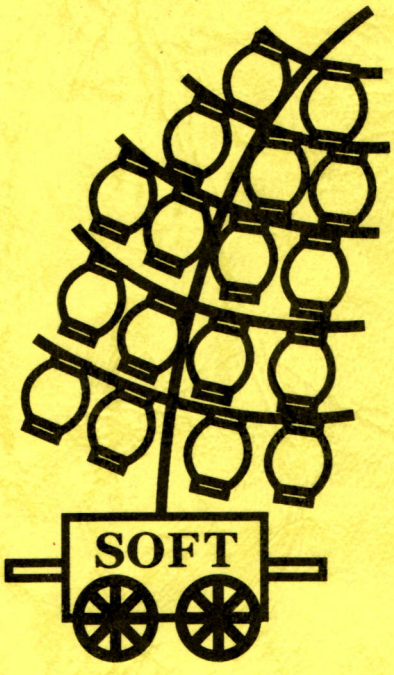
第16回

ファジィ システム シンポジウム

講演論文集

期日　2000年9月6日(水)・7日(木)・8日(金)

会場　秋田公立美術工芸短期大学



主催　日本ファジィ学会

(Japan Society for Fuzzy Theory and Systems)

第１６回ファジィ システム シンポジウム講演論文集

～ファジィとノン・ファジィの統合～

会期：２０００年9月６日（水）～ 9月８日（金）

会場：秋田公立美術工芸短期大学（秋田市新屋大川町１２－３）

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

共催：国際ファジィシステム学会（IFSA)

協賛：計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本オペレーションズ
リサーチ学会、日本行動計量学会、情報処理学会、電子情報通信学会、電気学会、
日本人間工学会、日本機械学会、土木学会、日本医療情報学会、
人工知能学会、日本ロボット学会、化学工学会、日本発酵生物学会、
日本エム・イー学会、日本原子力学会、日本神経回路学会、
バイオメディカル・ファジィ・システム学会、社会・経済・システム学会、
日本繊維製品消費科学会、日本デザイン学会、日本心理学会、日本応用数理学会、
数理社会学会、日本建築学会、日本応用心理学会、日本教育工学会、
日本塑性加工学会、日本経営工学会、日本計算工学会、日本バーチャ学会、
日本顔学会、日本感性工学会、ヒューマンインターフェース学会、日本数学会、
CFSAT（台湾)、KFIS（韓国）

第１６回ファジィシステムシンポジウム開催にあたって



日本ファジィ学会・第６期会長
塚本弥八郎　（名城大学）

ファジィシステムシンポジウムが東北支部の皆様のご尽力で今回はじめて東北の地、秋田市にて開催される運びとなりました。本年は第４回アジアファジィシステムシンポジウムがこの６月にはじめて日本（つくば市）で開催され、大盛況のうちに終わりました。今回のファジィシステムシンポジウムは、いつもと違って、９月に開かれますが、今後も費用削減のため大學の施設利用が多くなることが予想され、９月開催が続くかもしれません。

さて、今回は４０にのぼる他学会の協賛を得て、「ファジィとノン・ファジィ」の統合と冠して従来より広い分野からの論文の募集があったと聞いています。また、岩手県立大学長の西沢潤一氏による「大學の未来像」と題しての特別講演、五味隆志 AAI システムズ社長による「新 AI 科学と介護ロボット」と題しての招待講演が執り行われます。さらに、通常の懇親会に加えて今回はウエルカムパーティが開催前夜に開かれたり、電子セッション、市民参加など、積極的な新しい試みに期待感が膨らみます。

さて、日本ファジィ学会の将来検討委員会の分析によりますと、他学会と較べての本学会の特徴は、主観や感性を扱うところにあるということです。主観の問題にしろ感性の問題にしろ、２１世紀前半のキーワードと言っても過言ではないでしょう。本学会が１１年間培った知をさらに発展させることによって、学会や産業界に多大の貢献をしてゆかねばならないと考える次第です。

シンポジウムは、ひとつに、厳しい意見交換、討論の場であると同時に、他方で、人と人の暖かい交流の場の提供という意味があります。本当にせちがらい世の中になり、日本ファジィ学会もありとあらゆる費用削減計画を考え、できることから即実施しておりますが、依然として赤字財政が続いてます。こんなときだからこそ、本シンポジウムが、本学会の中長期へ向けての明るい材料を育むような、そんな学会になりますことを切に祈念する次第です。

最後になりましたが、本シンポジウムのために御尽力頂きました中津山幹男実行委員長、森岡正臣プログラム委員長、小松正武組織委員長はじめ、東北支部や秋田公立美術工芸短期大学の皆様方に心から御礼申し上げます。

9 月 5 日 （火）

時間	
18:00 20:00	ウェルカムパーティ コーディネータ：中津山 幹男（大会委員長、秋田公立美術工芸短期大学） 佐藤 英寛（秋田公立美術工芸短期大学　事務局次長） 場所：学生食堂

9 月 6 日 （水）

一般講演						
時間	A 室	B 室	C 室	D 室	E 室	F 室
9:00	WA1 ファジイ推論（1）	WB1 GA（1）	WC1 教育工学	WD1 ロボット	WE1 ファジイ数学（1）	WF1 知的情報処理（1）
10:10	WA2 ファジイ推論（2）	WB2 GA（2）	WC2 ニューラルネットワーク（1）	WD2 制御（1）	WE2 ファジイ数学（2）	WF2 知的情報処理（2）
11:20	WA3 ファジイ推論（3）	WB3 GA（3）	WC3 ニューラルネットワーク（2）	WD3 制御（2）	WE3 ファジイ数学（3）	WF3 知的情報処理（3）
12:20	昼　食					
13:20	招待講演 『新AI科学と介護ロボット』 講師：　五味 隆志　氏（AAIシステムズ社長） 司会：森岡 正臣（宮城教育大学） 場所：大講義室					
14:30	WA4 ファジイ推論（4）	WB4 GA（4）	WC4 ニューラルネットワーク（3）	WD4 制御（3）	WE4 ファジイ数学（4）（～15:50）	WF4 知的情報処理（4）
15:40 16:40	WA5 ファジイ推論（5）	WB5 GA（5）	WC5 ニューラルネットワーク（4）	WD5 制御（4） （～16:20）		WF5 知的情報処理（5） （～16:20）

9 月 7 日 （木）

一般講演						
時間	A 室	B 室	C 室	D 室	E 室	F 室
9:00	TA1 自然言語処理	TB1 GA (6)	TC1 (企画) 自己組織化マップ (SOM) (1)	TD1 (企画) 色彩とイメージ (1)	TE1 (企画) ラフ集合 (1)	TF1 データ解析 (1) (9:20～)
10:10	TA2 感覚・感性 (1)	TB2 OR (1)	TC2 (企画) 自己組織化マップ (SOM) (2)	TD2 (企画) 色彩とイメージ (2)	TE2 (企画) ラフ集合 (2)	TF2 データ解析 (2)
11:20	TA3 感覚・感性 (2)	TB3 OR (2)	TC3 (企画) 自己組織化マップ (SOM) (3)	TD3 (企画) 色彩とイメージ (3)	TE3 (企画) ラフ集合 (3)	TF3 データ解析 (3)
12:20	昼 食					
13:20	特別講演 『大学の将来像』 講師： 西澤 潤一 氏 (岩手県立大学学長、前東北大学総長) 司会：中津山 幹男 (秋田公立美術工芸短期大学) 場所：大講義室					
14:20	学会賞表彰式 場所：大講義室					
14:45	TA4 感覚・感性 (3)	TB4 OR (3)	TC4 (企画) 自己組織化マップ (SOM) (4)	TD4 ルール獲得 (1)	TE4 ファジィモデリング (1)	TF4 ファジィクラスタリング (1)
15:55 16:55	TA5 感覚・感性 (4)	TB5 情報検索	TC5 (企画) 自己組織化マップ (SOM) (5)	TD5 ルール獲得 (2) (～16:35)	TE5 ファジィモデリング (2)	TF5 ファジィクラスタリング (2) (～16:35)
18:00 20:30	懇親会 場所：秋田キャッスルホテル					

9 月 8 日 （金）

一般講演						
時間	A 室	B 室	C 室	D 室	E 室	F 室
9:00	FA1 学習(1)	FB1 パターン識別	FC1 医療応用(1)	FD1 意思決定 (～10:20)	FE1 （企画）短期大学でのファジィと情報教育	FF1 （企画）ANGLE（学生部会）(1)
10:10	FA2 学習(2)	FB2 画像(1)	FC2 医療応用(2)		FE2 ヒューマンインターフェース	FF2 （企画）ANGLE（学生部会）(2)
11:20 12:20	FA3 学習(3)	FB3 画像(2) (～12:00)				
	昼 食					
13:00 14:00			FC4 （企画）パネル討論「感性とファジィ」			

目次

－ 9月6日（水）－

大講義室

招待講演　13:20～14:20

演題：　新 AI 科学と介護ロボット

講師：　五味 隆志　氏（AAI システムズ 社長）

司会：　森岡 正臣（宮城教育大学）

A室

WA1　ファジィ推論（1）　9:00～10:00　　司会：　山下 元（早稲田大学）

WA1-1：距離型ファジィ推論法Ｐａｒｔ13－外挿機能を持つ距離型ファジィ推論法－　……1
○王 碩玉（高知工科大学）、水本 雅晴（大阪電気通信大学）、土谷 武士（北海道大学）

WA1-2：距離型ファジィ推論法Ｐａｒｔ14－動的ゴムストリング型連想記憶アルゴリズム－　……3
○王 碩玉 、河田 耕一（高知工科大学）、土谷 武士（北海道大学）、水本 雅晴（大阪電気通信大学）

WA1-3：距離型ファジィ推論法を用いたモデルに基づくファジィ制御　……5
○木村 太（苫小牧工業高等専門学校）、王 碩玉（高知工科大学）、土谷 武士（北海道大学）

WA2　ファジィ推論（2）　10:10～11:10　　司会：　古橋 武（名古屋大学）

WA2-1：単一入力ルール群結合型ファジィ推論法と簡略化ファジィ推論法との関係　……7
○長岡 毅、水本 雅晴（大阪電気通信大学）

WA2-2：種々のファジィ推論法の推論結果の非線形性について　……11
○松浦 優子（大阪電気通信大学）、有川 晴彦（アークテクノリサーチ(株)）、水本 雅晴（大阪電気通信大学）

WA2-3：Lagrange 補間による補間型ファジィ推論　……15
○石 岩(九州東海大学)、水本 雅晴（大阪電気通信大学）

WA3　ファジィ推論（3）　11:20～12:20　　司会：　王 碩玉（高知工科大学）

WA3-1：分割層を用いたファジィ推論モデルの構築　……19
○福元 伸也、宮島 廣美、長澤 庸二（鹿児島大学）

WA3-2：気象データを用いた売上予測ファジィ推論モデル　……21
古殿 幸雄（福山平成大学）

WA3-3：多次元データの可視化による簡潔なファジィモデル構築法の提案　……23
○服部 陽一郎、北内 智子、鈴木 俊博、古橋 武（名古屋大学）

(13:20～14:20に大講義室で招待講演があります。)

WA4　ファジィ推論（4）　14:30～15:30　　司会：　古殿 幸雄（福山平成大学）

WA4-1：台形メンバーシップ関数の言語近似と言語近似を用いた推論法の提案 ……27
○丸山 泰弘、江本 全志、向殿 政男（明治大学）

WA4-2：記号レベルでのファジィ制御系の記述のための新しい推論法のモデリング能力に関する一考察 ……31
○山元 秀洋、古橋 武（名古屋大学）

WA4-3：変形ファジィルールを用いた不完全情報ゲームにおける優劣判定 ……35
○風見 覚、鬼沢 武久（筑波大学）

WA5　ファジィ推論（5）　15:40～16:40　　司会：　水本 雅晴（大阪電気通信大学）

WA5-1：ファジィ推論を用いたハイブリッド交通機関選択モデルに関する検討 ……39
○水谷 香織、秋山 孝正（岐阜大学）

WA5-2：不明確な入力画像による特徴量の欠如を考慮した車動画像の認識 ……41
○佐藤 秀司、荒井 良徳（東京工芸大学）、廣田 薫（東京工業大学）

WA5-3：距離型ファジィ推論法による学習アルゴリズムを用いた静止画像圧縮 ……45
○石田 斉（北海道大学）、王 碩玉（高知工科大学）、土谷 武士（北海道大学）

B室

WB1　GA（1）　9:00～10:00　　司会：　村田 忠彦（足利工業大学）

WB1-1：不均衡進化説に基づく突然変異を有する遺伝的アルゴリズム ……49
前田 陽一郎（大阪電気通信大学）

WB1-2：木構造の複雑度に基づく推論評価値を用いた遺伝的プログラミング ……53
○藤田 篤、前田 陽一郎（大阪電気通信大学）

WB1-3：GPでの部分木決定の一考察 ……57
○竹内 康雄、向殿 政男（明治大学）

WB2　GA（2）　10:10～11:10　　司会：　前田 陽一郎（大阪電気通信大学）

WB2-1：遺伝的プログラミングを用いた分散協調問題の一解法 ……59
○山内 ゆかり、神谷 和浩、向殿 政男（明治大学）

WB2-2：多目的最適化問題のためのセルラー多目的GA ……61
○村田 忠彦（足利工業大学）、石渕 久生（大阪府立大学）、玄 光男（足利工業大学）

WB2-3：多目的最適化問題のためのセルラー遺伝的局所探索法 ……63
○村田 忠彦（足利工業大学）、石渕 久生（大阪府立大学）、玄 光男（足利工業大学）

WB3　GA（3）　11:20～12:20　　司会：　村田 忠彦（足利工業大学）

WB3-1：遺伝的アルゴリズムを用いた学習型ファジィ制御システムの開発 ……65
○山田 尚史、村上 周太、島川 学（九州工業大学）

WB3-2： 遺伝的プログラミングにおける初期値依存問題を改善するための学習法 ……69
吉家 悟司、○瀬名波 強、新美 礼彦、田崎 栄一郎（桐蔭横浜大学）
WB3-3： 異種個体集団が共存するGAによるファジィ推論ルールの獲得手法 — 既存手法との比較および考察 — ……73
○梶谷 賢司、増田 達也（大阪工業大学）、井上 純一(三菱電機（株))

（13:20～14:20に大講義室で招待講演があります。）

WB4 GA（4） 14:30～15:30 司会： 田崎 栄一郎（桐蔭横浜大学）

WB4-1： 実環境下での進化における評価負荷の軽減化 ……77
○山本 雅哉（名古屋大学）、橋山 智訓（名古屋市立大学）、大熊 繁（名古屋大学）
WB4-2： 群集流理論を用いた遺伝的アルゴリズムによる通路作成 ……81
○西山 信宏、椎塚 久雄（工学院大学）
WB4-3： 進化的計算によるケーブル配線経路計画問題の解法 ……83
○飯田 一弘、馬火 玄、西野 順二、白井 治彦、小高 知宏、小倉 久和(福井大学)

WB5 GA（5） 15:40～16:40

WB5-1： 遺伝的アルゴリズムを用いた物資配送計画 ……87
前田 幹夫（九州工業大学）、○新居 龍治（(株) 日立製作所）、岡部 隆男、
村上 周太（九州工業大学）
WB5-2： Intelligent Prediction Method for Power Consumption ……91
○アスクア ラファエル、安信 誠二(筑波大学)
WB5-3： 遺伝的アルゴリズムを用いた自動火災判断システム ……93
○秋田 真吾、海川 至幸、吉川 大弘、篠木 剛、鶴岡 信治（三重大学）

C室

WC1 教育工学 9:00～10:00 司会： 但馬 文昭（横浜国立大学）

WC1-1： ファジィノードファジィグラフを応用したソシオグラム分析 ……97
○上江洲 弘明、山下 元（早稲田大学）、稲井田 次郎（日本大学）、佐藤 章（東洋大学）、須田 宏（慶応大学）、津田 栄（国学院高校）、箭内 顕彦（早稲田実業）、箭内 美智子（淑徳高校）
WC1-2： 手書き風文字生成のためのファジィルールの構成 ……99
○但馬 文昭（横浜国立大学）、宮武 直樹（法政大学）、中島 洋一（空知教育研究所）
WC1-3： アクセスlog取得型知的CAIシステム ……101
○坂東 正規、菅野 直敏、米山 忠暲（玉川大学）

WC2 ニューラルネットワーク（1） 10:10～11:10 司会： 和多田 淳三（大阪工業大学）

WC2-1： 大量の入力ユニットを必要とするニューラルネットワークの学習 ……105
○小野 能嗣、池田 進矢、菊池 浩明、中西 祥八郎（東海大学）
WC2-2： 複数種類の知識を扱った多種入出力ニューラルネットワーク ……107
○小野 能嗣、菊池 浩明、上村 龍太郎、中西 祥八郎（東海大学）

WC2-3： ニューラルネットワークによる識別可能な入力の探索 ····111
○小野 能嗣、菊池 浩明、上村 龍太郎、中西 祥八郎（東海大学）

WC3 ニューラルネットワーク（2） 11:20～12:20 司会： 林 勲（阪南大学）

WC3-1： 階層型ニューラルネットワークにおける中間層ユニット数の特性 ····115
○大村 明弘、小野 能嗣、菊池 浩明、中西 祥八郎（東海大学）
WC3-2： ニューラルネットワークにおける獲得済み知識の利用 ····117
○池田 進矢、小野 能嗣、菊池 浩明、上村 龍太郎、中西 祥八郎（東海大学）
WC3-3： 階層学習を行なう自己増殖型自己組織モデルの提案 ····119
○岩崎 正宏（名古屋大学）、橋山 智訓（名古屋市立大学）、大熊 繁（名古屋大学）

（13:20～14:20に大講義室で招待講演があります。）

WC4 ニューラルネットワーク（3） 14:30～15:30 司会： 市村 匠（広島市立大学）

WC4-1： 投資変化最小化のための階層型ボルツマンマシンの構成 ····123
○渡辺 輝幸、和多田 淳三（大阪工業大学）、小田 憲志（人間情報学研究会）
WC4-2： ニューラルネットの発見的モデル選択規範－ディストータII ····125
○市橋 秀友、縄舟 守、本多 克宏（大阪府立大学）
WC4-3： TAM Network のプルーニング手法の一提案 ····127
○林 勲（阪南大学）、前田 利之（福山平成大学）

WC5 ニューラルネットワーク（4） 15:40～16:40 司会： 市橋 秀友（大阪府立大学）

WC5-1： ニューラルネットワークによる情報教育ＴＡのスキル向上支援システムの設計 ····131
○栗山 裕（桐蔭横浜大学）、市村 匠（広島市立大学）、山下 利之
（東京都立科学技術大学）
WC5-2： ニューラルネットワークによる医療データベースからの述語論理の抽出 ····135
○市村 匠（広島市立大学）、吉田 勝美（聖マリアンナ医科大学）
WC5-3： 遺伝的アルゴリズム学習を用いたニューラルネットワークによる天気予報システムの構築 ····139
向根 美和、○添川 真、ケネス J. マッキン、田崎 栄一郎（桐蔭横浜大学）

D室

WD1 ロボット 9:00～10:00 司会： 佐藤 章（東洋大学）

WD1-1： 自律移動ロボットによる教示情報の理解のための一考察 ····143
○井谷 久博（名古屋市工業研究所）、古橋 武（名古屋大学）
WD1-2： 多足ロボットにおけるファジィ推論を用いた起立動作およびバランス制御 ····147
○北山 功、和久田 肇、仲田 明紀、水本 雅晴、前田 陽一郎（大阪電気通信大学）
WD1-3： ファジィフィードフォワード制御によるジョイスティック教示システム ····151
○永田 寅臣（福岡県工業技術センター）、渡辺 桂吾（佐賀大学）

WD2　制御（1）　10:10～11:10　　司会：　高萩 栄一郎（専修大学）
WD2-1：ファジィスライディングモード制御を用いた振動制御の研究 ····155
○入江 寿弘、高木 良浩、新宮 清志（日本大学）
WD2-2：非線形プロセスを対象とした知的制御システムの構築 ····159
○増田 貴裕、安信 誠二(筑波大学)
WD2-3：進化的制御による倒立振子の振り上げ制御 ····161
○山崎 博昭、安信 誠二 (筑波大学)

WD3　制御（2）　11:20～12:20
WD3-1：倒立振子システムの振り上げおよび安定化ファジィ制御 ····163
○易 建強、湯場崎 直養（マイコム株式会社）、廣田 薫（東京工業大学）
WD3-2：並列型二重倒立振子システムの安定化ファジィ制御 ····167
○易 建強、湯場崎 直養（マイコム株式会社）、廣田 薫（東京工業大学）
WD3-3：直列型二重倒立振子システムの安定化ファジィ制御 ····171
○易 建強、湯場崎 直養（マイコム株式会社）、廣田 薫（東京工業大学）

（13:20～14:20 に大講義室で招待講演があります。）

WD4　制御（3）　14:30～15:30　　司会：　入江　寿弘（日本大学）
WD4-1：リモート診断と制御におけるカオス通信 ····175
○樋口 智尚、前田 幹夫、村上 周太（九州工業大学）
WD4-2：インテリジェント車椅子ナビゲーションシステムの開発－ファジィ走行制御 ····177
○古金 裕美、前田 幹夫、村上 周太（九州工業大学）
WD4-3：離散時間の適応ファジィ制御系一設計法 ····179
○韓 虎剛（広島県立大学）、村上 周太（九州工業大学）

WD5　制御（4）　15:40～16:40　　司会：　新宮 清志（日本大学）
WD5-1：ファジィスイッチング制御の提案とラジコンホバークラフトへの応用 ····183
○岩崎 正明、田中 一男（電気通信大学）
WD5-2：一般化ファジィシステムによるモデルリダクションとロバストコントローラ設計····187
○谷口 唯成、田中 一男、山藤 和男（電気通信大学）
WD5-3：ファジィカオス制御手法によるローレンツアトラクタの制御 ····191
○泉 清高、ランカ ウダワッタ、渡辺 桂吾、木口 量夫（佐賀大学）

E室

WE1　ファジィ数学（1）　9:00～10:00　　司会：　菊池 浩明（東海大学）
WE1-1：凸と凹のファジィ真理値の性質の違い ····193
○江本 全志、向殿 政男（明治大学）
WE1-2：ファジィ論理と二線式表現 ····197
○西野 篤史、江本 全志、向殿 政男（明治大学）

WE1-3： A proposal of FFD based on Conditional Probability ····199
○Rolly INTAN、向殿 政男（明治大学）

WE2 ファジィ数学（2） 10:10～11:10 司会： 佐々木 守寿（愛知教育大学）

WE2-1： 拡張原理について閉じているファジィ真理値の部分集合について ····203
○菊池 浩明、中西 祥八郎（東海大学）
WE2-2： 単調ファジィ論理関数とその同定問題について ····207
○菊池 浩明、中西 祥八郎（東海大学）
WE2-3： ファジィ検定法の提案 ····211
○加藤 裕一、高橋 将人、大月 隆一（島根大学）、山口 静馬（山口大学）

WE3 ファジィ数学（3） 11:20～12:20 司会： 向殿 政男（明治大学）

WE3-1： ファジィ積分型ファジィ制御 ····213
○高萩 栄一郎（専修大学）
WE3-2： 純粋ファジィ批判：導入編 L－ノルムについて（3） ····217
山口 人生（神奈川大学）
WE3-3： t-ノルムの拡張としての弱結合的連言演算 ····221
○河口 万由香、宮腰 政明（北海道大学）

（13:20～14:20に大講義室で招待講演があります。）

WE4 ファジィ数学（4） 14:30～15:50 司会： 河口 万由香（北海道大学）

WE4-1： 和・差・積の演算に関して閉じているファジィ数の族と区分的多項式タイプのファジィ数について ····223
古川 長太（創価大学）
WE4-2： ファジィ数の表現とファジィ微分 ····225
○ 陳 明浩(ハルビン工業大学)、齋藤 誠慈、石井 博昭（大阪大学）
WE4-3： 不明、矛盾を含む複数観測の結合結果の真理度計算の一方法 ····227
間淵 重昭（大阪学院大学）
WE4-4： 局所定常性にもとづく経済指標の時系列解析と予測への応用 ····231
松田 充夫（樟蔭女子短期大学）

F室

WF1 知的情報処理（1） 9:00～10:00 司会： 須田 宏（慶応大学）

WF1-1： ファジィ索引とその類似データ検索への応用 ····235
馬野 元秀、○大槻 充紀、宇野 裕之（大阪府立大学）
WF1-2： ファジィ・フレーム・システムの拡張 ····239
馬野 元秀、○後藤 聡、宇野 裕之、瀬田 和久（大阪府立大学）
WF1-3： 幾何図形におけるアナロジーへのファジィ理論の応用 ····243
馬野 元秀 、○鳴門 雅之 、宇野 裕之、瀬田 和久（大阪府立大学）

ＷＦ２　知的情報処理（2）　10:10～11:10　　司会：　馬野 元秀（大阪府立大学）

ＷＦ2-1：WWW 情報検索 Agent の学習支援システムの構築 ····247
山口 大輔、○山本 裕亮、瀧村 尚己、ケネス J. マッキン、田崎 栄一郎
（桐蔭横浜大学）

ＷＦ2-2：複数の絵からの小話生成に関する基礎的研究 ····251
○加藤 茂（筑波大学）、岩田 満（電気通信大学）、鬼沢 武久（筑波大学）

ＷＦ2-3：免疫ネットワークモデルを用いた話題分布構造可視化のためのキーワード抽出 ····255
○高間 康史、廣田 薫（東京工業大学）

ＷＦ３　知的情報処理（3）　11:20～12:20　　司会：　鬼沢 武久（筑波大学）

ＷＦ3-1：ボート競技におけるファジィモデルでの知識獲得 ····257
○橘 完太、古橋 武（名古屋大学）、下田 学、川上 泰雄、福永 哲夫（東京大学）

ＷＦ3-2：ロボットアシステッドアクティビティにおける状況依存性の提案 ····261
橋本 智己（那須大学）

ＷＦ3-3：あいまい行動型制御系のセンサ特性を考慮したモジュール学習 ····263
○泉　清高、渡辺 桂吾、木口 量夫（佐賀大学）

（13:20～14:20 に大講義室で招待講演があります。）

ＷＦ４　知的情報処理（4）　14:30～15:30　　司会：　安信 誠二（筑波大学）

ＷＦ4-1：Intelligent Multi-Agent 技術を用いた階層型プランニングシステム ····265
○山口 大輔、関 洋恒、ケネス J. マッキン、田崎 栄一郎（桐蔭横浜大学）

ＷＦ4-2：エージェント・アプローチによるファジィルール抽出法 ····269
○領家 美奈、中森 義輝(北陸先端科学技術大学院大学)

ＷＦ4-3：証拠理論における不確実さの指標を用いたエージェント間コミュニケーション ····271
に関する研究
○阿曽 光洋（名古屋大学）、橋山 智訓（名古屋市立大学）、大熊 繁（名古屋大学）

ＷＦ５　知的情報処理（5）　15:40～16:20

ＷＦ5-1：機器操作の知的支援システムの提案 ····275
安信 誠二、○武藤 裕美(筑波大学)

ＷＦ5-2：カラータイムペトリネットによる災害時避難システムの構成 ····277
○碓井 智範、田崎 栄一郎（桐蔭横浜大学）

－ 9月7日（木）－

大講義室

特別講演　13:20～14:20

演題：　大学の将来像

講師：　西澤 潤一　氏　（岩手県立大学学長、前東北大学総長）

司会：　中津山 幹男（秋田公立美術工芸短期大学）

A室

ＴＡ1　自然言語処理　9:00～10:00　　司会：　神長 裕明（福島大学）

ＴＡ1-1：類似概念に基づく文書クラスタリング手法の提案 ····281
○谷口 孝治、小笠原 千尋、大塚 和彦、高木 友博（明治大学）

ＴＡ1-2：失語症患者支援のための自然言語処理システム ····283
竹内 晴彦（生命工学工業技術研究所）

ＴＡ1-3：情報統合における情報の信頼性とその言語表現 ····285
○松下 光範、佐藤 浩史、藤本 和則、加藤 恒昭（NTT(株) コミュニケーション科学基礎研究所）

ＴＡ2　感覚・感性（1）　10:10～11:10　　司会：　稲井田　次郎（日本大学）

ＴＡ2-1：笑いの認知的考察 ····289
北垣 郁雄（広島大学）

ＴＡ2-2：似顔絵生成システムにおける感性の構造 ····291
○宮越 淳、白井 治彦、西野 順二、小高 知宏、小倉 久和（福井大学）

ＴＡ2-3：表情を考慮した似顔絵描写 ····293
○武田 夕紀、岩下 志乃、鬼沢 武久（筑波大学）

ＴＡ3　感覚・感性（2）　11:20～12:20　　司会：　北垣 郁雄（広島大学）

ＴＡ3-1：インタラクティブECを用いた感情自動獲得支援システム ····297
○桂田 有香、前田 陽一郎（大阪電気通信大学）

ＴＡ3-2：感性に基づく人間聴覚系快適システムの設計法 ····301
○小島　瞳（北海道大学）、王 碩玉（高知工科大学）、土谷 武士（北海道大学）

ＴＡ3-3：感性を用いた室内熱環境の快適性のファジィ的評価 ····303
○清水 友彦、椎塚 久雄（工学院大学）

（13:20～14:35に大講義室で特別講演と学会賞表彰式があります。）

ＴＡ4　感覚・感性（3）　14:45～15:45　　司会：　宮武 直樹（法政大学）

ＴＡ4-1：属性の縮約を使って多様な商品選好を少数の新開発商品に集約する方法 ····305
○森 典彦、高梨 令、粂田 起男、熊丸 健一（東京工芸大学）

ＴＡ4-2：信頼性工学におけるファジィ論的側面－故障判定における事例－ ····307
村田 忠（福岡工業大学）

ＴＡ4-3：ニューラルネットワークを用いたゴルフクラブの感性評価 ····311
○菊池 彰洋、徳丸 正孝、村中 徳明、今西 茂（関西大学）

ＴＡ5　感覚・感性（4）　15:55～16:55　　司会：　村田 忠（福岡工業大学）

ＴＡ5-1：曲のイメージを考慮した対話型編曲システムに関する研究 ····313
○木村 真理、徳丸 正孝、村中 徳明、今西 茂（関西大学）

ＴＡ5-2：自動作曲システム ····317
○三重野 芳典、椎塚 久雄（工学院大学）

ＴＡ5-3： 教育評価としての感性評価の実践活用とその意義について（１） ····319
○中島 洋一（北海道滝川市立江陵中学校）、但馬 文昭（横浜国立大学）、
松田 修三（法政大学）、小田 哲久（愛知工業大学）、宮武 直樹（法政大学）

（18:00～20:30 に秋田キャッスルホテルで懇親会（有料）があります。）

B室

ＴＢ1 ＧＡ（6） 9:00～10:00

ＴＢ1-1： CG を用いたマシンの 3 次元構造進化システム ····321
澤 亮治、○萩原 将文、（慶応義塾大学）
ＴＢ1-2： 共進化型ファジィクラシファイアシステムの提案 ····325
○野田 崇、半田 久志、小西 忠孝（岡山大学）、片井 修（京都大学）
ＴＢ1-3： 木構造表現を用いた進化的デザイン支援システム ····327
○小谷 淳司、萩原 将文（慶應義塾大学）

ＴＢ2 ＯＲ（1） 10:10～11:10 司会： 井田 正明（京都大学）

ＴＢ2-1： 2 レベル線形計画問題の Stackelberg 解の遺伝的アルゴリズムによる計算 ····331
西崎 一郎、坂和 正敏（広島大学）、○丹羽 啓一（広島経済大学）
ＴＢ2-2： 多目的 2 レベル 0-1 計画問題に対する遺伝的アルゴリズムを用いたStackelberg ····335
解の計算方法
○丹羽 啓一（広島経済大学）、西崎 一郎、坂和 正敏（広島大学）
ＴＢ2-3： ファジィランダム線形ナップサック問題 ····339
○片桐 英樹、石井 博昭（大阪大学）、坂和 正敏（広島大学）

ＴＢ3 ＯＲ（2） 11:20～12:20

ＴＢ3-1： 作業間の従属関係を考慮したファジィプロジェクトネットワーク問題の解析 ····341
岡田 真幸（足利短期大学）
ＴＢ3-2： Scheduling with Fuzzy Delays and Fuzzy Precedences ····345
○宋 少秋 (北陸先端科学技術大学院大学)、石井 博昭 (大阪大学)、
ブラッハ ミラン (北陸先端科学技術大学院大学)
ＴＢ3-3： Generalized Concavity in Location Theory ····349
○ラミーク ヤロスラフ、ブラッハ ミラン(北陸先端科学技術大学院大学)

（13:20～14:35 に大講義室で特別講演と学会賞表彰式があります。）

ＴＢ4 ＯＲ（3） 14:45～15:45 司会： 石井 博昭（大阪大学）

ＴＢ4-1： 外部近似と切除平面による最大リグレット最小解の計算法について ····353
○乾口 雅弘、松本 幸一、谷野 哲三（大阪大学）
ＴＢ4-2： 下位問題の目的関数が不明確な 2 レベル線形計画問題とその解法 ····357
○乾口 雅弘、有澤 政義、谷野 哲三（大阪大学）

ＴＢ4-3： 可能性線形計画問題における最適解の考察 ····361
井田 正明（京都大学）

ＴＢ5 情報検索 15:55～16:55 司会： 乾口 雅弘（大阪大学）

ＴＢ5-1： オントロジーを用いた検索エンジンの提案 ····363
○田島 正憲、神田 和幸、大塚 和彦、高木 友博（明治大学）
ＴＢ5-2： 距離型ファジィ推論法を用いたWWW情報検索 ····367
○加藤 高志（北海道大学）、王 碩玉（高知工科大学）、土谷 武士（北海道大学）
ＴＢ5-3： ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムの情報検索への応用 ····369
○田中 一成（北海道大学）、王 碩玉（高知工科大学）、土谷 武士（北海道大学）

（18:00～20:30に秋田キャッスルホテルで懇親会（有料）があります。）

C室

ＴＣ1 （企画）自己組織化マップ（ＳＯＭ）とその応用（1） 9:00～10:00
司会： 藤村 喜久郎（鳥取大学）

ＴＣ1-1： トーラス状自己組織化マップの学習とその特徴 ····373
○伊藤 正博、三好 力、増山 博（鳥取大学）
ＴＣ1-2： 入出力関係の変化に適応する自己組織化関係ネットワーク ····375
○堀尾 恵一、山川 烈（九州工業大学）
ＴＣ1-3： 重みの更新情報を用いたSOMの動的プルーニング ····379
内野 英治、川村 正樹、○長田 和寛（山口大学）

ＴＣ2 （企画）自己組織化マップ（ＳＯＭ）とその応用（2） 10:10～11:10
司会： 白木 渡（香川大学）

ＴＣ2-1： 自己組織化マップの追加学習後におけるラベルに関する考察 ····383
○道端 正裕、三好 力、増山 博（鳥取大学）
ＴＣ2-2： SOM を用いた新たな関数近似手法の提案 ····387
○伊藤 則夫（(有) シー・エー・イー）、白木 渡（香川大学）
ＴＣ2-3： 質的情報分析へのＳＯＭの適用方法についての考察 ····391
多田 薫弘（マインドウエア）

ＴＣ3 （企画）自己組織化マップ（ＳＯＭ）とその応用（3） 11:20～12:20
司会： 山川 烈（九州工業大学）

ＴＣ3-1： ファジィＳＯＭによる自律行動体の行動様式の類別化法 ····395
○宮下 雄一郎、平松 久佳、玉野 和保、浅野 敏郎（広島工業大学）
ＴＣ3-2： SOMを用いた日本語意味マップの自己組織化 ····399
○馬 青、神崎 享子、村田 真樹、内元 清貴、井佐原 均（郵政省通信総合研究所）
ＴＣ3-3： Viscovery SOMineを用いた地方交付税交付金の配分構造の分析 ····403
○柴田 愛子、坂井 優、武光 広志、望月 怜美（関西学院大学）

(13:20～14:35 に大講義室で特別講演と学会賞表彰式があります。)

ＴＣ4　（企画）自己組織化マップ（ＳＯＭ）とその応用（4）　14:45～15:45

司会：　三好 力（鳥取大学）

ＴＣ4-1：適応部分空間 SOM とファジィテンプレートマッチングを用いた話者識別 ····405
山川 烈、堀尾 恵一、○久保田 良輔（九州工業大学）

ＴＣ4-2：Randomized ハイパーコラムモデルを用いたジェスチャ認識 ····409
○吉木 裕一朗、津田 竜一、Tarek El.Tobely、鶴田 直之（福岡大学）

ＴＣ4-3：自己組織化マップ（SOM）の化学分析データへの適用 ····413
○山田 初幸、Kwaw Obu-Cann、藤村 喜久郎、徳高 平蔵（鳥取大学）、
吉原 一紘（金属材料研究所）

ＴＣ5　（企画）自己組織化マップ（ＳＯＭ）とその応用（5）　15:55～16:55

司会：　徳高 平蔵（鳥取大学）

ＴＣ5-1：ＳＯＭを用いた特徴的キーワードツリーによる文書ディレクトリ自動生成方式 ····417
の検討
窪野 哲光（東京電力）

（企画）パネル討論

テーマ：自己組織化マップの活用事例と今後の可能性について

司会：徳高 平蔵（鳥取大）

(18:00～20:30 に秋田キャッスルホテルで懇親会（有料）があります。)

D室

ＴＤ1　（企画）色彩とイメージ（1）　9:00～10:00　　司会：　玉野 和保（広島工業大学）

ＴＤ1-1：ファジィ理論的手法を用いたカラーネーミングシステム ····421
菅野 直敏 (玉川大学)

ＴＤ1-2：主観的な色彩イメージの表現 ····425
○川村 誠、鬼沢 武久(筑波大学)

ＴＤ1-3：色彩調和を考慮した配色支援システム ····429
○徳丸 正孝、村中 徳明、今西 茂（関西大学）

ＴＤ2　（企画）色彩とイメージ（2）　10:10～11:10　　司会：　徳丸 正孝（関西大学）

ＴＤ2-1：キュビズムによる空間表現のファジィネスに関する考察 ····433
玉野 和保（広島工業大学）

ＴＤ2-2：ＲＧＢ色空間内で最短距離の色彩系列による人間の色彩感覚 ····437
○菅野 直敏、那須 利将 (玉川大学)

ＴＤ2-3："物質感を伴う色"を使った人間の色感度の計測 ····441
○川澄 未来子（愛知淑徳大学）、鈴木 和彦、山川 みゆき（豊田中央研究所）

ＴＤ3　（企画）色彩とイメージ（3）　11:20～12:20　　司会：　菅野 直敏（玉川大学）

ＴＤ3-1：時間変化を伴う都市景観の評価－(1)モデル化関数の提案－ ····445
松下 裕（清水建設(株)）

ＴＤ3-2：時間変化を伴う都市景観の評価－(2)分析手法と適用例－ ····447
○宮腰 淳一、松下 裕（清水建設(株)）

色彩とイメージ総合討論

（13:20～14:35 に大講義室で特別講演と学会賞表彰式があります。）

ＴＤ4　ルール獲得（1）　14:45～15:45　　司会：　馬野 元秀（大阪府立大学）

ＴＤ4-1：対話による人間が納得できるファジィルールの獲得 ····451
○鬼沢 武久、安斎 剛（筑波大学）

ＴＤ4-2：ファジィ同定におけるルール生成規準とルール形式について ····455
○小林 俊一（信州大学）、網野 栄郎（セイコーエプソン㈱）

ＴＤ4-3：統合によるルール削減手法を用いたファジィクラシファイアシステムによる ····459
ファジィルール自動生成
○井上 博行(福井大学)、畑瀬 圭太、亀井 且有(立命館大学)

ＴＤ5　ルール獲得（2）　15:55～16:35　　司会：　鬼沢 武久（筑波大学）

ＴＤ5-1：ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張 ····463
馬野 元秀、○松本 裕二、宇野 裕之、瀬田 和久（大阪府立大学）

ＴＤ5-2：遺伝的プログラミングと相関ルールの組み合せによるルール獲得手法 ····467
○新美 礼彦、田崎 栄一郎（桐蔭横浜大学）

（18:00～20:30 に秋田キャッスルホテルで懇親会（有料）があります。）

Ｅ室

ＴＥ1　（企画）ラフ集合（1）　9:00～10:00

ＴＥ1-1：ラフ集合論による医学的推論過程のモデル化 ····471
津本 周作（島根医科大学）

ＴＥ1-2：細菌検査データベースからのデータマイニング ····475
○横山 茂樹(高電工業（株）)、津本 周作（島根医科大学）、松岡　喜美子、
福並　正剛（大阪府立病院）

ＴＥ1-3：GDT-RS による共通データからの知識発見 ····479
○鍾 寧、董 菊珍（前橋工科大学）、大須賀 節雄（早稲田大学）

ＴＥ2　（企画）ラフ集合（2）　10:10～11:10

ＴＥ2-1：ラフ集合専用プロセッサの設計 ····481
金杉 昭徳（埼玉大学）

ＴＥ2-2：ラフ集合論に基づく類似データ発見法を用いた名義データのクラスタリング法 ····485
○奥崎 智裕、植西 健二、畑 豊（姫路工業大学）

ＴＥ2-3： 必然性測度の新しいクラスとファジィラフ集合 ····487
○乾口 雅弘、谷野 哲三（大阪大学）

ＴＥ3 （企画）ラフ集合（3） 11:20～12:20

ＴＥ3-1： 複数の情報源があるデータの取り扱いについて ····491
○中田 典規（千葉経済大学）、Germano Resconi（カトリック大学）、
村井 哲也（北海道大学）
ラフ集合総合討論

（13:20～14:35 に大講義室で特別講演と学会賞表彰式があります。）

ＴＥ4 ファジィモデリング（1） 14:45～15:45 司会： 古橋 武（名古屋大学）

ＴＥ4-1： ファジィモデルによる上水道系の配水量予測 ····493
○石井 省爾、島川 学、村上 周太（九州工業大学）
ＴＥ4-2： ファジィモデリングにおける主成分分析によるルール削減と時系列データへの適用 ····497
本多 中二(電気通信大学)、植田 俊克(新菱冷熱工業(株))、○品田 誠一(電気通信大学)
ＴＥ4-3： ファジィ GMDH による大空間空調温度特性のモデリング ····501
本多 中二(電気通信大学)、植田 俊克(新菱冷熱工業(株))、○品田 誠一(電気通信大学)

ＴＥ5 ファジィモデリング（2） 15:55～16:55

ＴＥ5-1： 非定常時系列のファジィモデリングに関する一提案と予測問題への適用 ····505
竹内 一郎、○古橋 武（名古屋大学）
ＴＥ5-2： ファジィモデリングの簡潔さに関する一考察 ····509
○鈴木 俊博、古橋 武（名古屋大学）
ＴＥ5-3： H^{∞}ノルムベースドファジィモデリングとロバスト制御 ····513
○堀 強、田中 一男（電気通信大学）

（18:00～20:30 に秋田キャッスルホテルで懇親会（有料）があります。）

Ｆ室

ＴＦ1 データ解析（1） 9:20～10:00 司会： 中村 和男（長岡技術科学大学）

ＴＦ1-1： ミンコフスキー差を用いた区間ロバスト回帰 ····515
○乾口 雅弘、藤田 晴喜、谷野 哲三（大阪大学）
ＴＦ1-2： ファジィ回帰モデルを用いたデータ分析に関する基礎的研究ファジィ回帰モデルを用いたデータ分析に関する基礎的研究 ····519
田島 博之（創価大学）

ＴＦ2 データ解析（2） 10:10～11:10 司会： 奥田 徹示（大阪工業大学）

ＴＦ2-1： 凸包に基づくファジィ回帰分析 ····521
○和多田 淳三（大阪工業大学）、櫛木 雄介（松下電器産業）、豊浦 由浩
（大阪工業大学）

ＴＦ2-2： 凸包に基づくファジィスイッチング回帰分析 ····523
○豊浦 由浩（大阪工業大学）、和多田 淳三（大阪工業大学）、藪内 賢之（下関市立大学）
ＴＦ2-3： ショケ積分エージェント・ネット同定による生活様態理解 ····525
中村 和男（長岡技術科学大学）

ＴＦ3 データ解析（3） 11:20～12:20 司会： 和多田 淳三（大阪工業大学）

ＴＦ3-1： モーメント補正によるファジィ区間データからの一元配置分散分析 ····529
○小西 幹彦（広島国際大学）、奥田 徹示（大阪工業大学）、浅居 喜代治（大阪府立大学名誉教授）
ＴＦ3-2： GPSを用いた天気予測ニューラルネットワークシステムの基礎的研究 ····533
田中 成典、古田 均、○内野 幸生（関西大学）
ＴＦ3-3： デジタル画像を用いた写真測量システムの基礎的研究 ····535
村木 広和、田中 成典、古田 均、○北川 悦司、野田 肇（関西大学）

（13:20～14:35に大講義室で特別講演と学会賞表彰式があります。）

ＴＦ4 ファジィクラスタリング（1） 14:45～15:45 司会： 市橋 秀友（大阪府立大学）

ＴＦ4-1： クラスターサイズの調整機能をもつファジィc-平均法 ····537
○宮本 定明（筑波大学）、馬屋原 一孝（北陸先端科学技術大学院大学）
ＴＦ4-2： 正則化された標準ファジィc-平均法と可能性クラスタリング ····539
○宮本 定明（筑波大学）、馬屋原 一孝（北陸先端科学技術大学院大学）、高田 治（筑波大学）
ＴＦ4-3： 不確定性を含むデータのファジィクラスタリングにおける中心の計算 ····543
○高田 治、宮本 定明（筑波大学）、馬屋原 一孝（北陸先端科学技術大学院大学）

ＴＦ5 ファジィクラスタリング（2） 15:55～16:35 司会： 宮本 定明（筑波大学）

ＴＦ5-1： ファジィクラスタリングによるスイッチング線形判別 ····547
○山川 あす香、大迫 真実、呉 志賢、本多 克宏、市橋 秀友（大阪府立大学）
ＴＦ5-2： KL情報量による正則化を用いるファジィクラスタリング ····549
○宮岸 聖高、安富 善彦、市橋 秀友、本多 克宏（大阪府立大学）

（18:00～20:30に秋田キャッスルホテルで懇親会（有料）があります。）

－ 9月8日（金）－

A室

ＦＡ1 学習（1） 9:00～10:00

ＦＡ1-1： ファジィチューニングによる動的学習パラメータを有する適応型Q-Learning ····551
前田 陽一郎（大阪電気通信大学）

ＦＡ1-2： 認知記憶に基づく英会話学習法 ····555
市橋 秀友（大阪府立大学）
ＦＡ1-3： 確率的因果モデルにおける条件付因果確率の学習 ····557
山田 耕一（長岡技術科学大学）

