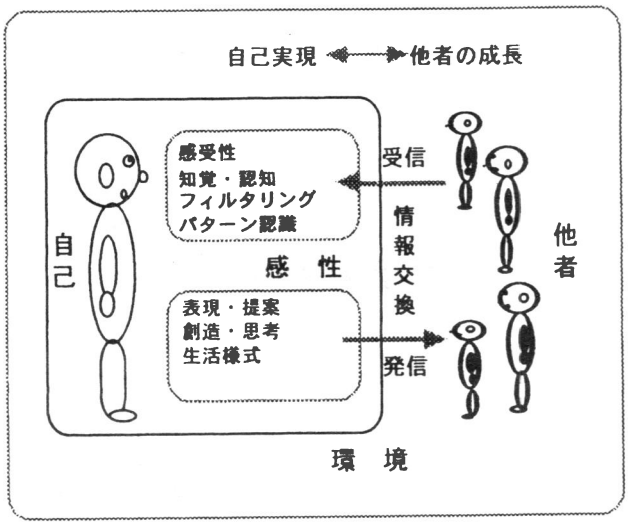


図4　感性の定義

以上の様に、感性とは他の人の心をどの様に理解し、受けとめるかの能力であり、同時に他の人に自分の心をどの様に伝えるかという発信の能力としても定義される(図4)。感性は、互いの心の流れを円滑にし、互いの幸福を高め合う情報化時代の最重要能力である。

2.4　情報化時代の形

自由競争原理によって、この1万年間、人類は物質生産競争と領地争奪戦を繰り広げてきた。この競争を勝ち抜いていくためには、図5左に示すような三角形の階層構造により分業を押し進め、効率化を勝ち取る必要があった。しかし階層構造だけでは、情報化時代の人々の心のやりとりに対応することはできない。人々が各々世界の中心であり、同時にいくつもの価値を共有でき、個人的な繋がりで世界が維持されるためには、図5右にあるようなネットワークがよい。この形によって多次元の価値を互いに交換し、共有することができる。インターネットやパソコン通信などの通信網は、この形である。このネットワークによって交流している人々は、従来のような社会的地位や仕事中心の人生にこだわらない。人々は自分を取り巻く広い環境の中から、互いに認め合える人、互いの存在を確認できる人と交流し自己実現を図ろうとしている。

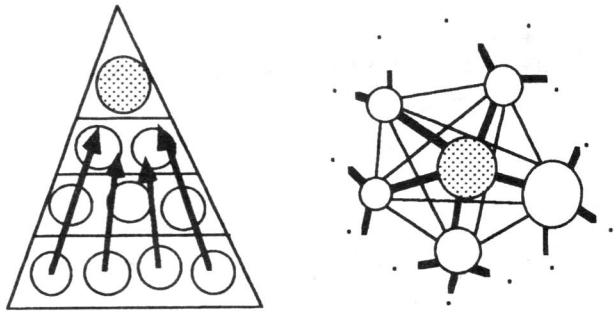


図5　階層型構造とネットワーク構造

3　感性工学の役割

我が国の海外生産に依存する割合は年々急激に増加している。特に、バブル経済の崩壊後、産業の空洞化が急速に進んでいることもあり、社会に閉息感が漂っている。激しく変わりつつある時代に、安穏として手をこまねいていたのでは、小資源国の日本は一瞬にして貧困に陥る。極東の小さな島国に住んでいる私達が、人的な資源を活用し、世界に貢献する新たな方法を早急に見いださなければならない。

3.1　産業パラダイムの転換

どのような方法が、我が国と世界の発展に貢献できるのか? 従来と同様に単なる目先の効率中心の戦略をとるだけでは、我が国の活路を見いだせない。図6に示すような、共生幸福原理に基づく産業パラダイムの転換が今起こりつつあり、これに対処した技術が必要になっている。即ち、物の消費・所有・購買欲求によって消費社会が維持されてきたが、今や人々は、物を取得・消費する対象から、自己の表現手段として活用できる「もの」として、あるいは互いのコミュニケーションを図り幸福の共有を行う「もの」として捉え始めている。

このような人々の意識の変化に対応した新しい技術は、例えば製品に美しさ、

豊さ、遊び心と言った人々の心を感動させる価値を付加する技術である。また、消費者のみならず、生産する労働者の幸福感も同時に満足させる技術でありたい。

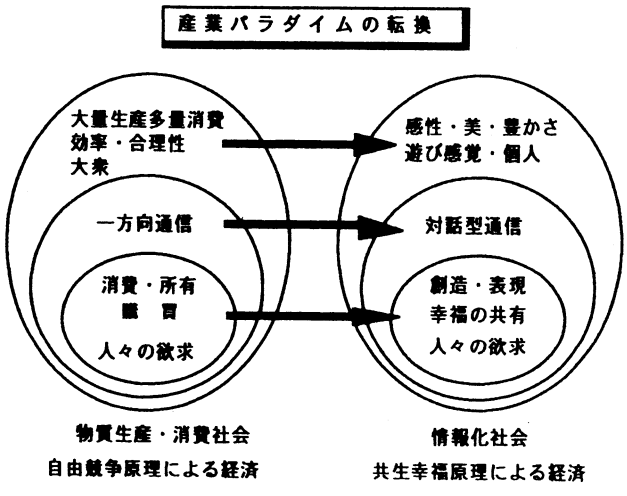


図6 産業パラダイムの転換

このような欲求に呼応して、従来の技術に対して反省の声が大きくなっている。例えば大量生産技術は、狭い範囲で見れば高効率であるが、大局的に考えれば、大量に不要な製品を作り、売れ残りを生じ、ゴミを発生し、環境汚染を引き起こす。従って、生産技術の中心を単なる工場生産の範囲での高効率や合理性から、経営や環境を含めた総合的な効率性へと変えていかなければならない。

3.2 感性工学

感性を中心とした情報化社会のための感性に基づいた新しい技術をここでは、感性工学と定義する。即ち、感性工学とは、「心の交流により互いに幸福になることを支援する技術」である。図7に示されるように、感性工学は多くの工学分野と関連する。

また、従来の工学が基礎を数学、物理並びに化学に置いていたのに対して、感性工学は、図8に示すように人文科学、社会科学や芸術をも工学の基礎として取り入れようとする。すでに存在している物を機械的に利用しようとしたり、単にデータベースの知識に頼ったりするだけでは、知的で、創造的な豊かな仕事は生まれてこない。

いま巷間騒がれている情報機器は、情報化社会の便利な道具にすぎない。情報化時代に最も要求される能力は、コンピュータを操る能力でも、記憶能力でもなく、他者との情報交換に必要な豊かな感性の能力であり、創造的能力である。感性工学は、このような能力を基に発展していくと考えられる。