ＦＡ2 学習（2） 10:10～11:10 司会： 高木 昇（富山県立大学）

ＦＡ2-1： 部分観測マルコフ決定過程における位置ベクトルを用いた強化学習手法の提案 ····561
○亀井 且有、清本 盛明（立命館大学）
ＦＡ2-2： ファジィ環境評価ルールを用いた強化学習の提案と応用 ····565
○星野 孝総、亀井 且有（立命館大学）
ＦＡ2-3： ミンコフスキーノルムによる重み付多分割層ファジィモデルの構造学習 ····569
○鄒 軍安、亀井 且有、井上 和夫（立命館大学）

ＦＡ3 学習(3) 11:20～12:20 司会： 前田 陽一郎（大阪電気通信大学）

ＦＡ3-1： 学習過程に着目したファジィ経路選択モデルの検討 ····573
○安田 浩明、秋山 孝正（岐阜大学）
ＦＡ3-2： カオス的時系列の短期予測法の改良とその応用 ····575
木戸 和彦（創価大学）
ＦＡ3-3： 鉄棒ロボットの学習型ファジィ制御システムの開発 ····577
○藤村 俊平、笠井 義友、村上 周太、島川 学（九州工業大学）

B室

ＦＢ1 パターン識別 9:00～10:00

ＦＢ1-1： ファジィ識別システムの構築と学習 ····581
○新居 学、田中 喜美子、石渕 久生（大阪府立大学）
ＦＢ1-2： パターン識別問題における遺伝的機械学習による知識獲得 ····583
○中島 智晴、石渕 久生（大阪府立大学）
ＦＢ1-3： 数値・文字混成データの論理的解析について ····585
○高木 昇、中島 恭一（富山県立大学）

ＦＢ2 画像（1） 10:10～11:10 司会： 廣田 薫（東京工業大学）

ＦＢ2-1： 心理測定法によるエッジ検出手法の比較評価 ····589
○大崎 美穂、杉山 岳弘、大野 英明（静岡大学）
ＦＢ2-2： ファジィ推論を用いた腰部MR画像からの硬膜嚢の抽出 ····593
○寺尾 道治、畑 豊（姫路工業大学）、田中 正道（姫路赤十字病院）
ＦＢ2-3： 画像処理によるスプレーカン検出法のリサイクルシステムへの応用 ····595
○平松 久佳、玉野 和保（広島工業大学）、林 一久、藤吉 誠（日立造船（株））

ＦＢ3　画像（2）　11:20～12:00　　司会：　玉野 和保（広島工業大学）

ＦＢ3-1：一般化ｔノルムに基づいたファジィ関係不等式の解法とその静止画像圧縮への応用　····597
○延原　肇、高間　康史、廣田　薫（東京工業大学）

ＦＢ3-2：画像に基づくシナリオ形成　····601
増井 重弘、寺野 寿郎、山下 智成、○柴田 浩司（法政大学）

C室

ＦＣ1　医療応用（1）　9:00～10:00　　司会：　吉川 大弘（三重大学）

ＦＣ1-1：ニューラルネットワークによる高齢者向け表情推論システム　····605
○市村 匠、目良 和也（広島市立大学）、山下 利之（東京都立科学技術大学）

ＦＣ1-2：麻酔時の血圧管理におけるファジィ推論知識の表現　····609
○鵜飼 英俊、白井 治彦、西野 順二、小高 知宏、小倉 久和（福井大学）、
大下 修造（徳島大学）

ＦＣ1-3：正準相関分析による介護ランクの分析　····613
○長坂 一徳、山川 あす香、市橋 秀友（大阪府立大学）、樋口 誠康（関西
ヘルスケアシステム（株））

ＦＣ2　医療応用（2）　10:10～11:10　　司会：　小倉　久和（福井大学）

ＦＣ2-1：看護システム論から見たケア・コミュニケーションに関する考察　····615
○野津 亮、片井 修、川上 浩司（京都大学）

ＦＣ2-2：インタラクティブEAを用いたナーススケジューリング支援システムのためのEAエンジンに関する一考察　····619
○井上 武士、古橋 武（名古屋大学）、前田 宏、高羽 実（鈴鹿医療科学大学）

ＦＣ2-3：看護婦スケジューリングにおける制約条件を取り入れたコーディング方法に関する一考察　····623
○川中 普晴、吉川 大弘、篠木 剛、鶴岡 信治（三重大学）

ＦＣ4　（企画）パネル討論　13:00～14:00　　司会：　長沢 伸也（立命館大学）
テーマ：　感性とファジィ
パネリスト：　長町 三生（呉工業高等専門学校）、椎塚 久生（工学院大学）、
中森 義輝（北陸先端科学技術大学院大学）

D室

ＦＤ1　意思決定　9:00～10:20

ＦＤ1-1：ファジィ多目的２レベル計画問題に対する主分解法による対話型意思決定　····627
矢野 均（名古屋市立大学）

ＦＤ1-2： ショケ積分と組み合わされた多目的意思決定－薬学臨床判断分析システムへの適応－ ····629
○近藤 智大、田崎 栄一郎（桐蔭横浜大学）
ＦＤ1-3： トップダウン・ボトムアップ融合型意思決定システムの構築 ····633
○佐藤 雄一郎、前田 陽一郎（大阪電気通信大学）
ＦＤ1-4： QOLとその評定プロセスについて ····637
奥田 裕紀（金城大学）

E室

ＦＥ1 （企画）短期大学でのファジィと情報教育 9:00～10:00
司会： 藤井 雅章（北海道女子大学）

ＦＥ1-1： プログラミング教育の事例研究 ····641
○中津山 幹男（秋田公立美術工芸短期大学）、阿部 清子（秋田県立脳血管研究センター）、田郷岡 直美（秋田公立美術工芸短期大学）
ＦＥ1-2： 栄養士養成学科における実習料理のデータベース ····643
井ノ口 美佐子（西南女学院短期大学）
ＦＥ1-3： 情報教育へのデータマイニングとファジイの応用 ····645
高橋 恒介、○川口 順功、大石 義（静岡産業大学）

ＦＥ2 ヒューマンインターフェース 10:10～11:10 司会： 矢野 均（名古屋市立大学）

ＦＥ2-1： ファジィ理論を用いたオンライン数式認識 ····649
○西守 克己、松井 尚、石原 永伯、西村 亮(鳥取大学)
ＦＥ2-2： 主観的等価面積の実験とファジィ理論による解析 ····653
○野本 弘平、若松 正晴、大矢 富保（三菱電機(株)）
ＦＥ2-3： レンズモデルに基づく人間—エージェント共創場における分散認知の解析 ····655
○椹木 哲夫、堀口 由貴男、鈴井 康浩（京都大学）

F室

ＦＦ1 ANGLE（学生部会）企画 9:00～10:00
テーマ： ２１世紀におけるソフトコンピューティング

ＦＦ2 ANGLE（学生部会）企画（つづき） 10:10～11:10

電子セッション（9月6日, 7日）

G室

Modeling numbers of teacher in vocational high school of Taiwan area ····659

Chao – Chih Tsai (National Tainan Teachers Colledge, Taiwan), Shun – Jyh Wu (Saint John's and Saint Mary's Institute of Technology, Taiwan)

($\Phi 1$, $\Phi 2$) - convex Fuzzy Mappings ····659

Yu – Ru Syau (Yuan Ze University, Taiwan)

Supervised Fuzzy Kohonen Clustering Networks ····660

Ching – Tang Hsieh, Uei – Jyh Chen, You – Chuang Wang (Tamkang University, Taiwan)

招待講演論文

特別講演論文

9月6日（水）、9月7日（木）

新ＡＩ科学と介護ロボット

五味　隆志

１．産業ロボットから介護ロボットまで

人類は４００万年に及ぶ試行錯誤の末、複雑な事象を抽象・記号化する方法を獲得し自らの認知力を拡大した。これが僅か数万年前の展開であることは洞窟画などから知られる。生活が狩猟から農耕へと移行し、言語と記号による生産の管理法が力を発揮し定着した。西欧が中世の封建体制から脱却し商品経済に進む中、ルネッサンスのエネルギーとデカルト、ニュートン、カント等の哲学・科学者達の作業で科学の方法が定式化され、発生したばかりの近代科学を支える強力な道具として広い範囲で使われ始めた。彼らは産業革命を通じて工業という膨大な富の生産と備蓄の方法を知った。常に科学のリードで方法論の改良は続き生産世界の効率は大きく向上した。デカルトが整備した代数学は、この時代から現代に至るまで科学の主要ツールである。２０世紀に入って電気・電子技術による第２次、コンピュータ・情報通信技術を中心とした第３次と加速的に産業革命が続き、米国や日本に象徴される産業主導型の社会が世界のリーダーシップを握り、生産、流通、消費の効率追求が社会の主要テーマになった。産業ロボットはこのような背景の下に生産のさらなる効率化を目指して誕生した。

捉えることの出来ない充足を追ってエスカレートし続ける人間の物質的欲望は、「環境の飽和」を我々の世代で現出させた。大気汚染、酸性雨、オゾンホール、地球温暖化、急速な生物種の絶滅などのグローバルな指標以外にも、生活の周辺での大型ゴミ類の突然の析出、旧知の河川・湖沼の極端な汚染や破壊など、我々が直接確認できる事例が増えた。平行して頻発する年少者の凶悪犯罪に象徴される心の荒廃も、物質的充足追求のパターンがこれ以上維持できないことを示唆する。これまで大量生産、大量流通、大量消費、大量廃棄のプロセスを支える資材収奪のために存在した第三世界への、今度は拡大の為の消費地としてのライフスタイルと生産機構の輸出は、そこでの生活をさらに圧迫する。１９９９年の米国シアトルＷＴＯおよび東南アジアＡＳＩＡＮ、２０００年のワシントンＩＭＦと、ビジネスの全地球化反対のデモとそれに対する過剰とも言える弾圧は、この構造の維持の困難さを露呈した。

自己の生存条件の破壊にも拘らず拡大し続けなければ維持出来ないシステムは、「人類は経済などというものを発明してからおかしくなった」という、昔読んだ逆説的な観察を思い起させる。現在の人類の葛藤の原因である大量生産の方法は、過去２世紀余にわたって高度化し続けた自動制御の思想を核に持つ。すでに多くの面で生産社会の要請に隷属した科学は、デカルトが方法序説で１６３７年に確立した演繹的な仮説証明の方法を中心として、対象分野の専門細分化、諸概念の階層化、対象に対する客観性と実験の再現性の重視など、過去２世紀余に亘って累積してきたmannerism を育てた。２０世紀に入って発見された不確定性原理、相対性理論、量子論などは、これらの諸概念の正当性に強い疑いを示したが、皮肉なことに科学教育の基幹にあるデカルト的な教育思想は自らの方法論を疑わせない。

少子高齢化は先進工業諸国にのみ顕著に見られる現象である。特に日本では高齢者の増加率は他の先進工業諸国の約２倍という高率を見る。バブル期に深刻化した生産コストの高騰に対処するため、日本の産業界は自らが得意とした生産の意志とメカニズムを第三世界に譲渡し、残った製造業界に進む空洞化は今日の日本の主要な問題となった。この少子高齢化と生産の放棄という社会現象は見方によっては福音である。止めることが出来なかったプロセスが人智を越えたホメオスタシスによって減速させられ、日本は後期資本主義の大国として、世界に先駆けて破局的になりかねない事態への有無を言わせない対応に突入したとも言えよう。従来の感覚でより高性能な産業ロボットを開発・生産し続けるという思想は、少なくとも歴史論理的に破綻していると考えるべきである。

２．新ＡＩ

ＭＩＴ人工知能研究所長のブルックス教授が助教授時代の１９８６年に提案したサブサンプション・アーキテクチャ（ＳＡ）を契機として、ロボット上での実現を中心に展開されつつある新たな知能論と、それによる知的機械の方法論を新ＡＩ(New AI)と呼ぶ。その出現は上述の高度工業

化社会の行き詰まりの顕著化と時を同じくしている。下に述べるように、新ＡＩは従来の人工知能の諸方法論および科学の客観性重視、複雑な事象の抽象化と記号化、一般解の追及などの方法論を否定する。ちなみに、新ＡＩの研究者達は従来のＡＩをしばしば"Good Old Fashioned AI (GOFAI, 古き良きＡＩ)"と呼ぶ。

(1) 知能波動論
知能は現象として観察者の感覚器官にあたかも波動のように捉われその感覚器官上に発生する。知能は GOFAI における知識表現や推論エンジンのように、観察者に対置した客観的な存在として定義したりモデル化して取り扱うことは出来ない。

(2) 参照フレーム問題
研究者が人間などを観測し推定した知的行動発生のメカニズムを、コンピュータなどのモデルとして実現する GOFAI の方法を、９１年に米国の「コンピュータと思考賞」受賞者Ｂ・クレンシーが「参照フレーム問題」(The Frame of Reference Problem)に基づく錯覚と指摘した(Clancey, 91)。例えば人間の大脳新皮質で起こっている現象の本質は、各々多数の神経細胞とそれらの間の膨大な数の結合を巻込んだコラム構造群が織りなすダイナミックなカオス的状態遷移の連続であり、デカルトが言う知能の座(Theater of Intelligence)における推論などではない。推論の機構を理解し再現しようとした過去３０年に及ぶＡＩ研究の中心的な思考には、始めから大きな哲学的な誤認があった。

(3) ゲシュタルトとしての知能
複雑系としての被観察者の脳がそれぞれの状況下で発生する個々の要素的な表現を、観察者がその感覚器官で総合して得るゲシュタルト的知覚が知能である。ブルックスは有名な「美」の定義をもじって、「知能は見る人の目の中にある」(Brooks, 91) と言い、チューリッヒ大学人工知能研究所長のファイファーなど (Pfeifer and Scheier, 99) と共にクレンシーの「参照点の１８０度の錯覚」論を支持する。知能は観察者が構成するのであって、知的存在が演じるものではない。

(4) 知能の非決定論的発生原理
複雑系として作動する脳またはＡＩ機構はその動きを決定論的に記述出来ない。知能は非アルゴリズム的であり、カオス的遍歴 (津田, 90) と呼ばれるような非決定論的過程を辿る。従って知能を要素還元したりモデルとして分析することは意味を持たない。

(5) 知能のオープン性
新ＡＩは昆虫や動物がダナミックに変化する環境に適応し続ける知的行動に注目するので、行動型ＡＩと呼ばれることもある。複雑な現象群の抽象化に基づいた推論などの人工的な論理能力ではなく、特定の環境に接地した物理的な行動を伴った適応のためのインタラクションが知能を発生するとする知能適応能力説を採り、高度な知能もこの延長にあると考える。生物学的、生理学的、生態学的動作原理による知的システムは、介護などのオープンな世界で必要な予測し得ない状況での柔軟な対応動作を発生し易く、人間が恣意的に考えた制御の原理でなく自律原理で作動するシステムを実現させる。

これらの特徴のため、新ＡＩは、介護の世界が必要とする大きな柔軟性、ロバスト性、適応性、知的能力を持つロボット実現の手段としての可能性が極めて大きい。

参考文献

(Clancey, 91) Clancey, W.J., "The frame of reference problem in the design of intelligent machines", in K.van Lehn(ed.) Architectures for Intelligence. Hillsdale, N.J.: Erlbaum 1991.

(Brooks, 91) Brooks, R.A.,"Intelligence Without Reason", International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'91), Sydney, Australia, August, 1991.

(Pfeifer & Scheier, 99) Pfeifer, R. and Scheier, C., "Understanding Intelligence" MIT Press, 1999.

(津田, 90) 津田一郎、「カオス的脳観」、サイエンス社、1990年。

連絡先
五味 隆志
アプライド・ＡＩ・システムズ社
カナダ、オンタリオ州、カナダ市
Tel:(613)592-3030
E-mail: aai@AAI.CA

大學の将来像

西沢　潤一

「天は人の上に人を作らず、人の下に人を作らず」と云うことは間違いのないところであるが、人各特徴があり、その特徴を見付けて伸びるのを手伝ってやるのが教育だと考える。だから、教育の本質は一対一が原則であり、正に伸び出ようとする天分を見付けて、時を見計らって呼び醒ましてゆく必要がある。これを碧巌録でそっ啄と云った。卵の殻を破こうとする雛と外から突いて雛を外へ出そうとする母鶏の呼吸が良く合うことを教育における師と弟子の関係に例えたのである。当然教育は各人に応じた多様なものになる。現在の日本の教育における最大の問題は同じことを覚えさせ、その覚えている程度によって偏差値なる量で示し、一生この偏差値ランクが付いて廻ると云った劃一化が進んでしまった。

この記憶の割合で個人差を表示する以外、カケッコでも何でも一切の順位付けは禁止されている。学業に自信がないが走ることだけ早い子供は、何時劣等感から開放されるのだろうか。

本来は、子供は「勉強は駄目だが走るのは」とか、「竹トンボ作りだけは」と云うようでなければなるまいと思われる。つまり多様化が必要な筈である。

現在の試験制度における最大の問題は、試験問題が暗記力対応であると云うことで、数学ですら暗記科目ということになっている。すべて暗記で対応するようになっているから思考力が発達しない。文科的に云えば、自分のロマンを持てないと云うことになるし、理科的に云えば自分の知識が相互に関連付けられてないと云えるであろう。

英国の教育哲学者アーサー・ウイリアム・バードは云った。「凡庸な教師はただ喋る。一寸ましな教師は理解させようと努める。優れた教師は自分からやって見せる。最も優れた教師は弟子の心に火を点ける。」と。つまり現在の教育のありかたは最低級と云うことになる。何とか上を目指して教育の質を上げてゆかねばならない。

人間が自我を育てる、つまりロマンを持ち心に火が点ぜられるのは、青春期である。この時期を捉えて外から教えることをせず、自由と、友人との討論を奔放に行わせる環境を作って自己の倫理感をもたせたのが旧制高等学校であった。真剣に考え、真剣に討論したから、育ってもいない低次元の自己主張をする現代と異なり、皆で切磋琢磨することで、自分の心の中核に迫り、また自己を高く育て上げたのである。つまり、皆個性があったし、何をするにもたとえ同一行動をしていても、自分の信念に基づいて是非を判断しているから雷同ということはなかった。行動は静かであっても止まることはなかったのである。

この最高の例が、松下村塾であり吉田松陰であった。このようなことから若者に心を持たせることの重要性が理解出来よう。吉田松陰は恐らく迫り来る外国の侵略の恐怖を若者に伝え、祖国を守るための近代化を訴えたのだろう。祖国を憂いた若者達は一斉に立って半ば命を失ったものの残りの数十人が逆に日本の近代化を成し遂げた。つい近年まで世界で最も高い効率で成功した近代化革命として英国で注目されることとなったのである。

今、日本人の心の奥底に棲む最高のロマンは何か、それを発見させるのが、少々おそいと思うが、大學低学年で行われた。しかし、それは倫理学の講義をすると云ったことで成し遂げられるものではない。自らの欲求とか悩みを直接捉えて、自分の素直な心を分析追求してゆくと云った期間にしてゆかねばならない。

よき書籍として読まれたゲーテのファウストにせよ、宮沢賢治にせよ、若者の心を自然に捉えてくれる。これらを読み、語り、若者が心を育てて行って貰いたい。

さて、少々青春期というには遅いと思われるの

は残念であるが、将来は中高一貫教育や飛び入学などによって、現在では暗記漬けのなかで過さなければならない青春期を当てるようにしてゆくべきだと考えているが、当分は更に、放任して自由にロマンを育ててゆく低学年と、そのロマンを実現してゆくための知識教育、技術教育を実現する高学年を同居させなければならないと云う困難を背負いつづけてゆかねばならない。

しかし、ロマンを持った人間がその具体化手段としての学術の習得に乗り出したとき、只受身に学術の習得を行う者達と比較したとき、研学の効果には著しい差がつく。松下村塾の塾生の目覚しい活躍を見れば容易に理解されることである。残念なことに、彼等が日本の近代化に素晴らしい成果を挙げたとき、既に師吉田松陰は此の世の人ではなかった。若し吉田松陰が生存していたら、次のロマンとして若者たちの心に火を点じたのは何だったろうか。私は思いやりの心ではなかったかと思っている。世界中の人達一人残らず幸せにしたいと思わせたのではなかったか。

これから先は多様化が必要である。各々の必要と考える分野に向かって、学生に理想実現の学問技術を教える。場合によっては、前半のロマンの育成を省略して、学問技術の習得だけに目的を限定する、旧制高等専門学校的な大學もあっても当然であり、社会人再教育なども主にこちらの大學が担当することとなろうし、将来は、２～３年の教養大學と云うロマン育成をその目標とした別の大學？が出来ることも考えなければならないであろう。

私が現在所属している岩手県立大学は県立大学であるが故に、その中心を県のために役に立つ人材の育成におくことになるから、現在の岩手県に最も必要な、看護、福祉、情報機器の実用を授けるソフトウエア情報、広域に亘って波及効果までを視野に入れて、行政施策を定量的に計画してゆく総合政策学部の四学部を設置していただいた。岩手のような県については、重工業などより、情報通信を県民生活の中に積極的にとり入れて二十一世紀に対応することが最も効果的と考えたからに他ならない。

更に、地域性を考慮すれば在職者が更に高度の学習をするときの条件が他に比較して可成苦しいから、大学院も早期に設置して、就職後の再勉強に便宜を計ることを企画した。これらの学生と共に、教官が、商店からでも計算機器、情報機器の導入にたいするアドバイスを行って、具体的な実習を行うと共に、委託研究を実施してゆく機関として、別個に財団法人組織を編成してゆく。理解力ある知事をはじめとした縣の御力を教育の協力努力で、今のところ順調に展開されつつある。

同時に重要視して実行したのが、入試改革である。早々と入学試験室を設置して、面接推薦などに中心をおいた所謂ＡＯ入試や推薦入試を展開したのは、現在、余りの暗記勉強が若者の頭脳から考察能力を失い鋳型化した人間、頭に辞書を搭載したロボット化した人間が育つに至っている事を憂いたからに他ならない。但し、ＡＯ入試が将来共、筆記試験をしないと云った形式的な抑えかたはしていない。云い換えれば、人間の天分の識別に有効なものなら何でも実施して見るつもりでいる。記述式の試問などは思考能力の識別には可成有効であると考えているが、絶対に視野に入れるつもりがないのは、暗記に留まっている知識量を計る試験であるから、高校までの勉強を、よく理解して、また、実施して見るように務めて貰うように導いてゆきたいしまた、そう云う勉強を志向する若い人に集まって貰いたいと考えている。

いずれにしても、最高の環境の中に最高の施設を作り、時間外には他学部の、学生諸君までがコンピュータ応用の実習が出来る程に設置していただいた設備を活用するのは勿論、学んだ学生諸君の心に親子三代に亘る大きな影響を残す程の人間教育を実施してゆきたい。

連絡先
西沢潤一
岩手県立大学長
岩手県滝沢村滝沢字巣子１５２－５２
Tel:019-694-2108

一般講演論文

9月6日（水）

WA1−1

距離型ファジィ推論法 Part 13

——— 外挿機能を持つ距離型ファジィ推論法 ———

Distance Type Fuzzy Reasoning Method Part 13

— A New Distance Type Fuzzy Reasoning Method With The Extrapolation Function —

王 碩玉[1)] 水本 雅晴[2)] 土谷 武士[3)]
Shuoyu Wang Masaharu Mizumoto Takeshi Tsuchiya

1): 高知工科大学 2): 大阪電気通信大学 3): 北海道大学

Kochi University of Technology, Osaka Electro-Communication University, Hokkaido University

Abstract : In this paper, a new distance type fuzzy reasoning method with the extrapolation function is proposed. In the previous paper, authors had proposed the distance type fuzzy reasoning method based on the between fuzzy sets in series like, however, it did not have the extrapolation function. Therefore, the purpose of this paper is to give the extrapolation function to the distance type fuzzy reasoning method. This new distance type fuzzy reasoning method will be called The characteristic space reasoning approach. The reasoning method has the following three main advantages. (1) Main features of the distance type fuzzy reasoning method already proposed have been inherited. (2) The reasoning algorithm is very simple, because it is not necessary to use the compound theorem. (3) It can be applied to not only fuzzy set but also reasoning rule which makes the figure to be the antecedent division.

1．はじめに

現在ファジィ制御でよく使われている直接推論法としては直接推論法と呼ばれている Mamdani のファジィ推論法[1]，簡略型ファジィ推論法[2]，関数型ファジィ推論法[3]がある．直接推論法では，前件部と与えられた事実との共通集合の高さを，前件部と事実がどの程度一致しているかを示す適合度としているので，幾つかの欠点がある．例えば，複数個のファジィルールにおける前件部が疎である場合，つまり前件部集合が互いに空の共通部分をもつ場合，事実がこの空集合に入力されると，直接推論法では推論の結論を求めることができない[4]．これに対して文献 [4]では，線形補間型推論法を提案している．しかし，この Kochi と Horiba の推論法では凸な前件部・後件部及び事実に対して，結論は必ずしも凸なファジィ集合にはならないことが指摘され，結論としてのファジィ集合の凸性を保つための４つの条件を与えている[5]．これらの条件によれば設計された推論ルールに対して，事実のクラスが制限されてしまったり，与えられた事実に対して推論ルールが制限されてしまったりする．すなわち推論ルールと事実が互いに厳しすぎる制約関係にあるといえる．また，ルールの個数は偶数個でなければならないという制限も付け加えられている．更にこの推論法は前件部が互いに疎でないルールには適用できなくなる．したがって，この推論法の適用できる範囲がかなり制限されているといえる． 著者らは，直接推論法の欠点を克服するためには，従来のファジィ推論の仕組とは異なる出発点から議論することが必要という立場から，ファジィ集合間の距離に基づく距離型ファジィ推論法を提案した[7]．距離型推論法は次の主な特徴がある．(1)後件部が凸なファジィ集合であれば，推論結論も凸なファジィ集合になる．(2)分離規則を厳密に満たしている．(3)前件部がシングルトンである場合でも適切な結論が推論される．文献[7]では，距離型ファジィ推論法の計算量を低減するために，文献[8]の特性パラメータのアプローチを利用して特性パラメータ空間における距離型ファジィ推論アルゴリズムを提案した．本論文では，特性パラメータ空間における距離型ファジィ推論アルゴリズムに外挿機能を持たせることを目的とする．

2．外挿機能を持つ距離型ファジィ推論法

m入力1出力のファジィ推論を検討対象とする．

$$R^i : x_1 = A^{i1}, x_2 = A^{i2}, \ldots x_m = A^{im} \Rightarrow y = B^i \qquad (1)$$

$i = 1,2,\ldots n$， $j = 1,2,\ldots n$， m．

次の二つの仮定のもとで推論を行う．

(a)ルール$R^1 \sim R^n$において，前件部が全く同一のルールは存在しない．$\forall q_1, q_2 \in \{1,2,\ldots,n\}$， $q_1 \neq q_2$ であれば，$\sum_{l=1}^{m} d(A^{q_1 l}, A^{q_2 l}) \neq 0$ とする．

(b)後件部が同形状のファジィ集合とする．つまり，n_Bで同形状のファジィ集合の後件部を表現する特性パラメータの個数を表わし，$B^i(p_1,\ldots,p_{n_B};R)$を満たす．ここで$p_1,\ldots,p_{n_B}$は特性パラメータ変数であり，値を代入することにより具体的なファジィ集合を表わすことになる．

STEP 1 ：各ルール間の距離d^{pq}を計算する．

$$d^{pq} = \sum_{j=1}^{m} d(A^{pj}, A^{qj}) \qquad (2)$$

$p = 1,2,\ldots n$． $q = 1,2,\ldots n$

STEP 2 ：事実と各ルール間の距離d^iを計算する．

$$d_i = \sum_{j=1}^{m} d(A^{ij}, A^j) \qquad (3)$$

$i = 1,2,\ldots n$．

STEP 3 ：(4)式により推論結果Bを求める．

$$B = B^0 D^0 \qquad (4)$$

$$B^0 = \begin{bmatrix} b_1^1, b_1^2, \ldots, b_1^n \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ b_k^1, b_k^2, \ldots, b_k^n \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ b_L^1, b_L^2, \ldots, b_L^n \end{bmatrix} \qquad (5)$$

$$D^0 = (d_1^0, d_2^0, \ldots, d_n^0)^T \qquad (6)$$

$$d_p^0 = \prod_{q=1, q\neq p}^{n} \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{n} d_i\right) - \left(\sum_{j=1}^{n} d^{qj}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n} d^{pi}\right) - \left(\sum_{j=1}^{n} d^{qj}\right)} \right] \qquad (7)$$

以上，特性空間推論法のアルゴリズムについて述べた．本推論アルゴリズムは計算機内で非常にプログラムとして書きやすい．

3．本推論アルゴリズムの特徴

本節では2節に述べた新しいファジィ推論アルゴリズムの特徴について述べる．特徴を定理の形式でまとめるが，その証明は省略する．

定理1 ：もし，$\exists_i \in \{1,2,\ldots,n\}, \forall_j \in \{1,2,\ldots,m\}$,$\forall_q \in \{1,2,\ldots,L_j\}$ に対して，等式$a_q^j = a_q^{ij}$が成立すれば，$\forall_q \in \{1,2,\ldots,L\}$ に対して等式$b_p^j = b_p^i$も成立する．すなわち，$A^j = A^{ij} \Rightarrow B = B^i$という関係があるので，本ファジィ推論法は分離規則を満たしている．

5．まとめ

本論文は，特性パラメータ空間と同形状のファジィ集合の関係を利用して，外挿機能をもつ距離型ファジィ推論法を提案た．ここでは言及していないが，距離型関数推論法及び簡略化推論法[6]は本論文の推論法の特例として取り扱える．また，離散的メンバーシップ関数を持つファジィ集合の場合，そのメンバーシップ関数値を特性値パラメータとすれば，本推論法はそのまま適用できる．

参考文献

[1] E. H. Mamdani : Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol. 121, No. 12, pp. 1585 - 1588 (1974)

[2] 前田，村上：自己調整ファジィコントローラ，計測自動制御学会論文集，Vol. 24, No. 2, pp. 191 - 197 (1988)

[3] T. Takagi and M. Sugeno : Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Transation on SMC, Vol. 15, No. 1, pp. 116 - 132 (1985)

[4] Y. T. Koczy and M. Mizumoto : Some Considerations on Koczy's Fuzzy Interpolative Reasonig Method, Proceedings of Fourth IEEE International Conference on Fuzzy System, pp. 2117 - 2122 (1995)

[5] 石岩，水本：Koczy の線形補間推論法に関する 23 の考察，日本ファジィ学会誌，Vol. 8, No. 1, pp. 147 - 157 (1996)

[6] 王，土谷，水本，河田：距離型ファジィ推論法 Part 1 -Part 1 2，第 12 回～第 15 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，(1996～1999)

[7] 島川，村上：プラントのファジィモデリングとファジィ予測制御，第6回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集，pp. 227 - 230 (1996)

WA1−2

距離型ファジィ推論法 Part 14

——— 動的ゴムストリング型連想記憶アルゴリズム ———

Distance Type Fuzzy Reasoning Method Part14
——— Proposal of Dynamic Associative Memory Algorithm ———

王 碩玉[1)] 河田 耕一[2)] 土谷 武士[3)] 水本 雅晴[4)]

Shuoyu Wang Koichi Kawata Takeshi Tsuchiy Masaharu Mizumoto

1)：高知工科大学
Kochi University of Technology

2)高知工科大学
Kochi University of Technology

3)：北海道大学
Hokkaido University

4)大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract： Present association result is not independent, when the human carries out the association, and there is the relation in some forms in association result in the last time. In short, the association is dynamically carried out. In the previous paper, authors proposed rubber string type associative memory algorithm using the physical model, however, it did not have the dynamics like the human. Therefore, in this paper, the dynamics is given to the conventional associative memory algorithm.

1．はじめに

人間が連想を行うときに、今回の連想結果が独立なものではなく何らかの形で前回の連想結果に関係する。つまり、連想がダイナミック的に行われている。著者らは物理モデルを利用したゴムストリング連想記憶アルゴリズムを提案したが、人間のようにダイナミック的に連想を行うことが出来なかった。したがって、本論文の目的はこのゴムストリング型連想記憶アルゴリズムに人間のような動的な連想機能を与えることである。この新しい連想記憶アルゴリズムを動的ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムと呼ぶことにする。動的ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムは相互想起型連想記憶のフィールドに属し、次の３つの特徴を持つ。(1)近い過去に連想されたことはよりよく連想されやすい。(2)プロトタイプパターンを表すベクトルの直交性を必要としない。したがって記憶パターンの個数には制限はない。(3)連想の安定性が理論的に保証されている。すなわち、入力されるパターンがプロトタイプパターンのある入力に等しい場合、その入力に対応するプロトタイプ出力が必ず連想される。

もし、認識、推論、学習が人間にとって無くてはならない重要な知的挙動であるとすれば、人間が知識を憶える（記憶）および思い出す（想起）機能を持っていればこそこの三つの知的挙動を実現できているのである。連想記憶は憶えた知識を単なるアドレス式で検索するだけでなく、たとえば友人の写真を見ると、名前を想起して、そしてその人の性格や人柄などを連想するといった高度な機能を指す。人間の持っている優れた連想記憶機能を機械的に再現しようとする工学的研究は昔から行われてきた。例えば、相関マトリクス型連想記憶[2],アソシアトン型連想記憶[3],双方向連想記憶[4],自律分散型連想記憶[5],などが知られている。これらの連想記憶モデルにおいてプロトタイプ出力を正確に連想するために、本質的にプロトタイプパターンを表す諸ベクトルは互いに一次独立することを必要としている。したがって、ベクトルのサイズと連想できるパターンの個数の間に制限がある。たとえば、二次元平面において、正確に想起するための記銘できるベクトルの最大数は２である。また近年双方向連想記憶モデルを用いたファジィ連想メモリシステム[6]やカオス的最急降下法を利用したファジィ連想記憶システム[7]などが提案されている。

2．動的ゴムストリング型連想記憶モデル

ゴムストリング型連想記憶モデルおよびゴムストリング型連想記憶アルゴリズムについて文献[１]を参考されるとして、ここではロバストゴムストリング型連想記憶アルゴリズムについて述べる。

L個のプロトタイプパターン$\left(X_i,Y_i\right)$の入力X_iと出力Y_iはユークリッド空間中のベクトルで、

$X_i=\left(x_{i1},x_{i2},\cdots x_{iN}\right)^T\in R^N$ と $Y_i=\left(y_{i1},y_{i2},\cdots y_{iM}\right)^T\in R^M$

とする。ただし、T は転置を表し、$i \in \{1,...,L\}$。ここで従来の連想記憶において設けられている厳しい条件$L \le M$を必要としない。したがって、記憶できるプロトタイプパターンの数が必要に応じて任意に設定できる。ところで、$\forall p,q \in \{1,2,...,L\}$ に対して $d(Y_p,Y_q) \neq 0$とする。d(・，・)は距離関数である。これは出力空間においては同じ出力ベクトルが存在しないことを意味している。

質量 m のボールの運動方程式は(1)式で表される。

$$m\ddot{Y} + D\dot{Y} = F \qquad (1)$$

ただし、

$Y = (Y_1, Y_2, ..., Y_M)^T$ ：ボールの位置

・・ ・

Y、Y ：それぞれのボールの速度と加速度

D：M×M の正定対角マトリクス

$F = \sum_{i=1}^{L} f_i$ ：ボールが受ける合力

f_i ：ストリングからの牽引力

もし、i 番目のゴムストリングの力係数をk_iとすれば、ボールが、i 番目のゴムストリングから力 $k_i(Y_i - Y)$を受けることがわかる。ここで、弾性係数k_iを(2),(3)式のように設定する。ただし、d(・，・)は距離関数であり、sgn(・)は符号関数である。λは定数である。δ_iはロバスト連想半径であり、(5)式を満たす定数である。

$$k_i = 1/d_i \qquad (2)$$

$$d_i = d(X_i,X)\left\{1 - \mathrm{sgn}\left[\delta_i - d(X_i,X)\right]\right\} \qquad (3)$$

$$d(X_i,X) = \left\{\sum_{j=1}^{N} \left|k_{ij} - x_i\right|^{\lambda}\right\}^{1/\lambda} \qquad (4)$$

$$\delta_i = \lambda_1 \delta_{i\max} + \lambda_2 \delta_{i\max}\left[1 - \exp(-n_i)\right] \qquad (5)$$

$$\delta_{i\max} = \frac{1}{2}\min\left\{d(X_1,X_i),...,d(X_{i-1},X_i)\right\}\left\{d(X_{i+1},X_i),...,d(X_L,X_i)\right\} \qquad (6)$$

i=1,2,...,L

$1 \le \lambda < \infty$

$\lambda_1 + \lambda_2 = 1$

n_i: i 番目プロトタイプパターン出力の連想された回数

(2)式と(3)式を(1)式に代入すると、(7)式を得る。この運動方程式を解けば、最終安定状態Y_sが求められる。すなわち、XからY_sが連想される。

$$m\ddot{Y} + D\dot{Y} + \left(\sum_{i=1}^{L} \frac{1}{d_i}\right)Y = \sum_{i=1}^{L} \frac{1}{d_i} Y_i \qquad (7)$$

3. 動的ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムの特徴

[特徴]：(7)式で表すボールの運動は任意の初期状態$\forall Y_0 \in R^M$から出発しても最終的に(8)で示す状態Y_sに安定する。また、もし、与えられた刺激 X は不等式$0 \le d(X_i,X) \le \delta_i$を満たしていれば、(9)式が成り立つ。すなわち、$Y_i$、は連想される。

$$Y_s = \frac{\sum_{i=1}^{L}\prod_{j=1,j\neq i}^{L} d_j Y_i}{\sum_{i=1}^{L}\prod_{j=1,j\neq i}^{L} d_j} \qquad (8)$$

$$d(Y_i,Y_s) = 0 \qquad (9)$$

4．まとめ

動的ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムを提案し、その特徴を述べた。

参 考 文 献

[1]王、土谷：距離型ファジィ推論法 Part9-ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムの提案 - 、第１４回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp. 81-84(1998)

[2] T. Kohonen：Correlation matrix memories, IEEE Trans. on Computers, C-21, pp. 353-359(1972) .

[3] K . Nakano：Associatron：A model of associative memory, IEEE Trans. on systems, Man, and Cybernetics, SMC-2, pp. 380-388(1972).

[4] B . Kosko：Adaptive bi-directional associal associative memories, Applied Optics, Vol. 26, No. 23, pp, 4947-4960(1987).

[5] 新、池田、湯浅、藤田：自律分散システム、朝倉書店(1995).

[6] T. Yamaguchi, K. Goto and T. Takagi：Two-Degree-of-Freedom Fuzzy Model Using Asociative Memories and Its Application, Information Sciences, Vol. 71, pp. 65-97(1993)

[7] 佐藤、牛田、山口、井村、高木：ファジィ連想記憶システムにいけるカオス的記憶探索、日本ファジィ学会誌, Vol6, No. 4, pp. 765-774(1994)

連絡先：〒782 高知県土佐山田町宮ノ口 185 番地
高知工科大学知能機械システム工学科
王 碩玉
TEL：08875－7－2306、FAX：08875－7－2320
Email : wang@mech.kochi-tech.ac.jp

WA1−3

距離型ファジィ推論法を用いたモデルに基づくファジィ制御
Fuzzy Control Systems Using A Distance-type Fuzzy Reasoning Method

木村　太
Futoshi KIMURA
苫小牧工業高等専門学校
Tomakomai National College of Technology

王　碩玉
Shouyu WANG
高知工科大学
Kochi University of Technology

土谷　武士
Takeshi TSUCHIYA
北海道大学
Hokkaido University

Abstract A fuzzy reasoning method called direct approach is used for fuzzy control systems and contains some problems. A distance-type fuzzy reasoning method is based on the calculated distance between two fuzzy sets. This method has some advantages over the conventional method. In this paper,we applied the distance-type fuzzy reasoning method to T-S fuzzy models. The stability of systems is guaranteed for sparse fuzzy rule sets.

1．はじめに

現在、非線形システムの動特性に基づいたファジィ制御系設計法、いわゆるモデルに基づくファジィ制御の研究が行われている[1]。この制御におけるファジィ推論法は適合度型ファジィ推論がほとんどである。しかし、適合度型では前件部ファジィ集合が疎である場合、事実が空集合にあるときは、全ルールにおいて適合度がゼロとなり適切な推論結果は得られない。

本研究で用いる距離型ファジィ推論法は、ファジィ集合間の距離に基づく推論であり、凸性・漸近性・分離性という３つの特徴を有するため、上記の問題点を解決できる[2]。

本稿では、後件部が状態方程式で表現されている高木・菅野ファジィモデル（T-Sファジィモデル）に距離型ファジィ推論法を適用し、その有効性を検討する。

2．距離型推論法を用いたファジィモデル

2.1　ファジィモデル

１入力1出力の非線形システムを、(1)式のようなT-Sファジィモデルで表す。

$$\text{Rule } i: \text{If } x_1(t) \text{ is } A^{i1} \text{ and } x_2(t) \text{ is } A^{i2} \ldots \text{and } x_m(t) \text{ is } A^{im}$$
$$\text{then } \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}_i\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_i u(t) \qquad (1)$$

ただし、i=1,2,...,n, nはルール数、j=1,2,...,m, mは状態変数の数であり、A^{ij}は前件部のファジィ集合である。また、 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \ldots, x_m(t)]^T$、$\mathbf{x}(t)$は状態変数、u(t)は制御入力であり、 $\mathbf{A}_i \in \mathbf{R}^{m\times m}$,$\mathbf{b}_i \in \mathbf{R}^{m\times 1}$ である。

なお、本推論法で用いるファジィ集合は有界凸とする。

距離型推論法を適用したファジィモデルの推論値は(2)式で求められる。

$$\mathbf{x}(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left\{\mathbf{A}_i\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_i u(t)\right\}\prod_{j=1,j\neq i}^{n} d_j\right]}{\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1,j\neq i}^{n} d_j} \qquad (2)$$

$$d_i = \sum_{j=1}^{m} d(A^{ij}, x_j(t)) \qquad (3)$$

ここで、$d(\cdot,\cdot)$はファジィ集合間の距離を定義する距離関数である。また、互いに矛盾するルールが存在しないものとする。

2.2　適用例

次のファジィモデルに適用した例を示す。

$\mathbf{x}(t+1) = [x_1(t), x_2(t)]^T$

Rule i : If $x_1(t)$ is A^i Then $\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}_i\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_i u(t)$

ここで、i=1,2（２ルール）、$\mathbf{A}_i \in \mathbf{R}^{2\times 2}$,$\mathbf{b}_i \in \mathbf{R}^{2\times 1}$ であり、また前件部ファジィ集合を図１とする。

このときの推論結果は(4)式となる。

$$\mathbf{x}(t+1) = \frac{d_1\{\mathbf{A}_2\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_2 u(t)\} + d_2\{\mathbf{A}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_1 u(t)\}}{d_1 + d_2} \qquad (4)$$

ただし、 $d_1 = d(A^1, x_1(t))$ ， $d_2 = d(A^2, x_1(t))$ (5)

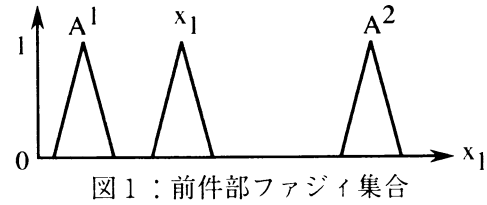


図１：前件部ファジィ集合

いま、x_1がファジィ集合A^1に近づいた場合を考えると、距離値d_1は小さくなり、d_2は大きくなるので、推論結果はルール1のシステムに近づく。さらに、x_1がファジィ集合A^1に完全に重なったときは、距離値d_1は０となるため、推論結果はルール１のシステムとなり、modus ponensを満たす。

また、図１のようにファジィ集合が疎な場合、適合度型推論ではx_1が空集合にあるため、適切な推論はできない。しかし、距離型では、ファジィ集合間の距離値が存在するため、推論が可能である。

3．ファジィ制御系の設計

従来のフィードバック制御と同様、ファジィ制御系においてもフィードバックゲインにより安定性が保証される。ゲインの決定には、リアプノフの直接法に基づくもの[3]とLMIによる方法[4]があるが、ここでは基本的な安定条件を導くため、前者の方法について述べる。

3.1　ファジィ制御器

並列分散的補償の考え方からファジィ制御器を次のように設ける。

$$\text{Rule } i: \text{If } x_1(t) \text{ is } A^{i1} \text{ and } x_2(t) \text{ is } A^{i2} \ldots \text{and } x_m(t) \text{ is } A^{im}$$
$$\text{then } u(t) = \mathbf{f}_i\mathbf{x}(t) \qquad (6)$$

ここで、$\mathbf{f}_i$はフィードバックゲイン $\mathbf{f}_i = [f_1, f_2, \ldots, f_m]$

最終的な制御入力は(7)式から得られる。

$$u(t)=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left\{f_i\mathbf{x}(t)\prod_{j=1,j\neq i}^{n}d_j\right\}}{\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1,j\neq i}^{n}d_j} \tag{7}$$

ファジィ制御系全体のモデルは、(7)式を(2)式に代入してまとめると、

$$\mathbf{x}(t+1)=\frac{1}{\Delta}\left[\sum_{i=1}^{n}\left\{(\mathbf{A}_i+\mathbf{b}_i f_i)\,\mathbf{x}(t)\prod_{j=1,j\neq i}^{n}d_j^2\right\}+\sum_{i<j}\left\{2\mathbf{G}_{ij}\mathbf{x}(t)\prod_{k=1,k\neq i}^{n}d_k\cdot\prod_{l=1,l\neq j}^{n}d_l\right\}\right] \tag{8}$$

$$\mathbf{G}_{ij}=\frac{(\mathbf{A}_i+\mathbf{b}_i\mathbf{f}_j)+(\mathbf{A}_j+\mathbf{b}_j\mathbf{f}_i)}{2} \tag{9}$$

$$\Delta=\sum_{i=1}^{n}\prod_{k=1,k\neq i}^{n}d_k\cdot\sum_{j=1}^{n}\prod_{l=1,l\neq j}^{n}d_l \tag{10}$$

となる。

リアプノフの直接法から、(11)式、(12)式を満たす共通の正定対称行列$\mathbf{P}$が存在すれば、ファジィ制御系は大域的漸近安定となる。

$$(\mathbf{A}_i+\mathbf{b}_i\mathbf{f}_i)^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\,(\mathbf{A}_i+\mathbf{b}_i\mathbf{f}_i)-\mathbf{P}<0 \tag{11}$$

$$\mathbf{G}_{ij}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{G}_{ij}-\mathbf{P}<0 \quad \forall_{i,j}\in\{1,2,..,n\} \tag{12}$$

4．設計例

次のようなファジィモデルに対する設計例を示す。

ファジィモデル

$$\mathbf{x}(t)=\left[x(t),x(t-1)\right]^{\mathrm{T}}$$

Rule i : If x(t) is A^i then $\mathbf{x}(t+1)=\mathbf{A}_i\mathbf{x}(t)+\mathbf{b}_i u(t)$

ここで、i=1,2（ルール数：2）

$$\mathbf{A}_1=\begin{bmatrix}2.178 & -0.588\\ 1 & 0\end{bmatrix},\mathbf{b}_1=\begin{bmatrix}0.603\\ 0\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2=\begin{bmatrix}2.256 & -0.361\\ 1 & 0\end{bmatrix},\mathbf{b}_2=\begin{bmatrix}1.120\\ 0\end{bmatrix}$$

である。

ファジィ制御器

Rule i : If x(t) is A^i then $u(t)=f_i\mathbf{x}(t)$

$$\mathbf{f}_1=\left[-2.285,0.726\right],\mathbf{f}_2=\left[-1.300,0.188\right]$$

f_iは固有値(0.3,0.5)から計算され、さらに安定条件を満たしている。

シミュレーション結果

図2に示すファジィ集合について、距離型推論法を用いたシミュレーション結果を図3に示す。

この結果から、ファジィ集合が疎な場合（集合間に共通集合がない）でも、安定性が確保されていることがわかる。また、Case2のようにファジィ集合をシングルトンメンバーシップ関数としても適切な推論が行われている。

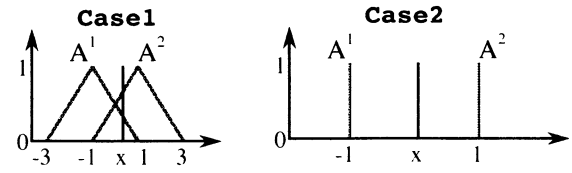


図2：前件部ファジィ集合

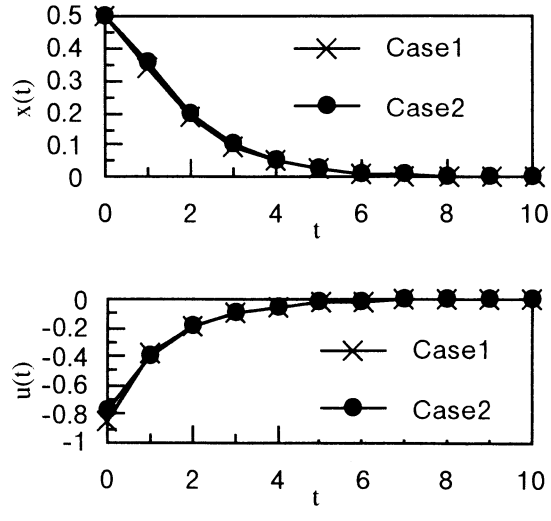


図3：シミュレーション結果

6．終わりに

本稿では、離散系のT-Sファジィモデルに距離型ファジィ推論法を適用し、その制御系設計法について述べた。結果として、ファジィ集合が疎な場合においても、制御系の安定性が確認され、本推論法の有効性が示された。

なお、誌面の都合により連続系の検討は割愛したが、これに関しても同様の結果を得ている。

参考文献

[1] K.Tanaka ,M.Sugeno : Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems, FUZZY SETS AND SYSTEMS,Vol.45,No.2,135/156(1992)

[2] 王,土谷：距離型ファジィ推論法,第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,9/20(1996)

[3] 田中：アドバンストファジィ制御,共立出版(1994)

[4] H.O.Wang ,K.Tanaka ,M.Griffin :An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems:Stability and Design Issues,IEEE Trans. on Fuzzy Systems,Vol.4, No.1,14/23(1996)

［問い合わせ先］
〒059-1275　苫小牧市字錦岡443番地
苫小牧工業高等専門学校　電気電子工学科
木村　太
Tel : 0144-67-8077　Fax : 0144-67-8022
E-mail : futoshi@el.tomakomai-ct.ac.jp

WA2−1

単一入力ルール群結合型ファジィ推論法と簡略化ファジィ推論法との関係

Relationship of Single Input Rule Modules Connected Fuzzy Inference Model and Simplified Fuzzy Inference Model

○長岡 毅　　水本 雅晴
Takeshi NAGAOKA　Masaharu MIZUMOTO

大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract　This paper compares Single Input Rule Modules Connected Fuzzy Inference Model (SIRMs Model, for simplicity) by Yubazaki to Single Input Connected Fuzzy Inference Model by Otsubo, and shows the method of transforming SIRMs Model into the well-known Simplified Fuzzy Inference Model.

1. はじめに

湯場崎らによる単一入力ルール群 (SIRMs, Single Input Rule Modules) 結合型ファジィ推論法 [1]-[3] は従来の簡略化ファジィ推論法と比べると、ファジィルール数を大幅に削減できるという長所がある。簡略化ファジィ推論法は入力数とファジィ分割数が増えるとファジィルールが指数的に増加し、人間の試行錯誤による作成では手におえない。単一入力ルール群結合型ファジィ推論法は入力数が増えても、ファジィ分割をそれぞれの入力に対して独立に行い、ファジィルールもそれぞれの入力、分割に応じて設定するためファジィルール数は入力数とファジィ分割数に比例するだけである。最終出力値はそれぞれの入力に対して独立に出力値を求め、それぞれの出力値に対して重み付けをし統合する方法をとる。大坪ら [4,5] による単一入力型のファジィ推論法は、独立に出力値を求める前に荷重平均をとりその結果を最終出力結果としている。この方法は重みを考えず、ファジィ規則のみを考慮するので試行錯誤で設定することが容易である。

本論文では、湯場崎らのSIRMs推論法と大坪らの単一入力型のファジィ推論法との関係を明らかにする。また、SIRMs推論法から従来の簡略化ファジィ推論法への変換方法について述べる。さらに逆の変換についても言及する。

2. 単一入力ルール群 (SIRMs) 結合型ファジィ推論法

従来のファジィ推論法において、入力項目数、ファジィ分割数が増加するにつれて、ファジィルール数が指数的に増加するのは、すべての入力項目をルールの前件部に対応させるためである。しかしSIRMs推論法では、各入力項目に対して1入力型のファジィルール群を用意し、各ルール群からの推論結果の重み付け加算を最終推論結果としている。これよりルール数を大幅に減らすことができる。

入力 x_i に対するルール群を以下のように定義する。

$$\text{Rule}\text{-}i : \{R_j^i : x_i = A_j^i \Rightarrow y_i = y_j^i\}_{j=1}^{m_i} \tag{2.1}$$

ここで、R_j^i は i 番目のルール群 Rule-i の中の j 番目のルールを表す。x_i はシステムの i 番目の入力項目に対応する前件部変数、y_i は後件部変数である。A_j^i は Rule-i の中の j 番目のルールの前件部変数 x_i のメンバーシップ関数、y_j^i は Rule-i の中の j 番目のルールの後件部の実数出力値を意味する。また、ルール群の番号は i=1,2,...,n、i 番目のルール群 Rule-i の中のルール番号は j=1,2,...,m_i とする。各ルール群の最大ルール数はその前件部変数の台集合の分割数、つまりメンバーシップ関数の個数に等しい。

各入力項目の入力値 $x_i^0(i=1,2,...,n)$ が入力されたとき、ルール群 Rule-i の j 番目のルールの前件部の適合度 h_j^i は

$$h_j^i = A_j^i(x_i^0) \tag{2.2}$$

で与えられ、そのルール群の推論結果 y_i^0 は

$$y_i^0 = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} h_j^i y_j^i}{\sum_{j=1}^{m_i} h_j^i} \tag{2.3}$$

のように求められる。各入力 $x_1^0, \cdots, x_n^0$ が与えられたときの最終の推論結果 y^0 は

$$y^0 = \sum_{i=1}^{n} w_i y_i^0 \tag{2.4}$$

で与えられ、式 (2.3) で求められた各推論結果 y_i^0 に重み w_i を付加して、それらを総和した結果をとるものである。

3. 単一入力結合型 (SIC) ファジィ推論法

大坪ら [4,5] が提案した単一入力型のファジィ推論法を「単一入力結合型 (SIC, Single Input Connected) ファジィ推論法」と呼ぶこととする。SIC 推論法は SIRMs 推論法と同様に、各入力項目に対しファジィルール群を設定する。SIRMs 推論法は各ルール群から得られた推論結果に重み付き総和をとり、それを最終推論結果としているが、SIC 推論法では各ルール群からの適合度を荷重平均で統合し、その結果を最終の推論結果としている。

SIC 推論ルールは SIRMs 推論ルール (式 (2.1)) と同様に与えられ、適合度 h_j^i も式 (2.2) と同様に与えられる。

各入力 $x_1^0, \cdots, x_n^0$ が与えられたときの推論結果 y^0 は、各ルール群からの適合度 h_j^i より以下のように与えられる。

$$y^0 = \frac{\sum_{j=1}^{m_1} h_j^1 y_j^1 + \cdots + \sum_{j=1}^{m_n} h_j^n y_j^n}{\sum_{j=1}^{m_1} h_j^1 + \cdots + \sum_{j=1}^{m_n} h_j^n} \tag{3.1}$$

すなわち、

$$y^0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} h_j^i y_j^i}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} h_j^i} \tag{3.2}$$

で表わされる。

4. SIRMs 推論法と SIC 推論法との関係

本節では SIRMs 推論法と SIC 推論法の比較検討を行う。

まず、簡単な例として、図 4.1 のようなファジィ集合 A_1, A_2, A_3 に対して、

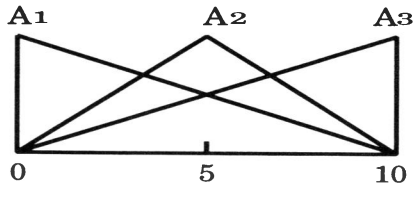


図 4.1　ファジィ集合 (その 1)

各入力 x_1, x_2 に対するルール群 Rule−1, 2 が

$$\begin{aligned} \text{Rule}-1: &\left\{ \begin{array}{l} x_1 = A_1 \Rightarrow y_1 = 1 \\ x_1 = A_2 \Rightarrow y_1 = 3 \\ x_1 = A_3 \Rightarrow y_1 = 5 \end{array} \right\} \\ \text{Rule}-2: &\left\{ \begin{array}{l} x_2 = A_1 \Rightarrow y_2 = 1 \\ x_2 = A_2 \Rightarrow y_2 = 2 \\ x_2 = A_3 \Rightarrow y_2 = 1 \end{array} \right\} \end{aligned} \tag{4.1}$$

と与えられたときの SIRMs 推論法と SIC 推論法による推論結果を求めると図 4.2, 4.3 のようになる。但し、SIRMs 推論法の重みを $w_1 = w_2 = 1/2$ としている。

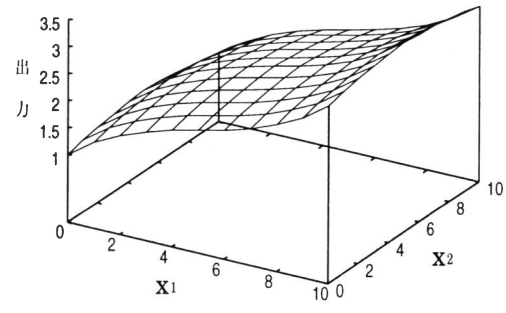


図 4.2　SIRMs 推論法による推論結果

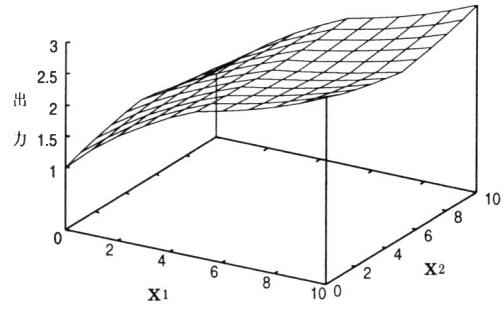


図 4.3　SIC 推論法による推論結果

これらの推論結果から分かるように、SIRMs 推論法と SIC 推論法は異なった推論結果を得ていることが分かる。

次の例として、図 4.4 のようなファジィ集合の下での式 (4.1) のルール群を考えてみよう。

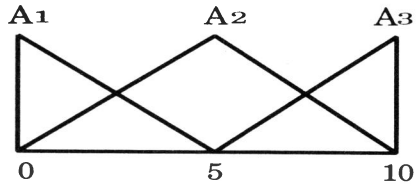


図 4.4　ファジィ集合 (その 2)

この場合、図 4.4 のファジィ集合は、任意の x に対して

$$A_1(x) + A_2(x) + A_3(x) = 1 \tag{4.2}$$

となる関係が成立している (いわゆる、“ファジィ分割” になっている)。

これより SIRMs 推論法と SIC 推論法の推論結果を求めると図 4.5 のようになり、両推論法とも同じ結果を得ていることが分かる。

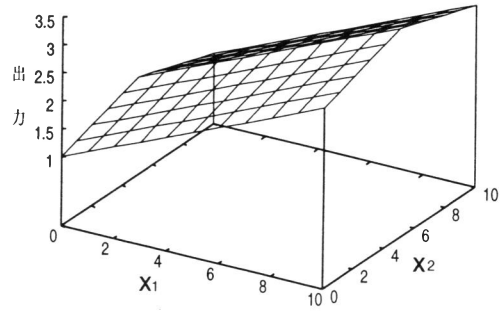


図 4.5　推論結果 (SIRMs,SIC)

次に、与えられたファジィ集合が図 4.4 のようにファジィ分割されている場合、SIRMs 推論法と SIC 推論法は同一の推論結果を得ることを示そう。

今、SIRMs 推論法の重み w_i を $w_1 = \cdots = w_n = 1/n$ と仮定すると、式 (2.3),(2.4) より、最終的な推論結果は

$$y^0 = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{m_1} h_j^1 y_j^1}{\sum_{j=1}^{m_1} h_j^1} + \cdots + \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{m_n} h_j^n y_j^n}{\sum_{j=1}^{m_n} h_j^n} \tag{4.3}$$

のようになる。各入力項目 x_iでのファジィ集合 A_j^i $(j = 1, \cdots, m_i)$ がファジィ分割となっている場合、

$$\sum_{j=1}^{m_i} h_j^i = 1 \quad (i = 1, \cdots, n) \tag{4.4}$$

となることにより、式 (4.3) は

$$y^0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} h_j^i y_j^i \tag{4.5}$$

のようになる。一方、SIC ファジィ推論法の最終推論結果 y^0は、式 (4.4) のようにファジィ分割である場合、式 (3.1) の分母は

$$\sum_{j=1}^{m_1} h_j^1 + \cdots + \sum_{j=1}^{m_n} h_j^n = n$$

となることより、

$$y^0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} h_j^i y_j^i \tag{4.6}$$

となり、SIRMs の結果 (4.5) と同じになることが分かる。

以上のように各入力項目でのファジィ集合がファジィ分割をなしている場合、両ファジィ推論法は一致することが分る。

しかしながら、ファジィ集合が図 4.1 のようなファジィ分割でない場合は、一般に両推論法は一致しない。

5 .SIRMs 結合型ファジィ推論法と簡略化ファジィ推論法との関係

本章では SIRMs 推論法から簡略化ファジィ推論法への変換方法について述べる。逆については一般に不可能であるが、簡略化ファジィ推論規則が "表形式" で表わされている場合、その上限、下限を実現するような SIRMs 推論ルールを設定することができる。

まず、SIRMs 推論法から簡略化ファジィ推論法へのルール設定方法について述べてみよう。

今、SIRMs 推論法の式 (2.1) の各ルール群 Rule−i の添字 jを区別するために j_iを使用し、

$$\text{Rule}-i : \{R_{j_i}^i : x_i = A_{j_i}^i \Rightarrow y_i = y_{j_i}^i\}_{j_i=1}^{m_i} \tag{5.1}$$

のように書き換えることにする。

これより、SIRMs 推論法のルール群から簡略化ファジィ推論法の規則が次のように求められる。

$$x_1 = A_{j_1}^1, x_2 = A_{j_2}^2, \cdots, x_n = A_{j_n}^n$$
$$\Rightarrow y = w_1 y_{j_1}^1 + w_2 y_{j_2}^2 + \cdots + w_n y_{j_n}^n \tag{5.2}$$
$$(\text{但し、} j_i = 1, \cdots, m_i)$$

簡単のため、2 入力の場合を考えると、SIRMs 推論法のルール群が

$$\text{Rule}-1 : \left\{ \begin{array}{l} x_1 = A_1^1 \Rightarrow y_1 = y_1^1 \\ x_1 = A_2^1 \Rightarrow y_1 = y_2^1 \\ x_1 = A_3^1 \Rightarrow y_1 = y_3^1 \end{array} \right\}$$
$$\text{Rule}-2 : \left\{ \begin{array}{l} x_2 = A_1^2 \Rightarrow y_2 = y_1^2 \\ x_2 = A_2^2 \Rightarrow y_2 = y_2^2 \\ x_2 = A_3^2 \Rightarrow y_2 = y_3^2 \end{array} \right\} \tag{5.3}$$

のように与えられているとき、簡略化推論法の規則は

$$x_1 = A_{j_1}^1,\ x_2 = A_{j_2}^2 \Rightarrow y = w_1 y_{j_1}^1 + w_2 y_{j_2}^2 \tag{5.4}$$

のように与えられる。但し、$j_1, j_2 = 1, 2, 3$

(例)　SIRMs 推論法のルール群が式 (4.1) のように与えられているとき、簡略化推論法の規則は表 5.1 のように与えられる。ただし、$w_1 = w_2 = 1/2$ としている。

表 5.1 式 (4.1) からの簡略化推論規則表

y		x2		
		A1	A2	A3
x1	A1	$\frac{1+1}{2}$	$\frac{1+2}{2}$	$\frac{1+1}{2}$
	A2	$\frac{3+1}{2}$	$\frac{3+2}{2}$	$\frac{3+1}{2}$
	A3	$\frac{5+1}{2}$	$\frac{5+2}{2}$	$\frac{5+1}{2}$

これより表 5.1 の簡略化推論規則から推論結果を求めてみると図 5.1 のようになり、図 4.2 の SIRMs 推論結果と同一であることがわかる。

同様に、多入力の場合に対しても同一の結果が得られることが分かる。

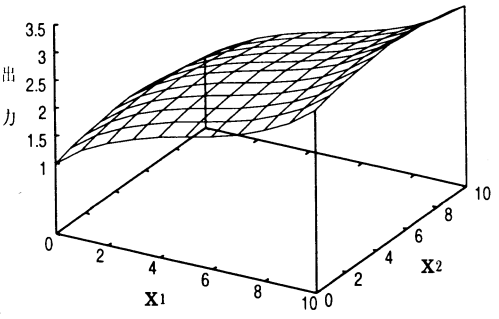


図 5.1 表 5.1 からの推論結果

逆に、簡略化ファジィ推論法からSIRMs推論法への変換は一般的に不可能である。また、簡略化ファジィ推論規則が表形式で与えられている場合も一般的に変換は不可能であるが、その下限および上限を実現するSIRMs推論規則を設定することができる。

表5.2 表形式の簡略化ファジィ推論規則

y		x_2		
		A_1^2	A_2^2	A_3^2
x_1	A_1^1	a	b	c
	A_2^1	d	e	f
	A_3^1	g	h	i

今、簡略化ファジィ推論法の規則が表5.2のように表形式で与えられている場合、その推論結果の下限および上限を実現するSIRMs推論法のルール群を次のように与えることができる。

設定方法は、表5.2の簡略化推論法の各行, 各列に対しmin(= ∧)を取ることにより、SIRMs推論法のルール群Rule−1, 2を得る。

$$\text{Rule}-1:\left\{\begin{array}{l} x_1 = A_1^1 \Rightarrow y_1 = a \wedge b \wedge c \\ x_1 = A_2^1 \Rightarrow y_1 = d \wedge e \wedge f \\ x_1 = A_3^1 \Rightarrow y_1 = g \wedge h \wedge i \end{array}\right\}$$
$$\text{Rule}-2:\left\{\begin{array}{l} x_2 = A_1^2 \Rightarrow y_2 = a \wedge d \wedge g \\ x_2 = A_2^2 \Rightarrow y_2 = b \wedge e \wedge h \\ x_2 = A_3^2 \Rightarrow y_2 = c \wedge f \wedge i \end{array}\right\} \quad (5.5)$$

同様に、各行, 各列に対しmax(= ∨)を取ることにより、以下のようなルール群を求める。

$$\text{Rule}-1:\left\{\begin{array}{l} x_1 = A_1^1 \Rightarrow y_1 = a \vee b \vee c \\ x_1 = A_2^1 \Rightarrow y_1 = d \vee e \vee f \\ x_1 = A_3^1 \Rightarrow y_1 = g \vee h \vee i \end{array}\right\}$$
$$\text{Rule}-2:\left\{\begin{array}{l} x_2 = A_1^2 \Rightarrow y_2 = a \vee d \vee g \\ x_2 = A_2^2 \Rightarrow y_2 = b \vee e \vee h \\ x_2 = A_3^2 \Rightarrow y_2 = c \vee f \vee i \end{array}\right\} \quad (5.6)$$

このように、minおよびmaxを用いた2種類のSIRMs推論法のルール群(5.5),(5.6)の推論結果は、表5.2の簡略化ファジィ推論法の推論結果の下限および上限になっていることが分かる。

なお、表5.2の各入力項目でファジィ分割になっており、各区間で平面を形成している($a+e=b+d$など)場合は、SIRMs推論法に変換することができる[6]。

6. おわりに

本研究では、湯場崎らが提案した単一入力ルール群(SIRMs)結合型ファジィ推論法と、大坪らが提案した単一入力結合型(SIC)ファジィ推論法とは、ファジィ集合がファジィ分割になっている場合は一致することを示した。また、SIRMs結合型ファジィ推論法と簡略化ファジィ推論法との変換方法について検討を行った。SIRMs結合型ファジィ推論法から簡略化ファジィ推論法への変換方法は本提案手法をとることで可能であることがわかった。また、逆に簡略化ファジィ推論法からSIRMs結合型ファジィ推論法への変換は一般的に不可能であるが、簡略化ファジィ推論規則が表形式で与えられている場合は、その推論結果の上限および下限を実現する2種類のSIRMs結合型ファジィ推論法が存在することを示した。

参考文献

[1] 湯場崎、易、廣田:複数入力ファジィ制御のための単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデルの提案、日本ファジィ学会誌、Vol.**9**, No.**5**, 699-709, 1997

[2] 湯場崎、易、廣田:動的重視度をもちいたSIRMsファジィ推論モデル、日本ファジィ学会誌、Vol.**10**, No.**3**, 522-531, 1998

[3] 湯場崎、易、廣田:SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる倒立振子システムの安定化制御器の構築、第15回 ファジィシステムシンポジウム講演論文集、51-54, 1999

[4] 大坪、林、村上、前田:簡略化間接法による非線型PID制御と線形PID制御の実現、日本機械学会論文集(C編),63巻,605号,219-222,1997

[5] 大坪、林:ファジィ推論によるPID制御の実現とそのハイブリッド制御への適用、電気学会論文誌(C編)、Vol.**118**, No.**5**, 756-764, 1998

[6] 張山達郎:簡略化ファジィ推論法と単一入力型ファジィ推論法との比較に関する研究, 大阪電気通信大学卒業論文集, 2000

[問い合わせ先]
〒572-8530 寝屋川市初町18−8
大阪電気通信大学大学院 情報工学専攻
ファジィ工学研究室
長岡 毅
Tel: 072-820-4569 Fax: 072-824-0014
E-mail: nagaoka@mzlab.osakac.ac.jp

WA2−2

種々のファジィ推論法の推論結果の非線形性について

Non-linearity of Reasoning Outputs under Various Fuzzy Reasoning Methods

○松浦 優子 Yuko MATSUURA 大阪電気通信大学 Osaka Electro-Com.Univ.
有川 晴彦 Haruhiko ARIKAWA アークテクノリサーチ（株） Ark Techno-Research Ltd.
水本 雅晴 Masaharu MIZUMOTO 大阪電気通信大学 Osaka Electro-Com.Univ.

Abstract Non-linearity on fuzzy reasoning output exists in the case of adopting min operation (still the most popular one) in order to calculate antecedent matching degree. The non-linearity becomes more critical as the number of inputs becomes more. This paper discusses and evaluates it by using some evaluation methods for the non-linearity of multi input fuzzy reasoning output.

1.はじめに

マムダニのファジィ推論法「MIN-MAX-重心法」は数多くのファジィ制御で使用されているが、非線形性の強い推論結果が得られ、必ずしも優れた推論法であるとはいえないであろう [1]。

ファジィ推論の特徴は、熟練者の非線形性の高い経験則をコンピュータ上で容易に実現できることであり、意図的に期待した非線形性が得られることである。

本論文では、ファジィ推論の出力結果の線形性を追究することにより、種々のファジィ推論法の推論結果の非線形性について議論する。

2.ファジィ推論

本論文では、ファジィ推論結果の統合の際の演算法として加算法とMAX法を用いる。たとえば、加算型ファジィ推論では、式(2.1)のようなファジィ規則の後件部が実数値で与えられている場合、まず、後件部の適合度は各規則での前件部適合度から各種の演算方法により求める。そして最終的に結論を統合する際に“加算”を用いて結論を求めるものである。

一方、MAX型ファジィ推論は、最終的に結論を統合する際にMAX演算を用いて結論を求めるものである。

たとえば、MAX型ファジィ推論法の一例として、代数積-MAX-重心法について述べると以下のようになる。

$$\begin{array}{lllllll} \text{規則 1} & : & A_1 & and & B_1 & \Rightarrow & z_1 \\ \text{規則 2} & : & A_2 & and & B_2 & \Rightarrow & z_2 \\ & & & \vdots & & & \\ \text{規則 n} & : & A_n & and & B_n & \Rightarrow & z_n \\ \text{事実} & : & x_1 & and & x_2 & & \\ \hline \text{結論} & : & & & & & z_0 \end{array} \qquad (2.1)$$

ここで、$A_i, B_i (i = 1, 2, \cdots, n)$はそれぞれ全体集合$X, Y$におけるファジィ集合であり、後件部$z_i$は定数である。

推論結果z_0の求め方は以下のようになる。

事実「x_1 and x_2」と各規則の前件部「A_i and B_i」との適合度は、代数積演算より

$$h_i = \mu_{A_i}(x_1) \cdot \mu_{B_i}(x_2) \qquad (2.2)$$

で求められる。この適合度h_iは、x_1, x_2が与えられたときに結論z_iが得られる度合いを示している。

ところで、図2.1のように、$z_2 = z_3$である場合、MAX演算で統合すると、$h_2 \vee h_3 = h_2$となる。

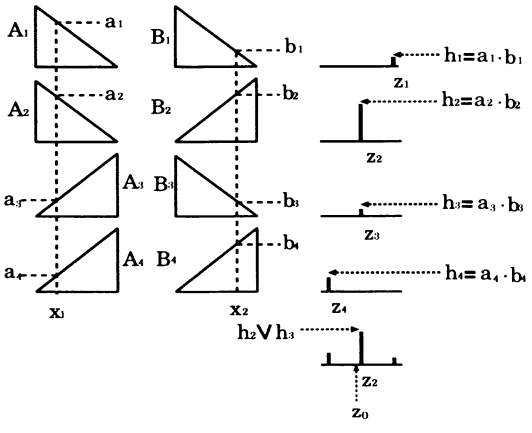


図2.1「代数積-MAX-重心法」の説明図

最終的な結論z_0はz_iを適合度h_iで荷重平均することにより得られる。すなわち、

$$z_0 = \frac{z_1 h_1 + z_2(h_2 \vee h_3) + z_4 h_4}{h_1 + (h_2 \vee h_3) + h_4} \qquad (2.3)$$

なお、代数積-加算-重心法では

$$z_0 = \frac{z_1 h_1 + z_2 h_2 + z_3 h_3 + z_4 h_4}{h_1 + h_2 + h_3 + h_4} \qquad (2.4)$$

となる。

また、本論文で使用した前件部の適合度算出法は以下のようである。

$$
\begin{aligned}
&\text{代数積演算：} && h_i = \mu_{A_i}(x_1)\cdot\mu_{B_i}(x_2)\\
&\text{MIN 演算：} && h_i = \mu_{A_i}(x_1)\wedge\mu_{B_i}(x_2)\\
&\text{算術平均：} && h_i = (\mu_{A_i}(x_1)+\mu_{B_i}(x_2))/2\\
&\text{幾何平均：} && h_i = (\mu_{A_i}(x_1)\cdot\mu_{B_i}(x_2))^{\frac{1}{2}} \qquad (2.5)\\
&\text{ハイブリッド演算：} && h_i = (\mu_{A_i}(x_1)\wedge\mu_{B_i}(x_2))\cdot\\
& && (\mu_{A_i}(x_1)+\mu_{B_i}(x_2))/2
\end{aligned}
$$

本論文ではこの５つの適合度算出法と、結論を統合する際に用いる加算法、MAX 法との組合わせにより計１０通りのファジィ推論法について考察を行った。

３．線形な出力が期待されるファジィ推論規則

線形な出力を期待する場合、‘‘線形’’な出力を期待させるファジィ規則の生成が必要であり、式（3.1）の線形式を基にファジィ規則を作成した。

本論文では入力値および出力値を区間［-１，１］としているので、n 入力の場合、線形式は次のようになる。

$$z = -\frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) \qquad (3.1)$$

この線形式を基に規則の生成を行う。

たとえば、２入力の場合、線形式は式（3.1）より次のようになる。

$$z = -\frac{1}{2}(x_1 + x_2) \qquad (3.2)$$

ファジィ規則の前件部を、各入力ごとに２分割 N、P とし、中心を-１と１とする。このことから、図 3.1,3.2 のように全部で４規則（＝2^2）が得られる。たとえば、１番目のルールの N の中心は-1 であることより、後件部 z は

$$z = -\frac{1}{2}(-1-1) = 1 \qquad (3.3)$$

と与えられる。

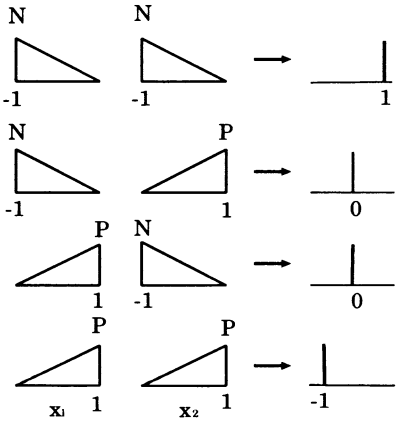


図 3.1 ２入力の場合のファジィ規則

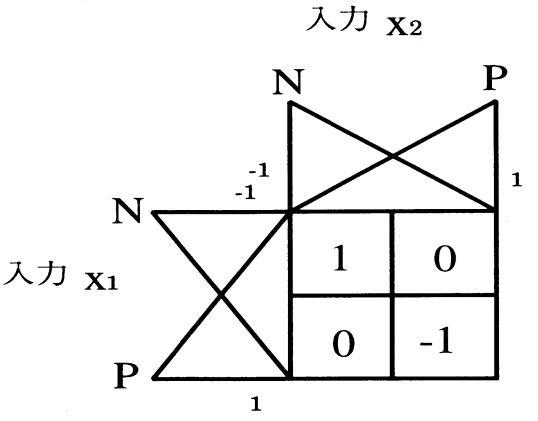


図 3.2 ２入力２分割の場合の規則表

４．非線形性の評価方法

４．１ 平均絶対誤差

式（2.5）の各適合度演算に対して非線形性がどのように変化するかを知るための評価法の１つとして、式(3.1) の線形式から求めた出力値と、線形な出力が期待されるファジィ規則から求めた推論値との平均絶対誤差を求める方法を用いる。平均絶対誤差 E は次のように与えられる。

$$E = \frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d}|\hat{y}_i - y_i| \qquad (4.1)$$

$\hat{y}_i$ ：i 番目の入力に対する線形式からの理想値
y_i ：i 番目の入力に対するファジィ推論値
d ：データ数

入力値の設定：平均絶対誤差を求める上で入力値の設定が重要である。そこで、入力値を定めるために２入力の場合の各適合度演算の下での平均絶対誤差をデータ間隔を変化させて求めた (図 4.1 参照)。ただし、推論法は加算法を用いている。

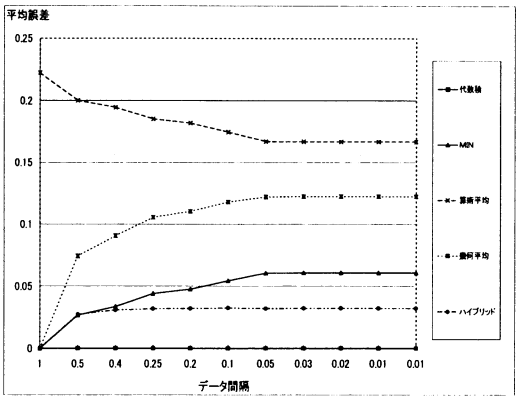


図 4.1 データ間隔を変化させた場合の*-加算法の推論結果

図 4.1 より、加算法を用いた場合、データ間隔 0.05 で各演算において平均絶対誤差が収束していることが分

る。よって多入力となっても良い結果が得られるのではないかと予想される。しかし入力値が-1 から 1 までの 41 点となり、多入力の場合、膨大な計算時間を要するので5入力まで行うことにした。しかし、データ間隔が 0.2 でも 0.05 と大きな差は見受けられないので、-1 から 1 までの 11 点に対し 2 入力～8 入力まで行った。さらに、データ間隔 0.5 についても-1 から 1 までの 5 点について行った。

$$\begin{aligned}&\text{データ間隔 } 0.5: \quad \{-1,-0.5,0,0.5,1\}\\&\text{データ間隔 } 0.2: \quad \{-1,-0.8,\cdots,0.8,1\}\\&\text{データ間隔 } 0.05: \quad \{-1,-0.95,\cdots,0.95,1\}\end{aligned} \tag{4.2}$$

各入力にこれらのデータを用い、すべての組合わせを行うことにより平均絶対誤差を求めた。図 4.2、図 4.3 に結果の一例を示す。(ただし、データ間隔 0.2 である)

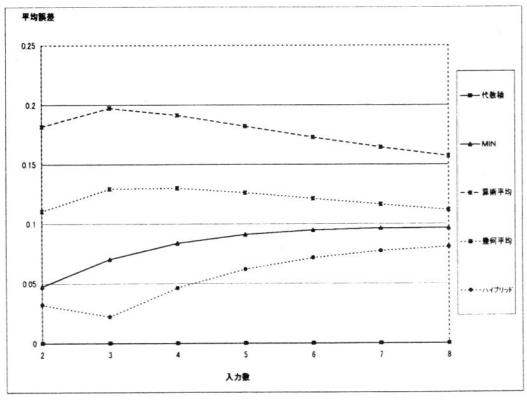


図 4.2 n 入力の場合の*-加算法に対する平均絶対誤差

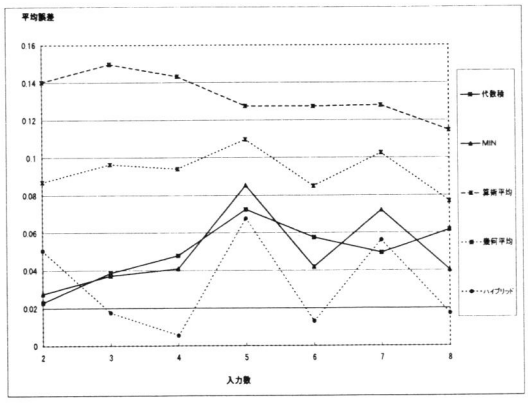


図 4.3 n 入力の場合の*-MAX 法に対する平均絶対誤差

図 4.2 の加算法では、代数積演算で誤差がないことがいえるが、ハイブリッド演算 [2] は多入力となっても MIN 演算よりもよいことが分る。また図 4.3 より、MAX 法においては、ハイブリッド演算は他の適合度演算に比べ最も小さい平均絶対誤差を示し、特に 4 入力の場合に最も小さいことが確認できた。

なお、図 4.3 より、MAX 法を用いると、5 入力の場合では算術平均演算以外、7 入力の場合では代数積演算と算術平均演算以外の各演算において平均絶対誤差が増大している。

4．2 対称面切断法

非線形性の評価方法の他の方法として“対称面切断法”[3] について述べる。たとえば、入力を x_1,x_2 とした場合、その位相面を x_1=x_2 で表される対称な面で切断して図示する方法である。図 4.4 は対称面により A 点と B 点を結ぶ直線で切断される。

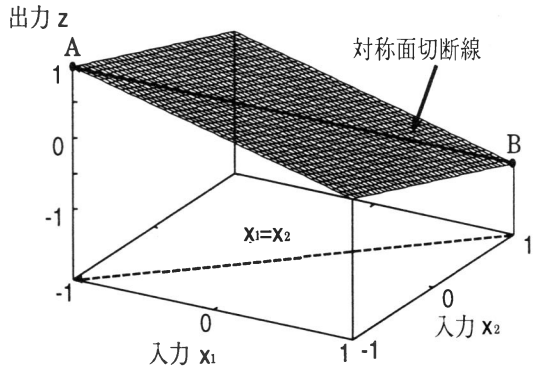


図 4.4 対称面切断法

対称面切断法の利点としては、それぞれの入力の座標軸方向に対する出力の代表的な変化を、均等かつ同時に図示できるだけでなく、任意の n 入力 1 出力のファジィ推論における n+1 次元の位相面を x_1=x_2…=x_n で表される対称面で切断することにより、2 次元の関数として表示できる点である。

図 4.5-図 4.7 に加算法および MAX 法の下での出力例を示す。(ただし、入力点は-1～1 の 0.1 刻みとした)

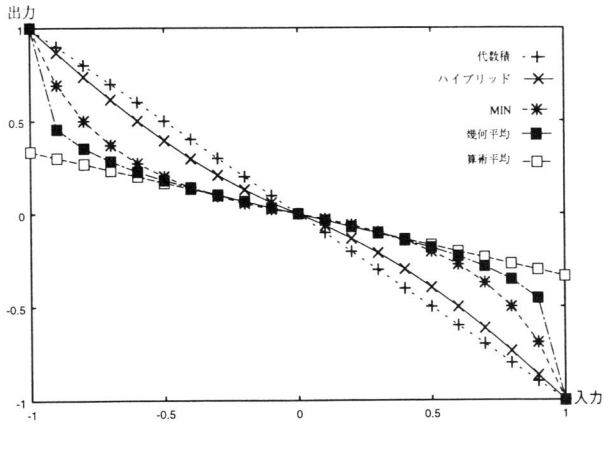


図 4.5 3 入力の場合の＊-加算法

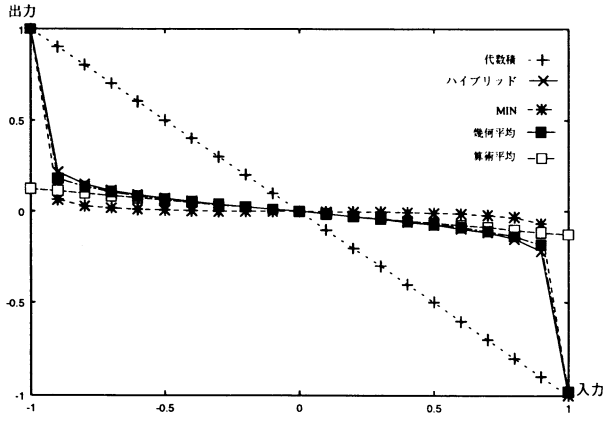


図 4.6 8 入力の場合の∗-加算法

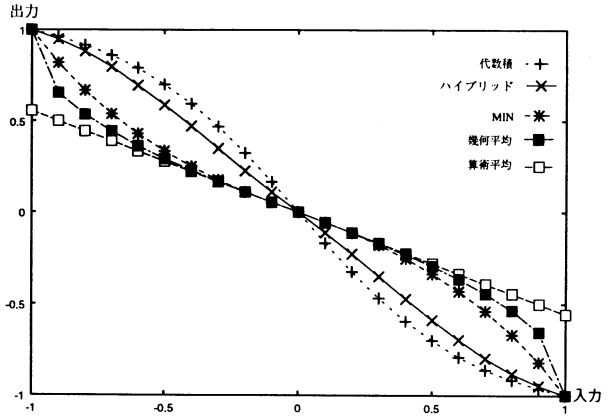


図 4.7 3 入力の場合の∗-MAX 法

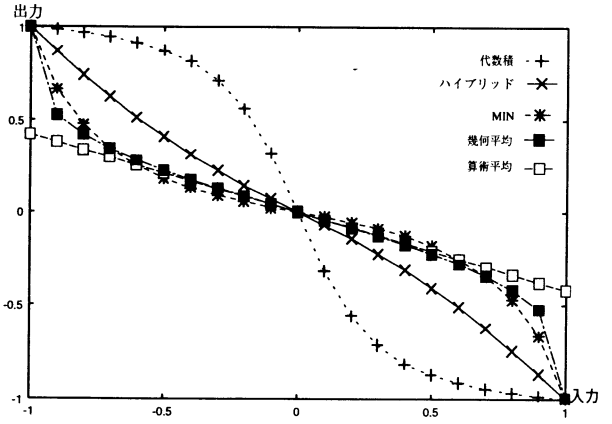


図 4.8 8 入力の場合の∗-MAX 法

図 4.5、4.6 より、∗-加算法において、代数積演算および算術平均演算では対称面切断線は常に線形であるが、算術平均演算では小さい値が生じている。すなわち、入力=-1 のとき、出力=1 とならなくて 1 以下となっている。他の演算においては非線形な結果が得られる。特に、MIN 演算、幾何平均演算では非線形性が増大していることが分る。また多入力になるほど、非線形性が増大していることが確認できる。

一方、図 4.7、4.8 より∗-MAX 法においては、ハイブリッド演算では対称面切断線はほぼ線形であることが確認できる。これは図 4.5、4.6 の代数積-加算法に相当するよい結果であるが、多入力になるにしたがってその非線形性は増す。また算術平均演算において対称面切断線は完全に線形であるが、加算法のときと同様の問題が残る。

5. 結果

本論文では非線形性の評価方法として、平均絶対誤差や対称面切断法を用いた評価方法をとりあげたが、これより次のことが考えられる。ハイブリッド演算は誤差の許容範囲を 0.1 以下とするならばファジィ推論に有効な演算であるといえる。特に、MAX 法では最も有効であるが、5 入力、7 入力では平均絶対誤差が増大するという問題が残る。

以上のことより、入力数によって有効な推論法が異なると考えられるが、代数積-加算-重心法とハイブリッド-MAX-重心法が有効なファジィ推論法であるといえよう。

6. おわりに

今後の課題としては、MAX 法に関して図 4.7 での 5 入力、7 入力に対して平均絶対誤差が増大する理由の解明や、各推論法、特に代数積-加算-重心法、ハイブリッド-MAX-重心法をファジィ制御に適用した場合の比較を行い、実用性を図ることが上げられる。

参考文献

[1] 水本雅晴：ファジィ制御法において max と min の使用は適当か？、第 9 回ファジィシステムシンポジウム、pp.317-320、1993

[2] 有川晴彦、水本雅晴：多入力ファジィ推論における前件部適合度へのハイブリッド演算の提案、第 11 回ファジィシステムシンポジウム、pp.369-370、1995

[3] 有川晴彦、水本雅晴：ファジィ推論出力における期待されない非線形性への一考察、第 12 回ファジィシステムシンポジウム、pp.21-22、1996

[4] 団堅司郎：ファジィ推論出力における非線形性への一考察、大阪電気通信大学卒業論文、1997

[問い合わせ先]
〒 572-8530 寝屋川市初町１８－８
大阪電気通信大学大学院 情報工学専攻
ファジィ工学研究室
松浦優子
Tel: 072-820-4569 Fax: 072-824-0014
E-mail: matsuura@mzlab.osakac.ac.jp

WA2−3

Lagrange補間による補間型ファジィ推論

A Fuzzy Interpolative-Type Reasoning Based on Lagrange's Interpolation

石岩
Yan SHI

九州東海大学応用情報学部
School of Information Science
Kyushu Tokai University

水本雅晴
Masaharu MIZUMOTO

大阪電気通信大学情報工学部
Faculty of Engineering Informatics
Osaka Electro-Communication University

Abstract By means of Lagrange's interpolation technique, we present a new fuzzy reasoning approach in sparse fuzzy rule bases. This fuzzy reasoning approach can guarantee the membership function of an inference consequence to be of triangular-type if all of membership functions of fuzzy rules and an observation are given by triangular-type, in a sparse rule-base fuzzy system, in general. Moreover, the efficiency of the presented method shall be shown by numerical examples.

1 Introduction

To apply some suitable fuzzy reasoning on fuzzy applications have much succeed in recent decade. One can note that all of the conventional fuzzy reasoning methods are almost based on the compact rule bases [1-3]. In these fuzzy reasoning methods the whole input universe of discourse is covered by all the rule bases completely, and when an observation comes, a consequence can be derived by some proper rules of inference. However, if a fuzzy rule base is sparse, conventional fuzzy reasoning methods encounter a difficulty, that is that they are not able to obtain a good inference result or, no rule will be fired when an observation comes to the empty space, so that no consequence is derived. To deal with this problem, Koczy and Hirota have proposed a linear interpolative reasoning [4,5], which given a solution for the problem of sparse fuzzy rule bases. But, it has been pointed that the consequence of inference by the linear interpolative reasoning is sometimes an abnormal fuzzy set, and it is very limited to guarantee the membership function of the consequence to be a convex fuzzy set subject to some special conditions suggested by authors [6,7]. In this paper, by means of the Lagrange's interpolation technique, we present a new fuzzy reasoning method in sparse fuzzy rule bases. This fuzzy reasoning method can guarantee the membership function of the inference consequence to be of triangular-type if all of membership functions of fuzzy rules and an observation are given by triangular-type in which a fuzzy rule base is sparse, in general. Moreover, the efficiency of the presented method shall be illustrated by several numerical examples.

2 Fuzzy Reasoning Problem in Sparse Fuzzy Rule Bases

To cope with the fuzzy reasoning problem in sparse rule bases, first, we describe briefly so-called "*Tomato Classification Problem*" proposed by Mizumoto and Zimmerman [1].

By the generalized modus ponens, we can obtain a proper fuzzy inference consequence as follows:

Rule: If a tomato is red then the tomato is ripe
Observation: This tomato is very red
Consequence: This tomato is very ripe

However, difficulty arise in the following inference:

Rule 1: If a tomato is red then the tomato is ripe
Rule 2: If a tomato is green then the tomato is unripe
Observation: This tomato is yellow
Consequence: ???

What would be the consequence? Intuitively, one would have a consequence, in which the tomato should be half ripe when it is yellow, which can be represented in Figure 1. But the consequence would be nothing by the conventional fuzzy reasoning methods [1-3].