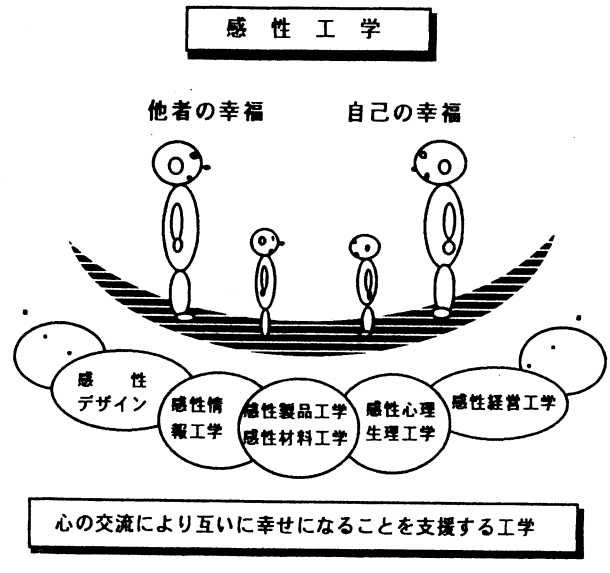


図7 感性工学の定義

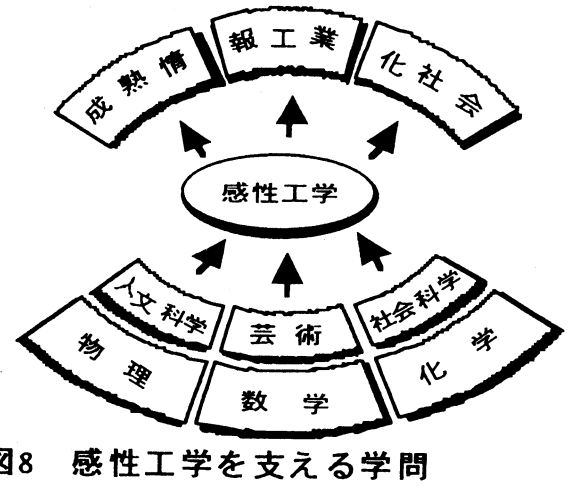


図8 感性工学を支える学問

〒386 長野県上田市常田3-15-1
信州大学繊維学部感性工学科
Department of KANSEI Engineering
Faculty of Textile Science and technology
Shinshu University
清水義雄
TEL. 0268-21-5537 FAX. 0268-26-1488
Email : shimizu@ted.shinshu-u.ac.jp

13th Fuzzy Symposium (Toyama, June 4 ~ 6, 1997)

FRS2-4

感性工学をこう考える

A Thought on KANSEI Engineering

長沢 伸也
Shin'ya NAGASAWA

立命館大学経営学部
Fac. of Bus. Admin., Ritsumeikan Univ.

Abstract: Recently the whole society tends to attach importance to humanity and human life. One's KANSEI such as feeling, sense, taste, preference and so on has been utilized to product design. Consequently the design technique has been adopted which the function or specification is decided according to measurement and analysis of KANSEI. And a though on KANSEI engineering is stated in this paper.

1. 緒　言

最近は、人間の感じ方、嗜好、個人差などを製品設計に活かしたり、そうした機能を製品に組み込もうとする動きも多方面で活発になりつつある。そこでは、ユーザーの感性の把握や分析を行い、機能や仕様をそれに合わせる設計方法が採用されるようになってきた。このような人間の感性を製品設計に活かすための方法、人間の感性に訴える製品をつくるための方法として、感性工学が注目されている。

そこで、本論文では、このように注目されている感性工学について、経営学・経営工学の立場から見解を述べる。とくに、感性そのものについてや、感性工学、感性情報処理の定義や相互の関係、アプローチの基礎となる官能検査（官能評価）や感性評価、著者自身の感性工学研究の動機・立場などについて概観してみる。

2. 「感性」そのものについて

2.1 「感性」の定義

どうしても「感性」そのものを定義しないと納得しない人もいるだろう。しかし、後述する文部省科学研究費補助金重点領域研究「感性情報処理の情報学・心理学的研究」で数十名の研究者にアンケートを行ったところ、語る人の数だけ「感性」の定義があり百家争鳴であった。とくに、工学畑では「感性」となると戸惑ってしまう人が多い。工学の世界では、用語や特性は厳密に定義されており、目標を数値で記述して最適設計のための合理的な方法論を見い出していく。それに対して、感性の定義や捉え方が人により異なっているなどということに違和感を覚えるのであろう。

さて、本来、感性は理性や悟性と対比される哲学的な概念である。例えば、哲学者による次のような定義づけや解説を読めば何となく理解できる。

「感性は、いのちなるもの、すなわち生きることに直した、ある根元的な働きであり、宗教や生き甲斐、最終的には生命すなわち生と死に結び付く」（戸田義雄『日本の感性』）

「感性のもとは共通感覚common senseであり常識に通ずる。それは感覚の全領域を統一的にとらえる根元的な能力であり、見えなかったものが見えてくるような働きをする発見と探求のための創造的概念装置である。近代の知に対して、臨床の知がそれから構築されねばならない」（中村雄二郎『感性の覚醒』、『共通感覚論』、『臨床の知とは何か』）

「特に論理的と呼ばれ、感性的なものに対立させられがちなものごとが、感性と意外に密接なつながりを持っているからこそ、現代において論理的な概念にもとづく文明がこれほど大きな力を持っている」（吉田夏彦『デジタル思考とアナログ思考』）

こうした定義や解説が理解できないと工学やビジネスにおいて感性の問題を扱うことができないかというと、それはまた別である。

工学やビジネスでの感性は、外界の刺激が感覚受容器に伝えられたあと発生する「感覚→知覚・認知→感情や情動など→言語などによる表現」までの一連の情報の流れ、感覚から心理までの反応とか、単に感覚と感情くらいに解して深入りしなくても十分であろう。

それでも納得せずに非難する人も多いが、著者は次の一節をいつも思い出す。

「理論できちっと説明出来ないことを感性といういい加減な言葉を使って人をたぶらかしているという非

難が一番多い。私は、そうした声に一度も反論したことがない。何故ならナンセンスなことだからだ。私は、この本で感性という言葉の定義を試みたのではない。あくまでも、生活者視点、受け手発想に立って、消費行動とか企業活動あるいは世の中そのものの動きを見た場合、整然と理屈通りに動いていることなど皆無に近いという現実を素直に見つめ直してみたいという日頃の欲求を表すために、あえてこの感性という曖昧な言葉を使ったのだ。」（小川明『感性革命』）

2.2 「感性の時代」とは

「感性の時代」と言われて久しいが、その出発点は、小川明『感性革命』や岡橋葉子『いま、時代は感性』、「ハイテク＝ハイタッチ」に言及したネイスビッツ（J. Naisbitt）『メガトレンド』（竹村健一訳）が出版された1983年であろう。また、これらをきっかけとして、「感性マーケティング」という言葉は、マーケティング業界でも広く通用しているようである（日本経済新聞社編『マーケティング100の常識』、宇野政雄編『マーケティングがわかる事典』）。さらに、「良い－悪い」という社会的規範や価値観によった理性的な判断に基づいてではなく、「好き－嫌い」という感覚や気分に基準をおいて商品やサービスを消費することを指す「感性消費」という言葉も出てきている（電通マーケティング戦略研究会編『感性消費・理性消費』）。

1980年代は「記号」や「感性」などを錦の御旗にしてクリエーターが号令をかけて流行を創ってきたが、1990年代ではその手法が通用しなくなった。その意味で「感性の時代や感性マーケティングは終った」とする論調もある。しかし、クリエーターやトレンドリーダーの感性ではなく、あくまでも生活者の視点、生活者の感性に根ざした「感性マーケティング」はますます重要となってきている（たとえば、佐藤邦夫・平澤徹也『感性マーケティングの技法』）。また、感性商品の開発管理も注目されている（たとえば、名城鉄夫・大熊和彦・田淵泰男『感性商品の開発管理』）。その意味では、新「感性の時代」と考えた方がよいかもしれない。