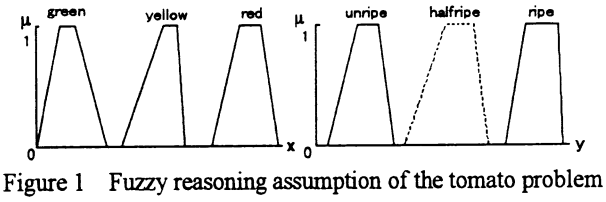


Figure 1 Fuzzy reasoning assumption of the tomato problem

Koczy and Hirota have looked into the above problem and, proposed a linear interpolative fuzzy reasoning for treating fuzzy rule interpolation when the fuzzy rule base is sparse [4,5]. But, it has been pointed that the consequence of inference by the linear interpolative reasoning is sometimes an abnormal fuzzy set, and it is very limited to guarantee the membership function of the consequence to be a convex fuzzy set subject to some special conditions suggested by authors [6,7].

We generally can rewrite the above fuzzy reasoning in the form of "*If...Then...*" fuzzy rule model as follows:

Rule 1: If x is A_1 then y is B_1
Rule 2: If x is A_2 then y is B_2
Observation: If x is A^*
Consequence: y is B^*

where A_1, A_2 and A^* are fuzzy sets on X; B_1, B_2 and B^* are fuzzy sets on Y. And, $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$ are the disjoint fuzzy rules on the universe of discourse $X \times Y$. Let the membership functions of A_1, A_2, B_1, B_2 and an observation A^* be of triangular-type as shown in Figure 2.

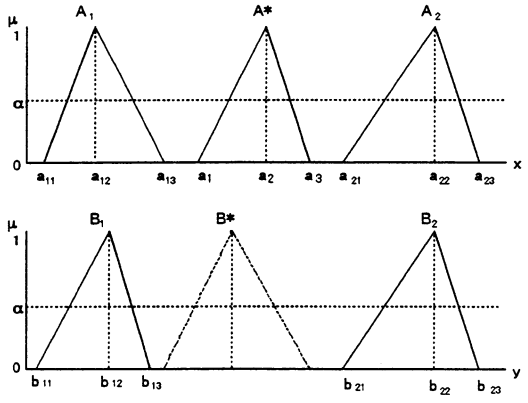


Figure 2 Triangular-type membership functions (I)

where $a_{11} = inf\{A_{1\alpha}\}$, $a_{21} = inf\{A_{2\alpha}\}$, $a_1 = inf\{A^*_\alpha\}$, $a_{13} = sup\{A_{1\alpha}\}$, $a_{23} = sup\{A_{2\alpha}\}$, $a_3 = sup\{A^*_\alpha\}$, $b_{11} = inf\{B_{1\alpha}\}$, $b_{21} = inf\{B_{2\alpha}\}$, $b_{13} = sup\{B_{1\alpha}\}$, $b_{23} = sup\{B_{2\alpha}\}$ at $\alpha = 0$. And $a_{12} = A_{1\alpha}$, $a_{22} = A_{2\alpha}$, $a_2 = A^*_\alpha$, $b_{12} = B_{1\alpha}$, $b_{22} = B_{2\alpha}$ at $\alpha = 1$.

We consider how to obtain B^*, and make its membership function to be a triangular-type as the same as B_1 and B_2. Using the interval of confidence at level α, fuzzy sets A_1, A_2, B_1, B_2 and A^* can be expressed as the following, respectively:

$$\begin{aligned} A_{i\alpha} &= [inf\{A_{i\alpha}\}, sup\{A_{i\alpha}\}] \\ &= [(a_{i2} - a_{i1})\alpha + a_{i1}, -(a_{i3} - a_{i2})\alpha + a_{i3}] \\ &= [\alpha a_{i2} + (1-\alpha)a_{i1}, \ \alpha a_{i2} + (1-\alpha)a_{i3}] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} B_{i\alpha} &= [inf\{B_{i\alpha}\}, sup\{B_{i\alpha}\}] \\ &= [(b_{i2} - b_{i1})\alpha + b_{i1}, -(b_{i3} - b_{i2})\alpha + b_{i3}] \\ &= [\alpha b_{i2} + (1-\alpha)b_{i1}, \ \alpha b_{i2} + (1-\alpha)b_{i3}] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A^*_\alpha &= [inf\{A^*_\alpha\}, sup\{A^*_\alpha\}] \\ &= [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, -(a_3 - a_2)\alpha + a_3] \\ &= [\alpha a_2 + (1-\alpha)a_1, \ \alpha a_2 + (1-\alpha)a_3] \end{aligned} \quad (3)$$

where, $i = 1, 2$, $\alpha \in [0,1]$.

To make B^* to be of triangular-type, here, there should be a form of interval of confidence at level α as

$$\begin{aligned} B^*_\alpha &= [inf\{B^*_\alpha\}, sup\{B^*_\alpha\}] \\ &= [(b_2 - b_1)\alpha + b_1, -(b_3 - b_2)\alpha + b_3] \\ &= [\alpha b_2 + (1-\alpha)b_1, \ \alpha b_2 + (1-\alpha)b_3] \end{aligned} \quad (4)$$

which satisfies conditions if $A^* = A_i$, then $B^* = B_i$ (i=1,2). That is, $b_1 = b_{i1}$, $b_2 = b_{i2}$, $b_3 = b_{i3}$ when $a_1 = a_{i1}$, $a_2 = a_{i2}$, $a_3 = a_{i3}$ (i=1,2). In other words, when α ($\in [0,1]$) is fixed, it should be noted that B^*_α is a mapping from A^*_α about variables a_1, a_2 and a_3 with the above conditions.

If we write such a mapping matrix $\boldsymbol{F}$, then

$$B^*_\alpha = \boldsymbol{F}(A^*_\alpha) \quad (5)$$

Equivalently,

$$\begin{aligned} &[inf\{B^*_\alpha\}, sup\{B^*_\alpha\}] = \boldsymbol{F}[inf\{A^*_\alpha\}, sup\{A^*_\alpha\}] \\ &= [\boldsymbol{F}(inf\{A^*_\alpha\}), \boldsymbol{F}(sup\{A^*_\alpha\})] \end{aligned} \quad (6)$$

Thus, we have the following two equations:

$$inf\{B^*_\alpha\} = \boldsymbol{F}(inf\{A^*_\alpha\}) \quad (7)$$

$$sup\{B^*_\alpha\} = \boldsymbol{F}(sup\{A^*_\alpha\}) \quad (8)$$

that is,

$$\alpha b_2 + (1-\alpha)b_1 = \boldsymbol{F}(\alpha a_2 + (1-\alpha)a_1) \quad (9)$$

$$\alpha b_2 + (1-\alpha)b_3 = \boldsymbol{F}(\alpha a_2 + (1-\alpha)a_3) \quad (10)$$

Due to arbitrariness of α ($\in [0,1]$), if we take α as 0 and 1 in (9) and (10) respectively, then we have the following result:

$$b_i = \boldsymbol{F}(a_i) \qquad (i=1,2,3) \quad (11)$$

which meets modus ponens [1].

Based on the above analysis, it hits us to search a mapping $\boldsymbol{F}$ which should satisfy (11) subject to the conditions of (1) - (3). If such a mapping $\boldsymbol{F}$ exists, then by (4) one can see that it can guarantee B^* is a triangular-type when A_1, A_2, B_1, B_2 and an observation A^* are defined by triangular-type membership functions, in general. In the next section, by means of Lagrange's interpolation method, we shall give a form of the mapping $\boldsymbol{F}$ above mentioned.

3 Fuzzy Lagrange's Interpolation Reasoning in the Case of one Dimension

3.1 Fuzzy Lagrange's Interpolation with two Rules

Based on previous discussions, for arbitrary $\alpha \in [0,1]$, by (11) the mapping $\boldsymbol{F}$ should satisfies the following condition:

$$\boldsymbol{F}(a_{ij}) = b_{ij} \qquad (i=1,2; j=1,2,3) \quad (12)$$

If three second-order **Vandermonde** determinants made of parameters of $A_{1\alpha}$ and $A_{2\alpha}$ satisfy

$$\begin{vmatrix} 1 & a_{1j} \\ 1 & a_{2j} \end{vmatrix} = (a_{2j} - a_{1j}) \neq 0, \qquad (j=1,2,3) \quad (13)$$

then we can construct a mapping $\boldsymbol{F}: A^* \mid \rightarrow B^*$ as

$$b_j = F(a_j) = \frac{(a_j - a_{2j})}{(a_{1j} - a_{2j})} b_{1j} + \frac{(a_j - a_{1j})}{(a_{2j} - a_{1j})} b_{2j} \quad (14)$$

such that

$$B^*_\alpha = [inf\{B^*_\alpha\}, sup\{B^*_\alpha\}] \tag{15}$$

namely,

$$\begin{aligned} inf\{B^*_\alpha\} &= (b_2 - b_1)\alpha + b_1 \\ &= [\frac{(a_2 - a_{22})}{(a_{12} - a_{22})} b_{12} + \frac{(a_2 - a_{12})}{(a_{22} - a_{12})} b_{22} \\ &- \frac{(a_1 - a_{21})}{(a_{11} - a_{21})} b_{11} \frac{(a_1 - a_{11})}{(a_{21} - a_{11})} b_{21}]\alpha \\ &+ \frac{(a_1 - a_{21})}{(a_{11} - a_{21})} b_{11} + \frac{(a_1 - a_{11})}{(a_{21} - a_{11})} b_{21} \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} sup\{B^*_\alpha\} &= -(b_3 - b_2)\alpha + b_3 \\ &= -[\frac{(a_3 - a_{23})}{(a_{13} - a_{23})} b_{13} + \frac{(a_3 - a_{13})}{(a_{23} - a_{13})} b_{23} \\ &- \frac{(a_2 - a_{22})}{(a_{12} - a_{22})} b_{12} \frac{(a_2 - a_{12})}{(a_{22} - a_{12})} b_{22}]\alpha \\ &+ \frac{(a_3 - a_{23})}{(a_{13} - a_{23})} b_{13} + \frac{(a_3 - a_{13})}{(a_{23} - a_{13})} b_{23} \end{aligned} \tag{17}$$

It is obviously from (14) that the consequence B^*_α satisfies $B^* = B_i$ when $A^* = A_i$ (i=1,2), and its membership function is also of triangular-type.

As an example, Figure 3 illustrates an interpolation result by using the proposed interpolation reasoning method, where $a_{11} = 0$, $a_{12} = 3$, $a_{13} = 4$; $a_{21} = 9$, $a_{22} = 13$, $a_{23} = 14$; $a_1 = 5$, $a_2 = 7$, $a_3 = 8$; $b_{11} = 1$, $b_{12} = 3$, $b_{13} = 4$; $b_{21} = 10$, $b_{22} = 13$, $b_{23} = 14$.

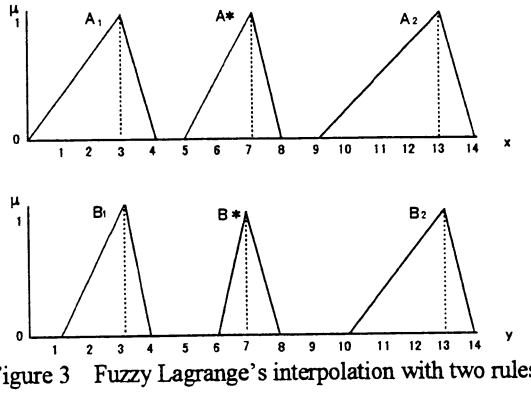


Figure 3 Fuzzy Lagrange's interpolation with two rules

3.2 Fuzzy Lagrange's Interpolation with *n* Rules

Generally, in the case of when a fuzzy inference system has n rules we have the following fuzzy inference form:

Rule 1: If x is A_1 then y is B_1
.....
Rule n: If x is A_n then y is B_n
Observation: If x is A^*
Consequence: y is B^*

where A_i (i=1,2,...,n) and A^* are disjoint fuzzy sets on X; B_i (i=1,2,...,n) and B^* are fuzzy sets on Y, respectively.

Let the membership functions of A_i, B_i (i=1,2,...,n) and an observation A^* be all defined by triangular-type as shown in Figure 4.

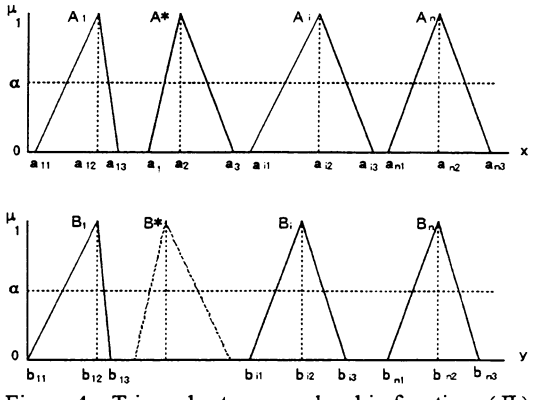


Figure 4 Triangular-type membership functions (II)

We consider how to obtain a consequence B^* and make its membership function to be of triangular-type as the same as B_i (i=1,2,...,n).

First, triangular-type membership functions of fuzzy sets A_i, B_i (i=1,2,...,n) and A^* can be expressed in the form of the interval of confidence at α level as follows:

$$A_{i\alpha} = [(a_{i2} - a_{i1})\alpha + a_{i1}, -(a_{i3} - a_{i2})\alpha + a_{i3}] \tag{18}$$

$$B_{i\alpha} = [(b_{i2} - b_{i1})\alpha + b_{i1}, -(b_{i3} - b_{i2})\alpha + b_{i3}] \tag{19}$$

$$A^*_\alpha = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, -(a_3 - a_2)\alpha + a_3] \tag{20}$$

where $\alpha \in [0,1]$.

Then, if third n-order **Vandermonde** determinants made of parameters of $A_{i\alpha} = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3})$ (i=1,2,...,n) satisfy

$$\begin{vmatrix} 1 & a_{1j} & a_{1j}^2 & \cdots & a_{1j}^{n-1} \\ 1 & a_{2j} & a_{2j}^2 & \cdots & a_{2j}^{n-1} \\ & \cdots\cdots & & & \\ 1 & a_{nj} & a_{nj}^2 & \cdots & a_{nj}^{n-1} \end{vmatrix} = \prod_{h>i} (a_{hj} - a_{ij}) \neq 0 \quad (j=1,2,\ldots,n) \tag{21}$$

then we can define a n-order polynomial expression mapping $\boldsymbol{F}: A^* \mid \rightarrow B^*$ as

$$b_j = F(a_j) = \sum_{i=1}^{n} \prod_{h \neq i}^{n} \frac{(a_j - a_{hj})}{(a_{ij} - a_{hj})} b_{ij} \quad (j=1,2,\ldots,n) \tag{22}$$

Obviously, it can be easy proved that the definition in (22) satisfies that if $a_j = a_{ij}$, then $b_j = b_{ij}$ (j=1,2,3; i=1,2,...,n) subject to the conditions in (18) - (20). That is to say, for arbitrary $\alpha \in [0,1]$, if $A^*_\alpha = A_{i\alpha}$, then $B^*_\alpha = B_{i\alpha}$ (i=1,2,...,n). So that, we have a polynomial expression interpolation formula, which is named a Fuzzy Lagrange's Interpolation as follows:

$$B^*_\alpha = [inf\{B^*_\alpha\}, sup\{B^*_\alpha\}] = \boldsymbol{F}(A^*_\alpha) \tag{23}$$

$$inf\{B^*_\alpha\} = -(b_2 - b_1)\alpha + b_1$$
$$-[\sum_{i=1}^{n}\prod_{h\neq i}^{n}\frac{(a_2 - a_{h2})}{(a_{i2} - a_{h2})}b_{i2} - \sum_{i=1}^{n}\prod_{h\neq i}^{n}\frac{(a_1 - a_{h1})}{(a_{i1} - a_{h1})}b_{i1}]\alpha$$
$$+\sum_{i=1}^{n}\prod_{h\neq i}^{n}\frac{(a_1 - a_{h1})}{(a_{i1} - a_{h1})}b_{i1} \quad (24)$$

$$sup\{B^*_\alpha\} = -(b_3 - b_2)\alpha + b_3$$
$$= -[\sum_{i=1}^{n}\prod_{h\neq i}^{n}\frac{(a_3 - a_{h3})}{(a_{i3} - a_{h3})}b_{i3} - \sum_{i=1}^{n}\prod_{h\neq i}^{n}\frac{(a_2 - a_{h2})}{(a_{i2} - a_{h2})}b_{i2}]\alpha$$
$$+\sum_{i=1}^{n}\prod_{h\neq i}^{n}\frac{(a_3 - a_{h3})}{(a_{i3} - a_{h3})}b_{i3} \quad (25)$$

In (23), one can see that B^*_α is of triangular-type, and its coefficients of one-order term (about α) in the left side is two n-order polynomial expressions about variables a_1 and a_2, respectively, and its constant term is also a n-order polynomial expression about variable a_1. Similarly, its coefficient of one-order term (about α) in the right side is two n-order polynomial expressions about variables a_2 and a_3, respectively, and its constant term is also a n-order polynomial expression about variable a_3. If A_i, B_i, and A^* are all given in the form of triangular-type membership functions with the conditions in (18) - (20), then according to (23), we can obtain a function expression of B^*_α, directly.

In the below, we give an illustration to show the above Fuzzy Lagrange's Interpolation method, which there are five rules in the fuzzy inference system.

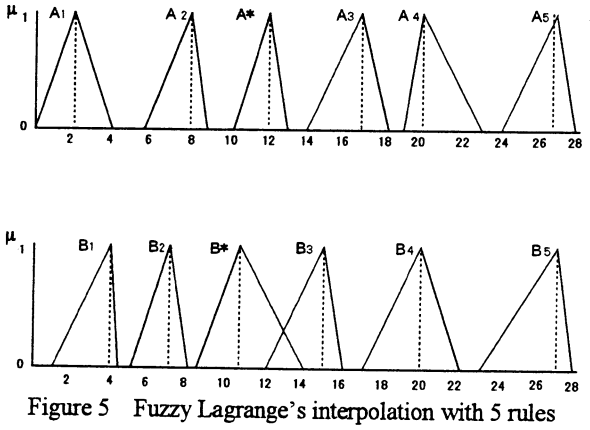


Figure 5 Fuzzy Lagrange's interpolation with 5 rules

In Figure 5, the parameters of fuzzy rules are given as $a_{11} = 0$, $a_{12} = 2$, $a_{13} = 4$, $a_{21} = 5.6$, $a_{22} = 8$, $a_{23} = 8.8$, $a_{31} = 14$, $a_{32} = 16.8$, $a_{33} = 18$, $a_{41} = 19$, $a_{42} = 20$, $a_{43} = 23$, $a_{51} = 24$, $a_{52} = 26.8$, $a_{53} = 28$, $a_1 = 10$, $a_2 = 12$, $a_3 = 13$; $b_{11} = 1$, $b_{12} = 4$, $b_{13} = 4.4$, $b_{21} = 5$, $b_{22} = 7$, $b_{23} = 8$, $b_{31} = 12$, $b_{32} = 15$, $b_{33} = 16$, $b_{41} = 17$, $b_{42} = 20$, $b_{43} = 22$, $b_{51} = 23$, $b_{52} = 27$, $b_{53} = 28$.

According to (23) - (25), we obtain an inference consequence B^* as following

$$B^*_\alpha = (b_1, b_2, b_3) = (8.5, 10.6, 14)$$
$$= [(b_2 - b_1)\alpha + b_1, -(b_3 - b_2)\alpha + b_3]$$
$$= [2.1\alpha + 8.5, -3.4\alpha + 14]$$

where $\alpha \in [0,1]$.

4 Conclusions

As a kind of fuzzy reasoning method in sparse rule bases, we have presented so-called the fuzzy Lagrange's interpolation method. By means of the method, we can guarantee that in sparse fuzzy rule bases, if the membership functions of all rules and an observation are given in form of triangular-type, then the membership function of the consequence of inference will be also of triangular-type, which show the fuzzy inference to be more intuitive. As further researches, it is important to give a general form of the fuzzy Lagrange's interpolation method, and guarantee that if fuzzy rules A_i => B_i (i=1,2,...,n) and an observation A^* are defined by normal "convex" fuzzy sets, the interpolated conclusion will be also normal "convex" fuzzy set. Also, it is expected to apply the presented the fuzzy reasoning approach to real fuzzy applications, in the case of the inference evidences are not enough.

References

[1] M. Mizumoto and H.J. Zimmermann, Comparison of fuzzy reasoning methods, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.8, 253-283, 1982.

[2] M. Mizumoto, Fuzzy reasoning, *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems* (in Japanese), Vol.4, 256-264, 1992.

[3] M. Mizumoto, Fuzzy reasoning, *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems* (in Japanese), Vol.4, 35-46, 1992.

[4] L.T. Koczy and K. Hirota, Interpolative reasoning with insufficient evidence in sparse fuzzy rules bases, *Information Sciences*, Vol.71, 169-201, 1993.

[5] L.T. Koczy and K. Hirota, Approximate reasoning by linear rule interpolation and general approximation, *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol.9, 197-225, 1993.

[6] Y. Shi, M. Mizumoto and Z.Q. Wu, Reasoning conditions on Koczy's interpolative reasoning method in sparse fuzzy rule bases, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.75, 63-71, 1995.

[7] Y. Shi and M. Mizumoto, Reasoning conditions on Kóczy's interpolative reasoning method in sparse fuzzy rule bases. Part II, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.87, 47-56, 1997.

[問い合わせ先]
〒862-8652 熊本市渡鹿 9-1-1
九州東海大学応用情報学部情報システム学科
石 岩 (Yan SHI)
Tel: 096-386-2666 (直通)
Fax: 096-381-7956 (事務課)
E-mail: shi@ktmail.ktokai-u.ac.jp

WA3−1

分割層を用いたファジィ推論モデルの構築

Generating Method of Fuzzy Inference Model Using Division Layer

福元 伸也　宮島 廣美　長澤 庸二

Shinya Fukumoto　Hiromi Miyajima　Yoji Nagasawa

鹿児島大学 工学部

Faculty of Engineering, Kagoshima University.

Abstract : To acquire suitable fuzzy reasoning rules is important in the fuzzy modeling. It is difficult to acquire suitable fuzzy reasoning rule, and various research has performed to get high accuracy model with generalization ability. In the present study, we introduce a philosophy of the distributed fuzzy rule, furthermore, we perform reasoning using fuzzy model that has divided layer each fuzzy neural network. We examine the modeling with less the number of divided layers using LVQ(Learning Vector Quantization) to determine the number of the divided layer.

1 はじめに

近年ファジィ推論ルールを自動的に作成するアプローチが数々行われてきた．推論モデルの構築には，学習用データを用いてモデルのパラメータを調整していく．このパラメータの個数，すなわちファジィでのルールの個数を増やすことにより，学習データに対する推論精度を高めることができる．この推論モデルに対し，学習に用いていない未学習のデータを与えると未学習のデータに対しては良い精度を示さないというトレードオフの関係がある．この問題を解決するために，複数のファジィ推論モデルを組み合わせた学習法と言える分割層を用いた推論モデルが提案されている [1, 2]．ルールの分割数の多い少ないは，ファジィルールが十分に学習できるかどうかに関わってき，そのためファジィ分割をいかに適切に行うかが重要になる．分割数が少なければファジィルールを十分学習でき，分割数を多くすると複雑な非線形関数の形状を持つ学習データに対しても，より高い推論精度を示すことが出来るが，一方学習データの近似に対してのみ敏感になってしまい，モデルの汎化能力が低下する．本研究では，モデルの汎化能力の低下を抑えるためにファジィ推論モデルを分割して与え，分割層の数の決め方に LVQ(Learning Vector Quantization) を用いた手法を提案し検討する．

2 分割層で用いる推論モデル

この章では，分割層で用いるファジィ推論モデル [3] について説明する．入力データおよび教師データを $(x_1, \cdots, x_q, y)$ とする．ここで教師データは単一出力とする．すると推論ルールは，次式のように表される．ただし，ルール番号 i を $i = 1, \cdots, n$ とする．

$$R_i : \ if\ x_1\ is\ M_{i1}\ and\ \cdots\ and\ x_q\ is\ M_{iq}\ then\ y\ is\ w_i \quad (1)$$

ここで M_{ij}は前件部のメンバーシップ関数を表し，$M_{ij}(x_j)$ は x_jにおける適合度である．また，w_iは後件部の実数値を表す．メンバシップ関数の形状を二等辺三角形とし，三角形の頂点の座標を c_{ij}，底辺の幅を b_{ij} とすると，$M_{ij}(x_j)$ は次式で表される．

$$M_{ij}(x_j) = \begin{cases} 1 - \frac{2 \cdot |x_j - c_{ij}|}{b_{ij}} & \left(c_{ij} - \frac{b_{ij}}{2} < x_j < c_{ij} + \frac{b_{ij}}{2}\right) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

各ルールに対する適合度 μ_i は次式のようにメンバシップ関数の適合度の積で表される．

$$\mu_i = \prod_{j=1}^{q} M_{ij}(x_j) \quad (3)$$

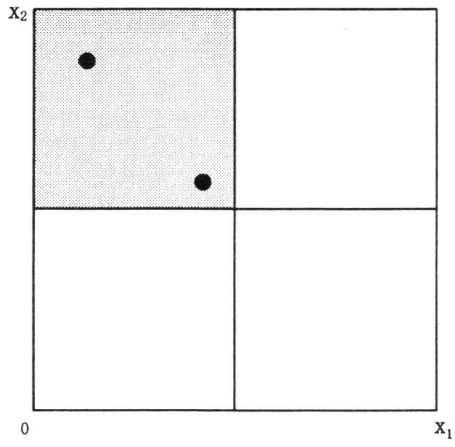
最終的な推論出力 y^*は，次式のような重み付き平均として算出される．

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_i} \quad (4)$$

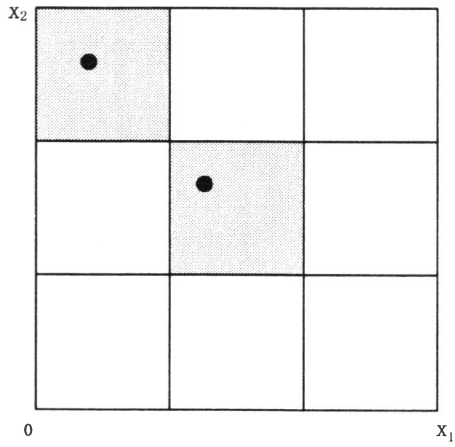
パラメータのチューニングは，最急降下法を用いて評価関数の値 (2 乗誤差) が小さくなるように各パラメータを調整する．

3 LVQ を用いた分割層数の決定

ファジィ分割層の個数は多くても少なくても適切なファジィルールを構築することはできない．そこで，分



(a) 分割層の数：2個



(b) 分割層の数：3個

図1： 2変数の場合のファジィ分割領域と参照ベクトルの例（●は参照ベクトル）

割層の個数が多くなりすぎないように，ここではLVQを用いて学習データの分布を考慮したファジィルールの設定を試みる．分割層を用いたファジィモデルでは，各層ごとに2章で述べた手法を用いて推論を行う．分割層では，各変数におけるメンバシップ関数の個数を2個 ($c_{0j}=0,\ c_{1j}=1.0$) からスタートさせ，次の分割層でメンバシップ関数の個数を1つ増やす．何番目の分割層まで増やすか，すなわち各変数におけるメンバシップ関数の個数を何個まで増やすかは，次に述べる方法を用いて決定する．

まず入力空間においてクラスタリングする個数だけ参照ベクトルを配置する．次にLVQを用いて学習を行う．例えば，2変数x_1x_2の2クラス分類問題では，2個の参照ベクトルを配置する (図1)．学習後，この参照ベクトルがファジィ分割された領域に対し，複数個含まれる場合 (図a) には，変数に対するメンバシップ関数の個数を1増やす．ファジィ分割された領域に含まれる参照ベクトルの数が1つ以下になるまで (図b)，この操作を繰り返す．分割層を用いた場合の推論出力は，各分割層で得られた推論結果 ($y_2^*, y_3^* \cdots, y_L^*$： L は分割層の数) の平均を推論結果とし，次式により算出する．

$$y_A^* = \frac{1}{L-1}\sum_{i=2}^{L} y_i^* \qquad (5)$$

4 数値シミュレーション

提案手法の検証のため，2次元空間において3つのクラスに分類する問題を行った．それぞれのクラスをA,B,Cとすると，クラスAは中心$(0.12, 0.88)$，クラスBは中心$(0.43, 0.57)$，クラスCは$(0.59, 0.41)$を中心とし，それぞれのクラスが半径$r=0.06$の円内にデータが分布するように学習データを配置した．また，データはそれぞれ50個を準備した．提案手法を用いて分割層の数を決定すると4個になった．そこで，それより1少ない3と4の場合で判別できたデータの個数を比較した．結果を表1に示す．

表 1: 判別結果

分割層の数	学習データで判別出来なかったデータ数
3	2
4	0

5 まとめ

本研究では，分割層を用いたファジィ推論の分割層の数の決定にLVQを用いた手法を提案した．実験により，この手法により分割層の数を決定できることがわかった．今回の実験では，単純な数値シミュレーションしか出来なかったので，今後さらに別の問題について実験を行う予定である．

参考文献

[1] 鄒, 亀井, 井上："ファジィ・ニューラルネットワークによる分散型簡略化ファジィルールの自動生成"，日本ファジィ学会誌，vol.11, no.6, pp.1119-1127(1999).

[2] 石渕, 野崎, 田中："分散型ファジィルールを用いたパターン認識"，システム制御情報学会論文誌，vol.4, no.12, pp.517-526(1991).

[3] 市橋, 渡辺："簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御"，日本ファジィ学会誌，vol.2, no.3, pp.429-437(1990).

問い合わせ先：
〒890-0065 鹿児島市郡元1－21－40
鹿児島大学 工学部 情報工学科
福元 伸也
TEL 099－285－8453
FAX 099－285－8464
E-mail fukumoto@ics.kagoshima-u.ac.jp

WA3−2

気象データを用いた売上予測ファジィ推論モデル

A Study on the sales forecasting fuzzy reasoning model by using meterological data

古殿　幸雄
Yukio Kodono

福山平成大学
Fukuyama Heisei University

Abstract: A consumer behavior model is proposed to understand the action that the consumer buys the commodity and receives services. In this consumer behavior model, the purchase behavior is examined the process that the consumer buys the goods to be stimulated to the marketing of the enterprise, the promotion, the advertisement and so on. In this paper, the marketing research is executed to analyze the factor which influences sales of every day. And the obtained data are applied to the analysis of variance. As a result, meteorological elements which influence the consumer behavior will be clarified. And the sales forecasting fuzzy reasoning model by using meterological data will be proposed.

1．まえがき

本研究は、日々の売上高を予測するファジィ推論モデル構築のために、日々の売上高や来客数に影響を与える気象要因について検討している。気象要因を取り上げたのは、柳原によって、食品の売れ行き、スーパーマーケット、ファミリーレストランの客足など人間活動に対する気象の影響の解析および地上気温と 500mb 高度偏差との関係の解析が報告され[1]、また、著者らによって、ファーストフード店の売上が、気温に影響されていることが報告されている[2],[3]からである。

そこで、あるファミリーレストランの日々の売上高や来客数などを調査し、同時に天候や気温などの気象データを調査した。そして、これらの調査データに対して、分散分析を適用することで、日々の売上高や来客数と気象要因との関係についての解析を試みる[4],[5]。このとき、ファジィ推論による消費者の購買行動モデルの構築を考慮して、気象データをファジィ推論モデルを構築しやすいように、だいたいの天候やだいたいの気温などで層別して解析を行う。例えば、実際には晴時々曇や 26.7 ℃などの気象データに対して、だいたい晴やだいたい 27 ℃などのように層別を行い、このようなだいたいの天候やだいたいの気温を用いることで、解析された結果からファジィ推論モデルを構築することを考えている。

2．データ調査

本研究では、日々の売上高の予測モデルとして、ファジィ推論モデルを考えている。このファジィ推論では、おおまかな分類をすることにより、基本的なルールを作成し、このルールから、実際のデータがおおまかな分類データに完全に合致しなくとも、推論が可能で、推論結果から非ファジィ化により結論を導くことができる。例えば、天候が売上高に影響を与えるのであれば、晴れた日は、売上が伸びるとか、雨の日は、売上が下がるなどの傾向が見つかれば、次のようなファジィ推論ルールを作成することができる。

ルール１：IF 天候は晴 THEN 売上は上がる
ルール２：IF 天候は雨 THEN 売上は下がる etc

そして、実際の天候として、晴一時雨などのデータが入力され、ルール１とルール２などの適合度から、売り上げに関する出力を推論する。

そこで、１日の売上高や来客数とその日の気象データを調査することにした。このとき得られたデータの一部を表１、２に示す。

表１　営業管理データ

日付	曜日	売上高	客数	客単価
1	火	276434	356	777
2	水	285900	368	777
3	木	305813	380	805
4	金	286640	367	781
5	土	490646	640	767
6	日	534834	641	834
7	月	230461	294	784

表２　気象データ

日付	気温			天気概況
	平均	最高	最低	8:30 ～ 17:00
1	24.9	28.9	22.3	曇一時雨
2	25.9	30.9	20.4	晴
3	25.4	30.3	20.0	晴一時曇
4	25.2	30.2	21.2	薄曇後晴
5	24.9	29.4	20.3	曇
6	23.7	27.0	21.5	雨後曇
7	25.0	29.3	21.8	曇後晴

3．分散分析

分散分析は、すべてのデータの変動（平方和）を、偶然原因による誤差変動（残差平方和）の部分と条件が異なることによる変動（処理平方和）の部分に分解することで、統計的な判定を下す手法である。ここでは、分散分析によって、日々の売上高に影響を与える要因について検討する。

表１のデータから、平日と土曜日、日曜日、祝日とでは明らかに売上高に違いが見られた。そこで、まず、平日（月～金曜日）間で売上高に差が見られるかどうかを分散分析によって検討する。

このときの分散分析表を表３に示す。分散比がＦ値よりも小さく、平日の曜日間で売上高に差がないと考えられる。

表３　売上高－平日の分散分析表

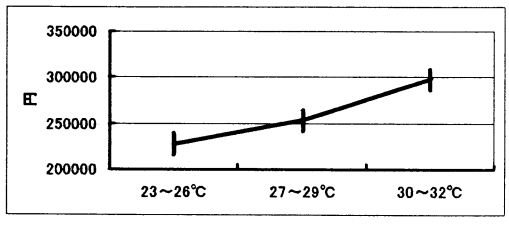
要因	平方和	自由度	分　散	分散比	F(0.05)
曜日	1.72E+09	4	4.32E+08	0.2750	3.0069
残差	2.51E+10	16	1.57E+09	---------	---------
計	2.68E+10	20	----------	---------	---------

平日の曜日間で、売上高に差がないという結果が得られたので、次に平日の売上高について検討を行う。平日の最高気温は、23.8 ℃から 32.2 ℃まで分布している。これを、23.8 ～ 26.9 ℃までを 23 ～ 26 ℃のグループ、27.0 ～ 29.9 ℃までを 27 ～ 29 ℃のグループ、30.0 ～ 32.2 ℃までを 30 ～ 32 ℃のグループとして、３つのグループに分類する。したがって、23 ～ 26 ℃、27 ～ 29 ℃、30 ～ 32 ℃の３水準で分散分析を試みる。

このときの分散分析表を表４に示す。分散比がＦ値よりも大きく、気温グループ間で、売上高に差があると考えられる。また、このときの売上高の推定値を図１に示す。

表４　売上高－最高気温３グループの分散分析表

要因	平方和	自由度	分　散	分散比	F(0.05)
気温	1.58E+10	2	7.91E+09	12.895	3.5546
残差	1.10E+09	18	6.13E+08	---------	---------
計	2.69E+10	20	----------	---------	---------



最小有意差：11635.07

図１　売上高の推定値

表２の気象データにおける天気概況は、曇一時雨、晴一時曇、薄曇後晴など、分類するには細かすぎる。そこで、これらを晴、曇、雨の３種類のいずれかに分類し、この３水準間で分散分析を試みる。なお、天気概況が、曇一時雨のように、曇に重点がおかれていれば曇にし、薄曇後晴のように晴に重点がおかれていれば晴というように分類した。

このときの分散分析表を表５に示す。分散比がＦ値よりも小さく、平日の天候間で売上高に差がないと考えられる。

表５　売上高－天候の分散分析表

要因	平方和	自由度	分　散	分散比	F(0.05)
天候	5.41E+09	2	2.71E+09	2.2695	3.5546
残差	2.15E+10	18	1.19E+09	---------	---------
計	2.69E+10	20	----------	---------	---------

したがって、３水準の最高気温のグループ間で、売上高に差があり、同じ３水準の天候によって、売上高に差がないことから、気温に関してもう少し検討しておきたい。１日の気温の変化を考えれば、それは、最高気温と最低気温との差によって表すことができる。この気温差が大きい場合と小さい場合とで、売上高に変化は見られないだろうか。そこで、気温差による売上高に関する分散分析を試みる。

表２のデータより１ヶ月間の気温差は、３℃～12 ℃であった。これより、先の最高気温の分類と同様にして、３～６℃未満、６～９℃未満、９℃以上の３水準で分散分析を試みる。

このときの分散分析表を表６に示す。分散比がＦ値よりも大きく、平日の気温差間で売上高に差があると考えられる。

表６　売上高－気温差の分散分析表

要　因	平方和	自由度	分　散	分散比	F(0.05)
気温差	8.5E+09	2	4.3E+09	4.1674	3.5546
残　差	1.8E+10	18	1.0E+09	---------	--------
計	2.7E+10	20	----------	---------	--------

なお、同様な分散分析を、客数、客単価についても行った。これらは、売上高と同様な結果となっているが、客単価については、気温差が小さいほど多く、気温差が中位で少なくなり、気温差が大きいと普通となった。

４．売上予測ファジィ推論モデル

以上のことより、次のようなファジィ推論モデルを構築することができそうである。

ファジィ推論モデル１

①平日、土曜日、日曜日・祝日で場合分けをし、
②最高気温から売上を推論

IF　最高気温が低い　THEN　売上は少ない
IF　最高気温が中位　THEN　売上は普通
IF　最高気温が高い　THEN　売上は多い

ファジィ推論モデル２

①平日、土曜日、日曜日・祝日で場合分けをし、
②最高気温から客数を推論

IF　最高気温が低い　THEN　客数は少ない
IF　最高気温が中位　THEN　客数は普通
IF　最高気温が高い　THEN　客数は多い
③気温差から客単価を推論
IF １日の気温差が小さい THEN 客単価は多い
IF １日の気温差が中位 THEN　客単価は少ない
IF １日の気温差が大きい THEN 客単価は普通
④客数×客単価＝売上として予測する。

実際に構築されたファジィ推論モデルを用いた売上予測および実データとの比較については、発表時に譲りたい。

参考文献

[1] 柳原一夫：ファジィ測度による多変量解析とその気象への応用, 天気, Vol.38, No.6, pp.381-388, 1991
[2] 古殿幸雄：マーケティング・リサーチにおける感性的要因の考察，福山平成大学経営学部紀要，第４号，pp.17-27，1999
[3] 古殿幸雄, 浅居喜代治：快適さと消費者行動，第 15 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.149-150，1999
[4] 古殿幸雄：気温と消費者行動，第４回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論文集，pp.61-62，1999
[5] 古殿幸雄：気象と消費者行動，福山平成大学経営学部紀要，第５号，pp.1-20，2000

［問い合わせ先］
〒 720-0001　福山市御幸町上岩成 117-1
福山平成大学　経営情報学科　古殿 幸雄
TEL:0849-72-5001、FAX:0849-72-7771
E-mail:kodono@heisei-u.ac.jp

WA3−3

多次元データの可視化による簡潔なファジィモデル構築法の提案

A Proposal of Construction Method for Concise Fuzzy Models with Visulaization of Multi-dimensional Data

服部 陽一郎　北内 智子　鈴木 俊博　古橋 武

Yoichiro Hattori　Satoko Kitauchi　Toshihiro Suzuki　Takeshi Furuhashi

名古屋大学工学研究科電子情報学専攻

Dept. of Information Electronics, Nagoya University

Abstract: Fuzzy modeling is effective in modeling non-linear relationships between input and output patterns. This paper proposes methods for construction of concise fuzzy models by visualizing multi-dimensional data. This paper describes two visuaization methods; linear transformation and nonlinear projection. The coordinates in reduced dimension are searched with evolutionary algorithm. The nonlinear projection into two dimensional space is done by multi-layered neural network. Numerical experiments are done to demonstrate the potential of the proposed method for knowledge extraction from multi-dimensional data.

1 はじめに

ファジィモデリングは非線形な対象のモデリングに有効であり、対象の入出力関係を IF-THEN 形式のルールにより記述する。多次元データの入出力関係の同定は、ファジィモデリングの重要な課題である。ファジィモデリングでは、パターン情報である多次元データに対してメンバシップ関数を定義することにより記号を導入し、IF-THEN ルールを記述する。IF-THEN ルールの複雑さはファジィ推論システムの構造に大きく依存する。

簡潔なルールにより高い精度のファジィモデルを実現する手法として、中山らは GA によりファジィモデルの階層構造を決定する手法を提案している [1]。松下らは GA により入力変数選択とメンバシップ関数の配置位置決定を行う手法を提案している [2]。これらの手法では適切なファジィ推論の構造を決定している。

これらの手法に対して、本稿では多次元データの可視化による簡潔なファジィモデルの構築法を提案する。本ファジィモデルでは、入力パターンは線形もしくは非線形写像により低次元空関上に可視化され、可視化された低次元パターンを入力として、ファジィ推論システムを構築する。本稿では、低次元化射影に線形／非線形の 2 つの射影の方法を検討する。

線形変換による低次元化射影は p 次元データを $q(<p)$ 本の軸へと基底変換することにより得る。この q 本の基底軸は進化的計算により探索的に決定する。

次に非線形写像を行う階層型ニューラルネットワークを利用することにより、非線形射影器を構築する。

2 基本概念

本稿で提案するファジィモデリング手法では、多入力システムの入出力関係に対する簡潔なファジィモデルの同定を以下のように行う。多入力システムの p 次元入力空間上のパターン $\boldsymbol{x}^*$ は、写影 π によって $q(<p)$ 次元空間上のパターン $\boldsymbol{x'}^*$ に低次元化射影される。射影された $q(<p)$ 次元パターン $\boldsymbol{x'}^*$ と出力パターン $\boldsymbol{y}^*$ に対して、ファジィ推論システムを構築する。本稿では射影 π を線形変換と非線形射影の 2 種類により実現する。前者では進化的計算、後者では階層型ニューラルネットワークを利用する。

3 線形変換による簡潔なファジィモデルの構築

本節では入力パターンの低次元化を線形変換により行い、低次元パターンに対してファジィモデルを構築する手法について述べる。

3.1 進化的計算による線形写像の探索

いま、p 次元入力空間内に $q(<p)$ 本の軸により決定される q 次元空間を定義する。q 本の軸のうち軸 i の入力空間上での方向ベクトルを $\boldsymbol{w_i} = (w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{ip})^T$ とする。ただし、w_{ij} は整数値である。このとき軸 i を定義する単位ベクトル $\boldsymbol{e_i} = (e_{i1}, e_{i2}, \cdots, e_{ip})^T$ は次式により決定される。

$$e_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{p} w_{ik}^2}} \tag{1}$$

p 次元入力空間のパターン $\boldsymbol{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \cdots, x_p^*)^T$ の $q(<p)$ 次元空間のパターン $\boldsymbol{x'}^* = (x_1'^*, x_2'^*, \cdots, x_q'^*)^T$ への低次元化射影は次式の線形変換により行われる。

$$x_i'^* = \boldsymbol{x}^* \cdot \boldsymbol{e_i} \tag{2}$$

本稿では適切な低次元空間を定義する q 本の基底軸の単位ベクトルの組合せ $E = \{\boldsymbol{e_1}, \boldsymbol{e_2} \cdots \boldsymbol{e_q}\}$ を進化的計算により探索する。各単位ベクトルに対応する方向ベクトル成分 w_{ij} を遺伝子として染色体にコーディングし、射影対象となる q 次元空間の候補とする。有効な軸の組合せを以下の進化的計算の手順により探索する。

1. 染色体の初期化。個体数 N_c の染色体の集団をランダムに生成する。各染色体 n の各遺伝子 w_{ij}^n は $w_{\min} \leq w_{ij}^n \leq w_{\max}$ の範囲の値をとる。

2. モデルの同定。各染色体により表される軸のうち、零ベクトル、線形従属の方向ベクトルを除いた残りの a_n 本の軸上に均等に N_m 個の三角型メンバシップ関数を配置する。学習用入力パターンを2式により低次元空間に射影し、ファジィモデルの後件部定数の同定を行う。

3. 染色体の評価。染色体 n の評価は同定されたモデルの精度 E_n と線形独立な基底軸の数 a_n に基づき行う。モデルの精度 E_n は次式で表される学習データに対する平均2乗誤差により定義される。

$$E_n = \frac{\sum_{i=1}^{N_t}(y^i - y^{i*})^2}{N_t} \tag{3}$$

ただし、N_t は学習用パターンの数、y^i は i 番目のパターンの出力値、y^{i*} は i 番目のパターンに対するモデルの出力値である。染色体 n の評価値 F_n を次式により定義する。この評価値 F_n が小さい染色体ほど優秀な個体であるとみなされる。

$$F_n = \alpha E_n + \beta a_n \tag{4}$$

α と β はそれぞれ定数であり、モデルの評価における精度と簡潔さに対する重みとなっている。

4. 遺伝的演算。P 個体の染色体のうち評価の高い染色体から順に $P/2$ 個体を親とする。各親をもとにして突然変異により2個体ずつ子を生成し、次世代の染色体とする。親となる染色体 n の遺伝子の整数値 w_{ij}^n は突然変異率 P_m で突然変異をするものとし、w_{ij}^n の値は $1/2$ の確率で $+1$、また $1/2$ の確率で -1 される。ただし、突然変異の結果 $w_{ij}^n > w_{\max}$ もしくは $w_{ij}^n < w_{\min}$ となる場合は w_{ij}^n の値を元の値に戻し、再び突然変異をするか否かの判定を行う。

5. 評価値の収束判定。評価値の最良値の更新があらかじめ決められた世代数行われなくなるまで、以上の2から4の世代更新を繰り返す。

3.2 数値実験

提案手法の有効性を確認するために、2入力1出力、3入力1出力、5入力1出力の3種類の非線形システムについて、低次元化射影によるファジィモデルの構築を行った。

次式の2入力1出力の非線形関数

$$y = \sin(x_1')\cos(x_2') \ (0 \leq x_1', x_2' < 2\pi) \tag{5}$$

を多次元空間内の2次元平面に埋め込み、これを対象システムの入出力データとした。軸の探索が適切に行われれば、この埋め込まれた2次元平面を含む2本の基底軸が選択され、この2本の軸上に簡潔なファジィモデルが構築されると期待される。実際の多入力システムの学習データの生成は、入力データについては p 次元空間内に一様にランダムに発生させたパターン $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_p)^T$ とした。出力データについては、入力パターン $\boldsymbol{x}$ をある平面に射影し、あらかじめ任意に決めた平面上のパターン $\boldsymbol{x}' = (x_1', x_2')^T$ に対して、出力 y を (5) 式により決定した。なお、軸の探索時には各基底軸上の定義域に10個のメンバシップ関数が均等に配置されるものとした。また、本実験では簡略化ファジィ推論法により、低次元空間のファジィモデルを同定した。

表1に実験結果を示す。表は3種類の非線形システムのモデリングについて、元の入力変数に対してメンバシップ関数を配置する従来手法と、入力空間内で軸の探索を行い探索された軸上にメンバシップ関数を配置する提案手法によりファジィモデルの構築をそれぞれ行った場合の軸の数とモデルの精度を示す。実験結果から、どの入力の場合も提案手法により2本の軸が発見され可視化が行われた一方で、発見された軸上で構築されたファジィモデルは、従来手法によるモデルと比較しても精度が劣っていないことが判る。

	従来手法		提案手法	
対象	軸の数	精度	軸の数	精度
2入力	2	0.00194	2	0.00098
3入力	3	0.0262	2	0.00105
5入力	5	0.118	2	0.00109

表 1: 実験結果

4 非線形射影による簡潔なファジィモデルの構築

次に、本節では入力パターンの可視化を非線形低次元化射影により行い、低次元空間のパターンに対してファジィモデルを構築する手法について議論する。

著者らはSammonの次元数削減手法とニューラルネットワークによるパターンの低次元化を行い、低次元化パターンを利用してファジィ推論を行う手法を提案している[3]。しかし、本手法のファジィ推論システムの構造は低次元パターンの分布に大きく依存する。このことはファジィ推論システムの構造の複雑化や精度の劣化を招く原因となる。

本稿では、設計者があらかじめ構造を仮定したファジィ推論システムへの入力として、可視化パターンを3層型ニューラルネットワークにより生成する手法を提案する。なお、可視化パターンは元の多次元パターンをファジィ推論システムを前提に抽象化したものであり、以降、非線形射影された可視化パターンを抽象パターンと呼ぶことにする。

4.1 提案システム

本提案手法は図1に示される3層型ニューラルネットワークによる非線形射影器と、ファジィニューラルネットワークによるファジィ推論システムからなる階層型システムにより実現される。

ある未知の$p(>2)$次元パターン$\boldsymbol{x}^*=(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_p^*)^T$が本システムの非線形射影器の入力層に入力されると、抽象パターン層に2次元の抽象パターン$\boldsymbol{x'}^*=(x_1'^*, x_2'^*)^T$が出力される。そして、ファジィ推論システムは抽象パターン$\boldsymbol{x'}^*$の入力に対してy^*を出力する。

図1の提案システムはバックプロパゲーション法により学習を行う。抽象パターン層における抽象パターンの分布はファジィ推論システムの設計に大きく影響するので、非線形射影器の3層型ネットワークの結合荷重の初期化が重要な問題である。

本稿では、提案システムの3層型ネットワークの結合荷重の初期化に対して、図2に示す5層型ネットワークを利用する。図2に示すように、提案システムの3層型ネットワークは5層型ネットワークの前半3層に埋め込まれる。そして、5層型ネットワークはp次元パターン$\boldsymbol{x}=(x_1, x_2, \cdots, x_p)^T$から入出力パターン$\boldsymbol{z}=(x_1, x_2, \cdots, x_p, y)^T$への写像をバックプロパゲーション法により学習する。この学習により抽象パターン層において、入力パターン-出力パターン間の関係の同定、さらに、入力パターン-入力パターン間の同定、すなわち入力パターンの恒等写像の実現に重要な抽象パターンが獲得される。

以上のように5層型ネットワークを利用して，3層型ネットワークの結合荷重の初期化を行った後、提案システムは3層型ネットワークとファジィニューラルネットワーク（FNN）を統合し、バックプロパゲーション法により学習を行う。この学習では、FNNにおける誤差が3層型ネットワークに逆伝播する。なお、FNNのバックプロパゲーション法による学習については、文献[4]を参照されたい。

本提案システムの利点はファジィ推論システムのパターン・記号対が、可視化パターンの利用による知識獲得に有効であることである。知識抽出の観点からは、記号とファジィ集合の関係はなるべく簡潔な方が望ましい。非線形射影器はファジィ推論システムから逆伝搬した誤差を利用して、バックロパゲーション法による学習を行うため、単純な構造のファジィ推論システムに対して適応する。

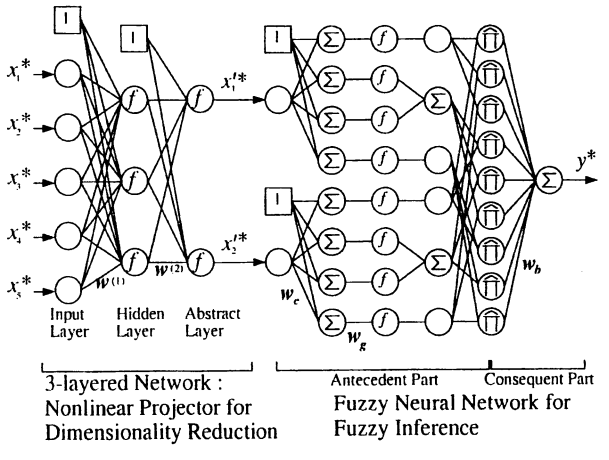


図 1: 提案システム

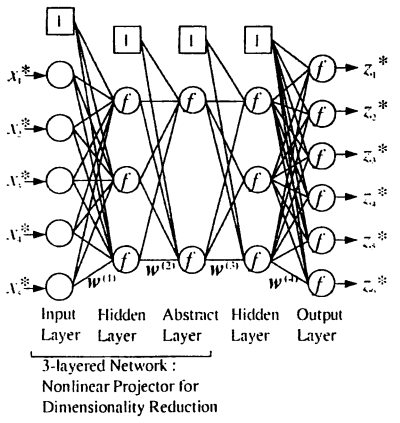


図 2: 5層型ネットワーク

4.2 実験

本章では、自律移動ロボットの壁回避実験を計算機上で行った。複数の距離センサを備えた自律移動ロボットの制御器として提案システムを適用した。

4.2.1 実験条件

ロボットは5つの方向(−90°, −45°, 0°, +45°, +90°)について、それぞれ距離センサを持つ。ロボットは距離センサからの入力に従い操舵角を推論し、回転した後、一定距離D前進するという手順を繰り返す。

まず始めに、学習データ獲得のために、人間により設計されたファジィ推論システムによりロボットを制御した。このルールはこの推論システムのルールの例である。

If x_1=S, x_2=M, x_3=B, x_4=B, x_5=B then y=ZO.