大胆な経営の革命を提唱して世界的に注目されているピーターズ（T.Peters）は、すべての企業がサービス化、ソフト化している中で成功している企業のキーワードとして「ファッション性」を強調している。すなわち、移り気で捉えどころのない顧客に密着して事業を展開していくには、発想から企画、実際の製品、サービスの提供まで、高度の「ファッション化」が必要という。もはや一般企業にも「ミラノのオートクチュール」と同じ次元の創造性が問われているという意味で「ファッションの時代」と言っている（大前研一訳『自由奔放のマネジメント』）。これこそ、今日で言う新「感性の時代」の真の意味であろう。

2.3 KANSEIは国際語に

アメリカの自動車業界では、「感性」に強い関心が寄せられている。その発端は、マツダの山本健一社長（当時）の1986年の世界自動車技術会議やアメリカ自動車産業経営者セミナー等での講演からだという（山本健一「日本の自動車産業」、安國一・長沢伸也他責任編集『トップが語る経営』）。KANSEI engineering（感性工学）により、日本の車、とくに高級車が素晴らしくなったというのが欧米での評判である。ところが、感性の対訳語の候補としては、feeling, comfort, sensibilityといった単語（その他にもheart, sense, sensitivityなども考えられる）が浮かぶものの、どれもピッタリしないといわれている。そのような事情から、KANSEIという日本語をそのまま使っているという。「感性情報処理」でも同じ理由でKANSEIを使っている。

人間工学の第一人者の野呂影勇教授によると、米国でもロシアでもKANSEIを説明すると彼の地には無い概念だと言われ敬服されるそうである。

また、感性商品、感性マーケティングといった言葉や表現が新聞やテレビに頻繁に登場するが、マーケティングの本場のアメリカなどではこの種の表現はなく、やはり日本独特の考え方といえる。

3．感性工学と感性情報処理

3.1 科学研究費補助金時限付き分科細目「感性工学」

日本学術会議材料工学研究連絡委員会感性工学小委員会（鈴木邁小委員長）が中心となり、文部省科学研究費補助金時限付き分科細目「感性工学」を申請した結果、平成９～11年度の３年間について認められた。応募件数が多ければ、その後は恒常化されるものであり、初年度には184件の応募があった模様である。「感性工学」の定義や範囲はこれに従えばよいと考える。

(1) 内容

人間と人工環境の調和をめざして人間の感性を工学的に研究する。すなわち、材料や製品等の個々の人工物と、人工物に取り巻かれた生活空間に対して、人が示す「感覚から心理」までの反応（＝感性）について、情報工学・人間工学・認知科学・心理学・デザイン学などの諸領域にわたって学際的に研究するとともに、その応用として、人にやさしい素材、分かりやすく使いやすい製品、安心できる生活空間の開発を支援する。

感性の計測と定量化法の開発、感性と生理的指標の対応、感性情報処理、材料・製品・生活空間における感性評価と開発支援、マンマシンインタフェースの認知工学的解析等を含む。

(2) 設定の理由

近年の科学技術の進歩によって、我が国には社会や生活に物質的豊かさがもたらされたが、その反面において人間阻害という副作用を増大させた。すなわち、

不健全な都市環境、高齢者や身障者にとって住みにくい社会、機器の高度化に伴っての使いにくさ・分かりにくさ・不安全感などである。

そして重要な点は、これらの問題が人間の心身両面、特に心の方に隠れた大きな影響を与えることにある。しかるに従来の科学技術は、人間の心に関わる問題は、あいまいで定量化が困難との理由から意識的に避ける傾向があった。

いま、人間阻害の問題の解決に取り組み、人間と人工環境の究極的な調和をめざして、生活環境を物質的な豊かさから心の豊かさへと転換する努力をすべき時がきている。そのための重点領域として、人工環境を構成する材料や製品等の人工物および生活空間に対して、人が示す「感覚から心理」までの反応（＝感性）に対して、工学の面から幅広くアプローチすることが必須である。

(3) 当該分野に関連すると考えられる学協会名

日本学術会議材料工学研究連絡委員会と、日本デザイン学会（幹事学会）、日本ファジィ学会、繊維学会、日本人間工学会、日本心理学会、精密工学会、情報処理学会、日本建築学会、土木学会、日本機械学会、自動車技術会、日本化学会、高分子学会、計測自動制御学会、日本行動計量学会、日本都市計画学会、日本セラミックス協会、日本金属学会が挙げられている。

3.2 科学研究費補助金重点領域研究「感性情報処理」

文部省科学研究費補助金の重点領域研究では、平成4～6年度に辻三郎教授を代表者として「感性情報処理の情報学・心理学的研究」が遂行された。「感性情報処理」の定義や範囲はこれに従えばよいと考える。

これは、人間が視覚や聴覚から入ってくる情報に対して抱く「美しい」とか「快い」といったような「情報の感性的側面」に対して情報科学と心理学の研究者が融合した研究を行い、感性科学の基礎を確立することを研究目標としたものである。具体的には、従来の論理的記号処理の情報処理の枠組みを非記号的主観的感性情報に拡張し、感性情報の構造分析、記述、計量法、モデリングなどのの基礎の問題を扱うとともに、視聴覚メディアに含まれる感性情報の抽出と表現、人間が行動する空間内の感性情報の知覚、情緒や感性の伝達を可能とするコミュニケーション支援、人間の創造的活動を支援するための感性デザイン・感性データベースのプロトタイプなどの研究が行われた。

3.3 感性工学と感性情報処理の関係

現時点で情報科学的に扱うことのできるのは、浅い感性（知性と感性がオーバーラップした領域）に限定していると考えるべきであり、深い感性（真の感性）はまだ対象にはならない。したがって、感性情報処理の目的も、人間の感性を解き明かすことが目的ではなく、よりヒューマンなインタフェースを実現するために人間と同じ応答をするモデルを構築すること、いわば「なぞり感性」を実現することと限定するものである（井口征士『感性情報処理』）。

感性工学は、こうした感性情報処理を製品設計支援などに応用する方法論であるといえる。

4．官能検査と感性評価

上述のように、「感性情報処理」という言葉の意味を、情報科学の立場で感性情報を利用することと解すると、まず感性の定量化が必要である。工学において感性的なアプローチを実践する上で、基本となるのは心理測定であろう。これは、官能検査（官能評価）としての実績と積み重ねがある。

4.1 官能検査（官能評価）

最近は、人間の五官（五感）などの感覚により計測される「官能品質」や、生活の豊かさ、快適性、好感度、選好、使いやすさなどの「感性品質」を問題にすることが多くなっている。ところが、理化学的な機器による客観的な計測と違って、官能品質や感性品質は人間が主観的に感じるものである。このような人間の主観的な感覚に依存する計量や評価の研究は、「官能検査（官能評価）」として、食品の味見、きき酒などで古くから研究されてきたものである。