なお、本実験においては、このファジィ推論システムを設計する際、以下の規則を参考にルールの記述を行った。

- 正面近傍に障害物が無ければ、直進する。
- 正面近傍に障害物が有り、右側近傍に障害物が無ければ、右に旋回する。
- 正面と右側近傍に障害物が有れば、左に旋回する。

図3は移動ロボットの作業空間と、人間が設計したファジィ推論システムによりロボットを制御したときのロボットの軌跡を示す。

提案システム内のファジィ推論システムでは、3つのメンバシップ関数が抽象空間に対して均等に配置されるものとした。ファジィ推論システムをこのように単純な構造に固定したまま、提案システムの学習を行った。

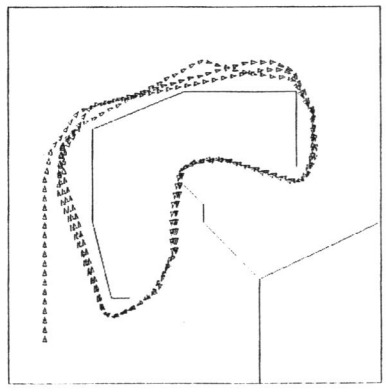


図 3: ロボットの作業空間と人間が設計した制御器によるロボットの軌道

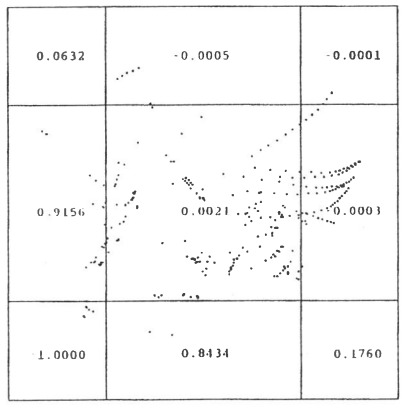


図 4: 非線形射影器の適応後の学習データに対する抽象パターン

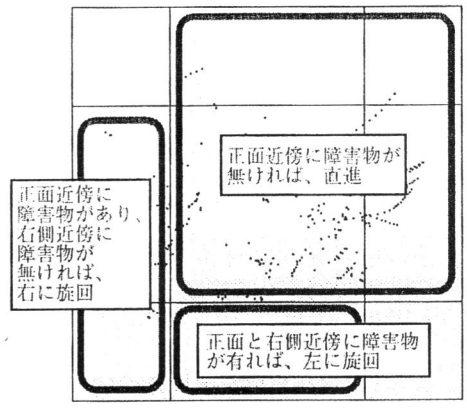


図 5: ロボットの障害物との位置関係と行動との対応

4.2.2 実験結果

図3の軌跡から獲得された２８５個の学習パターンにより、5層型ネットワークの学習を行った。図4は5層型ネットワークの学習の後、FNN と非線形射影器の学習を行った後の抽象パターンを示す。図中の実線は FNN のメンバシップ関数によるファジィ分割の中心である。各部分空間内の実数値はその部分空間に対応するルールの後件部定数である。

次に得られた抽象空間において、各方向のセンサーへの入力とロボットの行動との対応を観察したところ、図5に示すようにロボットと障害物の位置関係とロボットの行動との対応はまとめられた。これにより抽象空間上に構築されたファジィ推論システムの IF-THEN ルールは、学習用のファジィ推論システムを設計した時にルール記述の参考としたロボットの行動規則と一致することが確認された。我々はこの抽象空間上で可視化されたパターンを観察することにより、システムの振舞を把握することができる。

5 まとめ

本稿では多次元データの可視化による簡潔なファジィモデルの構築法を提案した。本ファジィモデルでは、入力パターンは線形もしくは非線形射影により低次元空間に射影され、射影された低次元パターンを入力としたファジィ推論が行われる。実験により多次元データの可視化による知識抽出の可能性を示した。

参考文献

[1] S. Nakayama, T. Furuhashi, Y. Uchikawa, "A Proposal of Hierachical FUzzy Modeling Method", Journal of Japan Society of Fuzzy Theory and Systems, vol.5, no.5, pp.1155-1168 (1993).

[2] S. Matsushita, A. Kuromiya, M. Yamaoka, T. Furuhashi, Y. Uchikawa, "Determination of Antecedent Structure of Fuzzy Modeling using Genetic Algorithm", Proc. of ICEC '96, pp.235-238 (1996).

[3] Y. Hattori, T. Furuhashi, "A Study on Integration of Patterns and Symbols for Intelligent Information Processing", Proc. of 1999 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp.III-453-458 (1999).

[4] 堀川, 古橋, 内川 : "ファジィニューラルネットワークの構成法と学習法", 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.5, pp.906–928 (1992).

問い合わせ先

〒 464-8603 愛知県 名古屋市 千種区 不老町
名古屋大学 工学研究科 電子情報学専攻
服部 陽一郎
TEL (052)-789-2792
FAX (052)-789-3166
E-mail: hattori@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

WA4−1

台形メンバーシップ関数の言語近似と言語近似を用いた推論法の提案

Lingustic approximation based on trapezoid menbership functions and its application to fuzzy reasoning.

丸山 泰弘 Yasuhiro Maruyama
江本 全志 Masashi Emoto
向殿 政男 Masao Mukaidono
明治大学
Meiji University

Abstract

We propose a method of linguistic approximation by which any given membership function is represented by a phrase constructed of understandable words and modifiers. Here,we limite the menbership function as trapezoid types,and we use only fine types of the modifiers [between A and B] , [near] , [just] , [about] ,[very] . In these conditions, we show an approximate method to express any given menbership function with initial functions and modifiers. And, we suggest new fuzzy-reasoning based on the approximate method proposed here.

1 はじめに

与えられたメンバーシップ関数を人間に直感的にわかりやすい言葉（メンバーシップ関数）と修飾語（演算子）を用いて言語に近似することを考える。用いるメンバーシップ関数は、台形に限定し、修飾語は、「～と～との間」「～(やや,-, 非常に) に近い～」「(ちょうど, 非常に, だいたい)～」「およそ～」などを定義した。そして、これらの条件のもとで、ある与えられたメンバーシップ関数を、初期に与えた言葉 (メンバーシップ関数) と演算子の組み合わせで表現するためのアルゴリズム（近似手法）を示す。また、この近似手法を用いた新しいファジィ推論法を提案する。

2 台形メンバーシップ関数

本研究では、正規で凸なファジィメンバーシップ関数の代表として、台形メンバーシップ関数のみを扱うことにする。台形メンバーシップ関数は次のように表記する。

$[a,b,c,d]$, 但し $a \leq b \leq c \leq d$ (図 1 参照)

また、台形の中心は適合度が 1 の部分の中心という意味で、

$$\text{台形 } F \text{ の中心} = \frac{b+c}{2}$$

で求めることとする。

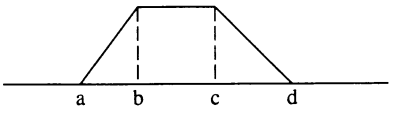


図 1: 台形メンバーシップ関数の表記法

3 修飾語

3.1 ～と～との間

2 つの台形 A,B から、F=「A と B との間」は次のように求める。

$$A = [a_1, a_2, a_3, a_4], B = [b_1, b_2, b_3, b_4]$$

$$F = [a_3, a_4, b_1, b_2]$$

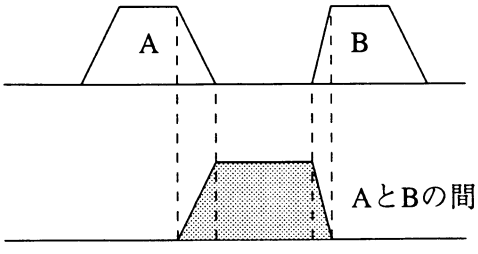


図 2: 修飾語「A と B との間」

3.2 ～に (やや , - , 非常に) 近い～

この修飾語は、2つのメンバーシップ関数の一方を平行移動し，その中心をもう片方の中心に近づけるものである。例えば、F=「B に近い A」は次のように表す。

$$A = [a_1, a_2, a_3, a_4], B = [b_1, b_2, b_3, b_4]$$

$$\theta = (\frac{a_2 + a_3}{2} - \frac{b_2 + b_3}{2}) \times 0.3$$

$$B \text{に近い} A = [a_1 - \theta, a_2 - \theta, a_3 - \theta, a_4 - \theta]$$

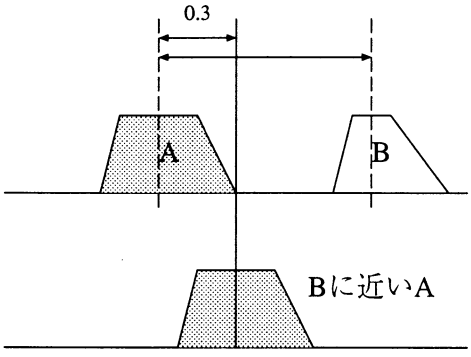


図 3: 修飾語「B に近い A」

移動する量は、2つの台形の中心間の距離に対する割合で指定する。

やや	0.1
-	0.3
非常に	0.5

上の F の場合、移動量は 0.3 で指定した。0.5 で指定するときは「B に非常に近い A」という言葉になり、0.1 で指定するときは「B にやや近い A」という言葉になる。

3.3 (ちょうど, 非常に, だいたい)～

メンバーシップ関数の中心を軸にして、拡大したり（だいたい）縮小したり（非常に, ちょうど）する修飾語である。台形 A にこの修飾語をつけた台形 F は、次のように求める。

$$A = [a_1, a_2, a_3, a_4]$$

$$\theta = \frac{a_2 + a_3}{2}$$

$$F = \begin{bmatrix} \theta - (\theta - a_1) \times t, \\ \theta - (\theta - a_2) \times t, \\ \theta - (\theta - a_3) \times t, \\ \theta - (\theta - a_4) \times t \end{bmatrix}$$

ここで、t の値により修飾語が決まる。

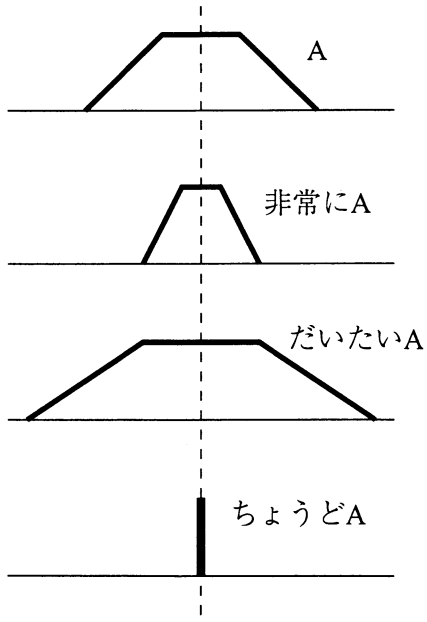


図 4: 修飾語「(ちょうど, 非常に, だいたい)A」

だいたい	1.5
非常に	0.5
ちょうど	0

3.4 およそ～

この修飾語は、台形 $A = [a_1, a_2, a_3, a_4]$ が $a_1 = a_2$ 又は $a_3 = a_4$ が成り立つとき、台形 A に曖昧な部分を追加するものであり、次のように表す。

$$\text{およそ} A = [a_1 - s, a_2, a_3, a_4 + s]$$

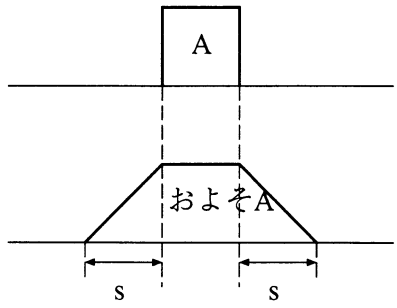


図 5: 修飾語「およそ A」

ここで、s の値は問題毎に設定する必要がある。また、上の条件が成り立たない台形においては、この修飾語は使えないものとする。

4 近似手法

4.1 近似手法

台形 $A=[a_1,a_2,a_3,a_4]$, $B=[b_1,b_2,b_3,b_4]$ があったときに、$\frac{a_2+a_3}{2}$ 以上 $\frac{b_2+b_3}{2}$ 以下の範囲に含まれる任意の台形 $F=[f_1,f_2,f_3,f_4]$ $(a_2 \leq f_1, f_4 \leq b_3)$ を、前述の修飾語と A,B を用いて近似する方法を、以下に示す。尚、**step2** と**step3** では、実際に近似するときは、ある程度の誤差範囲を認めることにし、その誤差範囲はそれぞれの問題毎に設定するものとする。この誤差範囲が大きい程、表現は簡潔になる。

前処理 台形 A,B に曖昧さを導入する。

- $f_1 \neq f_2$ で $a_3=a_4$ のとき、台形 A を「およそ A」にする。
- $f_3 \neq f_4$ で $b_1=b_2$ のとき、台形 B を「およそ B」にする。

結果を
台形 $A'=[a'_1,a'_2,a'_3,a'_4]$,$B'=[b'_1,b'_2,b'_3,b'_4]$
とする。

step1 台形 A',B' の傾きの大きさ $(|a'_4-a'_3|,|b'_2-b'_1|)$ を台形 F の傾きの大きさ $(|f_2-f_1|,|f_4-f_3|)$ にあわせる。これは、修飾語「(ちょうど, 非常に, だいたい)～」を繰り返すことで、実現する。結果を $A''=[a''_1,a''_2,a''_3,a''_4]$, $B''=[b''_1,b''_2,b''_3,b''_4]$ とする。

step2 台形 A'',B'' を修飾語「～に (やや,-, 非常に) 近い～」を繰り返して、$a'''_3=f_1, b'''_2=f_4$ となるように、$A'''=[a'''_1,a'''_2,a'''_3,a'''_4]$, $B'''=[b'''_1,b'''_2,b'''_3,b'''_4]$ を求める。

step3 台形 A''',B''' から台形「A''' と B''' との間」を求める。これが、求める台形 F である。

5 新しい推論法の提案

5.1 新しい推論法

一致度によるファジィ推論（頭切り法）では、与えられたファジィ集合をファジィルールの前件部との一致度で表し、その一致度の値を後件部にそのまま持ち込むことで結論を求める。

今回提案する方法では、与えられたファジィ集合を前件部の関数との一致度ではなく前述の近似手法で表し (言語化)、その近似法で求まった前件部の関係を後件部に適用させることで、結論を求める。

ルール 1:	A_1	$\rightarrow$	B_1
ルール 2:	A_2	$\rightarrow$	B_2
	$\vdots$		$\vdots$
事実:	A'		
		出力	B'

事実 A' を、前件部の関数 $A_1,A_2,\cdots$ を基本用語として、前述の手法で近似する。

近似の結果の $A_1,A_2,\cdots$ の部分を、ルール 1, ルール 2,$\cdots$ を用いて、$B_1,B_2,\cdots$ に変える。

5.2 推論法の例

以下のような推論例を考える。

ルール 1	A_1：やせている	$\rightarrow$	B_1：食が細い
ルール 2	A_2：太っている	$\rightarrow$	B_2：よく食べる
事実	A'		
結論			B'

$$A_1 = [40,40,50,70]$$
$$A_2 = [60,80,90,90]$$
$$A' = [55,65,65,75]$$

$$B_1 = [1000,1000,1000,3000]$$
$$B_2 = [2500,3200,4000,4000]$$

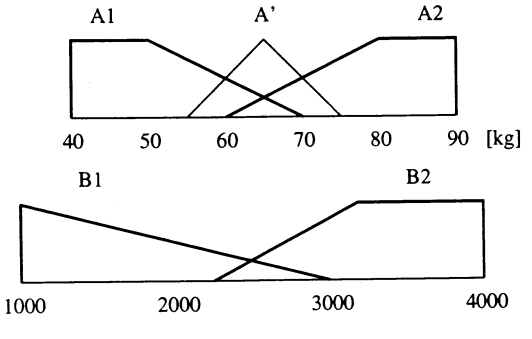


図 6: 推論の例

また、**step2,step3** における誤差範囲は、5kg とする。

まず、A' を A_1,A_2 を用いて近似する。

step1 A_1 で $50 \neq 70$、A_2 で $60 \neq 80$ なので、何も行わない。

step2 修飾語「非常に～」を使う。

- A_1''=「非常にやせている」
  =[42.5,42.5,47.5,57.5]
  $|a_4' - a_3'|$ = (57.5-47.5)=10=(65-55)
  =$|f_2 - f_1|$
- A_2''=「非常にふとっている」
  =[72.5,82.5,87.5,87.5]
  = $|b_2' - b_1'|$ = (82.5-72.5)=10=(75-65)
  =$|f_4 - f_3|$

step3 修飾語「～にやや近い～」を使う。

- A_1'''=「ふとっている (A_2) にやや近い非常にやせている (A_1'')」= [46.5, 46.5, 53.5, 63.5]
- A_2'''=「やせている (A_1) にやや近い非常にふとっている (A_2'')」= [68.5, 78.5, 83.5, 83.5]

step4 「A_1''' と A_2''' との間」を求める。
「A_1''' と A_2''' との間」=[53.5,63.5,68.5,78.5]
$\doteqdot A'$ = [55, 65, 65, 75]

事実 A' は、「(A_2 にやや近い非常に A_1) と (A_1 にやや近い非常に A_2) との間」と近似できた。ここで、ルール 1 , ルール 2 を適用して、出力 B' は「(B_2 にやや近い非常に B_1) と (B_1 にやや近い非常に B_2) との間」と求まり、

$$B' = [1260, 2260, 2790, 3140]$$

となり、これが結論となる。

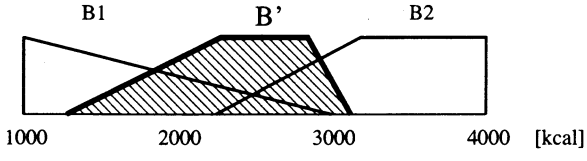


図 7: 推論推論結果

5.3 頭切り法との比較

5.2 の問題で、頭切り法で求めた結果と提案した手法の結果の中心の差は以下の通り。

頭切り法の結果	2500
提案した手法の結果の中心	2520

推論結果の図 7 と図 8 とを比較すると、脱ファジィ化するとほとんど同じでも、本提案手法の方がメンバーシップ関数としては自然な結果が得られることがわかる。

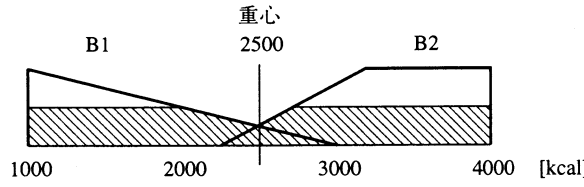


図 8: 頭切り法による推論推論結果

6 今後の課題

今後は、より自然な言語に近くなるような近似アルゴリズムを作成したい。また、提案した推論手法では、1 入力の場合は、直感的にうまく推論できるであろうことはわかるが、多入力の場合にどのように適用すればよいかは今後の課題である。

参考文献

[1] 向殿 政男, 講座 ファジィ 第 4 巻 ファジィ論理, 日刊工業新聞社, 1993

[問い合わせ先]
〒 214-8571
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科システム科学研究室
丸山　泰弘
Tel: 044-934-7442
Fax: 044-934-7912
E-mail: maru@cs.meiji.ac.jp

WA4−2

記号レベルでのファジィ制御系の記述のための新しい推論法のモデリング能力に関する一考察

A Study on Modeling Capability of New Fuzzy Inference Method for Symolic Description of Fuzzy Control System

山元 秀洋　古橋 武
H. Yamamoto　T. Furuhashi

名古屋大学　名古屋大学

Abstract The stability analysis method on symbolic level has been proposed. However, the validity of the stability analysis on the symbolic level was not guaranteed in the continuous system. To guarantee this validity, "non-separate condition" has been introduced. If the fuzzy control system is asymptotically stable in the symbolic system and the system satisfies the non-separate condition, the continuous system is also asymptotically stable. The extended version of the condition has been proposed. It is called "relaxed non-separate condition". However, this relaxed condition was applicable only to the control system with aymmetric membership functions. The class of the control systems that can satisfy the relaxed condition was still small. The authors have introduced a new fuzzy inference method. By using the new method, the relaxed condition can be made applicable to the control systems with asymmetric membership functions.
This paper investigates the modeling capability of the new fuzzy inference method.
Keyword: Fuzzy inference, Fuzzy control, Symbolic stability analysis

1 はじめに

ファジィ制御はあいまいに表現された制御知識をif-then型のファジィルールで表現することができる。ファジィ制御では制御系の入出力変数の連続的数値をファジィ集合により粒子化し、それぞれの粒子を記号によりラベル付けする。これらのファジィ集合と記号がベテランの知識を記述するのに有効である。ファジィ制御系の安定解析は最重要課題の一つであり、これまでにさまざまな研究がなされてきた[1-3]。

長谷川、古橋[4]はファジィ制御系を離散近似し、ペトリネットの状態遷移行列で表現することにより代数的に安定性を解析する手法を提案した。この手法の問題点は離散近似されたファジィ制御系での安定解析の結果が連続系でも成り立つという保証が得られない点であった。

古橋、山元、J. ピータース、W. ペドリッチ[5]は文献[4]の安定解析法の問題点である離散近似の妥当性に対して非分離の条件を示した。この非分離の条件を満たす制御系においては離散近似系での安定解析の結果が連続系においても保証された。しかし、非分離の条件は十分条件として保守的に過ぎるという問題点を持っていた。山元、古橋[6]は非分離の条件を緩和することにより、離散近似の妥当性を保証できる制御系のクラスを広げ、記号レベルでの安定な制御器の設計法を提案した。
しかし、緩和された非分離の条件には、対称なメンバーシップ関数を持つ制御系にしか適用できないという問題点があり、離散近似の妥当性を保証することができる制御系のクラスは依然として小さかった。著者らは上で述べた問題点を解析し、記号を用いた安定解析のための新しい推論法を導入した[7]。本手法は非対称なメンバーシップ関数を持つ制御系にも緩和条件を適用することを可能にした。

本稿では本推論法および従来法を用いて非線型な制御対象のモデリングを行い、両者のモデルの近似能力に差がないことを示す。

2 記号レベルでの安定性

本稿で対象とするファジィ制御系はファジィ制御器と制御対象のファジィモデルからなり、制御対象のファジィモデルおよび、制御器のルール R_p^i, R_c^j は制御対象の出力 y_k、制御器の出力である操作量 u_k、目標値 y_k^* を用いて以下のように表現される。ただし、k はサンプリング時刻である。

$$\begin{aligned} R_p^i \ : \ & \text{If } y_k \text{ is } A_{i_1} \text{ and } y_{k-1} \text{ is } A_{i_2} \cdots \\ & u_k \text{ is } B_{j_1} \text{ and } u_{k-1} \text{ is } B_{j_2} \ \cdots \\ & \text{then } y_{k+1} \text{ is } A_{i_0} \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} R_c^j \ : \ & \text{If } y_k^* \text{ is } A_m \text{ and } y_k \text{ is } A_{i_1} \text{ and } y_{k-1} \text{ is } A_{i_2} \cdots \\ & \text{then } y_{k+1} \text{ is } A_{i_0} \end{aligned} \tag{2}$$

ただし $A_{i_0}, \cdots, B_{j_1}, \cdots A_m$ はメンバーシップ関数のラベルである。文献[4]において、長谷川、古橋によって提案された安定解析はファジィ制御の記号表現に着目したものである。この手法はファジィ制御系を目標記号毎にペトリネットの状態遷移行列 $\boldsymbol{A}$ で表現することにより、代数的に安定解析を行うことを可能とする。離散近似系の安定解析は状態遷移行列と時刻 k における制御対象のルール発火後、すなわち制御ルール発火前の制御系の状態を表すマーキング $\boldsymbol{\mu}_k$ および、制御ルール発火後の制御系の状態を表すマーキング $\boldsymbol{\mu}_k'$ を用いてなされる。状態遷移行列は $n \times n$ の正方行列であり、制御系の次の状態 $\boldsymbol{\mu}_{k+1}$ は

$$\boldsymbol{\mu}_k' = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\mu}_k \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\mu}_{k+1} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\mu}_k' \tag{4}$$

と与えられる。よって、

$$\boldsymbol{\mu}_{k+1} = \boldsymbol{A}^2\boldsymbol{\mu}_k \tag{5}$$

状態遷移行列の作成方法は [4] を参照されたい。離散近似系での安定性の定義はペトリネットのマーキング $\boldsymbol{\mu}$ を用いることにより以下のように示される。

定義 1 漸近安定
制御系が漸近安定であることは、任意の初期マーキング $\boldsymbol{\mu}_0$ に対して $K \geq 0$ が存在し、

$$\boldsymbol{\mu}'_K \neq \boldsymbol{\mu}_K \tag{6}$$
$$\boldsymbol{\mu}_{K+1} = \boldsymbol{\mu}_K \tag{7}$$
$$\boldsymbol{\mu}'_{K+1} = \boldsymbol{\mu}'_K \tag{8}$$

を満たすことである。

また、文献 [4] では以下の定理が証明されている

定理 1 離散近似されたファジィ制御系がある目標値、任意の初期状態に対して漸近安定である必要十分条件は、この制御系の状態遷移行列 $\boldsymbol{A}$ において対角要素が 1 ではなく、零列ベクトルが存在せず、

$$\text{rank } \boldsymbol{A}^n = 2 \tag{9}$$

を満たすことである。

定理 1 を満たす制御系は記号レベルでは漸近安定であるが、連続的数値レベルでは漸近安定であるとは限らない。文献 [5] ではこの問題点を解決するために非分離の条件が示された。非分離の条件は次のように定義される。

定義 2 非分離の条件
同時に発火するファジィルールの後件部変数のラベルが 1 種類、または隣り合う 2 種類に限られる。

この条件を満たす制御系は記号レベルで漸近安定であれば連続系においても漸近安定であることが証明されている。

これにより上記の問題点は解決されたが、非分離の条件は十分条件として保守的に過ぎるため、この条件を満たすことのできる制御系のクラスは非常に小さかった。

山元、古橋らは文献 [6] において非分離の条件の制約を緩和することにより緩和された非分離の条件を提案した。

定義 3 緩和された非分離の条件
同時に発火するファジィルールの後件部変数のラベルは隣り合って続く 3 種類に限られる。ただし、縦もしくは横方向に隣り合うルールのそれらは同じか隣り合う 2 種類に限られる。

緩和条件の提案により離散近似の妥当性を保証することができる制御系のクラスを広げることができたが、緩和条件は対称なメンバーシップ関数を持つ制御系にしか適用することができないという問題点を持っており、離散近似の妥当性を保証することができる制御系のクラスは依然として小さかった。

3 緩和条件の問題点

前章でも述べたように緩和条件は非対称なメンバーシップ関数を持つ制御系には適用することができなかった。例として、表 1 に示す制御系を用いてこれを説明する。

表 1: 制御系 1

(a) ファジィ制御器

u_k \ y_k	NB	N	Z	P	PB
NB	N	NB	NB	NB	N
N	Z	N	NB	N	N
Z	Z	Z	N	Z	Z
P	P	P	Z	P	Z
PB	PB	P	P	PB	P

(b) 制御対象のファジィモデル

y_{k+1} \ y_k	NB	N	Z	P	PB
NB	NB	NB	N	N	Z
N	NB	N	Z	Z	Z
Z	N	Z	P	Z	P
P	N	Z	P	P	PB
PB	Z	P	PB	PB	PB

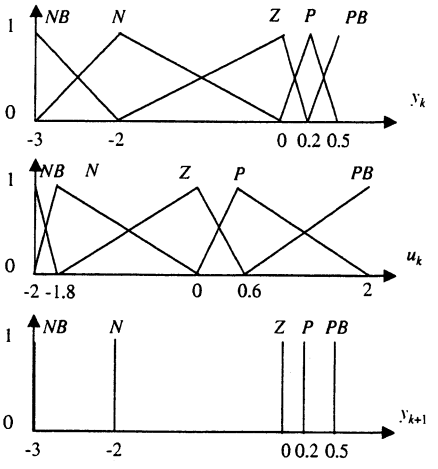


図 1: メンバーシップ関数

る。 表 1 の制御系は定義 3 に示した緩和条件を満たしている。ただし、表 1 の制御系のメンバーシップ関数は図 1 に示すように非対称である。

例えば、表 1 の制御系の目標値 y_k^* ='P' における状態遷移行列 $\boldsymbol{A}$ は次のように得られる。

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} . \tag{10}$$

また、

$$\text{rank } \boldsymbol{A}^{10} = 2 . \tag{11}$$

この状態遷移行列は定理1を満たすので、この制御系は目標値'P'について記号レベルでは漸近安定であることが保証される。紙面の都合上割愛するが、この制御系は他のすべての目標記号についても定理1の条件を満たし、記号レベルでの漸近安定性が保証されている。

次に連続系において行ったシミュレーション結果を図2に示す。初期値は-1.8、目標値は-2.1であり、ファジィ

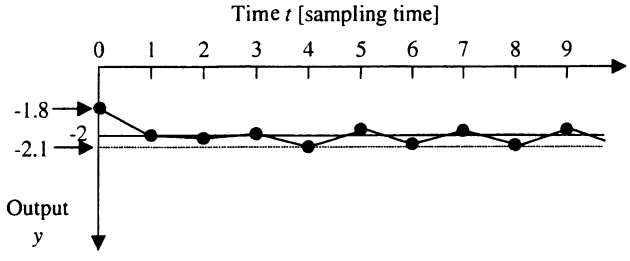


図 2: 簡略化ファジィ推論法を用いた場合のシミュレーション結果（初期値 $y_0 = -1.8$、目標値 $y_k^* = -2.2$）

推論法として簡略化ファジィ推論法を用いた。図2から分かるように、目標値は $NB - N$ 領域にあるが制御対象の出力値 y は目標領域に整定せず、$NB - N$ 領域と $N - Z$ 領域の間を行き来している。つまりこの制御系は離散近似系では漸近安定であり、緩和条件を満たしているが、メンバーシップ関数が非対称なために連続系では漸近安定ではない。

この現象はメンバーシップ関数が非対称である時、記号レベルでの制御系の挙動と連続系での挙動が一致しないために起こる現象である。この問題を解決するために筆者らは新しい推論法として適合度変換法が提案してきた[7]。適合度変換法を用いるとメンバーシップ関数が非対称な時でも記号レベルでの挙動と連続系での挙動が一致し、それによって緩和条件を非対称なメンバーシップ関数を持つ制御系にも適用できるようになる。

4 緩和された非分離の条件の拡張

4.1 適合度変換法

本章では文献[7]において提案した適合度変換法を簡単に説明する。適合度変換法は簡略化ファジィ推論を拡張した推論法であり、3つの手順からなる。（図3参照）新しい推論法では適合度変換のステップでそれぞれの

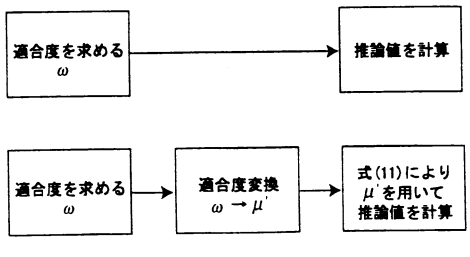


図 3: 推論法の比較

ルールの適合度を対称三角型のメンバーシップ関数を用いて変換する。適合度変換法の手順を以下に示す。

1: それぞれのルールの適合度（ω）を簡略化ファジィ推論法と同じように求める。

2: 図4に示す対称三角型のメンバーシップ関数を用いて適合度の重心値を計算する。ただし、後件部記号 NB, N, .., PB がそれぞれ、H_1, H_2, .., H_5 に対応している。計算した適合度の重心値を図4のメンバーシップ関数に与えることにより、変換後のメンバーシップグレードが求められる。例えば、重心値が H_j と H_{j+1} の間にある場合、変換後のグレードとして μ'_{H_j} と $\mu'_{H_{j+1}}$ が次の式で求められる。

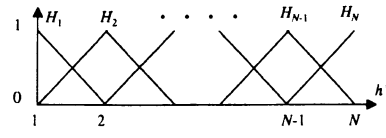


図 4: 変換用メンバーシップ関数

$$\begin{aligned} \mu'_{H_j} \cdot j + \mu'_{H_{j+1}} \cdot (j+1) &= COG \\ \mu'_{H_j} + \mu'_{H_{j+1}} &= 1 . \end{aligned} \tag{12}$$

ただし、COG は重心値である。

3: 最後に変換されたグレードを用いて後件部変数の重心値を次のように求める。

$$y^0_{k+1} = \mu'_{A_j} \cdot a_j + \mu'_{A_{j+1}} \cdot a_{j+1} \tag{13}$$

この推論法を用いることにより記号レベルでの制御系の挙動と連続系における挙動とを一致させることができ、非対称なメンバーシップ関数を持つ制御系にも緩和条件を適用することができる。詳しい証明は文献[8]に示す。

4.2 シミュレーション

表1の制御系に適合度変換法を用いた場合のシミュレーション結果を示す。初期値が-1.8、目標値が-2.2の時、適合度変換法による結果を図5に示す。制御対象の

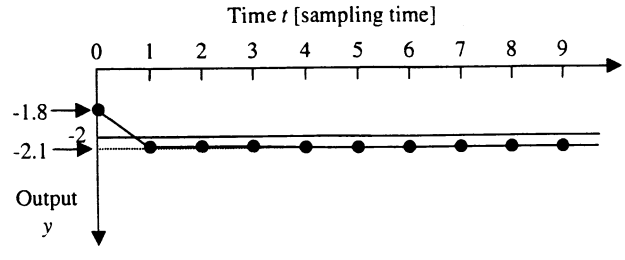


図 5: 適合度変換法を用いた場合のシミュレーション結果（初期値 $y_0 = -1.8$、目標値 $y_k^* = -2.2$）

出力値は目標値に整定している。他のどんな初期値、目標値においても制御対象の出力値は目標値領域に整定することができた。この結果は適合度変換法により緩和条件を非対称なメンバーシップ関数を持つ制御系に拡張できたことを示している。

5 モデルを用いた推論法の比較

簡略化ファジィ推論法および適合度変換法を用いて、非線型な制御対象からファジィモデルを作り、得られた

2つのモデルを比較する。ファジィモデリングを行う制御対象を図6に示す。 図7はモデリングに用いたメン

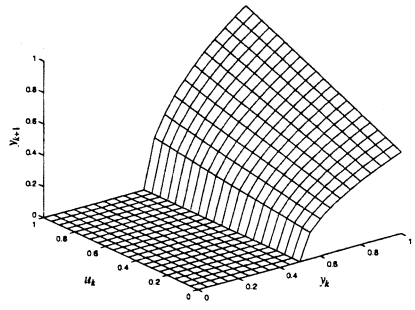


図 6: モデリング対象

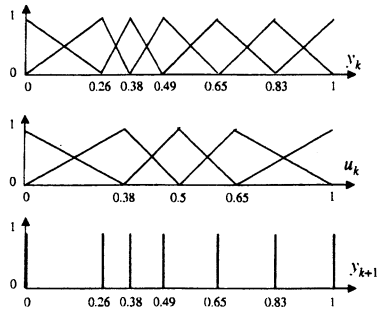
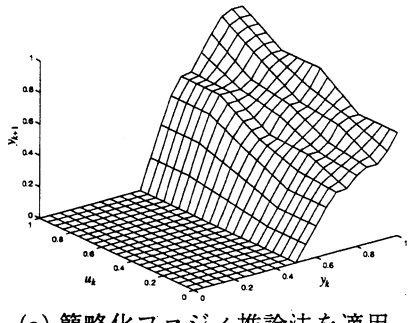
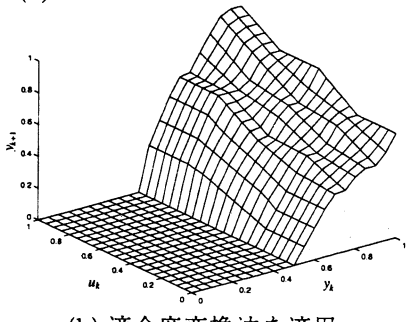


図 7: メンバーシップ関数

バーシップ関数を示す。得られたファジィモデルを図8に示す。 2つのモデルの誤差は表2に示すようにほと



(a) 簡略化ファジィ推論法を適用



(b) 適合度変換法を適用

図 8: 得られたファジィモデル

んど差がなく、提案法には従来法と同等のモデリング能力があると期待できる。

6 結言

緩和された非分離の条件は非対称なメンバーシップ関数を持つ制御系には適用することができず、緩和条件に

表 2: モデル誤差の比較

推論法	モデル誤差
簡略化ファジィ推論法	0.0010
適合度変換法	0.0007

より安定性を保証することができる制御系のクラスが小さいと言う問題点を持っていた。本稿では新しい推論法として適合度変換法を提案し、緩和条件を非対称なメンバーシップ関数を持つファジィ制御系にも適できるように拡張した。最後に提案法と従来法を用いたファジィモデリングを行い、両者のモデルの近似能力に差がないことを示した。今後の課題は緩和条件、および、適合度変換法を実機に適用し検討することである。

参考文献

[1] K. TANAKA and M. SUGENO, "Stability Analysis of Fuzzy Control Systems Using Lyapunov's Direct Method", Proceedings of NAFIPS'90, pp.133-136(1990).

[2] K. TANAKA and M. SUGENO, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control System", Fuzzy Sets and Systems, Vol45, No.2, pp.135-156(1992).

[3] T. HASEGAWA and T. FURUHASHI and Y. UCHIKAWA, "Approximated Discrete System of Fuzzy Control System and Stability Analysis", Proceedings of Fifth IEEE International Conference on Fuzzy System, pp.2155-2161(1996).

[4] 長谷川、古橋、"離散事象表現を用いたファジィ制御系の安定性定理と事象間遷移の数値解析"、日本ファジィ学会誌、vol.10, No.1, pp.126-134(1998)

[5] T. FURUHASHI, H.YAMAMOTO, J. PETERS, W. PEDRYCZ, "Fuzzy Control Stability Analysis Using a Generalized Fuzzy Petri Net Model", Journal of Advamced Computational Intelligence, Vol.3, No.2, pp 99-105(1999)

[6] 山元、古橋、"ファジィ制御系の記号レベルでの設計法に関する一考察"、第7回東海ファジィ研究会、pp 33-40(1999)

[7] H. YAMAMOTO and T. FURUHASHI "New Fuzzy Inference Method for Symolic Stability Analysis of Fuzzy Control System", 6th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2000), pp.443-447

[8] H. YAMAMOTO and T. FURUHASHI "Symbolic Stability Analysis under Relaxed Non-separate Condition with New Fuzzy Inference Method" Proc. of FUZZ-IEEE 2000 (to appear)

[お問い合わせ先]

〒 464-8603
名古屋市千種区不老町
名古屋大学工学研究科電子情報学専攻
山元 秀洋
Tel: 052-789-2793, Fax: 052-789-3166
E-mail: hidehiro@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

WA4−3

変形ファジィルールを用いた不完全情報ゲームにおける優劣判定
Estimation of Superiority/Inferiority in Incomplete Information Game by Transformational Fuzzy Rules

風見覚
Satoru Kazami
筑波大学 理工学研究科
Master's Program in Science and Engineering,
University of Tsukuba

鬼沢武久
Takehisa Onisawa
筑波大学 機能工学系
Institute of Engineering Mechanics and Systems,
University of Tsukuba

Abstract This paper presents a fuzzy system which plays Seven-card Stud Poker game adapting its strategy to an opponent player's one. This system estimates the comparative strength of a system's poker hand, and makes a decision on amount of a bet and whether to drop or not by using the fuzzy inference. This paper mainly mentions the estimation of the comparative strength of a system's poker hand. The system has fuzzy rules with non-fixed consequent parts and threshold values. The threshold values are changed according to the results of the game. The change of the threshold values is also estimated by ordinary fuzzy inference rules. The system plays the poker game with a human player many times. The analysis of games data shows that the system estimates the comparative strength of a system's hand adapting its strategy to opponent's one.