官能検査では、測定機器による検査と違って個人差もあり、検査員の身体の調子や周囲の影響を受けやすいうえ、測定の結果もメータの読みのように客観的な数値が出てこないために、扱いにくく困った問題と考えられていた。しかし、外観検査を初めとして楽器や音響機器の音質、水道管や石油ストーブの臭気、テレビや写真の映像の画質、繊維製品の風合いなどの問題が具体的に起こっており、JIS（日本工業規格）の中にも官能検査の規定を盛り込みたいという要望が高まってきた。このため、1979年に『JIS Z 9080 官能検査通則』が制定された。そこでは、「官能検査とは、人間の感覚を用いて品質特性を評価し、判定基準と照合して判定を下す検査をいう」とされている。また、1990年に『JIS Z 8144 官能検査用語』が制定され、そこでは官能検査は「官能試験に基づく検査」とされている。

このように、権威あるJISに官能検査が規定されていること自体は意義深い。しかし、あまりにも「感覚」と「検査」に限定しすぎている、また官能という言葉が誤解されやすいという議論もある。ASTM（米国材料試験協会）規格などでは“sensory evaluation”で規定されている。これを翻訳すれば「官能評価」であり、検査という言葉の意味が狭すぎると考える専門家は意識的に「官能検査」を避けて「官能評価」の方を用いているようである。

表1　商品の品質要素（自動車の例）

品質要素		形態的要素	測定方法	感性評価・感性品質	
商品品質（市場品質）	第1次品質	機能、動力性能（加速・燃費）	理化学的検査		
	第2次品質	スタイリング、乗り心地、居住性	官能検査	狭義	広義
	第3次品質	ネーミング、ブランド、企業名	イメージ調査		

4.2 感性評価

官能検査（官能評価）は、人間の有する五官（五感）を活用しての検査・評価技術であり、われわれ個人の日常生活はもとより、産業界で新製品開発や市場調査、品質管理等に広く活用されている。また、従来は食品業界や化粧品業界を中心に研究・活用されていたが、近年は自動車、建設、電気機器などいろいろな業界で活用されるようになってきた。

しかも、官能検査（官能評価）は、単なる検査や評価を行うだけでなく、最近では「感性」といった言葉で表現されることも多くなり、「生活をより豊かにする製品開発やシステム設計のための総合評価手法・技術」として産業界で見直され、再評価されつつある。

したがって、JISによる官能検査の定義は権威があり尊重する必要はあるものの、現状に合っていないように思われる。今日の官能検査（官能評価）は、「感性品質の評価」あるいは「人間の感性による評価」として活用されているのであるから、名称も「官能検査」や「官能評価」に代えて「感性評価」と呼ぶべきであろう。これによって、官能という言葉や検査という言葉にまつわる議論にも終止符が打たれるはずである。

4.3 感性品質

「感性品質」とは、「感性に訴える品質」あるいは「感性により評価される品質」である。商品の品質要素を2つ、あるいはそれ以上の要素に分類する考え方は、商品学や品質管理などの分野において少なからず提案されている。とくに、商品学の権威である吉田富義教授は品質要素を「第1次品質」「第2次品質」及び「第3次品質」に分類している（吉田富義『商品学』）。この説を発展させて感性評価との関係を考えると表1のようになる。すなわち、感性品質は、狭義には（感覚による）官能検査および（心理的な）イメージ調査により主観的に測定される第2次品質および第3次品質を指し、理化学的検査により客観的に測定される第1次品質と対比される。広義には第1次品質も包含した総合的な商品品質（市場品質）そのものを指す。自動車でいえば、走るという機能、動力性能（加速・燃費）やスタイリング、乗り心地などの個別の要素を総合した「良さ」あるいは「好ましさ」になる。

また、感性評価は狭義には官能検査およびイメージ調査を指し、広義には理化学的検査も踏まえた総合評価や嗜好、選好を指す。

極端に言えば、理化学的検査により測定される第1次品質だけであっても、「あちら立てればこちら立たず」のようなトレード・オフの関係があれば、総合評価は感性でなされる。たとえば、加速に優れ燃費は劣るA車と、加速は劣るが燃費は優れているB車があり、両車が同一価格であるとする。加速と燃費はいずれも物理的に測定される第1次品質であり、客観的に同じ数値であっても、燃費よりも加速を重視する人は総合評価としてA車を選び、逆の人はB車を選ぶであろう。

なお、マーケティングで品質を考える場合、消費者がどう知覚しているかを問題にすることが多い。マーケティングではこれを「知覚品質」というが、これは本節で述べた広義の感性品質と同義である。

5．感性工学研究の動機・立場

経営学部への就職とファッションを専門とする愚妻との共同研究を契機として、著者の専門は環境アセスメントの統計モデル→統計的品質管理→統計的官能検査法→感性マーケティング・感性デザイン・感性工学と推移してきた。「人間の感性に訴える製品づくり」は、マーケティングと言ってもデザインと言っても品質管理と言っても著者にとっては同じことである。経営学、経営工学、心理学、統計学、システム工学をクロスオーバーさせて学際的に取り組み、ファッション画の印象の定量的評価、マンションの外観やＶＴＲの使いやすさのファジィ構造モデルによる解析、Scheffeの一対比較法の改良、商品企画七つ道具の提案等を行っている。なお、文部省科学研究費補助金をこの8年間に研究代表者で6件、研究分担者で1件、計7件受給している。また、日本品質管理学会感性工学研究会の主査を務めるとともに、感性工学会の設立に注力している。

6．結　言

以上、本論文では、感性そのものについてや、感性工学、感性情報処理の定義や相互の関係、その基礎となる官能検査（官能評価）や感性評価、著者自身の感性工学研究の動機・立場などについて述べた。

なお、本研究は平成8年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)および同(C)の補助を受けている。

[問い合せ先]　〒603-77 京都市北区等持院北町56-1
立命館大学経営学部　長沢　伸也
Tel.075-466-3365 Fax.075-465-7883

著者名索引

[欧文字]

Anjel TZANEV 31
A.R. Arredondo 849
Saeed BAGHERI SHOURAKI 91
Chang-Hoon Lee 13
Dawei Zheng 495
Gancho VACHKOV 31, 447
Gengui Zhou 491, 803
H. Y. Xu 11
Haekwan Lee 363, 365
Heloisa M. Shih 231
Hideo Tanaka 365, 685
Hiroyuki Matsuura 191
Hiroyuki Mizutani 691
Hugang Han 261
J. WATADA 849
Jian Wu 757
Jianqiang YI 43, 47
John Takuya Ootsuki 691
Jongryul Kim 831
K. Shiina 715
Kenichi Ida 501
KHOR Chin Siong 235
Kim, Donhan 707
Kyu-Hung Lee 229
Lian Yu 231
Linhu Zhao 345
Masahiro Nakano 191
Masayoshi KOBAYASHI 447
Mitsuro Isobe 165
Mitsuo Gen 345, 491, 495, 501, 799
Nakaji HONDA 91
Norberto Eiji Nawa 353
OH Kabsuk 415
Peijun Guo 685
Qihao CHEN 543
R.R.Yager 349
Ronald R.Yager 727
Runwei Cheng 831
Shoko NISHIMURA 853
Shouyu WANG 129, 133, 141, 145, 157
Sucbum Ko 799
Takashi Sekiguchi 231, 691
Takeshi Furuhashi 353
Takeshi Sakuragi 547
Toru YAMAGUCHI 853
Tomonori Hashiyama 353
XU MingQing 419
Y. YABUUCHI
Yan SHI 53, 75
Yasuhiro Tsujimura 345, 799
Yinzhen Li 501
Yoshiki Uchikawa 353
Zhixiong XU 853