1 はじめに

ゲームの思考アルゴリズムをコンピュータ上で構築するという研究は広く世界中で行われている。中でも「完全情報・ゼロ和ゲーム」[1]と呼ばれるチェス、将棋の研究が盛んである[2][3]。これらのゲームに対して「一般・ゼロ和ゲーム」[1]と呼ばれるゲームがある。この種のゲームには、ポーカーや麻雀のように、見ることのできる情報と見ることのできない情報がプレーヤごとに存在する。ゲーム理論は、プレーヤが常に合理的な行動を取るという仮定を置き、その条件下でのプレーヤの利益を最大にする戦略を数学的に論じている。しかし、ゲームのプレーヤが人間である場合、常に合理的な戦略を取るとは限らない。そのため、相手の傾向を考慮しつつ主観的に戦略を決め、相手に応じた戦略を取る必要がある。

本研究では不完全情報ゲームの例としてポーカーの一種である7スタッドポーカーを用い、このゲームをプレイするファジィシステムを構築する。本システムは優劣推定や賭け金の決定、ドロップの判断をファジィ推論で行うが、本稿では特に優劣推定とルールの修正について述べる。対戦相手の傾向に応じて優劣推定を行うためにゲーム中に変更可能な変形ファジィルールを用いる。

2 スタッドポーカーのルール[4]

2.1 概略

スタッドポーカーでは表向きに配られるアップカードと裏向きに配られるホールカードがある。アップカードは全てのプレーヤが見ることができ、ホールカードは配られたプレーヤだけが見ることができる。

スタッドポーカーはドロー(手札の交換)がないことが特徴である。手札を交換することはないが、カードが1枚配られる度にベッティングインターバルを行う。ベッティングインターバルとはそれぞれのプレーヤがベット、ドロップのいずれかの戦術を決定する手番のことである。ベットとは賭け金を賭けること、ドロップとは自分の負けを認め、そのゲームにおいて自分が出した賭け金を放棄することである。ベットにもその種類ごとに名前がついており、コール、レイズなどがある。コールとは相手が出した賭け金と同じだけ自分も賭けること、レイズとは相手が出した賭け金を上回る金額を賭けて賭け金をつりあげることである。

2.2 賭け金(ステークス)のリミット

賭け金の上限と下限を次のように定める。まず、賭け金の上限として、ポットリミット制を採用する。ポットリミット制とは賭け金の上限をテーブル上に出ている賭け金の合計(ポット)とするルールである。賭け金の下限は、それぞれのベッティングインターバルにおいて最初に賭けるプレーヤは1とし、それ以降のプレーヤはコール、またはレイズをしなくてはならないものとする。つまり、相手と同額かそれ以上を賭けなくてならないと定める。ただし、レイズは1回までとする。

2.3 ゲームの進行

初めにホールカード2枚、アップカード1枚をそれぞれのプレーヤに配って最初のベッティングインターバルを行う(図1)。本研究で用いるルールでは最初にベットをするプレーヤを固定しており、そのプレーヤから順に戦術の決定を行っていく。自分が出した賭け金と相手が出した賭け金が同額になったとき、次のカード(4枚目のカード)がそれぞれのプレーヤに配られる。ここまでを第1 turnと呼ぶこととする。以下、双方のプレーヤの賭け金が同額になるごとに1枚ずつカードが配られ、第2 turn、第3 turnのベッティングインターバルが行わ

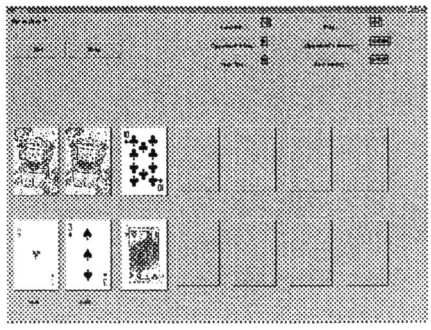


図 1: ゲーム画面 (開始直後)

れる。4、5、6枚目のカードはアップカードとして配られ、7枚目のカードはホールカードとして配られる。途中のベッティングインターバルでドロップすることもできる。ドロップすれば負けである。双方のプレーヤが7枚のカードを持ったとき (第5turn)、どちらもドロップしなかった場合は次のカードを配るかわりにホールカードを公開する (ショウダウン、図2)。ホールカードを一度に公開するのではなく、1枚ずつ開いていくルールもあるが、本研究では一度に公開するルールを用いる。公開後、7枚のうちから最強の5枚を選び出し、より強いポーカーハンド (手役) をもつプレーヤを勝ちとする。

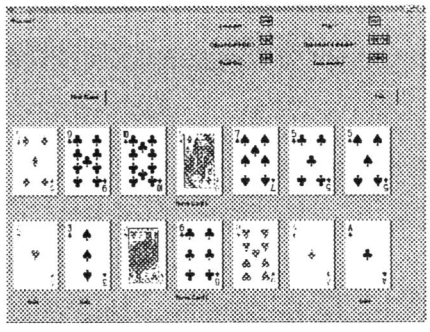


図 2: ゲーム画面 (ショウダウン)

3 システムの構成

3.1 全体構成

システム全体の流れ図を図3に示す。優劣推定、ドロップの判断、賭け金の決定、ルールの修正をファジィ推論 [5] を用いて行う。本稿では特に優劣推定とルールの修正について述べる。

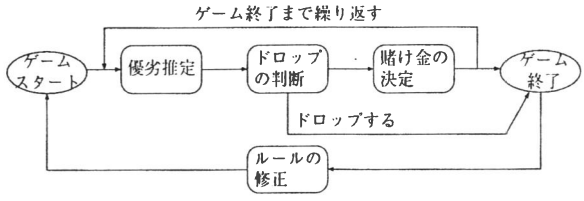


図 3: システムの流れ図

3.2 優劣推定

本研究での優劣推定とは以下のようなものを指す。スタッドポーカーにはアップカードとホールカードがある。そのため、相手のカードの強さは見えるカード (アップカードと自分のホールカード) と賭け金の賭け方の様子から推定しなくてはならない。この推定した相手のカードの強さと比較して自分のカードが強いのか弱いのかを推定することを優劣推定と呼ぶ。自分のカードの方が強ければ優勢、弱ければ劣勢とする。

3.2.1 優劣推定に用いる変形のファジィルール

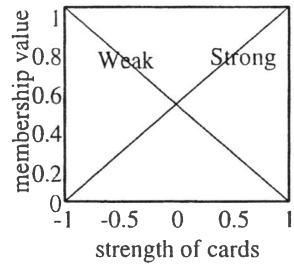
優劣推定のファジィルールとそのルールで使われるファジィ集合を表1、図4の (a)、(b)、(c) に示す。

If "システムのアップカードの強さ is $\tilde{A}$"
and "ポットで正規化した対戦相手の賭け金 is $\tilde{B}$"
and "5で正規化した turn is $\tilde{C}$"
then "システムのカードの強さ is $\tilde{D}$"

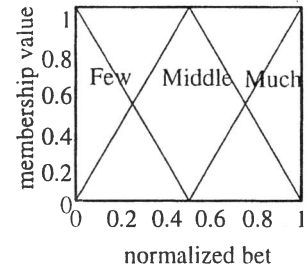
$\tilde{A}, \tilde{D}$	:	Weak,Strong	(図4 (a))
$\tilde{B}$	:	Few,Middle,Much	(図4 (b))
$\tilde{C}$	:	Early, Middle, End	(図4 (c))

表 1: 後件部が確定していないファジィルール

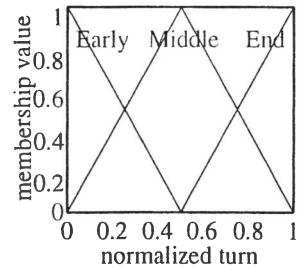
$\tilde{D}$		$\tilde{B}$		
		Few	Middle	Much
$\tilde{A}$	Weak	Weak 50 Strong	Weak 30 Strong	Weak 10 Strong
	Strong	Weak 90 Strong	Weak 70 Strong	Weak 50 Strong



(a) カードの強さ



(b) 正規化した賭け金



(c) 正規化した turn

図 4: メンバーシップ関数

表1のファジィルールはゲームの前半 (Early) のルールとして定義する。中盤 (Middle)、後半 (End) のルールも同様に定義する。表1のファジィルールは後件部のファジィ集合 $\tilde{D}$ が確定していないことが特徴である。$\tilde{D}$ は確率的に決定され Weak、Strong のいずれかとなる。

Weak、Strong の選ばれる割合を決定するパラメータとして傾向値 $t(0 \leq t \leq 100)$ というものを導入する。表1に 50、30 のように示されているのが傾向値である。傾向値が大きいほど $\tilde{D}$ が Strong となる割合が大きくなる。傾向値は相手の賭け方と対戦結果を考慮しながら1回の対戦が終るごとに変更していく。それにより相手ごとに適応した戦略をとれるようになると考えられる。

3.2.2 ゲーム中の傾向値の変換

対戦相手のホールカードの枚数は高々3枚なのでシステムが優勢である場合の数の全数探索を短時間で行うことが可能である。しかし、この情報は表1のルールでは用いられていない。この情報を有効に使うことで、より状況に即した推論が可能になると考えられる。

全数探索によってわかる、システムが優勢である割合を p $(0 \leq p \leq 1)$ とする。システムが優勢である割合が大きい (p が1に近い) 場合、傾向値が小さくても後件部を Strong とした方がよく、システムが優勢である割合が小さい場合は後件部を Weak とした方がよい。そのためには、p の値に応じて傾向値を変換することが考えられる。そこで、傾向値の変換式を式 (1) のように定義する。変換後の傾向値をしきい値と呼び、s と名付ける。

$$s = \begin{cases} 100 \cdot \left(\dfrac{t}{100}\right)^{-log_2 p} & (0 < p \leq 1) \\ 0 & (p = 0) \end{cases} \qquad (1)$$

s : しきい値 $(0 \leq s \leq 100)$ t : 傾向値 $(0 \leq t \leq 100)$
p : 全数探索によるシステムが優勢な割合 $(0 \leq p \leq 1)$

p の値に応じて傾向値からしきい値への変換の様子は異なる。その例を図5に示す。ここで、傾向値の大小関係がしきい値へ変換されても保存されるように式 (1) は単調増加関数となるように選んでいる。

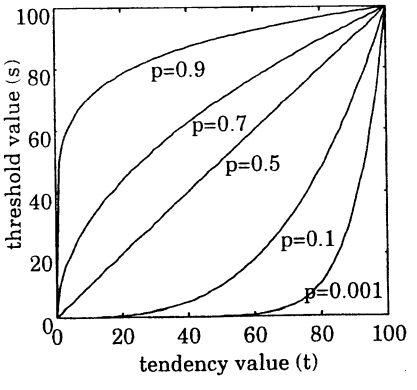


図 5: 傾向値からしきい値への変換

3.2.3 後件部の決定と推論方法

しきい値を決定後、0 ～ 100 の一様乱数を発生させ乱数がしきい値以上なら後件部を Weak とし、しきい値より小さければ後件部を Strong とする。後件部を決定した後は Mamdani の方法 [5] によってファジィ推論を行う。推定結果は -1 以上1以下の実数となる。

3.3 ルールの修正

1回のゲームが終了するごとに手札を公開するので、優劣推定の推定結果がどの程度正しかったのかを知ることが出来る。推定結果と実際のカードの強さの差の大きさに応じて表1に示した優劣推定ルールの傾向値を修正する。その修正量をファジィ推論を用いて求める。ファジィルールは表2のようにする。

If "推定結果 is $\tilde{E}$" and "実際のカードの強さ is $\tilde{F}$"
then "傾向値の修正量 is $\tilde{G}$"

$\tilde{E}, \tilde{F}$: Weak,Strong (図 4 (a))
$\tilde{G}$: N,Z,P (図 6)

表 2: 傾向値の修正量を求めるファジィルール

$\tilde{G}$		$\tilde{F}$	
		Weak	Strong
$\tilde{E}$	Weak	Z	P
	Strong	N	Z

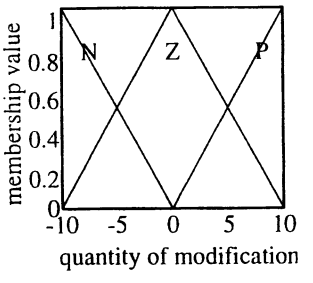


図 6: メンバーシップ関数 (傾向値の修正量)

修正量は1回の対戦が終るごとに求めるが、1回の対戦からだけで対戦相手の傾向をつかむのは難しい。そこで、求めた修正量の5回分の平均値と最新の修正量を用いて実際に傾向値を変更する。そのためのファジィルールを以下に示す。

If "5回分の修正量の平均 is $\tilde{H}$"
and "最新の対戦の修正量 is $\tilde{I}$"
then "傾向値の実際の変更量 is $\tilde{J}$"

$\tilde{H}, \tilde{I}, \tilde{J}$: N,Z,P (図 6)

表 3: 傾向値の実際の変更量を決めるファジィルール

$\tilde{J}$		$\tilde{I}$		
		N	Z	P
$\tilde{H}$	N	N	N	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	P

4 実験方法

ある被験者がシステムとポーカーを 100 戦行う。その際のシステムの優劣推定に以下の二つの方法を用い、それぞれの推定がどの程度正解を出しているのかを比較してみる。推定はシステムの手番が来たときのみ行う。

方法 1 表 1の優劣推定ルールを用いたファジィ推論を 30 回行い、その結果の平均を推定結果とする

方法 2 ホールカードの全数探索によって求められるシステムが優勢である割合が、0.5 以上なら優勢、0.5 より小さいなら劣勢を推定結果とする

本実験ではシステムが優勢と推定したときに実際のカードも優勢であればその推定を正解としている。つまり、僅差の優勢や大差の優勢といったものはなく、単に優勢とみなして評価を行う。このような評価を行うのは、このゲームでは僅差の勝利も大差の勝利も全く同じ価値を持っているためである。

5 実験結果

実験結果を表 4、5に示す。優劣推定の回数が 100 回でないものもあるがこれは途中でどちらかのプレーヤがドロップすることがあるために全てのゲームが turn5 まで続くわけではないためである。

表 4: それぞれの方法の正解率

	turn				
	1	2	3	4	5
方法 1	0.860	0.790	0.780	0.838	0.838
方法 2	0.860	0.770	0.750	0.798	0.812

方法 1： 30 回の推論の平均を用いた手法
方法 2： システムが優勢である割合のみを用いた手法

表 5: 表 4の詳細

(方法 1, 方法 2)	turn					計
	1	2	3	4	5	
(正解, 正解)	80	74	71	75	60	360
(不正解, 正解)	6	3	4	4	5	22
(正解, 不正解)	6	5	7	8	7	33
(不正解, 不正解)	8	18	18	12	8	64
計	100	100	100	99	80	479

6 考察

方法 1 の平均正解率 μ_1 が方法 2 の平均正解率 μ_2 を上回っているかどうか検定 [6] を行う。表 4の正解率のデータには turn ごとに対応があるので母平均の差 ($\mu_1 - \mu_2 = \delta$) に関する検定を行うには、対応するデータの差

$$d_j = x_{1j} - x_{2j} \qquad (j = 1, 2, 3, 4, 5)$$

ただし、x_{ij}: 方法 i の第 j turn の正解率 $(i = 1, 2)$

の平均値を $\bar{d}$、平均平方を V_d としたとき $t = \frac{\bar{d}-\delta}{\sqrt{V_d/n}}$ が自由度 $\phi = n - 1$ の t 分布に従うことを利用する。この検定ではデータ数が 5 なので、自由度 $\phi = 4$ である。

仮説 $H_0 : \delta = 0$ を $H_1 : \delta > 0$ に対して有意水準 $\alpha = 0.05$ で検定する。検定規則は、

$$R : t_0 = \frac{\bar{d}}{\sqrt{V_d/n}} \geq t(n-1, 2\alpha) = t(4, 0.10) = 2.132 \qquad (2)$$

である。統計量 $\bar{d} = 0.232$、$V_d = 0.02212$ より、

$$t_0 = \frac{0.232}{\sqrt{0.02212/5}} = 3.488\cdots > 2.132 \qquad (3)$$

ゆえに、有意水準 0.05 で、仮説 $H_0 : \delta = 0$ は棄却される。以上より、方法 1 の方が正解率が高いと言える。

7 まとめと今後の予定

本稿では、対戦相手に応じて優劣を推定するファジィシステムを構築し被験者実験を行った。その結果、カード情報のみを用いて優劣推定をした場合よりも良い結果が得られた。これはシステムが相手の賭け金の賭け方の傾向に適応したためと考えられる。今後は被験者実験をより多く行い、その有効性を確認していく予定である。

参考文献

[1] モートン・D・デービス： ゲームの理論入門, 講談社 (1973)

[2] Peter W.Frey *Chess Skill in Man and Machine*, Springer-Verlag,New York,1978

[3] 松原仁： コンピュータ将棋の進歩, 共立出版 (1996)

[4] ディヴィット・パーレット： トランプゲーム大百科, 社会思想社 (1998)

[5] 本多中二, 大里有生 ： ファジィ工学入門, 海文堂 (1989)

[6] 安藤貞一, 松村嘉隆, 二見良治： 技術者のための統計的品質管理入門, 共立出版 (1981)

[問い合わせ先]
〒 305-8573
つくば市天王台 1-1-1
筑波大学人間情報処理研究室
風見覚
Tel: 0298-53-6188
Fax: 0298-53-5207
E-mail: skazami@onisawa-gw.esys.tsukuba.ac.jp

WA5−1

ファジィ推論を用いたハイブリッド交通機関選択モデルに関する検討

Hybrid Modal Sprit Models Using Fuzzy Reasoning

水谷香織 Kaori MIZUTANI
秋山孝正 Takamasa AKIYAMA
岐阜大学大学院 Graduate School of Gifu University
岐阜大学 Gifu University

Abstract It is important in travel behaviour analysis to construct precise discrete choice models. Stochastic models based on the random utility theory such as logit models and fuzzy reasoning models can be combined in order to create advanced models for the estimation of travel behaviour as hybrid models. Particularly, logit models with fuzzy logic utility functions have been proposed. It is known that the utility function described with fuzzy inference rules can reflect human decision making processes on the logit models. The rules and parameters of membership functions are determined by the GA. A fuzzy logit model is applied to a modal choice problem in this study.

1 はじめに

多様な交通行動の局面を記述するため，確率的効用理論に基づくロジットモデル[1]と，ソフトコンピューティングを相互補完的に融合したハイブリッド交通行動分析モデルが提案されている[2]．ここでは，交通行動者が行う現実的な選択行動を考える場合に，人間のもつランダム性やファジィ性を同時に持つ不確実要因を含む意思決定構造を前提としている．これより，所要時間，所要費用等に対する人間の曖昧性を確率的モデルに取入れ，各説明要因と効用の関係を明示的に記述することが可能になっている．

本研究では，簡略ファジィ推論型効用関数をもつロジットモデルの適用性の検討を行う．とくに，交通機関選択行動に関する効率的なルール生成とメンバシップ関数のパラメータ推定を行うため，遺伝的アルゴリズム(GA)を用いる．自動生成されたルールは，交通行動の重要な因果関係を示していると思われる．したがって，交通行動の根源的分析が可能になると思われる．

2 ファジィロジットモデルの作成

2.1 モデルの概要

ここでは，具体的な交通行動モデル作成のため，自動車と公共交通機関の 2 項選択問題を取り上げる．具体的モデルとして，線形和の効用関数をもつロジットモデル（BL）と，簡略ファジィ推論により効用が記述された「ファジィロジットモデル」（FBL）を取り上げる．説明変数は，所要時間，所要費用，自動車免所の有無とした．また分析対象として，第 3 回中京圏 PT 調査結果における岐阜市の出勤トリップ（1,597）を考えた．各モデル作成にあたっては，1,278 サンプル（80%）を学習用データとし，319 サンプル（20%）をモデル検証データとする．

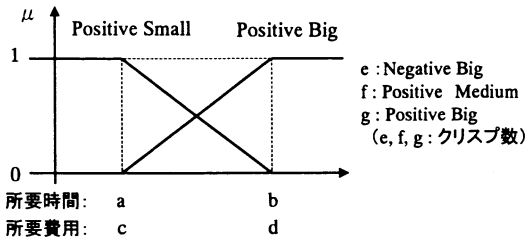
2.2 ファジィ推論型効用関数の作成

ファジィロジットモデルは，ファジィ推論型効用関数 Z_{in} を内包するロジットモデルである．選択確率 P_{in} は式(1)で表される．

$$P_{in}=\frac{1}{1+e^{-\lambda\ (Z_{in}-Z_{jn})}} \qquad (1)$$

i, j: 選択肢番号，λ:バラツキを示す変数(=1)

すなわち，上記の Z_{in} がファジィ推論結果として求められる．ここでは，表−1 のように 10 ルールを作成した．また，メンバシップ関数のパラメータは，図−1 のａ〜ｇである．尤度最大化を目的とし試行錯誤法により各パラメータ決定した．このモデルを FBL1 とする．



図−1　メンバシップ関数とパラメータ

2.3 ルールの自動生成とパラメータ推定

一般的に，BL モデルは，NR 法等を用いた最尤推定法によるパラメータ推定が行なわれる．離散的な変数をもつ最適化手法として GA を用いると，FBL モデルについても，最大尤度を目的とした推論ルール後件部の自動生成と，パラメータ推定が実行できる．具体的には，式(2)に示す対数尤度関数 L を目的関数とした．

$$L=\sum_{n=1}^{N}\left[y_{in}\log P_{in}+y_{jn}\log P_{jn}\right] \qquad (2)$$

y_{in}: 実績選択結果の場合 1，異なる場合：0

また，表−1 に示す 10 ルールの効用（後件部）と，図−1 に示す 7 種類のパラメータ値を，45 ビットの個体（染色体）01001…1010 で表現した．ここでは，図−2 に示すように，各ルールの後件部に 2 ビットの遺伝子を割り当て，11：PB，10：PM，01：NB，00：ルールなし（表−1）とした．

パラメータ a〜d に関しては，4 ビットの遺伝子により二進法表記された値 k，最小値 m，刻み幅 w（所要時間は 5 分，所要費用は 30 円）を用いて，a＝m+k×w のように表記する．また，パラメータ e〜g に関しては，3 ビットの遺伝子により二進法表記した．各設定変数は，個体数:100，淘汰率:0.4，交差率:0.4，突然変異率:0.4 である．また，1000 世代までの計算を行い，20 回の試行結果から最大値を与えるものを解とした（FBL2）．

3 ファジィロジットモデルの適用性

3.1 推計精度

ここでは，推計結果の適合性から，モデルの有意性に関する考察を行う．ここで，$\%Right_1$は，個人の選択結果に関する的中率である，また，$\%Right_2$は，個人の選択確率に関する的中率を表す．このとき，的中率（$\%Right_1$，$\%Right_2$）は，BL が（84.4，82.1），FBL1（90.7，86.8）が，FBL1（89.0，85.0）である．FBL1，FBL2 では，通常の BL モデルより良好な適中率が得られている．また同表において，モデル検証データに対しても良好な的中率が観測されている．このように，通常のロジットモデル（線形和の効用）に比べて，ファジィロジットモデルの適合性は高く，実用的な交通機関選択行動の推計が可能なものと思われる．

また，FBL1 と比較し FBL2 の推計精度は若干劣る．これは，パラメータをコーディングする際に，刻み幅を用いて簡略化したためであると思われる．したがって，試行錯誤によるパラメータの設定と比較して，本例では，GA の効率性を示すことはできない．しかしながら，一般に多数のパラメータを推定する場合には，GA の利用が有効であると思われる．

3.2 生成されたルールについての検討

表－3に示される後件部を自動生成したファジィ推論ルールを分析する．ここで得られたルールは，最尤推定を仮定し，サンプルデータより抽出した交通機関選択に関する知識を記述したものである．したがって，交通行動の因果関係を明示しているものと考えられる．

表－2に示される FBL 1 のファジィ推論ルールと比較すると，FBL 2 ではルール 3，ルール 8 が棄却された．これより，出勤時の交通機関選択に対して，「自動車の所要時間が短いとき，自動車に対する効用は非常に大きい」，「自動車の所要費用が大きいとき，自動車に対して非常に大きい負の効用がある」という知識は，選択に影響を及ぼす重要ではないことがわかった．また，ルール 5，ルール 9 より，「公共交通機関の所要時間が非常に短く，所要費用が非常に高いときは，公共交通機関に対する効用は大きくはなく，中くらいである」ことがわかる．したがって，FBL1 と比較し FBL2 では，公共交通機関の所要時間，所要費用を変化に対して，公共交通機関選択に与える効果が少ない状況を記述したモデルとなっている．

3.3 効用曲面についての検討

簡略ファジィ推論ルール群と効用関数の形状の関係を分析するため，FBL2 の公共交通機関に対する効用曲面を図－3 に示す．これは，効用変化を時間費用平面に対して描いたものである．後件部がクリスプ数で表わされているため，平面的な効用曲面となっている．図－3より FBL 2 では所要時間がおよそ 30 分以内，所要費用がおよそ 200 円以内で効用が逓減することがわかる．また，所要時間が 1 時間前後で公共交通機関の効用が著しく減少することがわかる．さらに，所要費用が 200～300 円で著しく減少する．これは，需要関数の価格弾力性が一定でないことを表わしており，現実の交通現象からも知られることである．

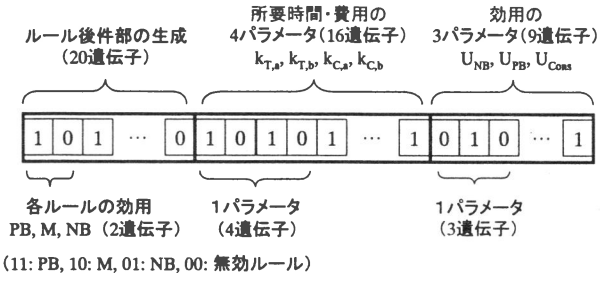
4 おわりに

本研究では，簡略ファジィ推論を用いた効用に基づく交通機関選択ロジットモデルを作成した．とくに，

表－1　ファジィ推論ルール

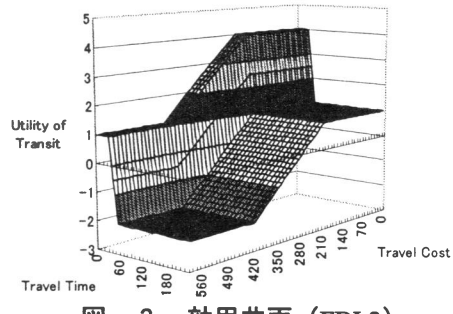
No.	Items	IF L	T_C	T_{MT}	THEN (FBL1) UT(C)	UT(MT)	THEN (FBL2) U(C)	U(MT)
1	Car Licence	ZE			NVB		NB	
2	Car Licence	AV			PM		PM	
3	Travel Time of Car		PS		PB			
4	Travel Time of Car		PB		NB		NB	
5	Travel Time of Mass Transit			PS		PB		PM
6	Travel Time of Mass Transit			PB		NB		NB
7	Travel Cost of Car		PS		PB		PB	
8	Travel Cost of Car		PB		NB			
9	Travel Cost of Mass Transit			PS		PB		PM
10	Travel Cost of Mass Transit			PB		NB		NB

C: Car, MT: Mass Transit, L: Car Licence, T: Travel Time, U: Utility
ZE: Zero (=0), AV:Available (=1)
NB: Negative Big, PB: Positive Big, PM: Positive Medium



（11: PB, 10: M, 01: NB, 00: 無効ルール）

図－2　染色体内の遺伝子一次元配列



図－3　効用曲面（FBL2）

ルール後件部の自動生成とパラメータ推定に GA を導入し，モデル作成の効率化を図っている．また，生成されたルールを分析することにより，交通行動原理に基づいた分析が可能になると思われる．

今後の課題として，①都市交通政策評価に関連する説明要因に対する交通需要の弾力性分析，②TDM 等の交通政策評価への応用，さらに，③多項ファジィロジットモデルでは対応できない非限定的な多数の選択肢をもつ問題に対応可能な他のハイブリッド手法の検討が挙げられる．

【参考文献】
1） Ben- Akiva & S. Lerman. Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand, The MIT Press, 1985.
2） Kaori Mizutani and Takamasa Akiyama：A Descriptive Hybrid Model of Modal Choice with using Fuzzy Reasoning, the 4th Asian Fuzzy System Symposium, 2000 (Forthcoming).

[問い合わせ先]
〒501－1193
岐阜市柳戸 1－1　岐阜大学大学院工学研究科
水谷香織
Tel：058-293-2446　Fax：058-230-1528
E-mail：kao@cc.gifu-u.ac.jp

WA5−2

不明確な入力画像による特徴量の欠如を考慮した車種認識

Pattern Recognition of Cars using Fuzzy Inference with Lacked Input Data

佐藤 秀司 Shuji Sato
荒井 良徳 Yoshinori Arai
東京工芸大学 Tokyo Institute of Polytechnics
廣田 薫 Kaoru HIROTA
東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

Abstract We introduce a frame work of a modified fuzzy inference method with lacked input data. In this method that is modified from the Mamdani's fuzzy inference, a result of each rule is the adjustment for the purpose of protection from influence of lacked input data. The adjustment of result fuzzy labels at each rule is used the degree of importance which is set up in the rules by human. And in the results of simply experiment, the system can infer well with lacked input data used this method.

1. はじめに

街に走っている多種多様な車を見て、その車名を判断する事は人間でさえ容易ではない。人間は、その車の特徴を観察し、知識と照らし合わせることによって、推論を行っていると考えられる。コンピュータ上でこれらを行う際、照らし合わせをテンプレートマッチングや構造マッチングによって行うことは、知識の膨大さ、処理の複雑さの問題などを含み現実的であるとは考え難い。

高度な画像処理技術を用いることなく、車の各部分の長さ、角度といった特徴量から車種、車名を特定するアルゴリズムとして、注視点フィードバックによるファジィ階層型車種認識システム（FHPR/FF）の研究[1][2][3]が行われている。このシステムにより、ある程度不正確な特徴量に対しても車種および車名の認識を行うことが可能となっている。しかし、それらの特徴量を抽出する上で、どうしても測定できない、「不明」な部分が存在してしまうことがある。ファジィ推論を用いたシステムの場合、入力特徴量の「不明」を考慮していないため、極端に間違ったデータがそのまま入力されてしまう場合があり、これが、認識率を低下させるひとつの大きな要因となっていた。

そこで、観測特徴量が「不明」つまり欠如した場合でも、より正確な認識結果を得られるシステムを提案する。

2. ＦＨＰＲ／ＦＦの概要と問題点

静止カラー車画像（図１）から、ファジィ推論を用いて、その車種および車名を認識するシステム（FHPR/FF）の研究が行われている。「注視点」という考え方やファジィ推論を用いたアルゴリズムにより、複雑な形状を持つ車に対し、車種・車名までの認識が可能となっている。その処理の概要を図２に示す。



図１　静止カラー車画像例

ミニカーを用いた静止カラー車画像（図１）から抽出された車の各部分の長さ、角度といった情報を、入力特徴量として用いる。それらの特徴量を用い、まず、あらかじめ用意された一般的知識によってファジィ推論による大まかな推論を行う。次に、比較知識を用いて注視点の選択を行う。注視点とは、例えばある２つの車種を区別するために最も適した特徴量のことを指す。選択された注視点を測定し、最後に大まかな推論結果に修正を

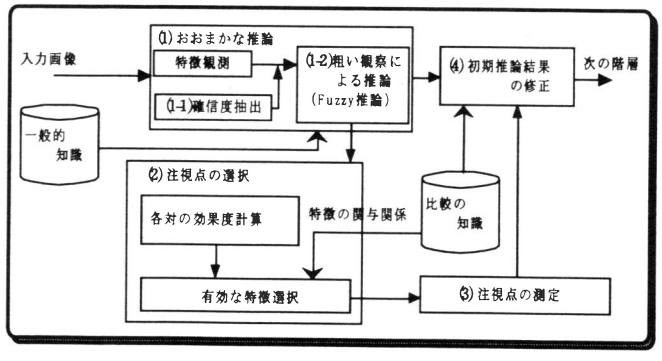


図２　FHPR/FF の処理の流れ

加えて推論結果とする。

しかし、原画像の状態によって背景除去の不備や特徴抽出の失敗した場合が想定されておらず、極端に間違った値が入力されてそのままファジィ推論されてしまうという欠点があった。

3. 提案システムの概要

ＦＨＰＲ／ＦＦでは、静止画を対象とした認識を行い、本研究では更にその対象を、動画、つまり連続した静止画にまで拡張する。

対象を動画にしたことで、その１枚１枚の画像は、ぶれているような、不明確な部分が存在してしまう（図３）。このような入力画像では、静止画特徴抽出方法[4]によって、完全な特徴量抽出を行うことが不可能である。



図３　動画像例

たとえ抽出ができない特徴量が存在したとしても、ＦＨＰＲ／ＦＦで用いたMamdaniのファジィ推論などではそのまま入力するしかない。そのため、入力画像の状態によっては、推論結果に大きく影響してしまう懸念がある。

そこで、そのような画像に対処するため、処理に失敗し推論の入力が欠如している場合にも対応できる処理方法を提案する。

4. 観測特徴量欠如を考慮した処理方法

4-1. 新方法の特長と概要

ここでは、ファジィ推論によって車種を特定するシステム構築を目的とする。入力は、車の各部分の長さや角度を表す数値データであり、特徴抽出アルゴリズムが処理できず、その数値データが出力されない場合、「不明」というデータが入力されたと考える。

通常のファジィ推論（Mamdaniによる方法など）では、入力が欠如すると、そのまま結論に影響を与えてしまう。そこで、「不明」というデータを用いて、その影響をなるべく小さくする処理を行い、より正確な推論結果を導く。

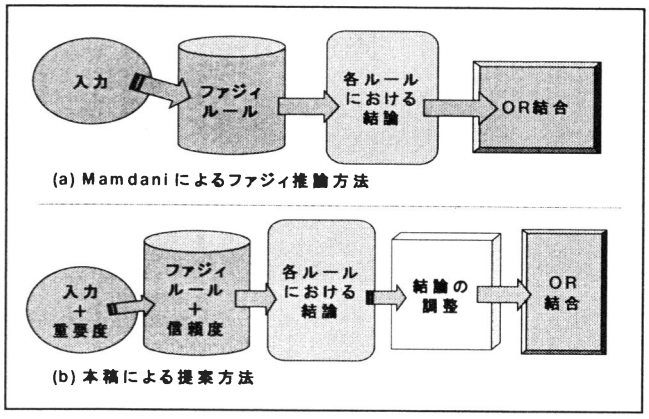


図４　処理の流れ

4-2. 具体的な処理方法

図４(a)にMamdaniによるファジィ推論の方法の流れを、図４(b)に本提案による処理の大まかな流れを示す。

本提案による方法では、“結論の調整”という処理ブロックを新たに加えている。ここで、システムへの入力特徴量が「不明」であった場合の調整を行い、最終的な結論にそれを反映させる。そのために、ファジィルールの入力部分に対し「重要度」という考え方を用いる。

以下に、「重要度」の定義について、及び“結論の調整”でのその適用の仕方について述べる。

1)　重要度

ｎ入力１出力のファジィ推論における、ファジィルール各ｎ個の入力部分に、ファジィラベルとは独立に「重要度」という数値を設ける。「重要度」は、ファジィルール毎に０以上１未満の値で設定する。

入力が欠如したときの結論への影響度合は、各々のファジィルールによって異なると考えられるため、その度合いを「重要度」によって表す。

2)　ファジィルールの結論の信頼度

各ファジィルールについて、全ての有効な（「不明」でない）入力に付した「重要度」を、加算したものをそのルールの「信頼度」と呼ぶ。

入力のうちどれか１つでも欠如していた場合、個々のファジィルールの信頼度は低下する。各ルールにおいて重要な入力が欠如するほど、信頼度は低くなる。

3)　“結論の調整”ブロック

ここでは、“結論の調整”での処理手順について述べる。

(a)　調整の概要

図４の“各ルールにおける結論”、C_1～C_nについて、それぞれ調整A_1～A_nを行い、調整結論C_1'～C_n'を求める。各調整結論C_1'～C_n'は、調整前の

結論C_1～C_nそれ自体と、それ以外との組み合わせによって得られる結論より求める。

(b)　組み合わせ

まず、結論C_1に注目する。結論C_1以外のC_2～C_nのうち、結論C_1の信頼度λ_1よりも大きい信頼度を持つものとの組み合わせを考える。同様に結論$C_2, C_3, \cdots, C_n$について、それぞれ自分以外の結論との組み合わせを考える。

(c)　調整方法

(b)で述べた組み合わせで、各結論の調整を行う。調整は、X（台集合）方向、Y（メンバーシップ値）方向という順序で、別々に行う。

ここで、今注目しているラベルを「対象ラベルf(x)」、組み合わせによるそれ以外のラベルを「比較ラベルg(x)」として説明を行う。

(d)　X（台集合）方向の調整

1. 対象ラベル f(x)、比較ラベル g(x)それぞれの重心のX座標x_f、x_gを求める。
2. 対象ラベル f(x)を、x_fとx_gを結ぶ線分をそれぞれの信頼度λ_f:λ_gに内分する点x_mが重心となるように平行移動する（図５）。

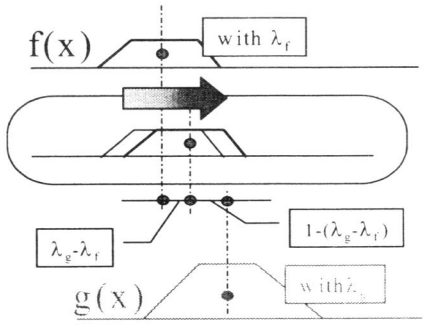


図５　x方向の調整

(e)　Y（メンバーシップ値）方向の調整

対象ラベルf(x)の全てのxについて、以下の式を用いて修正する（図６）。

$$f(x)=\begin{cases} f(x), \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (f(x) \le g(x)) \\ f(x)\times(1-(\lambda_f-\lambda_g)), \ldots (f(x) > g(x)) \end{cases}$$

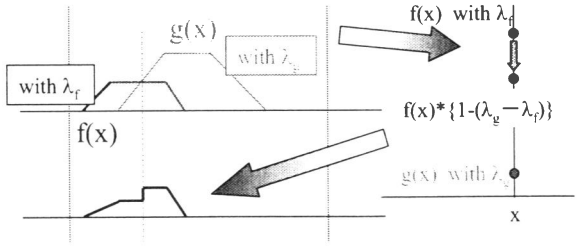


図６　y方向の調整

(f)　組み合わせごとの統合

各対象ラベルごとの組み合わせにより調整されたラベルを、OR結合によりそれぞれ統合する。

(g)　最終的な統合

(f)で出来た各ラベルを、最終的にOR結合する。

5.　実験

5-1.　実験の概要

本提案方法に基づいて、入力特徴量が欠如した場合についての車名推論を行い、撮影された入力画像が規定の３車名の内どれであるか推論する実験を行う。本実験では、簡略化のため、1/40 のミニカーを撮影対象とする。撮影対象は、約 70Km/h で走行する車を想定したものである。また、カメラの地上からの高さは 20 メートル、カメラと車の距離は 10 メートル程度を想定する。

想定速度で動いているミニカーを、デジタルカメラにより動画として撮影する。その中から、車全体を捕らえているフレーム（静止画像）を入力画像とする。画像からの特徴抽出は、撮影車の各部分を実測することにより行う。これらの実測値のうち、幾つかが欠如することを想定し、推論結果を確認する。

5-2.　入力及び出力

1)　入力画像

３車名、７枚を入力画像とする。３車名は、GTO、Skyline、Celica で、いずれもハッチバック車である。このうち GTO のみ向きの異なる５枚で、他２車名を１枚づつとする。

2)　特徴量の抽出

車の撮影画像をプリントアウトしたものを実験者が直接測定し、特徴量とする。特徴量は、屋根の長さ、ボンネットの長さ、トランクの長さの３種類とする。

カメラとの距離、車の向きに影響されないようにするため、全特徴量は車の全長との比で表す。

3)　ファジィルール

入力画像を正しく認識するための、５つのファジィルールを用意した。ルールは、2)で述べた特徴量の３入力とし、入力毎に重要度を設定する。

4)　出力（推論結果）

推論結果は、入力画像がどれだけ規定の３車名らしいかを表す、０～１の数値とする。例えば、GTO:0.8、Skyline:0.1、Celica:0.4 などと出力され、この場合は入力画像がGTOらしいと推論されたことになる。

5-3.　実験方法

1) ルールの有用性の確認

提案方法は Mamdani によるファジィ推論の方法を基本としている。特に入力特徴量が全く欠如しなかった場合には、本方法の特殊例として Mamdani によるファジィ推論法と同等になる。そこで、推論に用いるファジィルールの有用性を確かめるため、入力特徴量が欠如しなかった場合についても、推論が正しく行われるかどうかを確認した。

2) 提案方法の優位性の確認

本提案方法の目的である、入力特徴量が欠如した場合の車名推論について実験を行う。ここでは、5-2 で実測した３つの特徴量のうち、１つが欠如した場合、２つが欠如した場合を想定する。

5-4. 実験結果

1) 入力が欠如しなかった場合について

７枚の撮影画像からの特徴量を入力し、用意したルールを用いてファジィ推論を行った。

推論結果を表１に示す。

全て正しいと思われる推論が行われ、ルールが妥当なものであることが確認できた。

表１ ルールの確認結果

	屋根	ボンネット	トランク	GTO	Skyline	Celica
GTO 1	0.18	0.32	0.14	**0.6**	0.1	0
GTO 2	0.21	0.31	0.13	**0.6**	0.2	0
GTO 3	0.24	0.27	0.15	**0.2**	0.1	0
GTO 4	0.18	0.3	0.12	**0.4**	0.1	0
GTO 5	0.23	0.29	0.15	**0.4**	0.1	0
Skyline	0.24	0.29	0.11	0.2	**0.8**	0.1
Celica	0.25	0.25	0.06	0	**0.1**	0.8

2) 入力が欠如した場合について

入力特徴量が欠如した場合について、推論結果の正否を表２に示す。これは、全ての入力画像の全ての特徴量の、全ての欠如の組み合わせについて、通常の Mamdani 推論による結果と、本提案方法による推論結果を比較したものである。

例えば、ＧＴＯ４の最左列の欄は、入力が屋根とボンネットの２つであり（トランクが欠如）、本提案方法によってより正しく推論されるようになったことを示している。

表２ 実験結果

	屋・ボ	屋・ト	ボ・ト	屋根	ボンネット	トランク
GTO 1	・	・	・	・	○	・
GTO 2	・	・	・	・	○	・
GTO 3	・	・	・	△	・	△
GTO 4	○	・	△	・	○	・
GTO 5	・	・	・	△	○	△
Skyline	・	・	・	・	・	×
Celica	・	×	・	・	・	・

両方法とも正しい、あるいは間違った推論結果となったもの（・）は 71%、本提案方法によって正しい結論に近づいたが、推論結果が依然として正しくないものが（△）12%、通常法では正しく推論できなかったが本提案方法により正しく推論できたもの（○）が 12%、通常法で正しく推論できているが本提案方法では間違った結果となっているもの（×）が 5%となった。

6. おわりに

ＦＨＰＲ／ＦＦなどの車種車名認識アルゴリズムにおいて、車の各部分の特徴を表す数値が、入力として用いられている。それらの入力は多岐にわたり、抽出アルゴリズムで完全に抽出することは難しい。

本稿では、入力が完全でない場合についても、成るべく正しい推論が行えるような方法を提案した。Mamdani のファジィ推論法を基本とし、“重要度”という数値をファジィールールの入力部に設定することで、入力の欠如を考慮した。

実験の結果、妥当なルールで“重要度”がうまく設定されれば、入力が欠如した場合でも、より正しい結果が得られることが分かった。今後は、より複雑なルールを用いて検証し、様々な入力欠如のパターンについて正しい結果が得られるように、改善していきたい。

[参考文献]

[1] 荒井、関口、廣田：「注視点フィードバックによるファジィ階層型車種認識」、第 12 回ファジィシステムシンポジウム、pp78/82、1996.6

[2] Y. Arai, G. Sekiguchi, K. Hirota: “Fuzzy Hierarchical Car-model Pattern Recognhition System Using Fixation Feedback”, Int. Conf. On KES’97, pp154/158, 1997

[3] Y. Arai, K. Hirota: “A Pattern Classification Algorithm based on Fixation Feedback”, CESA’98, CD-ROM, 1998

[4] 佐藤、荒井：「車画像の特徴抽出のためのワイヤーフレーム化処理」、東京工芸大学紀要 Vol22 No.1、pp76/86、2000.1

[問い合わせ先]

〒243-0297
神奈川県 厚木市 飯山 1583
東京工芸大学・情報システム研究室
荒井 良徳
Tel&Fax: 046-242-9564
E-mail: arai@t-kougei.ac.jp

WA5−3

距離型ファジィ推論法による学習アルゴリズムを用いた静止画像圧縮

Image Compression with a Learnig Algorithm for Distance-type Fuzzy Reasoning Method

石田 斉
Hitoshi ISHIDA
北海道大学 大学院
Graduate School of Engineering,
Hokkaido University

王 碩玉
Syouyu WANG
高知工科大学
Kochi University of Technology

土谷 武士
Takeshi TSUCHIYA
北海道大学 大学院
Graduate School of Engineering,
Hokkaido University

Abstract : As an application of distance-type fuzzy reasoning method, I would propose the digital image compression of full color BMP images with the learning algorithm for distance-type fuzzy reasoning method. The learning algorithm, so to speak, selects essential signals from whole teaching signals. Image data is regarded as a set of teaching signals : the coordinates in the image $(x, y) \Rightarrow$ primary colors of the pixel (b, r, g). So the selection of essential signals from image data results in the image compression.