[あ]

愛須英之 611, 613
青木研 311
秋山孝正 219, 221
浅居喜代治 383, 385
足立剛史 279
新井隆之 857
荒井良徳 95, 99
荒川丈昌 687, 733
荒川道康 535
荒木智行 535, 539
有田清三郎 177, 181

[い]

飯田誠 461
五百旗頭正 635, 639
猪飼國夫 451
池田貴幸 23
石井博昭 499, 797, 807, 829
石井真樹 649
石原永伯 173
石渕久生 65, 117, 119, 229, 335, 399, 559, 601
磯部光朗 165
磯本征雄 751, 753, 759, 765
板倉直明 451
井田憲一 803, 831, 835
市橋秀友 589, 591, 653, 823, 825, 827
市村匠 67, 645, 669
一色真吾 283
伊藤健 499, 797, 829
伊藤敏 759
稲井田次郎 775, 783, 787
乾口雅弘 367, 819
井上和夫 341
井上堅治 269
井上博行 341
今岡春樹 883
今崎直樹 611
今中武 893
入江寿弘 513
岩崎正宏 293
岩下志乃 477
岩田満 473
岩本直子 877
印具毅雄 859

[う]

殖栗俊明 27
上田徹 677, 681
植田俊克 453
上田靖之 525
上地正昭 275
上野修 319
上原清彦 161
植村芳樹 245

後呂智 367
内川嘉樹 87, 197, 359, 735
内野英治 223, 225, 673
内山明彦 183
畝村暢一 47
馬野元秀 569
馬屋原一孝 125

[え]

江澤義典 429
江山優 283

[お]

老松建成 719, 723
大内東 439
大内裕士 169
大岡純 51
大熊繁 293, 695, 699
大崎美穂 859
大里有生 607
大沢光 895
大谷忍 349, 727
大谷崇 591, 823, 827
太田幸広 83
大西巍 227
大貫雄一 485
大野研 519, 521
大野宏司 735
大場和宏 669
大橋力 319
大森明央 845
大森秀樹 675
大薮多可志 793, 843
岡村正和 349, 727
岡本博司 627
奥大輔 731
奥田徹示 385, 391
奥田裕紀 711
奥田通大 203
奥田良治 775, 783, 787
奥野豊 253
小倉久和 35, 307, 413, 421, 465
小沢和浩 369, 373, 381, 393
小澤順 585, 893
小高知宏 35, 307, 413, 421, 465
小田哲久 287, 405
鬼沢武久 469, 473, 477, 703, 845, 863, 879
小俣寿之 857

[か]

甲斐郁子 675
柿ヶ尾仁司 357
影井清一郎 11
影山暁久 271
片井修 337
片桐英樹 797
片山佳之 181
加藤浩介 811, 815
加藤亮 257
加藤裕一 719, 723, 891
金海好彦 591
加納誠 611, 613
鎌野琢也 39, 615
上村哲志 681
神谷誠 525
亀井且有 199, 341, 481, 593, 791
河口万由香 153
川崎憲介 615
川島康広 457
川瀬真 543
川中愛 401
川原徹也 221
河村圭 531
河村廣 505, 509
菅家正康 373, 381, 393

[き]

菊池愛子 227
菊池英明 525
菊池浩明 349, 357, 435, 727
岸川信二 653
岸田一也 433, 663
北垣郁雄 755
北島宗雄 707
北島康広 199
北辻桂憲 569
喜多一 327
北原義典 897
喜多村直 187
木藤智光 779
木村誠志 451
清原知二 461

[く]

九津見洋 633, 893
櫛田崇 551, 553
久保公彦 187
久保田直行 687
熊本浩 561, 565
栗山裕 645
黒崎美和子 549
黒須顕二 107

[け]

玄光男 345, 491, 495, 501, 799, 803, 831, 835

[こ]

小池清之 839
糀谷和人 561, 565
甲田哲也 633
五反田秋彦 451
古殿幸雄 383
小西幹彦 385

木幡直樹 623
小林貴生 35
小林隆広 283
小林俊一 57, 83
小淵礼子 835
駒形真樹 779
古俣洋一郎 733
小松原明哲 237
小松由香 481
小山研一 363
近藤邦雄 463
近藤信二 633, 675

[さ]

斎藤恵一 183
佐伯徹郎 719, 723
坂口聡 177
坂和正敏 367, 811, 815, 819, 821
櫻木武 547
佐々木敏彦 105
佐藤章 779
佐藤健 863
佐藤智子 417
佐藤誠 623
佐藤美佳 123
佐藤義治 123
佐藤礼 71
佐山弘樹 319
澤本佳和 515
椹木哲夫 337

[し]

椎塚久雄 489
椎名乾平 715
柴野俊弘 453, 815, 821
柴原吉成 521
島川学 443
島崎素子 465
島田文彦 829
清水義雄 911
下野雅芳 655
下原勝憲 323
下村武 825
白石匡央 603
白濱成希 297
新宮清志 513

[す]

菅野直敏 457, 485, 487
杉本光公 389
菅野道夫 13, 271, 275, 289
鈴木泉 607
鈴木茂行 39, 615
鈴木尚 489
鈴木正美 453
須田宏 761

[せ]

関口悟朗 95
関口隆 11, 231, 691
関根智 611

[た]

高木昇 435, 549, 551, 553
高木英行 311, 559, 859
高木浩 593
高荻栄一郎 251, 867, 871
高橋理 641
高橋範光 683
高橋英孝 669
高橋総子 645
高濱節子 61
阪井徹行 61
高山政人 803
田川聡洋 421
瀧澤武信 787
武井勲 241
竹内一郎 573
竹川宙史 485
田崎栄一郎 67, 169, 203, 641, 645, 669
田崎宗邦 505
田島博之 377
但馬文昭 757
橘完太 87
巽久行 535, 539
伊達大輔 703
田中一男 19, 23, 51, 731
田中尚樹 627
田中英夫 363, 365, 683, 685
田中秀樹 743
田中洋司 589
谷明勲 505, 509
谷久壹朗 791
谷口唯成 51
谷哲次 283
谷直樹 337
谷村隆義 635, 639
谷村弘 177
田野俊一 559, 581
田渕創 589
玉野和保 109
田村担之 431, 569

[つ]

塚本弥八郎 885
津田栄 775, 787
津田エミ子 585
土田賢省 779
土田孝弘 453
土谷武士 129, 133, 141, 145, 157
筒井宏明 359
坪井兵太 219

[て]

寺野寿郎 257, 619

[と]

富樫正彦 779
富岡重光 65
友田大輔 357

[な]

内藤正美 627
苗村高義 695
永井栄一 391
中岡睦雄 269
中川友紀子 103
長坂 一徳 591
長沢伸也 915
長澤庸二 433
中島恭一 549, 551, 553
中島賢二 505
中島智晴 119, 335
中島信之 763
中嶋宏 561, 565
中島洋一 769, 771
仲田明紀 303
中田典規 207
中津山幹男 417
中西康仁 747
中西祥八郎 349, 357, 435, 727
中野宇宙 759, 765
長町三生 907
仲光廣晃 79
中村和男 839
中村真 223
中村心哉 275
中村秀明 531
中村めぐみ 673
中森義輝 125, 395, 401, 431, 877, 901
長尾尚 461
成田雄彦 53
成松聖也 261
成瀬喜則 763