1 はじめに

一般に画像情報は，音声情報や文字情報に比べ情報量が非常に大きい．記憶容量や通信容量に制限があることを考えれば，画像情報を圧縮しようという発想は至極当然であり，情報工学の分野において重要な研究テーマの１つであると言える．

距離型ファジィ推論法 [1] は比較的新しい推論法であり，実際の応用例はあまり報告されていない．そこで著者は，距離型ファジィ推論法の応用例として，これを画像圧縮に適用する事を考え，実験を行ったのでここに報告する．距離型ファジィ推論法が画像圧縮に使えるのではないか，と考えた理由は，

- 距離型ファジィ推論法の学習アルゴリズム [2] が既に提案されており，これが画像圧縮に簡単に適用できる．
- 距離型ファジィ推論法ではシングルトン型（離散値）のデータが扱いやすい．

といったものである．

距離型ファジィ推論による学習アルゴリズムを簡単に説明すると，与えられた教師信号の中から，必要な教師信号と不必要な教師信号を取捨選択し，必要な教師信号のみを獲得するというアルゴリズムである．必要か不必要かの判断基準は，教師信号の前件部を入力として，当の推論システムがその時点で獲得している信号を元に推論を行い，その推論結果と教師信号の後件部の違いが，許容誤差内かどうかというものである．

画像情報は位置 (x, y) を前件部，画素値 (b, r, g) を後件部とする教師信号の集まりと見ることができ，その中から必要な信号のみを抽出し記録すれば，画像を圧縮できたことになる．以下では詳しい圧縮手順と，実験結果について述べる．また紙面の都合上，復元方法については省略する．

2 圧縮のアルゴリズム

ここでは圧縮の手順について述べる．実際に扱う画像情報は計算機上のフルカラー画像であり，具体的には 24 bit BMP イメージを扱う．また 1 章では，

$$(x, y) \quad \Rightarrow \quad (b, r, g) \tag{1}$$

を教師信号と見なすと述べたが，処理の都合上，前件部は水平座標のみを用い，後件部は各色成分ごとに個

別に学習を行う．つまり

$$x \Rightarrow b \quad , \quad x \Rightarrow r \quad , \quad x \Rightarrow g \qquad (2)$$

を教師信号とみなした．なお，以下では説明のため，画像の横幅を W ピクセル，縦幅を H ピクセルとする．

2.1 BMP ファイルの分解

準備段階として BMP ファイルをヘッダ，青 (B) 成分，赤 (R) 成分，緑 (G) 成分の 4 つのファイルに分割し，ヘッダを除く各色成分データに対し，以下の処理を個別に行う．

2.2 教師信号の生成

例として緑成分を考える．水平方向に 1 ライン分のデータを取り出し，水平座標 x_i を前件部，画素値 g_i を後件部とする教師信号を作成する（図 1）．ただし，

$$0 \leqq i < W \qquad (i \in \mathbf{Z}) \qquad (3)$$

である．

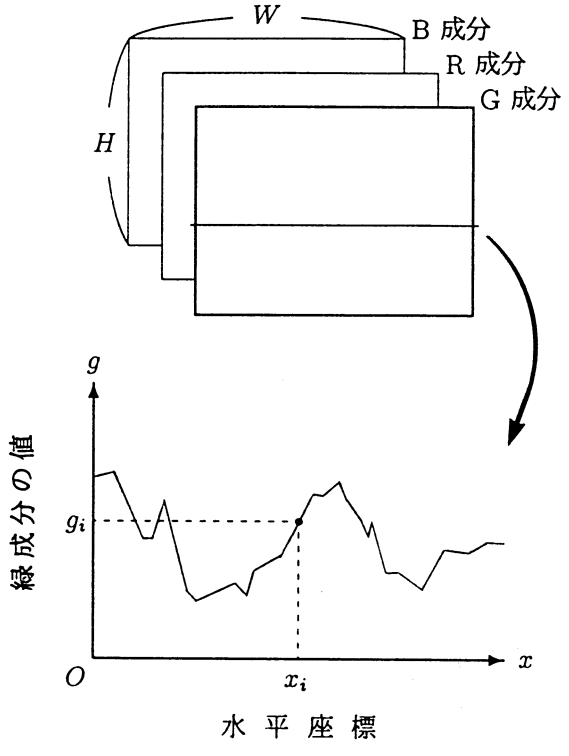


図 1: 教師信号の生成

2.3 学習アルゴリズム

本圧縮方法の核となるのは，距離型ファジィ推論による学習アルゴリズムである．このアルゴリズムの詳しい説明は文献 [2] で述べられているので，ここでは具体的に必要な部分を説明するにとどめる．

STEP 1　最初の 2 つの教師信号 $(i = 0, 1)$ は，無条件でルールとして獲得し，これを先験的なルールベースとする．$i = 2$ とする．

STEP 2　教師信号 $\{x_i, g_i\}$ に対し，x_i を入力として，現在まで獲得しているルールを元に距離型ファジィ推論法を用いて画素値を推論し，推論結果を G とする．なお，本来の距離型ファジィ推論法においては，推論を行う際に，ルールベース中のすべてのルールを用いて推論を行うが，計算量が多くなることを避けるため，すべてのルールを用いるのではなく，入力に近いものから最大 5 つのルールを用いて推論を行うように変更する．

STEP 3　教師信号（実際の画素値）g_i と推論結果（推論した画素値）G の距離

$$d(g_i, G) = |g_i - G| \qquad (4)$$

を計算する．このとき，任意の学習誤差 ε に対し，

case 1　$d(g_i, G) > \varepsilon$ であれば，$x_i \Rightarrow g_i$ を新しいルールとして獲得する．

case 2　$d(g_i, G) \leqq \varepsilon$ ならばルールの獲得は行わない．

ε は非負の実数値であり，小さくすればするほど，元画像に対する復元画像の変形量が小さくなる，極端な話，$\varepsilon = 0$ の場合は可逆圧縮となる．しかし許容誤差 ε が小さい程，獲得ルール数が増え圧縮比は大きくなる．

STEP 4　i をインクリメントし，$i < W$，つまり教師信号が残っていれば **STEP 2** へ．残っていなければ，これで 1 ライン分の学習は終わりとなる．

2.4 出力

獲得したルール数，および獲得したルールの前件部と後件部をファイルに記録するのだが，後件部は 0 ～ 255 の 1 バイトデータ（char 型）であるのに対し，前件部は座標なので 2 バイトデータ（int 型）であり，ファイルサイズがどうしても大きくなってしまう．そこで，前件部に関しては，1 つ前のルールの前件部と

の差を取ることで，1 バイトデータに収まるような処理を施した（図 2）．

前件部	252	254	255	257	258
後件部	255	255	240	224	255

↓

前件部	4	2	1	2	1
後件部	255	255	240	224	255

図 2: 前件部同士の差を取る処理

2.5 反復について

2.2 節から 2.4 節までの処理は，水平方向のある 1 ライン分のデータに関する学習であるから，実際には各色成分につき，最下行から最上行まで H 回繰り返すことになる．また色成分は，赤，緑，青の 3 色あるので，結局，1 枚の画像に対して上述の処理を $3H$ 回繰り返すことになる．

3 実験と結果

前章のアルゴリズムをプログラム化し，実際に圧縮を行ったのでその結果を述べる．実験に使用した画像は，SIDBA COLOR[*1]から選んだ自然画像と，インターネット上および個人的に入手した人工的な CG など十数枚である．ここにその全ての実験結果を載せることは出来ないので，代表的な 4 枚の画像について実験結果を記す．

3.1 諸量の定義

以下で用いる物理量の計算方法を示す．

圧縮比 元画像のファイルサイズを D_0，圧縮後のファイルサイズを D としたとき，圧縮比 c は

$$c = \frac{D}{D_0} \times 100 \qquad [\%] \tag{5}$$

と計算する．ただし，D_0，D はヘッダの類を含まないファイルサイズをバイト単位で表した値とした．

[*1]Standard Image Data BAse と呼ばれる画像データベースに収録されているフルカラー画像の総称．

平均変形 元画像の緑成分を $g_{\mathrm{org}}(x,y)$，復元画像の緑成分を $g_{\mathrm{out}}(x,y)$ としたとき，緑成分に関する平均変形を

$$E_g = \frac{1}{WH} \sum_{\substack{0 \le x < W \\ 0 \le y < H}} \left| g_{\mathrm{org}}(x,y) - g_{\mathrm{out}}(x,y) \right| \tag{6}$$

と定義する．同様に，青，赤成分に関しても平均変形 E_b，E_r を求め，最終的に

$$E = \frac{1}{3}(E_b + E_r + E_g) \tag{7}$$

を平均変形とする．

S/N 比 緑成分に関する変形の 2 乗平均（実効値）N_g を

$$N_g{}^2 = \frac{1}{WH} \sum_{\substack{0 \le x < W \\ 0 \le y < H}} \left\{ g_{\mathrm{org}}(x,y) - g_{\mathrm{out}}(x,y) \right\}^2 \tag{8}$$

と計算する．同様に，青，赤成分に関しても変形の 2 乗平均 N_b，N_r を求め，総合的な変形の 2 乗平均 N を

$$N^2 = \frac{1}{3}(N_b{}^2 + N_r{}^2 + N_g{}^2) \tag{9}$$

と定義する．一方，色に関係なく，元画像の信号の振幅（p-p 値）を S として S/N 比 s を

$$s = 20 \cdot \log_{10} \frac{S}{N} \qquad [\mathrm{dB}] \tag{10}$$

と計算する．

3.2 結果

画像 1 SIDBA COLOR の中から色数が多く，画素値の変化が激しい自然画像である `mandrill.bmp` を選んだ．サイズは 512 × 511．圧縮・復元結果を表 1 に示す．画素値が激しく変化しているためか，獲得ルール数が増え，圧縮比が小さくならない．誤差 $\varepsilon = 20$ でも劣化はあまり目立たなかった．

画像 2 SIDBA COLOR の中から色数が少なく，画素値の変化が緩やかな自然画像である `milkdrop.bmp` を選んだ．サイズは 448 × 510．圧縮・復元結果を表 2 に示す．画像 1 とは対照的に良く圧縮できている．表の範囲においては特に目立つ劣化は見られなかった．

画像 3 人工画像．一般的な CG．サイズは 384 × 360．圧縮・復元結果を表 3 に示す．$\varepsilon = 8$ くらいから，部分的に劣化が目立ち始めた．圧縮比としては，実験に用いた画像の中では比較的圧縮できた部類に入る．

表 1: 画像 1 の圧縮・復元の結果

ε	圧縮比	平均変形	S/N 比
10	113.5 %	2.11	36.6 dB
12	102.5 %	2.81	34.7 dB
15	88.3 %	3.95	32.3 dB
17	80.2 %	4.75	31.0 dB
20	69.5 %	6.01	29.3 dB

表 2: 画像 2 の圧縮・復元の結果

ε	圧縮比	平均変形	S/N 比
0	176.6 %	0.00	∞ dB
3	69.3 %	0.97	44.7 dB
5	43.3 %	1.78	40.3 dB
8	25.5 %	2.95	36.3 dB
10	19.6 %	3.74	34.4 dB

表 3: 画像 3 の圧縮・復元の結果

ε	圧縮比	平均変形	S/N 比
3	66.3 %	0.80	45.7 dB
5	49.2 %	1.46	41.2 dB
8	34.2 %	2.45	37.0 dB
10	28.2 %	3.05	35.3 dB
12	23.9 %	3.65	33.8 dB

表 4: 画像 4 の圧縮・復元の結果

ε	圧縮比	平均変形	S/N 比
0	19.3 %	0.00	∞ dB
1	17.9 %	0.15	56.5 dB
3	14.7 %	0.52	47.2 dB
5	12.7 %	0.58	45.7 dB
8	10.8 %	0.74	41.7 dB

画像 4　人工画像で色数が少なく，単純なもの．サイズは 840 × 260 ．圧縮・復元結果を表 4 に示す．広い領域にわたって同じ色が続くため，獲得ルール数が増えず，結果としてよく圧縮されている．

4　まとめ

以上，本報告では，距離型ファジィ推論法による学習アルゴリズムを用いた画像の圧縮手法を提案し，実験の結果を示した．画像圧縮の評価には圧縮比の他に，視覚的な劣化具合という主観的な量を考えなくてはならないため，単純に他の圧縮方法と比較できないのが残念であるが，今現在のところ本手法は，計算機上で一般に用いられている JPEG 等の圧縮方法には及ばないと言わざるを得ない．今後は，距離型ファジィ推論法による学習アルゴリズム単体ではなく，Huffman 符号化のような別の技術とも組み合わせて，圧縮比を小さくすること，および復元画像の劣化を少なくすることを目指す．

参考文献

[1] 王碩玉，土谷武士，“ 距離型ファジィ推論法 Part1 —距離型ファジィ推論法の提案— ”，第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集，pp.9 - 12，1996 年

[2] 王碩玉，土谷武士，“ 距離型ファジィ推論法 Part7 —距離型ファジィ推論法の学習アルゴリズム— ”，第 13 回ファジィシステムシンポジウム講演 論文集，pp.145 - 148，1997 年

[3] 何立風，王立松，巣宇燕，中村剛士，伊藤秀則，“ F - TTP ： ファジィ推論を用いた TPP 画像圧縮法 ”，日本ファジィ学会誌，Vol.11，No.2，pp.347 - 353，1999 年

[4] 映像メディア学会編，“ 画像情報圧縮 ”，オーム社，1996 年

問い合わせ先

〒 060 - 8628
札幌市北区北 13 条西 8 丁目
北海道大学大学院 工学研究科
システム情報工学専攻 制御工学分野
石田 斉
TEL : 011 - 706 - 6761
FAX : 011 - 706 - 7890
E-mail : ishida@ctrl.coin.eng.hokudai.ac.jp

WB1−1

不均衡進化説に基づく突然変異を有する遺伝的アルゴリズム
Genetic Algorithm with Mutation Based on Disparity Theory of Evolution

○前田 陽一郎
Yoichiro MAEDA
大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract — Generally, it has a problem that searching performance in the initial stage or the final stage of GA search is not good because genetic parameters are always constant. We apply the disparity theory of evolution to GA search proposed by Dr. Furusawa. In this research, we propose the disparity model of GA which has the mutation algorithm of this theory. We also report some simulaton results by using Knapsack Problem.

1 緒 言

遺伝的アルゴリズム (GA) とは生物進化から着想を得た確率的探索手法である。GA の特徴としては多点探索を行うため、様々な最適値問題において比較的良好な解を短時間で見つけ出すことができることが知られている。しかしながら一般的には GA の探索性能にはランダム的要素を含むため、いくつかの問題点がある。その中でも重要な問題点の 1 つに、シミュレーションで用いる遺伝的パラメータ (淘汰・増殖率、交叉率、突然変異率) を通常一定の値で用いるため、初期や収束期において探索性能があまり上がらないという問題がある。

これを改善するために種々の方法が提案されている。例えば、線形な関数やべき乗の関数を用いて、各々適応度の値に対して、探索初期に甘い淘汰を行い、収束期には厳密な淘汰を行う適応度のスケーリング法 [1]、設定した収束状況を満たすと個体群は安定スキーマを含まない空間を探索する親個体群と安定スキーマ内の縮退した空間を探索する子個体群とに個体群探索を分岐して進化を進め、広域探索と局所探索とのバランスをとって探索を進める個体群探索分岐型 GA (Population Forking GA) を用いた手法 [2]、並列処理による高速化と幾つもの下位集団を持たせて局所解の全集団への伝播を避け、良好な解を得ようとする二つの考え方を持った並列分散 GA を用いた手法 [3]、探索空間を領域分割手法 [4]、個体群の多様性を維持するため各個体についてその近傍を定義し、近傍ごとに選択を局所的かつ並列的に行う GA の一並列化 [5]、交叉率、突然変異率をファジィルールによりチューニングし効果的な探索を行うファジィ適応型探索 GA(Fuzzy Adaptive Search method for GA:FASGA) [6][7] など多くの手法が提案されている。

一方、現在における生物の進化論にはダーウィニズム、ネオダーウィニズム、反ダーウィニズムなど様々な仮説が存在する。その仮説の 1 つとして古澤ら [8] が新技術事業団「古澤発生遺伝子プロジェクト」に従事し、DNA 複製の研究を基に考え出された新仮説である進化の不均衡説がある。この不均衡進化説は生物がもつ二重螺旋構造の DNA を複製するときに起こるエラー頻度の違いを発見し、それをモデルにしたところ、DNA の複製から多様性が生まれることが見つけだされ、この仮説により生物のもつ多様性、進化のスピードの高速化などが証明された。

そこで本研究はこの不均衡進化説を取り入れた GA の不均衡モデルを提案することにより、多様性の高い効果的な探索を行う高速化 GA を提案する。さらに本手法の有効性を検証するためにナップザック問題を例題としてシミュレーションを行ったので、この結果についても報告する。

2 均衡進化説と不均衡進化説

均衡進化説、不均衡進化説は生物学である遺伝子複製方法に関する学説であり、本手法では不均衡進化説を GA に適用した。以下ではこれらの学説について説明する。

2.1 遺伝子複製エラーに基づく不均衡進化説

均衡進化説 (Parity theory of evolution) は GA の考えとほぼ同じである。生物学での DNA の染色体は二重螺旋構造になっているが、その 2 本鎖をほどいてみると向きが鋳型になっており全く反対の同じデータが存在している。その染色体を酵素が読み込むので、1 つの染色体を用いるだけでいいと考えられたのが一般的な GA であり均衡進化説である。また染色体を酵素が読み込みエラーをおこすのが突然変異にあたる [9]。

古澤ら [8] により提唱された不均衡進化説 (Disparity theory of evolution) は DNA の染色体を読み込むときに均衡進化説では考えていない酵素の読み方の違いがある。二重螺旋構造を持つ染色体は裂かれながら酵素によって読み込まれるとき開列を行うが、開列方向と同方向に合成されるリーディング鎖と呼ばれる複製エラーの頻度が少ないもの（低突然変異率）と、開列方向と逆方向に合成されるラギング鎖と呼ばれる複製エラーの頻度が高いもの（高突然変異）の 2 つに分れるという説である。またリーディング鎖とラギング鎖の突然変異率の差は約 30 倍である。

2.2 均衡モデルと不均衡モデルの違い

均衡進化説をモデルにした均衡モデルと不均衡進化説をモデルにした不均衡モデルの進化の方法を考える。均衡モデルは二重螺旋構造ではあるが、次世代に受け継がれるときはリーディング鎖・ラギング鎖ともに同じ変異率をもつものと考えられ、また不均衡モデルはリーディング鎖は突然変異率が低くラギング鎖の突然変異率は高いものと考えられる。これをモデルにしたもの図 1 に示す [8]。

太い矢印は親の DNA 鎖とし、連続した細い矢印を連続鎖、切れ切れの細い矢印を不連続鎖とすると 1 回の複製で 2 個の

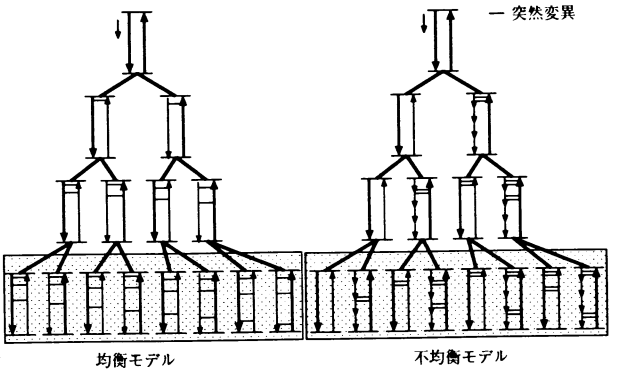


図 1. 均衡モデルと不均衡モデルの比較

変異が入ると考える。このとき均衡モデルと不均衡モデルを比較したときに均衡モデルは突然変異からできるDNAはあまり変化がなく安定した子ができる。それに対して不均衡モデルは様々なDNAを持つ子ができる。このことから解空間探索問題を考えたときに不均衡モデルは多様性があり最適解が見つけやすいと考えられる。従って不均衡モデルと均衡モデルとでは、環境変動に対する適応能力という意味では、不均衡モデルははるかに優れており、進化速度を約10倍ほど高めることができると言われている。

しかしながら、適応度、すなわち子孫の繁殖成功度という意味では、均衡モデルが有利である。不均衡モデルのラギング鎖の個体は広い遺伝子空間を探索するためには最も有効であるが、親の優れた形質を持っていてもリーディング鎖の個体でしか生き残れなくなる。逆に均衡モデルの方は種の淘汰によって生き残った優れた遺伝子がほぼ正確に子に伝わる。このことから環境に対する適応能力という意味では不均衡モデルが生かされ、次世代に引き継がれる適応度という意味では均衡モデルが生かされる[9]。よって不均衡モデルの適応度を高めるためにリーディング鎖を0に近い値にしておき等価的にエリート保存を実現させれば優れた遺伝子が次世代に引き継がれる。

2.3 進化の不均衡性を用いた研究例

和田ら[9]はアルゴリズムの進化の研究において多峰性の最大値探索問題でかつ山々の形が時間ごとに徐々に変化する問題に進化の不均衡説を用いた。つまり幾つも山脈が徐々に地殻変動していくものである。この問題は実時間にできるだけ、その時点で高い山を見つけ出すものであり、一般的なGAである均衡モデルと不均衡モデルの比較を行っている。ここでは遺伝子のコード体系と複製機構の組み合わせに応じて4つの種を存在させる。種はグレイコードの不均衡モデル、グレイコードの均衡モデル、2進数の不均衡モデル、2進数の均衡モデルである。

この問題に進化の不均衡説のリーディング鎖とラギング鎖を用いて探索を行った結果、不均衡モデルは進化初期の段階から圧倒的に優位であり、グレイコードの不均衡モデルが完全に他の集団を圧倒して繁殖し、乱数のタネを変えてみても2進数の集団が優勢であるため、不均衡モデルが優れていることが証明された。

このことから多様性が優れていていることが証明され、少ない世代で局所解に陥らず最適解を見つけ出す結果となる。逆に多様性を重視することから個体の平均適応度は当然低くなる。また次世代に受け継がれる繁殖成功度もあまりよくない結果になるので、あくまで多様性が必要とされる解空間探索問題に対して適用すべき手法である。

3 不均衡進化説に基づくGAの提案

不均衡進化説をモデル化した不均衡モデルを実現することで、その長所である解空間における多様性をGAの探索に生かそうとするのが本研究の目的である。不均衡モデルのアルゴリズムフローを図2に示す。

不均衡モデルはリーディング鎖・ラギング鎖を用いる。ビット列が並ぶ染色体の1つをリーディング鎖・ラギング鎖の突然変異を用いて2つの個体を作り出すため、個体数が2倍になってしまう。そのため次世代が生成されたときに、その半分を淘汰させる。

本手法で用いる不均衡モデルのアルゴリズムは2つあり、それぞれをアルゴリズム1、アルゴリズム2として説明する。また均衡モデルは不均衡モデルと同様の処理を行い、突然変異にリーディング鎖だけを用いる。

3.1 アルゴリズム1

染色体DNAの鋳型を考えずに、リーディング鎖・ラギング鎖の突然変異を用いたアルゴリズムである。図3にこのモデルの概略説明を示す。

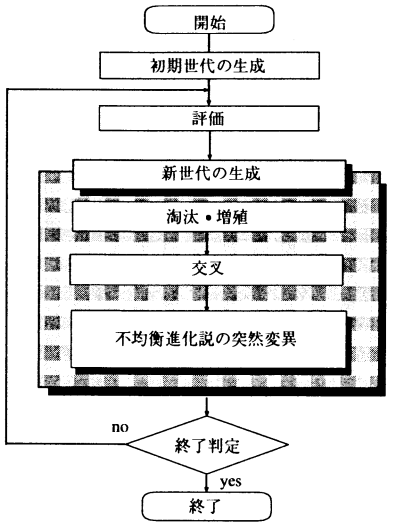


図2. 不均衡モデルのアルゴリズムフロー

1. 初期のビット列の個体を生成する
2. それぞれの個体に交叉をかける
3. 交叉を終えた個体にリーディング鎖の低突然変異をかける
4. できた個体を遺伝子プールに加える
5. 処理2を終えた個体にラギング鎖の高突然変異をかける
6. できた個体を遺伝子プールに加える
7. できた個体を評価する
8. 適応度の高い個体を残す

3.2 アルゴリズム2

染色体DNAの鋳型を考え、リーディング鎖・ラギング鎖の突然変異を用いたアルゴリズムである。図4にこのモデルの概略説明を示す。

1. 初期のビット列の個体を生成する
2. それぞれの個体に交叉をかける
3. 交叉を終えた個体にビット反転させたものを生成する
4. 処理2で生成された個体にリーディング鎖の低突然変異をかける
5. 処理3で生成された個体にラギング鎖の高突然変異をかける
6. 処理4と処理5で選ばれた個体を評価する
7. 適応度の高い個体を残す

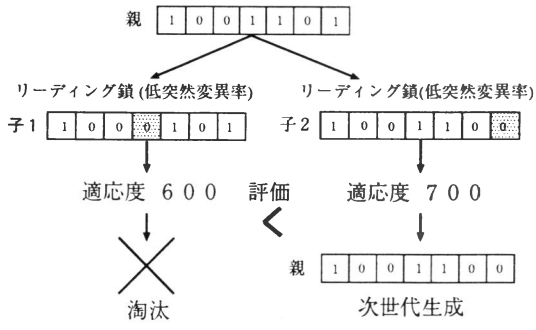
4 シミュレーション

ここでは典型的な組み合わせ問題の代表例であるナップザック問題を取り上げ、本研究で提案した均衡モデル・不均衡モデルの探索能力を比較する。また、前章で述べた2つのアルゴリズムについても比較シミュレーションを行った。

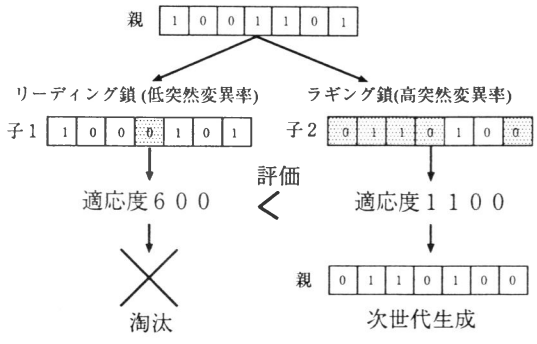
4.1 シミュレーション条件

本研究では提案手法の有効性検証のため、例題としてナップザック問題を用いた。この問題はナップザックの重量制限のもとでそれぞれ異なる重量と価値の品物をナップザックに詰め込むときに、総価値が最大となるような品物の組み合わせを選択するという問題である。

世代数をgとし個体数をkとし3000世代までシミュレーションを行った。シミュレーション条件を表1に示す。ここでは問題を複雑化するために1000世代ごとに品物の数を50



a) 均衡モデル



b) 不均衡モデル

図 3. アルゴリズム 1

個づつ増やし、進化過程で途中から条件の変わるような問題を仮定した。よって最大適応度の値は、1000 世代ごとに階段状になる傾向を示した。ナップザック問題は制約条件として制限重量を用いており、これを越えた時点で適応度は 0 になることから平均適応度の値は大きく変動する。

均衡モデル・不均衡モデルの適応度比較と不均衡モデルのアルゴリズム 1 と 2 の適応度比較について以下の 3 つのシミュレーションを行った。

case 1 : エリート戦略 + アルゴリズム 1 + 均衡 / 不均衡モデルの最大・平均適応度比較

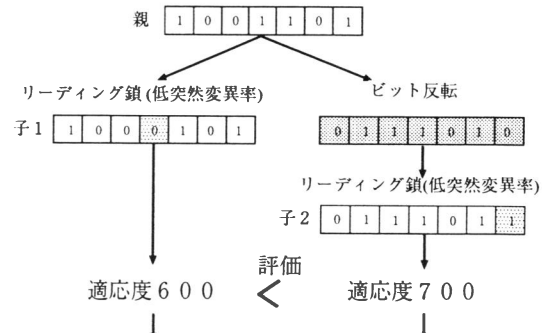
case 2 : エリート戦略 + アルゴリズム 2 + 均衡 / 不均衡モデルの最大・平均適応度比較

case 3 : エリート戦略 + アルゴリズム 1 / アルゴリズム 2 の最大・平均適応度比較

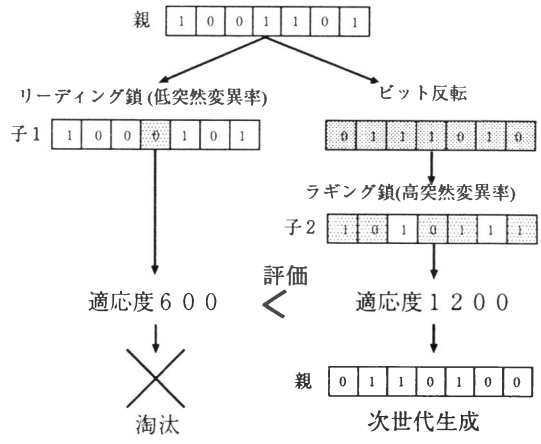
4.2 シミュレーション結果および考察

均衡モデル・不均衡モデルの適応度比較のシミュレーションを行った結果を図 5 に示す。

- case 1 : 均衡モデルに比べて明らかに不均衡モデルの方が高い適応度の値を示している。これは不均衡モデルのラギング鎖の多様性が生かされ、しかもエリート戦略の高い適応度を残すことにより適応度上昇が容易に行えたためであり、平均適応度も比較的高い値を示した。
- case 2 : case 1 と同様 3000 世代までを比較すると不均衡モデルの多様性とエリート戦略が有効なことが証明され、高い最大適応度を示した。しかしビット反転したことにより適応度の高い値を選びにくくなったことから、1000 世代までの初期の段階では均衡モデルに比べて進化の速度が遅いことが確認された。
- case 3 : アルゴリズム 1 とアルゴリズム 2 の比較はともに多様性が活かされたことと次世代生成における



a) 均衡モデル



b) 不均衡モデル

図 4. アルゴリズム 2

繁殖成功度が高いことから最大・平均適応度ともに、ほぼ同じ高い結果となったがアルゴリズム 2 はビット反転により、1000 世代までの初期の段階では進化速度が 5 %ほど遅くなっていることが確認された。

3 つのシミュレーションをすべて比較した結果、どれを見ても本手法である不均衡モデルの方が最大適応度が高くなることが確認された。また乱数の種を代えてもほぼ同様の結果が得られた。表 2 より平均的に約 20 %進化の高速化が実現されたことがわかる。これは不均衡モデルの多様性が多分に生かされ制限重量を超すことなく良いものを選び出したことを示す。また条件の変わる 1000 世代ごとに最大適応度は上昇しているのに対し、多様性が上がったため平均適応度は逆に下がっている傾向も確認された。

リーディング鎖・ラギング鎖の突然変異率の数値はすべて同一のものを今回用いたが突然変異率の数値を調節すると、さらに多様性を高めることも可能であると思われる。これにはファジィルールなどを用いて突然変異率をコントロールして、より進化の高速化を図ることなどが考えられる。

5 結 言

低突然変異率のリーディング鎖と高突然変異率のラギング鎖を仮定した不均衡進化説を GA の突然変異に適用し、高い多様性を維持し、効率的な探索が実現可能な手法を提案した。本手法を組み合わせ最適化問題の代表例であるナップザック問題に応用して、制限がある重量の中でいかに速く少ない世

表 1. シミュレーション条件

世代数 (g)	1≤g<1000	1000≤g<2000	2000≤g≤3000
制限重量 (We)	200	200	200
品物の数 (n)	100	150	200
個体数 (k)	50	50	50

表 2. 進化の高速化率

比較 \ 乱数の seed	1	2	3	4	5	6	平均
case 1	14%	42%	12%	26%	14%	21%	22%
case 2	10%	30%	12%	20%	11%	18%	17%
case 3	4%	12%	0%	6%	3%	3%	5%

代で価値の高いものを見つけ出せるかをシミュレーションで検証した。

本手法で提案した不均衡進化説に基づく GA の不均衡モデルは多様性が充分生かされ、少ない世代で高い適応度の個体を生成し、約 20 %の進化の高速化が実現できた。また本手法で利用したアルゴリズムの比較ではアルゴリズム 2 に比べて初期の段階は約 5 %ほどアルゴリズム 1 の方が進化の速度が速いこともわかった。これによりビット反転しないアルゴリズム 1 の方が優れていることが確認できた。今回は組み合わせ問題であるナップザック問題を用いたが、他の探索問題においても本手法により同様の効果が期待できる。

また今後の課題として、リーディング鎖・ラギング鎖の個体数に差をもたせたより高い多様性をもつ不均衡モデルの構築、リーディング鎖・ラギング鎖における突然変異率の数値のファジィチューニング、などが考えられる。

参考文献

[1] 安居院 猛、長尾 智晴: ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂 (1993)

[2] 筒井 茂義, 藤本 好司: 個体群探索分岐型遺伝的アルゴリズム fGA(Forking GA) の提案, 人工知能学会誌, Vol.9, No.5, pp.741-747 (1994)

[3] H.Muhlenbein: Evolution in Time and Space The Parallel Genetic Glgorithm , *Foundations of Genetic Algorithms*,Morgan Kaufmann Publishers , pp.316-337 (1991)

[4] 今中 武, 若見 昇: 領域ベース GA の提案, 第 *37* 回システム制御情報処理学会研究発表会, pp.53-54 (1993)

[5] H.Tamaki, Y.Nishikawa: A Paralleled Genetic Algorithm based on a Neighborhood Model and Its Application to the Jobshop Scheduling , *Parallel Problem Solving from Nature 2* , Elsevier Science Publishers, pp.573-582 (1992)

[6] 前田 陽一郎: ファジィルールによる GA の探索能力改善手法, 第 *6* 回インテリジェントシステム シンポジウム講演論文集, pp.27-30 (1996)

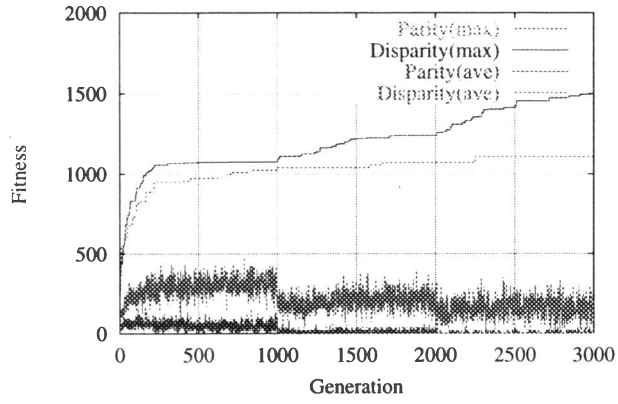
[7] 山本 哲哉, 前田 陽一郎: ファジィ適応型探索 GA の提案と TSP 問題への応用, バイオメディカル・ファジィ・システム学会第 *11* 回年次大会講演論文集, pp.103-106 (1998)

[8] 古澤 満, 土居 洋文: *Biomedica 8 NO.13* , pp.74 ~ pp.78 (1993)

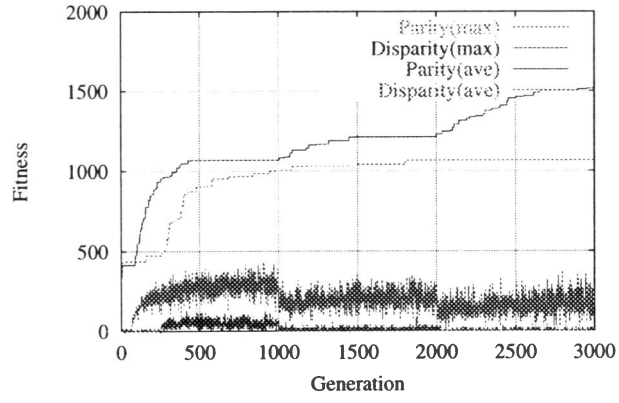
[9] 下原 勝憲 他 著: 人工生命と進化システム, 東京電機大学出版 (1998)

＜連絡先＞

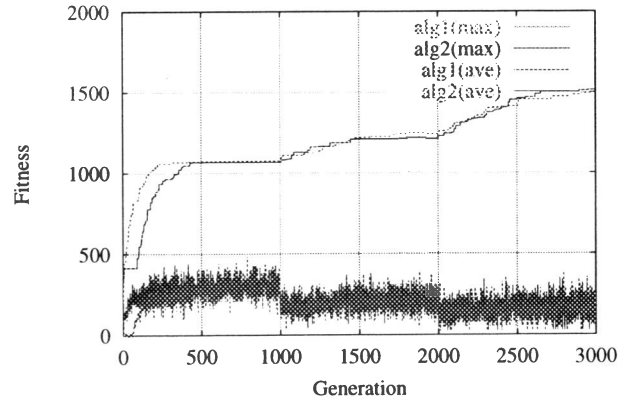
〒 572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学 総合情報学部 情報工学科 前田 陽一郎
Tel & Fax : 072-825-4698(直通)
E-mail : maeda@mdlab.osakac.ac.jp



1) case 1



2) case 2



3) case 3

図 5. シミュレーション結果

WB1−2

木構造の複雑度に基づく推論評価値を用いた遺伝的プログラミング

Genetic Programming Using Estimated Evaluation Value Based on Degree of Complexity of Tree Structure

○ 藤田 篤
Atsusi FUJITA

前田 陽一郎
Yoichiro MAEDA

大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract — In this research, we propose the method which we can obtain an estimated evaluation value from the complexity of a tree structure. By this method, we can omit some useless evaluations of tree structure, decrease the number of evaluations and cut short the total amount of the evaluation time in each generation. We confirmed the efficiency of this method by some computer simulations.

1 諸 言

Kozaら [1][2] は遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) の染色体を木構造に拡張した遺伝的プログラミング (Genetic Programming:GP) を提案している。GP は応用面においてプログラムを進化的に自動生成する進化型計算手法の一つである。例えば Koza らはロボットによる壁づたい行動、物体を押して動かす行動などのさまざまなシミュレーション結果を報告している。

しかしながら、GP の問題点としてプログラムの多様性を保持しなければならないために集団数を非常に多くとる必要があり、各世代の木構造の評価に莫大な計算量が必要になることがあげられる。またプログラムの冗長性が高く探索効率なども悪いことが指摘されている。この問題点に対して Koze らはプログラムに頻繁にあらわれる部分を自動的にサブルーチンとして登録して、新たな関数とする自動関数定義 (Automatically Defined Functions:ADF)[2] を提案している。その他の自動関数定義手法として Angeline と Pollack により提案された MA(Module Acquisition)[3] や、本堂、伊庭らによって提案された COAST(COllection Adf for Subroutine acquisiTion)[4] 等が知られている。これらの手法によってプログラム (木構造) のサイズが減少できることが示されているが、木の冗長部分の削減や探索効率改善の有効な手法についてはまだ実現されていないのが現状である。

そこで筆者らは、GP の探索効率改善のためファジィ適応型探索 GP(Fuzzy Adaptive Search method for Genetic Programming:FASGP) [5] の研究を行なっている。この手法は GP における突然変異率や交叉率といった遺伝的操作に関わるパラメータを最大適合度および平均適合度を基にリアルタイムにチューニングするファジィルールを記述し、それにより探索ステージに適した効率的な探索を実現する手法である。

本研究では木構造に複雑度を導入し、複雑度から木構造の推論評価値を得る方法を提案する。木構造を実行せず推論評価値を用いることによって、探索の高速化を図る。人工蟻の探索シミュレーションを用いて本手法の有効性を検証したので、それについても報告する。

2 ファジィ適応型探索 GP(FASGP)

GP では 1 つのシミュレーション終了まで遺伝的操作のパラメータが一定であるため、各探索ステージに応じて必ずしも適切な遺伝的操作が行われているとは限らないという問題があった。そこでファジィ適応型探索法 GP(FASGP) では、各探索ステージ (世代) に応じてファジィルールを用いて遺伝的パラメータ (交叉率、突然変異率) をチューニングすることにより GP の探索効率の改善を図る。

本手法では簡略化ファジィ推論法を用いて、初期の世代は個体群中に多様性を持たせるという意味で交叉率を低く、突然変異率を高く設定する。逆に、収束期においては優れた個体だけを注意深く探索する必要があるので、交叉率は高く、突然変異率を低く設定するというものである。

FASGP では初期世代で適合度を計算した後、ファジィルールにより交叉率、突然変異率のチューニングを行なう。前件部には各世代の最大適合度および (最大適合度-平均適合度) をもちいる。各探索ステージには図 1のファジィルールを用いた。

初期世代では最大適合度 (VAL) と (最大適合度-平均適合度) (VAL-ASF) の値を計算し、ファジィ推論の入力値として遺伝的操作における突然変異の割合 (RMC) と交叉の割合 (RCA) を出力する。この出力値の意味は、遺伝的操作全体の確率を 1.0 とした時、交叉と突然変異全体の確率をファジィルールによってチューニングしたものである。Gcf, Gca, Gmu, Grp のそれぞれのパラメータは図 2のように定義され、これらのパーティション (RMC, RCA) がファジィ推論により決定される。尚、複製の確率 (Grp) は一定値とした。ファジィ推論後、得られた RMC と RCA の値を用いて

以下の式によりそれぞれの遺伝的操作の確率が定まる。

- 交叉率全体 (Gcf_Gca)

$$Gcf_Gca = ((1.0 - RMC) * (1.0 - Grp)) \quad (1)$$

- 突然変異率 (Gmu)

$$Gmu = ((1.0 - Grp) - Gcf_Gca) \quad (2)$$

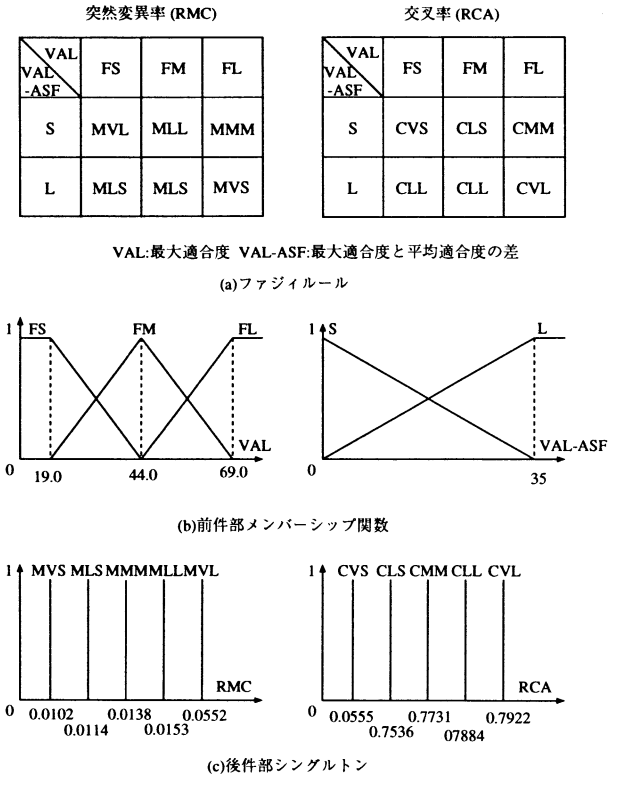


図 1: FASGP のファジィルールとメンバーシップ関数

- 関数ノードでの交叉率 (Gcf)

$$Gcf = ((1.0 - RCA) * Gcf_Gca) \quad (3)$$

- 任意ノードでの交叉率 (Gca)

$$Gca = Gcf_Gca - Gcf \quad (4)$$

変換した遺伝的パラメータを基に遺伝的操作を行ない、世代交代を行なう。

3 木構造の複雑度に基づく推論評価

GP および FASGP では個体の評価に探索時間の大部分を費しているという問題点があった。そこで、本研究では、個体の複雑度の定義を行ない、その値をもとに個体の評価値を推論することで探索時間の改善を図る方法を提案する。推論評価では個体を実際に実行をせず、評価値を推論することで高速に評価を行うことができる。複雑度は世代を重ねるにつれて収束するものと考えられるので初期ほど予測精度は悪く、末期は予測精度がよくなると予想される。概念図を図 3に示す。

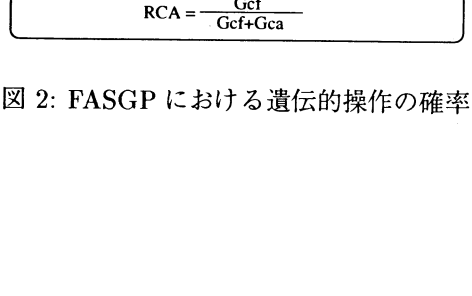


図 2: FASGP における遺伝的操作の確率

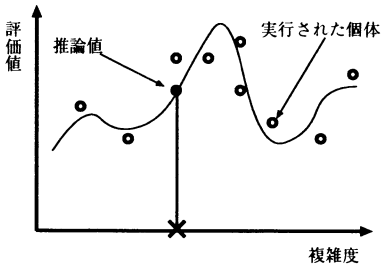


図 3: 提案手法の概念図

本手法は、適合度の計算時に全個体の複雑度の計算を行い、その値をもとに推論評価値を計算する。その後、複雑度から実行個体の選別を行う。全個体の一部は推論評価され、残りの個体は実行を行い評価値を得て世代交代の処理を行う。本手法のフローチャートを図 4に示す。

複雑度は個体の持っている特性を数値化する。本シミュレーションでは個体で用いられている関数、終端記号の種類 ($i = 1, ..., n$)、木構造の深さを特性とした。具体的には関数、終端記号それぞれが個体内で出現する回数 c_iと、木構造の深さ d を a_i,b で重み付け加算した値を複雑度とした。以下の式 (5) により複雑度 Cが定まる。

$$C = \sum_{i=1}^{n} a_i c_i + bd \quad (5)$$

推論評価値は、複雑度より算出される。前世代の個体群の評価値と複雑度を参照して現世代の個体の推論評価値を決定する。ここでは個体の複雑度を C、推論評価値 Eとすると、推論評価値は親の評価値 e_1、e_2と複雑度 c_1、c_2を用いて式 (6) で定義する。

$$E = \frac{e_2 - e_1}{c_2 - c_1}(C - c_1) + e_1 \quad (6)$$

個体の評価値を推論する際、子の複雑度と親の複雑度との差が大きいと推論値も大きく離れている可能性が高いので通常通り実行して評価を行ない、複雑度の差が小さい時は子の推論評価を式 (6) を用いて行なうことにより演算時間の短縮を図る。

4 シミュレーション

本研究の有効性を検証するためサンタフェ・トレイルと呼ばれる人工蟻探索問題のシミュレーションを用いて GP, FASGP, 本手法の 3 手法で比較を行なった。シミュレーション環境としては、32*32 マス目上に 89 箇所の餌があり、人工蟻 (Ant) はこの中で限られたエネルギーの範囲内で餌の探索ができる。Ant は右や左へ

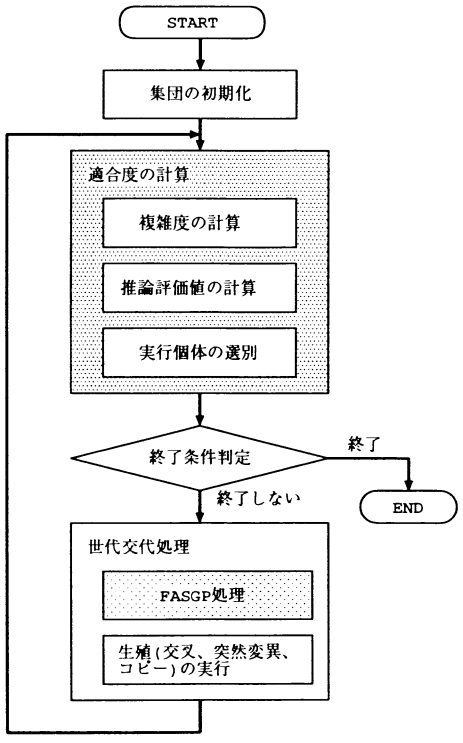


図 4: 提案手法のフローチャート

と向きを変えながら前方に進めるが、斜め移動や壁を越えることはできない。またAntはセンサをもっているので、自分の前方に餌があるか否かがわかる。そして、Antが動作を行なうたびにエネルギーを消費する。エネルギーには限りがあり消費し尽すと動作が出来なくなる。適合度はマップ上の残りの餌の数である。適合度の初期値は89であり、最良値は0である。実行は初期世代の個体生成シードを何度も変えてシミュレーションを行った。

本シミュレーションで用いた初期パラメータを表1に示す。遺伝的パラメータの初期値はGPのみで、本手法とFASGPは探索ステージに応じて可変である。

表 1: 初期パラメータ

世代数	100
個体数	2000
初期に生成される木の最大深さ	6
交叉で生成される木の最大深さ	17
突然変異で生成される木の最大深さ	4
選択方式	ルーレット戦略
非終端ノード同士の交叉の確率	0.695
非終端および終端ノードでの交叉の確率	0.195
コピーのみの確率	0.095