[に]

仁泉大輔 225
新居学 399, 601
西野順二 35, 307, 413, 421, 465
西端雅浩 509
西村晶子 853, 857
西村武 301, 397
西村正孝 19
西本由紀恵 383
西守克己 173

[ね]

根津紀久雄 235

[の]

野口真児 39
野崎浩成 751, 753, 759, 765
野村竜也 331
野村博義 633
野本弘平 211

[は]

萩野剛二郎 453
橋本智己 459
橋山智訓 293, 695, 699
長谷川貴史 17, 87
服部陽一郎 577
服部隆二 463
鳩野逸生 569
浜中雅俊 783
早川武 827
林勲 559, 585
林陽一 71, 79, 603, 649
原敬徳 521
原由美子 633, 675
波呂浩一郎 215
伴浩美 793

[ひ]

日景智文 323
東原正和 297
平川進 173
平野奈穂美 645
広兼道幸 527
廣瀬幸雄 105
廣田薫 43,47,95,99,103, 161, 177,415, 419

[ふ]

福田敏男 687, 733
福見淳二 39
福元伸也 433, 663
福山雅弘 283
藤井誠 597
藤目葉子 87
藤本太郎 289
藤本泰成 639
藤吉誠 461, 463
布施光男 769
古川浩平 525
古川長太 555
古田均 527
古橋武 17, 87, 197, 315, 359, 559, 573, 577, 597, 735

[へ]

邊見均 323

[ほ]

細谷敏哉 615
細田超 181
堀内敦司 391
堀川慎一 659

堀義巳 177, 181
本多克宏 653
本多中二 91, 451, 453

[ま]

前川督雄 319
前田隆 763
前田博 215
前田幹夫 261
前田道治 663
前田豊 683
前田陽一郎 739, 743, 747
牧野俊朗 425
牧野泰裕 307
増井重弘 257, 619
枡田行央 469
松浦貴宏 219
松浦瑞樹 487
松下聖一 359
松下光範 425
松下裕 873
松田修三 769
松田充夫 247
松富達夫 807
松永公廣 759
松永貴司 739
松本昇 67
馬庭芳朗 177
間淵 重昭 887

[み]

三浦康史 893
三上貞芳 631
神酒勤 655
三雲是宏 527
水本雅晴 53, 75, 137, 177, 303
三田村保 439
宮内肇 173
宮腰政明 153
宮地功 667
宮島廣美 433, 663
宮武直樹 769, 771
宮田裕次郎 197
宮野尚哉 635
宮本文穂 531
宮本定明 121
三好哲也 589, 591, 653, 823, 825, 827

[む]

向殿政男 121, 535, 539
村上周太 261, 443
村田忠彦 65, 117, 229, 335, 601
村田昌司 635

[も]

杢屋銑一 879
茂原英樹 811
守田圭 107
森俊也 105, 793
森典彦 903
森宗仁 265

[や]

安川昇一 105
安野卓 39, 615
安信誠二 27, 265, 279, 389
箭内顕彦 775, 783, 787
箭内美智子 775, 783, 787
柳原二郎 543
矢鳴虎夫 193, 297
矢野均 821
矢野良和 699
藪内賢之 395, 849
山川あす香 827
山川烈 223, 225, 655, 673
山口明宏 631
山口静馬 719, 723, 891
山口亨 459, 623, 853, 857
山口昌志 87
山崎初夫 751, 753, 759, 765
山埼秀城 463
山下元 775, 779, 783, 787
山田耕一 149
山田登志朗 515
山本秀夫 531

[ゆ]

湯場崎直養 43, 47

[よ]

横川壽彦 409
吉浦真由美 843
吉川歩 301, 397
吉川大弘 315
吉川泰文 613
吉田勝美 67, 71, 669
吉根勝美 751, 753, 759, 765
吉野一 419
米山忠暲 457

[り]

領家美奈 431

[わ]

若狭浩 203
若松良行 623
和多田淳三 113, 253, 395, 849
渡辺匠 369, 373, 381, 393
渡邊輝幸 253
渡部弘隆 631
渡部勉 519
和田充雄 631

第１３回ファジィシステムシンポジウム実行委員会

実行委員長　中島　信之

総務	大薮多可志	プログラム委員長	山田　耕一
	中島　恭一		大里　有生
会計	高木　　昇		奥田　裕紀
庶務	小倉　久和		加藤　康記
	小野　理恵		小池　清之
	久志本　茂		小林　俊一
	桑野　昭裕		阪井　節子
	師玉　康成		田中　一男
	白石　俊輔		中村　和男
	白山　政敏		山浦　弘夫
	醍醐　元正		
	田代　発造		
	中沢　　賢		
	成瀬　喜則		
	西野　順二		
	林　　良茂		

第１３回ファジィシステムシンポジウム講演論文集

1997年6月4日発行

発行　　日本ファジィ学会（SOFT）

〒113　東京都文京区本郷4-24-5

春日ビル8F　システム総研内

電話（03）5684-5146

編集　第１３回ファジィシステムシンポジウム実行委員会

◆ソフトコンピューティングシリーズ〈全11巻〉◆

日本ファジィ学会 編

現実の世界には１＋１＝２では割り切れない問題が数多く存在する。そうした不精密性・不確実性といった人間固有の性格の問題解決にあたっては許容範囲の明示が肝要であり，ここにZadeh教授の提唱した「ソフトコンピューティング」の考え方が脚光を浴びるに至っている。日本ファジィ学会編集の下，本シリーズでは理論に止まらず，現実とのリンクも重視し応用事例を数多く取り上げる。

⑧ファジィロボット〔最新刊〕

－インテリジェントシステムのための－

柴田崇徳・福田敏男著　A５判 176頁 本体3900円 〒310

〔内容〕SOFT／階層的制御／マニピュレータ／姿勢最適化／センサ統合システム／知的ナビゲーション／行動計画／利己的計画と協調的計画／知的インタフェース／他

⑥ファジィ・ニューラルネットワーク

林　勲・古橋　武編著　A５判 224頁 本体3900円 〒340

表題を独自に10のモデルに分類し，各モデルの紹介と実例を示した意欲作。〔内容〕現状／ファジィルール／ニューロ的学習／ファジィルール的構造／ファジィ化ニューラルネット／海外の研究と応用／家電／自動車／プロセス制御／他

①遺伝的アルゴリズム

坂和正敏・田中雅博著　A５判 224頁 本体3200円 〒340

大学教養課程の学生を対象とした基礎理論の紹介から，最適問題，機械学習，画像処理，ゲーム理論など具体的な適用の実際までを解説。〔内容〕GAとは／基本的GAとオペレータ／最適化とGA／組合せ最適化／機械学習システム他

⑦自律分散システム

新　誠一・池田雄司・湯浅秀男・藤田博之著　A５判 152頁 本体3000円 〒310

集中から知性をもった個の集まりへ，自律分散の意義が高まっている中，その原理と個別のシステムの具体的像と方法論を提供。〔内容〕ソフトコンピューティング／自律分散適応制御／自律分散原理による画像認識／マイクロマシン

②ソフト最適化

坂和正敏・石井博昭・西崎一郎著　A５判 216頁 本体3600円 〒340

ファジィ環境すなわち人間固有の主観的判断のあいまい性を，最適化手法の線形計画法，非線形計画法，組合せ計画法，ゲーム理論に取り入れた考え方・応用について解説。〔内容〕線形システム／非線形システム／離散システム／他

⑨カオス応用システム

合原一幸・五百旗頭正編著　A５判 164頁 本体2800円 〒310

カオス工学の先端研究の具体例について，すでに製品化されたものを含め解説し，工学の基礎理論としての立場を明示。〔内容〕カオス入門／人間の表情の作成／力学系の学習／応用研究開発ツール／家電への応用／自律ロボット／他

④ソフトデータ解析

田中英夫・石渕久生著　A５判 192頁 本体3700円 〒340

入出力データ・システムに存在するあいまいな現象をモデル化する手法を解説。〔内容〕可能性線形モデル／可能性モデルによる回帰分析・判別分析／ニューラルネットによる関数近似・識別／ファジィルールによるパターン識別

⑪ソフトコンピューティング用語集

坂和正敏・馬野元秀・大里有生編　A５判 244頁 本体4500円 〒340

SOFTを学ぶ上で重要となる用語を以下の分野より200語を精選し，それぞれの専門家が１語１ページで解説したもの。〔内容〕ファジィ（理論／方法論／応用）／ニューラルネットワーク／GA／カオス／人工知能・知識工学／OR／他

「複雑系双書」　編集：津田一郎・金子邦彦・池上高志

1. 複雑系のカオス的シナリオ

金子邦彦・津田一郎著

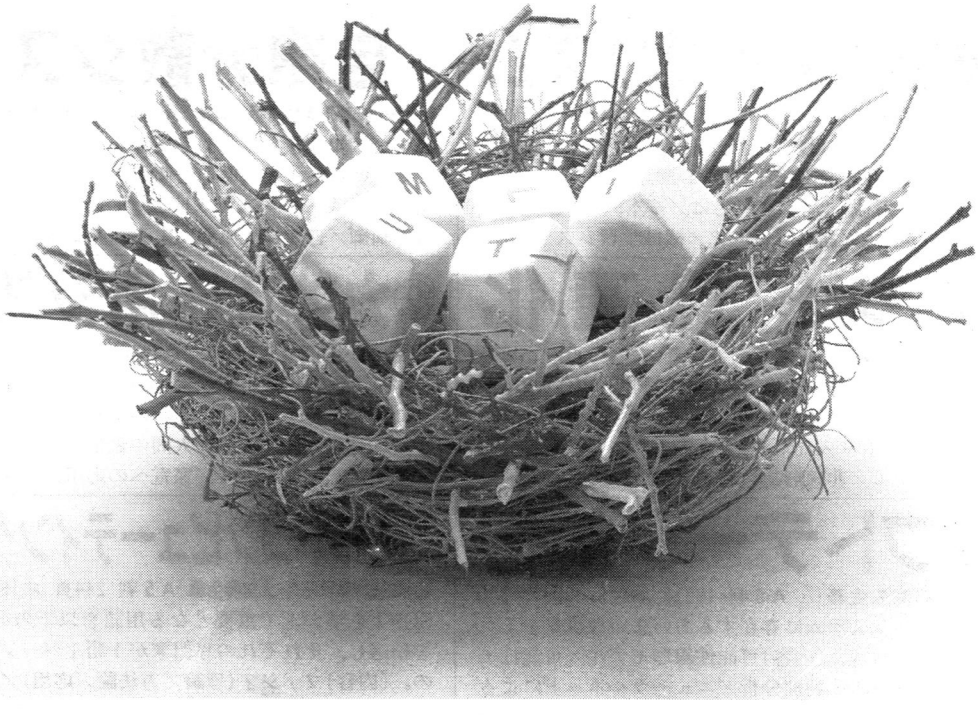
A５判　312頁　本体4800円　〒340

カオス，複雑現象の研究から到達した新しい自然認識を開示。〔内容〕複雑系科学の必然性／カオスとは／情報論的立場による観測問題／CML／カオス要素のネットワーク／カオス結合系の生物ネットワークの意義／脳の情報処理とカオス

朝倉書店　〒162 東京都新宿区新小川町6-29/振替00160-9-8673
電話　営業部 (03) 3260-7631　FAX (03) 3260-0180
http：//www.asakura.co.jp　info@asakura.co.jp

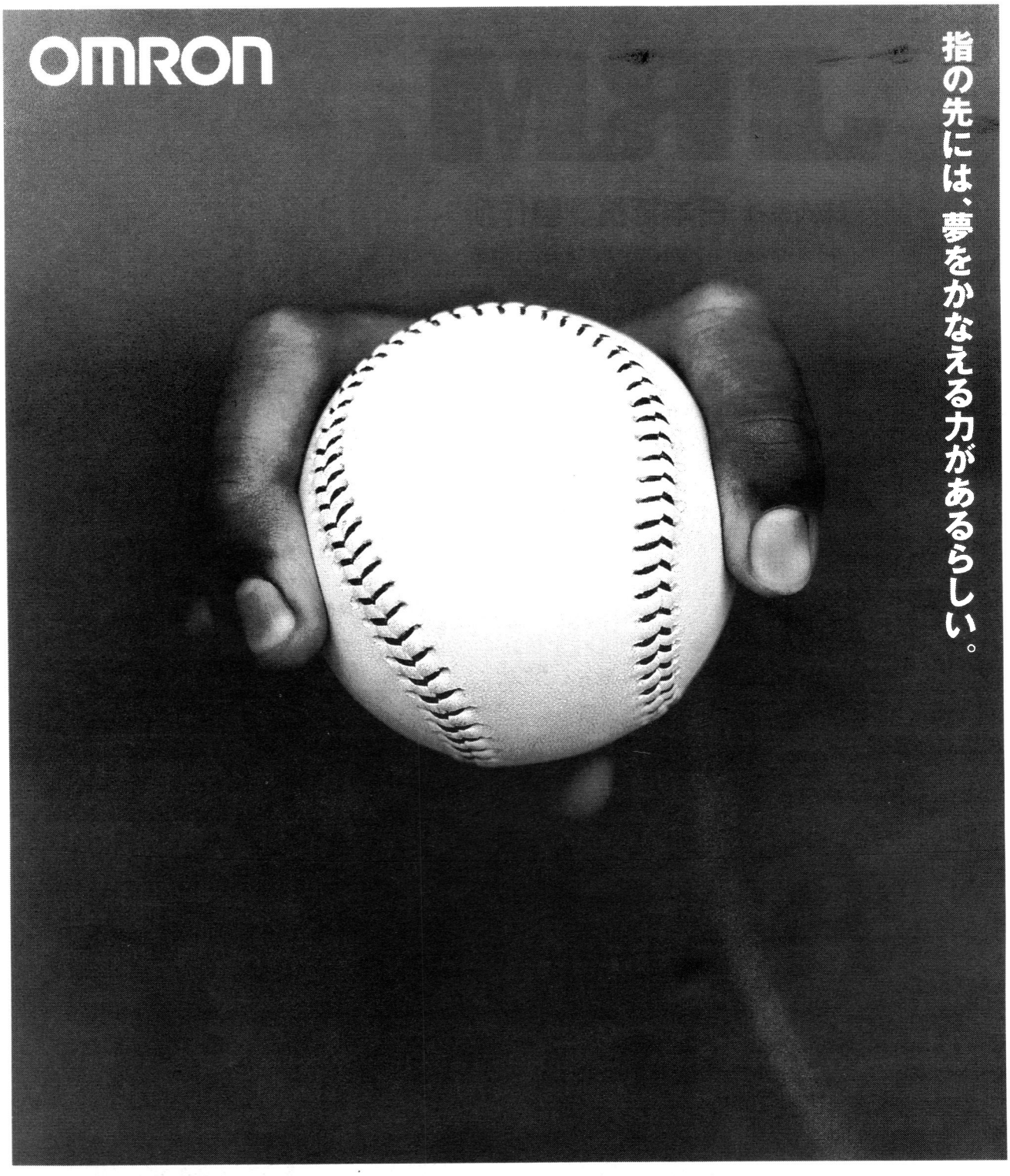
＊価格は消費税別です。

マルチメディアを育みます。



インテック
INTEC＝The Multimedia Company

本　　社／〒930 富山市牛島新町5-5　　TEL (0764) 44-1111 (代)
東京本社／〒101 東京都千代田区猿楽町2-6-10　　TEL (03) 3292-2911 (代)
札幌 釧路 仙台 山形 東京 横浜 新潟 長野 名古屋 大阪 京都 広島 高松 福岡 大分 魚津 富山 高岡 金沢 福井 ニューヨーク 香港

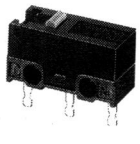


あなたがその指先を動かすだけで、まだ見ぬ新しい世界が始まる。オムロンのスイッチ技術の、目標です。

指を武器に一人海のむこうに渡り、見事アメリカンドリームを実現した青年の活躍に、胸を熱くしている人も多いことでしょう。野球に限った話ではありません。未知の世界に分け入る時、人は指を頼りにすることが多いようです。機械を動かそうとするときも、多くの場合、人はまず指でスイッチに触れますね。複雑な回路を持った機械でも、人は指一本で便利で楽しい世界を手にすることができます。ところで、身の回りのあちこちにあるスイッチ、実はオムロン製のものが非常に多いことをご存じでしたか。たとえば、インターネットで未知の世界に入る時に、パソコンのマウスが鳴らす"カチッ"という音の正体は、オムロンのマイクロスイッチです。自動販売機でジュースを買う時も、クルマの窓を開ける時も、あなたはオムロンのスイッチに触れることになります。誰もが簡単な操作で、自分の意志とか欲求とかを実現できる、より快適な社会をめざして、これからのオムロンに、ご期待ください。

社会を豊かに、おもしろくするオムロン。

オムロンのマイクロスイッチ
あなたのそばで、"カチッ"といい音を
鳴らしているかもしれません。



オムロン株式会社

JRM

株式会社 日本抵抗器製作所

〒939-18 富山県東砺波郡城端町北野2315番地
TEL(0763)62-1180　FAX(0763)62-2848

■会社概要

設　　立	昭和18年
代 表 者	木村　　準
資 本 金	5億400万円
従業員数	男　31名
	女　57名
勤務時間	AM8:15～PM5:00
休　　日	週休2日
	年末・年始　他（年間115日）
事業内容	電子機器、マイコン・ファジー・AI応用製品、センサー複合製品、ハイブリッドIC、SWC製品、センサー、ポテンションメーター、ヒーター　他各種抵抗器の開発設計、製造販売

BGMのように、技術を届けたい



■関連会社

日本抵抗器販売㈱
マイクロジェニックス㈱
㈲福光製作所
山口抵抗器㈱
㈱サ　ン　ワ
㈱ファイン電子
㈲雄神製作所
㈱オーミックス
日抵特販㈱
㈱日抵特販部
㈲日本抵抗器特販
幸亜電子工業股份有限公司
日本抵抗器香港有限公司

ひとりひとりの思いに、ひとつひとつ真剣。



あなたの増やす情熱、引き受けます。

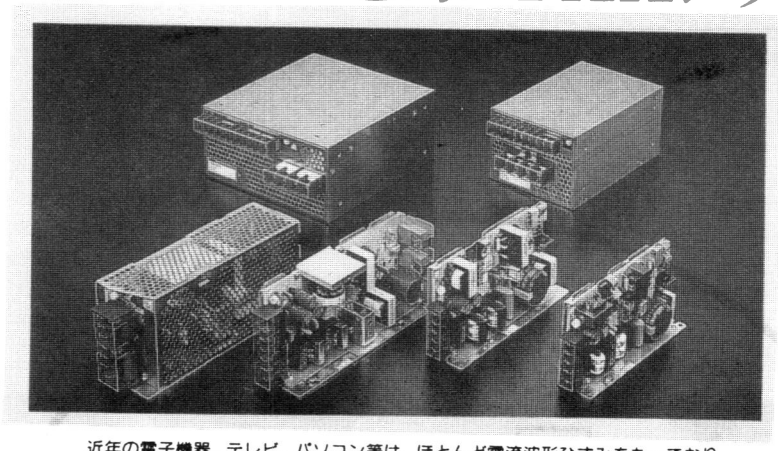
超低金利が続くマネー環境だからこそ「増やす情熱」が必要なときです。短期でひとまず貯めるもよし、長期でじっくり増やすのもよし、広く海外に目を向けるのもいいでしょう。明日が楽しみになる投資プランがきっとみつかるはずです。和光証券が、最新の情報と最適のプランでお手伝いいたします。ぜひ、お気軽にご相談ください。

おかげさまで50周年

和光証券

和光のホームページアドレス　http://www.wako-sec.co.jp/

地球にやさしい電源　PAAシリーズ



近年の電子機器、テレビ、パソコン等は、ほとんど電流波形ひずみをもっており、これにより、電力系統のトランスやコンデンサ等が障害を受け、発熱または故障に至ることがあります。これを「高調波の問題」といいます。
ヨーロッパでは、いち早く厳しい規制（高調波規制）がしかれました。
当社では、この度、この「高調波規制」に対応し、ひずみの発生を抑えた地球環境にやさしい「PAAシリーズ」を開発しました。
【ワールドワイドな安全設計】
安全規格　TUV(ドイツ)、UL(アメリカ)、CSA(カナダ)対応

COSEL

品質管理・保証の国際規格　ISO9001認証取得

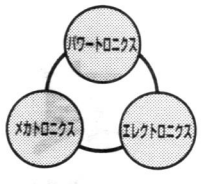
コーセル株式会社

本社／富山市上赤江町1-6-43　☎(0764)32-8151代

MEIDEN



パワートロニクス、
メカトロニクス、
エレクトロニクスと、
さまざまなテクノロジーを通して
明電舎は見つめています。
地球環境のこと、エネルギー資源のこと、
これからの情報社会のこと——。
すてきや快適をいっぱい膨らませながら、
わくわくする未来に向かって
走り続けます。



明電のシステムエンジニアリング

おかげさまで 100 周年 1997

株式会社　明電舎　〒103 東京都中央区日本橋箱崎町36-2(リバーサイドビル) ☎(03)5641-7000　支社・支店●関西支社(06)203-5261●中部支社(052)231-7181●九州支店(092)771-7041●北海道支店(011)261-5531●東北支店(022)227-3231●北陸支店(0764)33-0445●中国支店(082)221-4255●四国支店(0878)22-3437