人工蟻探索シミュレーションを用いて、提案手法が従来のGPやFASGPと比べてどの程度探索効率を向上させるかを検証した。

実行は初期世代の個体のシードを変えることによってランダムに生成させてシミュレーションを行なった。本手法の通常通り実行する個体と推論する個体を選ぶための複雑度の差(スレショールド)を図5では1でシミュレーションを行ない、図6では2で行なった。

シミュレーションの結果、本手法がGPやFASGPに比べ、良好な探索性能を示すことがわかった。本手法は他の手法にくらべ探索初期は時間がかかるが、中期以降では1世代にかかる時間が短くなっており最終世代までかかる時間が短くなっているのが分かった。図5と図6を比べると最大適合度、平均適合度、探索時間のどれもがスレショールドを2にした場合の方が良い結果が得られた。

シミュレーションから、初期個体生成シードや遺伝的パラメータが最終結果に大きく影響を与えることが分かった。今後、さらに適切なパラメータ値の設定を行えば探索効率がより一層向上するものと考えられる。

5 結 言

GPにおける探索性能の改善手法として、個体の複雑度を定義し、推論評価値を得ることにより個体(プログラム)の実行を大幅に削減し探索の効率化を図る方法を提案した。本研究では、オリジナルのGP、ファジィルールにより遺伝的パラメータのチューニングを行なうFASGP、推論評価値を用いて個体を評価する本手法の3手法の比較を行なった。その結果提案した手法の有効性が人工蟻探索シミュレーションにより確認された。オリジナルのGPでは、最終世代まで適合度が上がらないことが多々あったが他の2手法ではオリジナルGPにくらべ最終世代の適合度は良好な結果を示した。これはファジィルールによりパラメータが探索ステージにより適切にチューニングされたためと考えられる。本手法では、FASGPより良い場合と悪い場合の結果が得られたが、演算時間については確実に減少させることができた。

しかしながら全ての場合に対して最適解を見つけることが出来なかった。今後さらに多くのシミュレーションにより最適なパラメータチューニングを行なう必要があると考えられる。

参考文献

[1] J.Koza: *GeneticProgramming*, MIT Press (1992)

[2] J.Koza: *GeneticProgrammingII*, MIT Press (1994)

[3] K.Kennear: *"Alternative in Automatic Funcion Definition"*, MIT Press (1994)

[4] 本堂 直浩, 伊庭 斉志, 嘉数 侑昇: "遺伝的プログラミングによる自動関数定義を用いた概念獲得", FANシンポジウム '95, pp175-202 (1995)

[5] 前田 陽一郎: "ファジィ推論を用いた遺伝的プログラミングの適応型探索手法", 第14回ファジィシステムシンポジウム, pp267-270 (1998)

＜連絡先＞

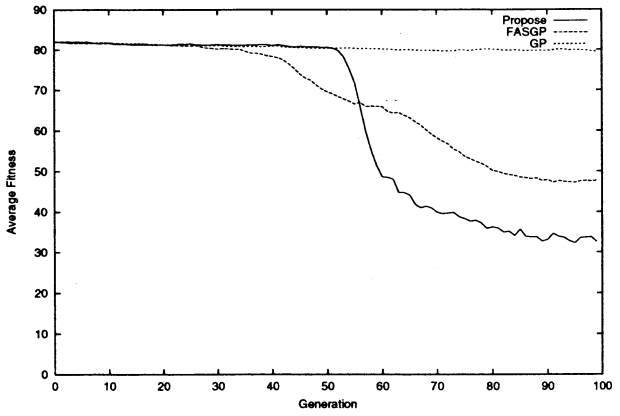
〒572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8

大阪電気通信大学 総合情報学部 情報工学科

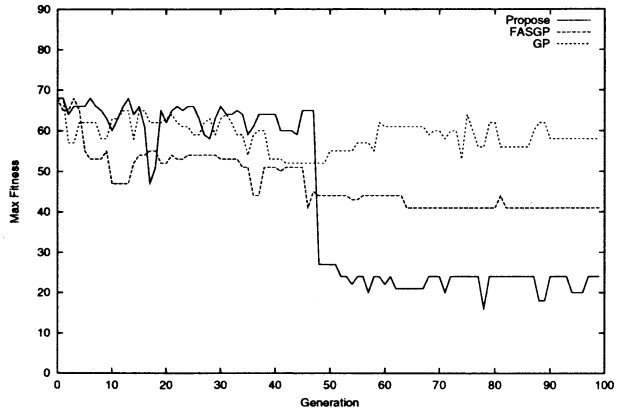
前田 陽一郎

Tel & Fax : 072-825-4698(直通)

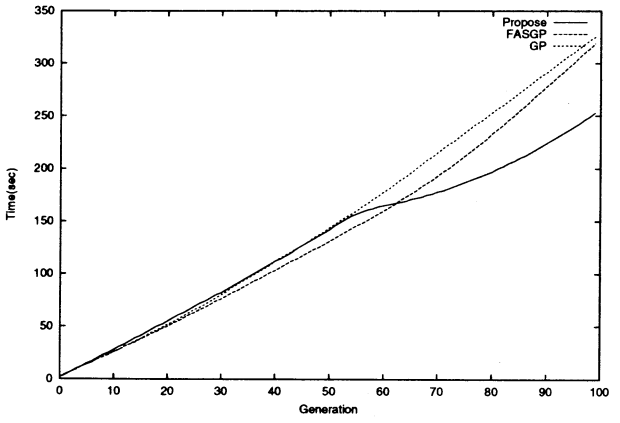
E-mail : maeda@mdlab.osakac.ac.jp



(a) 平均適合度

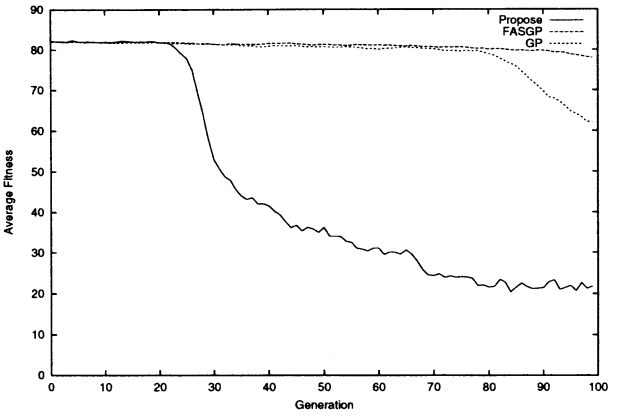


(b) 最大適合度

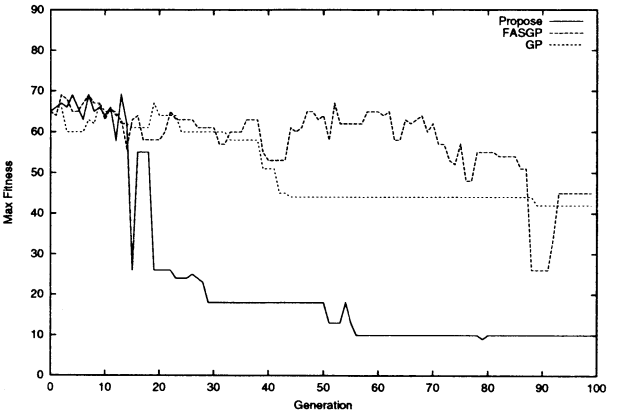


(c) 探索時間

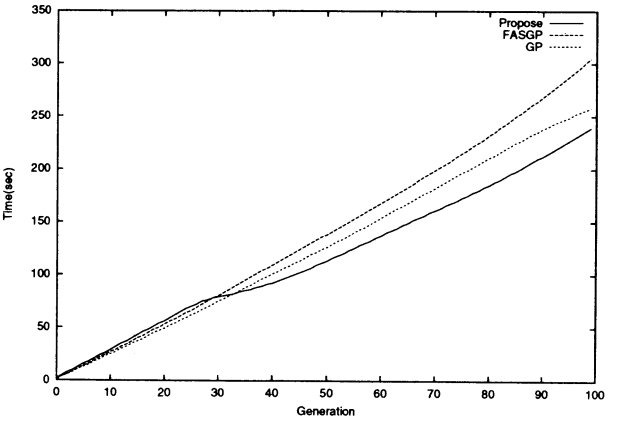
図 5: スレショールドが 1 の場合



(a) 平均適合度



(b) 最大適合度



(c) 探索時間

図 6: スレショールドが 2 の場合

WB1−3

GPでの部分木決定の一考察

A proposal of subtree determination in Genetic Programming

竹内　康雄　　向殿　政男
Yasuo TAKEUCHI　　Masao MUKAIDONO
明治大学
Meiji University

Abstract In Genetic Programming, the calculation of fitness in the tree has no relation to subtrees. In this paper, we propose a new method to revaluate the fitness of tree which includes good subtrees. It is shown that the fitness of the tree is increased by using the relation between two nodes of subtrees in associative inference.

1　はじめに

現在、遺伝的アルゴリズム(GA:Genetic Algorithm)の拡張型として、遺伝的プログラミング(GP:Genetic Programming)が、着目されている。それは、木構造を取り入れることで、複雑な数式や概念、関係などを扱えるようにしたことで、問題の適用範囲を拡大化したことにある。しかし、複雑な問題を扱うと言うことは、最適解を探索する範囲も広くなり、無駄な探索が増え最適解を見極めることも難しくなった。そこで、探索の効率性を上げるため、自動関数定義(ADF: Automatically Defined Function)やMA(Module Acquisition)など様々な手法が考えられている。

2　研究背景

GAには、探索原理の根拠としてスキーマ定理と積み木仮説が存在する。その仮説では、集団内にスキーマ(schema)と呼ばれる最適解の部分解を保持し、交叉、突然変異によってそのスキーマを組み合わせて最適解を構成していくと説明されている。GPにおいてスキーマに相当するものが部分木であると考えられ、実際に部分木が有効な解の形成に役立っていることが実験的に証明されている[1]。しかし、現在行われている評価方法は、最適値と部分木の関連性において正当な評価をされていなく、有効である可能性をもつ部分木を木に代入した結果、適応度がより上がるか否かでその有効性を探る方法が行われている。本研究では人間の思考に近いものとして、部分木に焦点をあて、木全体の評価を部分木の適応度から再評価する方法を提案する。

3　新手法の提案

新手法では、連想推論を用いて、有効な部分木の適応度を再評価し、木全体の評価を部分木の評価に基づいて行っていく。

3.1　連想推論

本研究では、3層の双方向連想記憶を用いて、ネットワークを構成する。それぞれの層には、終端、非終端のノードが展開されている。層間は全結合されており、層内の結合はない状態である。以下に、それを示す。

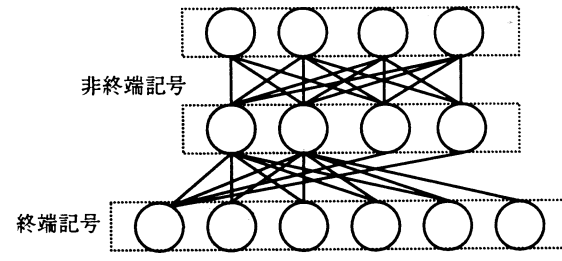


図1　ネットワーク構成

3.2　連想推論の有効性

終端記号と非終端記号からなるGPでは、記号間で、相互的な関連性がある。問題の定式化によって、その可能性というものが制約される場合もあるが、終端記号に値・方向性、非終端記号に関数・動作を持たせるのが、常である。例として、記号当て問題では、終端記号に変数、非終端記号に四則演算を当てはめている。そのため、部分木上での関連性を連想推論で明確にすることは、重要であると考えられる。

3.3　連想推論への展開方法

終端記号と非終端記号で、連想マトリクスを作成する。その後、各木からランダムに終端記号と非終端記号からなる深さ2以下の部分木を抜き出し、ノード間の関係を連想推論に展開し、非終端-非終端、非終端-終端を明確を分けていく。それぞれの活性値は部分木が含まれている木の適応度を当てる。活性値が重なる場合には、平均値をそれに当てる。その流れを以下に示す。

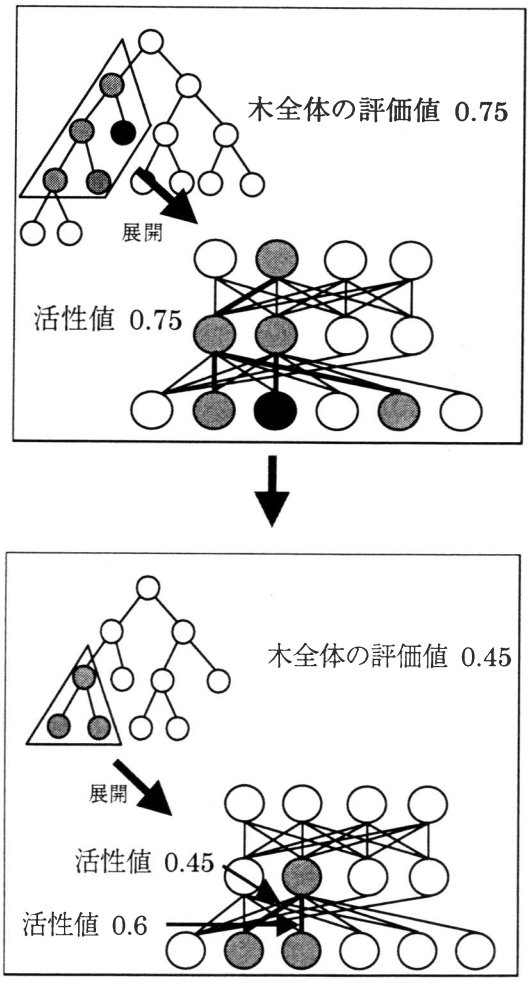


図2 部分木の連想推論への展開

その後、この連想推論の活性値を用いて、木全体の適応度を再構築していく。木において、活性値が高いノード間の関係をもつ方が、適応度が高くなっていく。そして、GP での選択淘汰によって、次世代に残る木が決まる。全体の流れを以下に示す。

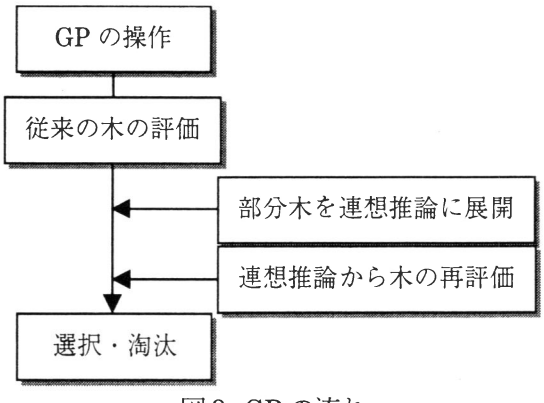


図3 GP の流れ

3.4 本評価方法の有用性

本研究では、連想推論を用いて部分木の適応度を再評価している。反響(reverberation)を用いることで、あまり使われていない部分木に対しても多少の伝播が起きるため、探索の多様性を損なわない結果になる。反響の回数を少なくすると、あいまいな結果が残り、多くすることで、厳密な評価値を部分木に表現することができる。

4 検証・考察

4.1 検証：4-パリティ問題

実際に、4-パリティ問題に対して検証を行ってみた。4-パリティ問題とは、以下のブール代数を16組の入出力のペアから同定する問題である。

$$f(x_1,x_2,x_3,x_4)=x_1x_2x_3x_4\vee\bar{x}_1\bar{x}_2x_3x_4\vee\bar{x}_1x_2\bar{x}_3x_4\vee\bar{x}_1x_2x_3\bar{x}_4\vee\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3x_4\vee\bar{x}_1\bar{x}_2x_3\bar{x}_4\vee x_1\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4\vee x_1x_2x_3x_4\vee x_1x_2\bar{x}_3\bar{x}_4\vee x_1\bar{x}_2x_3\bar{x}_4\vee x_1\bar{x}_2\bar{x}_3x_4\vee\bar{x}_1x_2x_3\bar{x}_4\vee\bar{x}_1x_2\bar{x}_3x_4\vee\bar{x}_1\bar{x}_2x_3x_4\vee\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4$$

非終端記号に、AND、OR、NAND、NOR を使用し、終端記号には0または1が入る。

4.2 考察

問題がそれほど難しくなかったことから、従来より早い世代で最適解を導き出すことができた。しかし、全体の計算量を比べると大きな成果であるとは言い切れない結果となったため、もっと多くの計算時間がかかる問題として、分散協調問題等での検証をし、その結果が顕著に分かるように試みる予定である。

5 今後の課題

現在、部分木の再評価を連想推論で行っているが、ルールの抽出を行うための利用ではないため、直交化を無視し、発火だけに焦点を絞っている。今後、GP を使って知識処理を行う際、この点に着目してルールの早期発見などの実現へと繋げていきたい。

参考文献

[1] Justinian P.Rosca. and Dana H. Ballard., Hierarchical Self-Organization in Genetic Progrramming ,in Proc.11th International Conference of Machine Learning ,p251-258,1994

[2] John R. Koza, Hierarchical Automatic Function Definition in Genetic Programming,1994

[3] 伊庭斉志、「遺伝的プログラミング」、東京電機大学出版局、1996

[4] 伊庭斉志、「進化論的計算の方法」、東京大学出版会、1999

[問い合わせ先]
〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
システム科学研究室　竹内 康雄(Yasuo TAKEUCHI)
Tel: 044-934-7442　Fax: 044-934-7912
E-mail: take@cs.meiji.ac.jp

WB 2−1

遺伝的プログラミングを用いた分散協調問題の一解法

Genetic Programming for Co-operation Problem

山内ゆかり　神谷和浩　向殿政男
Yukari YAMAUCHI　Kazuhiro KAMIYA　Masao MUKAIDONO
明治大学理工学部情報科学科
Dept. of Computer Science, Meiji University

Abstract This article shows the effectiveness of Genetic Programming (GP) for dispersion cooperation problem. We employed two simulations, ants and sheepdogs, to verify the successful acquisition of cooperation behavior.

1. はじめに

近年、マルチエージェントにおける協調問題の研究は盛んに行われ、その手法として進化的手法が注目されている。本研究では分散協調問題における遺伝的プログラミング(Genetic Programming 以下 GP)の有効性を示すものであり、ここでの分散協調問題とは、各エージェントが同じ構造を持ち独立して行動をするが、集団としてある協調動作を行うような場合をいう。

本研究では、蟻の餌運びとシープドックの各問題に対し、シミュレーションを行い GP の有効性を検証した。

2. 分散協調問題について

分散協調とは、それぞれの個体は同じ制御プログラムで動くが、複数が集まるとお互いが協調し合うように動き出すものである。

協調問題では、個体として見ると無意味な動作であっても、集団における協調動作においては重要な要素となる場合などがあり、人間が作為的にプログラムを生成することが困難になっている。GP では進化の過程で取捨選択が行われるので、協調行動の獲得、より良いプログラムの自動構成が可能になると考えられる。

3. 蟻の餌運び

3.1 シミュレーションの説明

協調問題の最も単純でポピュラーな問題である蟻の餌運びは 図 1 のような 32×32 のフィールド上に巣と合計 144 個の餌を用意し、そこを 20 匹の蟻が動き回って餌を集めるシミュレーションである。

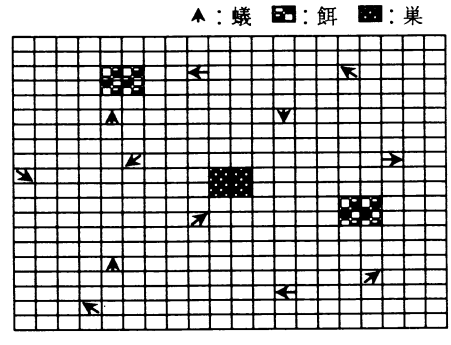


図 1　蟻の活動する世界

3.2 結果と考察

餌を持っているときはにおい物質を落としながら巣に向かい、持っていないときには餌やにおい物質を探すという、想像どおりの構造が得られた。生成された制御プログラムを見ると多少のノイズがあるものの、人が想像するものとほぼ同じ様な構造が得られていた。この問題における制御プログラム生成は、十分満足の行くものができたということができる。

しかし、この問題はもともと人間でもわかりやすいものである。蟻は協調の手がかりとして、におい物質をたどっているだけであり、『単体での運搬能力が獲得されただけ』という解釈も拭い去ることができない。より明確な協調動作を、シープドッグのシミュレーションで検証する。

4. シープドッグ

4.1 シミュレーションの説明

図 2のような 32×32 マスの牧草地に羊が放牧されており、それを犬が柵の中に追い込んでいくというシミュレーションである。羊と犬の数は、羊 50 頭、犬 8 頭および羊 6 頭、犬 1 頭の 2 種類で行った。

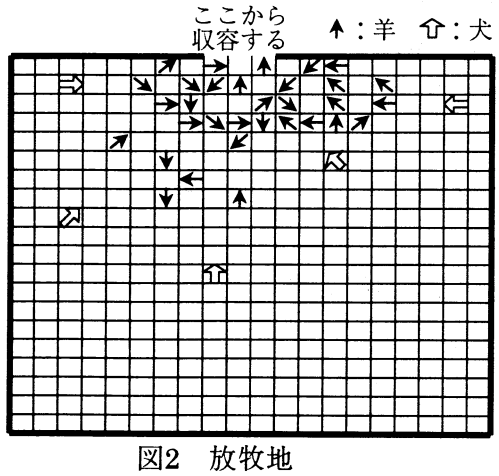


図2　放牧地

4.2 シミュレーションの結果

グラフ 1 は羊 50 頭、犬 8 頭で生成させた制御プログラムに対し、羊 80 頭、犬 10 頭でシミュレーションを行い、その追いこむ効率を示している。グラフ 2 は羊 6 頭、犬 1 頭で生成させたもので同様のグラフを作成したものである。

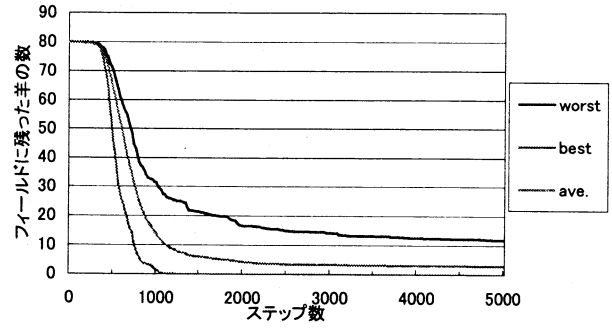
4.3 考察

羊 50 頭、犬 8 頭で生成したものは協調行動を学習し、羊 6 頭、犬 1 頭で生成したものは、個体としての能力を追求したと考えられる。グラフから実際に協調を学習させた集団は、単体の性能のみを進化させておいた集団に比べて、かなり良い効率で追い込んでいることがわかる。これにより、GP が協調動作の獲得に成功していることを検証している。

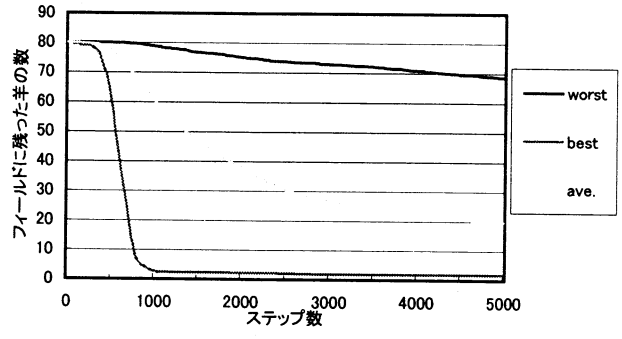
5. まとめ

GP によって生成された制御プログラムは、かなりの性能を持ち、協調動作自体の獲得に成功していることも確かめられた。また、生成されたプログラムは人には理解できないような不思議な構造をしているところもあるが、結果として有益なものとなっていることも確かである。実際に手動で制御プログラムを作り、シミュレーションしてみたがシープドックに関しては、かなり効率が悪く使い物にならなかった。意図的に最適な協調行動を生成するのは困難である。これらのことを総合して考えると GP は分散協調問題に対してかなり有効であると結論付けることができる。

グラフ 1　追いこむ効率－協調



グラフ 2　追いこむ効率－単独



参考文献

[1] 伊庭斉志 遺伝的プログラミング 東京電気大学出版 1996

[2] 伊庭斉志 進化論的計算の方法 東京電気大学出版 1999

[問い合わせ先]
〒214-8571
川崎市多摩区東三田１－１－１
明治大学理工学部情報科学科
yukari@cs.meiji.ac.jp
masao@cs.meiji.ac.jp

WB2−2

多目的最適化問題のためのセルラー多目的GA

Cellular Multi-Objective Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization Problems

村田　忠彦
Tadahiko Murata
足利工業大学
Ashikaga Institute of Technology

石渕　久生
Hisao Ishibuchi
大阪府立大学
Osaka Prefecture University

玄　光男
Mitsuo Gen
足利工業大学
Ashikaga Institute of Technology

Abstract In this paper, we show how cellular structures can be combined with multi-objective genetic algorithms (MOGA) for improving their search ability to find Pareto-optimal solutions of multi-objective optimization problems. In our cellular MOGA, every individual in each population exists in a cell of a spatially structured space (e.g., two-dimensional grid-world). The selection of parents for generating a new individual in a cell is performed within the neighborhood of that cell in the spatially structured space. We apply our cellular MOGA to two-objective scheduling problems, and show its effectiveness.

1. はじめに

本研究では，多目的ＧＡ[1]にセルラー構造[2]を導入したセルラー多目的ＧＡを提案する．様々な方向への個体の選択操作をもつ多目的ＧＡでは，非劣解集合の探索が行われている．一方，セルラー構造を用いたＧＡでは，各個体はセルに格納され，その個体の交叉操作の対象は近くのセルの個体に限定されている．本研究では，これらを組み合わせたセルラー多目的ＧＡを多目的スケジューリング問題に適用し，非劣解集合の探索能力が改善できることを示す．

2. 多目的ＧＡ

多目的ＧＡ[1]の特徴の一つは，次のような加重和により定義された適応度関数を用いていることである．

$$f(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \ldots + w_n f_n(x), \quad (1)$$

ここで，$w_1,\ldots,w_n$ は n 個の目的の非負の重みであり，次のような関係を満たしている．

$$w_i \geq 0 \quad \text{for} \quad i = 1,2,\ldots,n, \quad (2)$$

$$w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 1. \quad (3)$$

適応度関数は，交叉操作の親個体を選択するために用いられる．選択操作の際に，さまざまな特徴をもつ解を選択するため，親個体の選択のたびに，次のように n 個の重み $(w_1, w_2, \ldots, w_n)$ をランダムに変更する．

$$w_i = random_i / (random_1 + \cdots + random_n), \quad i = 1,2,\ldots,n, \quad (4)$$

ここで，$random_i$ は非負の実数である．たとえば，交叉の対象となる親個体として N 個のペアが選択されるとき，N 個の異なる重みが式(4)により生成されることになる．これにより，N 個の探索方向が，一つの世代の生成の際に考慮される．すなわち，親個体の選択は，それぞれ異なる適応度関数に基づいて行われているといえる．

多目的ＧＡのもう一つの特徴は，二つの異なる解集合を保持していることである．すなわち，遺伝的操作の対象となる解集合とアルゴリズム実行中に探索された非劣解集合を保持している．Fig.1 は，これら二つの解集合の関係を表してる．Fig.1 からわかるように，遺伝的操作により解が改善されると，非劣解集合の解集合が更新される．すなわち，遺伝的操作により，非劣解集合の解の一部を優越する解が探索された場合，その解は非劣解集合に加えられ，劣解となる解は非劣解集合から除かれる．このようにして，非劣解集合は，毎世代更新される．

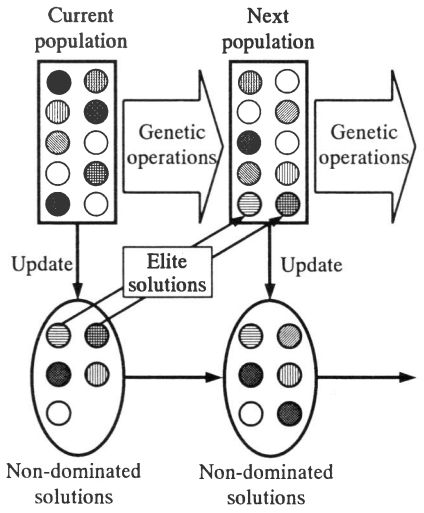


Fig.1　多目的ＧＡで保持される二つの解集合．

多目的ＧＡでは，エリート個体として，非劣解集合の一部の解を用いる．すなわち，非劣解集合から複数の解をエリート個体としてランダムに選び，遺伝的操作の対象となる個体群に加える．したがって，選択された非劣解も次の世代における遺伝的操作の対象となる．

3. セルラー多目的ＧＡ

セルラーＧＡ[2]では，各個体（すなわち，解）は，セルに位置づけられている．新しい解を生成するための交叉操作は，近くのセルに位置づけられている解との間に制限されている．本研究では，セル構造を多目的ＧＡに用いるため，各セルに異なる重みを与える．すなわち，各セルはそれぞれ固有の重みをもっており，その重みを用いて解の選択が行われる．

n 目的最適化問題において，セルは n 次元空間に配置される．Fig.2 は，２目的最適化問題の場合の重みベクトルとセルの配置の関係を示している．二

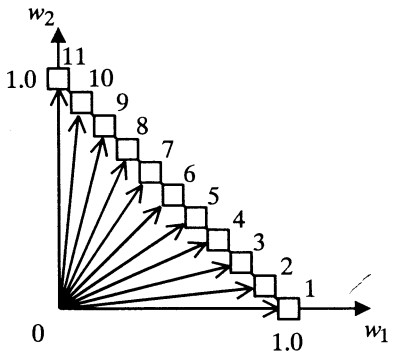


Fig.2　重みベクトルとセルの配置の関係.

Table 1　数値実験結果.

	Number of nondominated solutions	Distance	Quality value of Esbensen	SD of Quality
MOGA	14.6	1512.4	-1065.2	66.0
C-MOGA	15.9	1342.2	-990.0	36.1

つの目的のうち一つの目的の重みを 0.1 刻みで与えると，11 個の重みベクトルを生成できる．セルは重みベクトルに対応して配置されている．各セルに一つの個体が入るとすると，ＧＡの個体群の大きさは 11 となる．以下，このセルの配置される空間のことをセル空間と呼ぶことにする．

セルラーＧＡにおいて，あるセルの個体の遺伝的操作は，「近く」のセルの個体とに限定されるため，セル空間における近傍を定義する必要がある．ここで，近傍を定義するために，n 次元空間での距離を求めなければならない．本研究では，ユークリッド距離によりセル間の距離を測り，操作の対象となっているセルを含めて k_{neighbor} 個のセルを近傍とする．

セルラー多目的ＧＡでの選択操作は，定義された近傍に含まれる個体を対象にして行う．すなわち，操作の対象となっているセルに関連付けられている重みを用いて，k_{neighbor} 個の近傍セルに含まれている個体の適応度を計算し，それらの個体の中から，交叉操作の親個体を選択する．したがって，異なるセルの親個体は，異なる重みを用いた適応度関数に基づいて選択されることになる．

4. 数値実験

本研究では，フローショップ・スケジューリング問題に提案手法を適用する．総処理時間最小化と総納期遅れ最小化を目的関数として用いる．ここで，総処理時間は，すべてのジョブの処理にかかる時間を表しており，総納期遅れは，すべてのジョブの納期遅れの総和を表している．フローショップ・スケジューリング問題は，与えられた目的関数を最適にするジョブ順列を求める問題であるので，ジョブ順列をＧＡでの個体として取り扱うことにする．

テスト問題として，10 種類の 20 ジョブ 10 機械問題を生成した．各ジョブの各機械での処理時間は，[1, 99]の範囲内の乱数で与え，各ジョブの納期はランダムに設定した．本研究での多目的最適化問題の解は，非劣解集合として与えられるため，次のような解集合の評価基準を用いることにする．

1) 求められた非劣解の数

非劣解集合の多様性を測る尺度の一つとして，探索手法により求められた非劣解の数を用いる．

2) 解集合内の最大距離

解集合 Ω の広がりを求めるため，集合に含まれる２つの解の距離の最大値を次式により求める．

$$D(\Omega) = \max\left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (f_i(x) - f_i(y))^2} \;\middle|\; x, y \in \Omega \right\}. \quad (5)$$

3) Esbensen (1996)の解集合評価基準

解集合 Ω において，ある重み $w = (w_1, w_2)$ を用いたときの最良の解 x^* が次のように求められるとする．

$$f(x^*) = w_1 f_1(x^*) + w_2 f_2(x^*) = \max\{w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) \mid x \in \Omega\}. \quad (6)$$

ここで，$f_1(x)$ と $f_2(x)$ はそれぞれ，目的関数により計算される評価値を表している．Esbensen [3]は，さまざまな重みを用いたときの $f(x^*)$ の期待値を求めることにより，解集合の評価を行う方法を提案している．本研究では，ランダムに生成された 10,000 個の重みベクトルに対して，式(6)の期待値を求める．

多目的ＧＡとセルラー多目的ＧＡを各テスト問題に 10 回ずつ適用したときの結果を，Table 1 に示す．なお，それぞれのアルゴリズムにおいて，個体数は 100 とし，エリート解の数は 3 個体とした．また，セルラー多目的ＧＡにおける近傍解の数は 10 個体とした．Table 1 から，セルラー多目的ＧＡにより，多目的ＧＡと同程度の数の非劣解が得られていることがわかる．解集合内の最大距離は，多目的ＧＡの方が長いが，Esbensen の評価値は，平均も標準偏差の値も提案手法の方が優れていることがわかる．

5. おわりに

本研究では，セルラー多目的ＧＡを提案し，フローショップ・スケジューリング問題に適用した．提案手法により，多目的ＧＡよりも優れた非劣解集合を得られることを示した．

参考文献

[1] T.Murata and H.Ishibuchi (1995). MOGA: Multi-objective genetic algorithms. *Proc. of 2nd IEEE International Conference on Evolutionary Computing*: 289-294.

[2] D. Whitley (1993). Cellular Genetic Algorithms. *Proc. of 5th International Conference on Genetic Algorithms*: 658.

[3] H.Esbensen (1996). Defining solution set quality. *Memorandum* (No.UCB/ERL M96/1, Electric Research Laboratory, College of Engineering, University of California, Berkeley, USA, January, 1996).

[問い合わせ先]
〒326-8558　栃木県足利市大前町 286-1
足利工業大学工学部経営情報工学科
村田　忠彦
TEL: 0284-62-0605 内線 378　FAX: 0284-64-1071
Email: murata@ashitech.ac.jp

WB2−3

多目的最適化問題のためのセルラー遺伝的局所探索法

Cellular Genetic Local Search Algorithm for Multi-Objective Optimization Problems

村田 忠彦
Tadahiko Murata
足利工業大学
Ashikaga Institute of Technology

石渕 久生
Hisao Ishibuchi
大阪府立大学
Osaka Prefecture University

玄 光男
Mitsuo Gen
足利工業大学
Ashikaga Institute of Technology

Abstract In this paper, we extend our cellular multi-objective genetic algorithm by introducing a local search procedure. In our algorithm, every individual in each population exists in a cell of a spatially structured space (e.g., two-dimensional grid-world) where each cell has a different local search direction. Such a local search direction corresponds to weights in a scalar fitness function defined by the weighted sum of multiple objectives. We show how cellular structures can be combined with multi-objective genetic local search (MOGLS) algorithm for improving their search ability to find Pareto-optimal solutions of multi-objective optimization problems. We apply our cellular MOGLS to two-objective scheduling problems, and show its effectiveness.

1. はじめに

本研究では，多目的最適化問題のためのセルラー多目的ＧＡ[1]に局所探索法を導入した探索法(セルラーＭＯＧＬＳ）を提案する．Fig.1 は，筆者らの多目的ＧＡ（ＭＯＧＡ），多目的局所探索法（ＭＯＧＬＳ），および，それらへのセルラー構造[2]の導入を示している．ＭＯＧＡ[3]では，複数の目的関数を重みベクトルによりスカラー化した適応度関数が用いられる．重みベクトルが親個体の選択のたびに変更されることにより，さまざまな方向への解探索が実現されている．ＭＯＧＡに局所探索を導入したＭＯＧＬＳ[4]では，解が選択されたときの重みを用いて局所探索方向が定められている．また，局所探索において，探索する近傍の数を制限することにより，遺伝的操作による探索と局所探索のバランスを保っている．

一方，セルラー構造を用いたＧＡでは，各個体はセルに格納され，その個体の交叉操作の対象は近くのセルの個体に限定されている．本研究では，これらを組み合わせたセルラー多目的ＧＡに局所探索を導入した，多目的最適化問題のためのセルラー遺伝的局所探索法（セルラーＭＯＧＬＳ）を提案し，多目的スケジューリング問題に適用する．数値実験により，提案手法が従来手法より非劣解集合の探索能力の点で優れていることを示す．

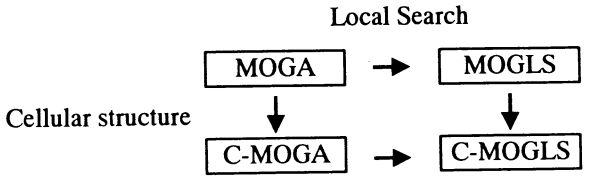


Fig.1 局所探索法とセルラー構造の導入の関係．

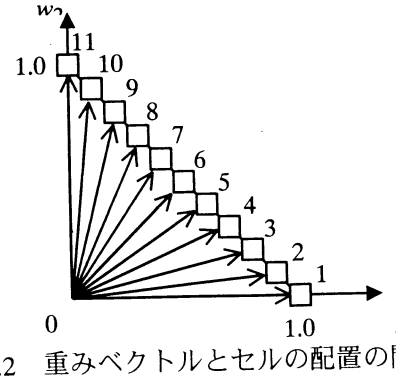


Fig.2 重みベクトルとセルの配置の関係．

2. 多目的最適化問題のための遺伝的局所探索法

ＭＯＧＬＳ[4]は，ＭＯＧＡに局所探索法を導入した手法である．ＭＯＧＡに関する特徴は，別稿[1]を参考にしていただきたい．本稿では，ＭＯＧＡに局所探索法を導入する際の特徴を述べる．

局所探索法は，選択，交叉，突然変異などの遺伝的操作により生成された解に適用される．局所探索法は，ＭＯＧＡの適応度関数である次のスカラー化目的関数を最大化するように適用される．

$$f(\boldsymbol{x}) = w_1 f_1(\boldsymbol{x}) + w_2 f_2(\boldsymbol{x}) + \ldots + w_n f_n(\boldsymbol{x}), \quad (1)$$

ＭＯＧＬＳでは，次のような制限つきの近傍探索により解の改善が行われる．

Step 1) $\boldsymbol{x}$ を局所探索の初期解とする．
Step 2) 現在の解 $\boldsymbol{x}$ の近傍解 $\boldsymbol{y}$ をランダムに選択する．
Step 3) もし $f(\boldsymbol{x}) < f(\boldsymbol{y})$（すなわち，$\boldsymbol{y}$ が $\boldsymbol{x}$ より優れた解である）なら，$\boldsymbol{x}$ を $\boldsymbol{y}$ に更新し，Step 2 へもどる．
Step 4) もし，ランダムに選択された k 個の近傍解が探索され，現在の解 $\boldsymbol{x}$ より優れた解が存在しない場合には，局所探索を終了する．それ以外の場合には，Step 2 へもどる．

上記の局所探索は，ランダムに選択された k 個の近傍解に，現在の解より優れた解が存在しない場合，終了する．したがって，k の値を調整することにより，遺伝的操作による探索と局所探索のバランスをとることができる．もし，$k = 0$ とするなら，ＭＯＧＬＳはＭＯＧＡと同じアルゴリズムになり，k の値が十分大きく，遺伝的操作が行われない場合には，多数の初期解から探索をおこなう局所探索法と同じアルゴリズムとなる．

3. セルラーＭＯＧＬＳ

セルラー多目的ＧＡ[1]では，各個体（すなわち，解）は，Fig.2 のように，異なる重みをもつセルに位置づけられており，新しい解を生成するための交

叉操作は，近くのセルに位置づけられている解との間に制限されている．すなわち，各セルはそれぞれ固有の重みをもっており，その重みを用いて解の選択が行われる．

セルラーＭＯＧＬＳでは，選択の際の重みを用いて，セルに属する解の局所探索を行う．すなわち，個体の属するセルの重みベクトルを用いた式(1)の適応度関数を最大にするような局所探索が行われる．局所探索により改善された個体は引き続き同じセルに属し，次の世代において遺伝的操作の対象となる．

4. 数値実験

本研究では，フローショップ・スケジューリング問題に提案手法を適用する．総処理時間最小化と総納期遅れ最小化を目的関数として用いる．ここで，総処理時間は，すべてのジョブの処理にかかる時間を表しており，総納期遅れは，すべてのジョブの納期遅れの総和を表している．フローショップ・スケジューリング問題は，与えられた目的関数を最適にするジョブ順列を求める問題であるので，ジョブ順列をＧＡでの個体として取り扱うことにする．

テスト問題として，10 種類の 20 ジョブ 10 機械問題を生成した．各ジョブの各機械での処理時間は，[1, 99]の範囲内の乱数で与え，各ジョブの納期はランダムに設定した．本研究での多目的最適化問題の解は，非劣解集合として与えられるため，次のような解集合の評価基準を用いることにする．

1) 求められた非劣解の数

非劣解集合の多様性を測る尺度の一つとして，探索手法により求められた非劣解の数を用いる．

2) 解集合内の最大距離

解集合 Ω の広がりを求めるため，集合に含まれる２つの解の距離の最大値を次式により求める．

$$D(\Omega)=\max\left\{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(f_i(x)-f_i(y))^2}\ \middle|\ x,y\in\Omega\right\}. \quad (2)$$

3) Esbensen (1996)の解集合評価基準

解集合 Ω において，ある重み $w=(w_1, w_2)$ を用いたときの最良の解 x^* が次のように求められるとする．

$$f(x^*)=w_1f_1(x^*)+w_2f_2(x^*)$$
$$=\max\{w_1f_1(x)+w_2f_2(x)\,|\,x\in\Omega\}. \quad (3)$$

ここで，$f_1(x)$ と $f_2(x)$ はそれぞれ，目的関数により計算される評価値を表している．Esbensen [5]は，さまざまな重みを用いたときの $f(x^*)$ の期待値を求めることにより，解集合の評価を行う方法を提案している．本研究では，ランダムに生成された 10,000 個の重みベクトルに対して，式(3)の期待値を求める．

ＭＯＧＡ，ＭＯＧＬＳ，セルラー多目的ＧＡ，セルラーＭＯＧＬＳを各テスト問題に 10 回ずつ適用したときの結果を，Table 1 に示す．なお，それぞれのアルゴリズムにおいて，個体数は 100 とし，非劣解集合から遺伝的操作の対象となる個体群へ保存されるエリート解の数は 3 個体とした．また，セルラーＧＡにおける近傍解の数は 10 個体とした．

Table 1　数値実験結果.

	A	B	B/A	D	Quality	SD of Q
MOGA	14.6	2.9	0.211	1512.4	-1065.2	66.0
MOGLS	14.0	3.4	0.257	1829.4	-971.5	32.4
C-MOGA	15.9	8.4	0.540	1342.2	-990.0	36.1
C-MOGLS	17.1	7.0	0.427	1854.5	-964.0	29.4

A: 非劣解集合に含まれる解の数

B: 他の手法により得られた非劣解により優越されない解の数.

Quality: Esbensen による集合評価基準値.

SD of Q: 集合評価基準値の標準偏差値.

D: 解集合内の最大距離.

Table 1 から，ＭＯＧＡとＭＯＧＬＳにセルラー構造を導入することにより，優れた非劣解集合を探索することができていることがわかる．また，ＭＯＧＡとセルラーＭＯＧＡへの局所探索の導入により，それぞれの性能が向上していることもわかる．集合評価基準の平均値と標準偏差値からも，局所探索の導入が優れた解を安定して得ることによい影響を与えていることがわかる．

5. おわりに

本研究では，セルラー多目的ＧＡに局所探索法を導入したセルラーＭＯＧＬＳを提案した．提案手法をフローショップ・スケジューリング問題に適用することにより，ＭＯＧＡの局所探索法とのハイブリッド化とセルラー構造の導入が，非劣解探索能力を向上することを示した．今後の研究課題として，３目的以上の最適化問題に提案手法を適用し，その効果性を検証するとともに，スケジューリング問題以外の問題にも適用することが必要であると思われる．

参考文献

[1] 村田，石渕，玄 (2000). 多目的最適化問題のためのセルラー多目的ＧＡ．第 16 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集.

[2] D. Whitley (1993). Cellular Genetic Algorithms. *Proc. of 5th International Conference on Genetic Algorithms*: 658.

[3] T.Murata and H.Ishibuchi (1995). MOGA: Multi-objective genetic algorithms. *Proc. of 2nd IEEE International Conference on Evolutionary Computing*: 289-294.

[4] H.Ishibuchi and T.Murata (1998). A multi-objective genetic local search algorithms and its application to flowshop scheduling. *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, Part C,* **28** (3): 392-403.

[5] H.Esbensen (1996). Defining solution set quality. *Memorandum* (No.UCB/ERL M96/1, Electric Research Laboratory, College of Engineering, University of California, Berkeley, USA, January, 1996).

[問い合わせ先]

〒326-8558　栃木県足利市大前町 286-1
足利工業大学工学部経営情報工学科
村田　忠彦

ＴＥＬ: 0284-62-0605 内線 378　ＦＡＸ: 0284-64-1071

Email: murata@ashitech.ac.jp

WB3−1

遺伝的アルゴリズムを用いた学習型ファジィ制御システムの開発
Design of a Learning Fuzzy Control System Using Genetic Algorithms

○山田尚史, 村上周太, 島川学

Shuta Murakami Manabu Shimakawa Hisashi Yamada

Kyushu Institute of Technology

Abstract : This paper deals with a design of learning-fuzzy-control system . This system adjusts parameters of fuzzy sets for a fuzzy model and a fuzzy controller by using GA. First, the fuzzy model is designed by GA. Second, the fuzzy controller is repeatedly designed by control simulation for the fuzzy model and by using genetic parameter searching. Finally, in this paper the effectiveness of our proposed system is discussed from simulation results.

1 はじめに

世の中には、未だに自動的に制御できないものがたくさんある。例えば陶芸などの分野において名人の技術を制御知識として応用することは大変難しい。名人の技術は修練という試行錯誤を繰り返し、習得できるのもであるが、これを計算機においてこの試行錯誤を繰り返すことにより習得（学習）はできないものだろうか。

本研究は、この試行錯誤的な学習制御を実現するために、人間の試行・直感に近い制御方法であるファジィ制御と、選択、交叉、突然変異などの繰り返しにより進化していく遺伝的アルゴリズムを用い、制御知識のない無知な状態から、人間と同じように試行錯誤的な学習を繰り返し行う事で制御ルールを獲得していく学習型ファジィ制御システムの開発を試みる。

2 倒立振子

本研究において、制御対象として倒立振子を用い、振子の倒立を目標とする。倒立振子は図1のようなモデルで表される非線形なシステムである。

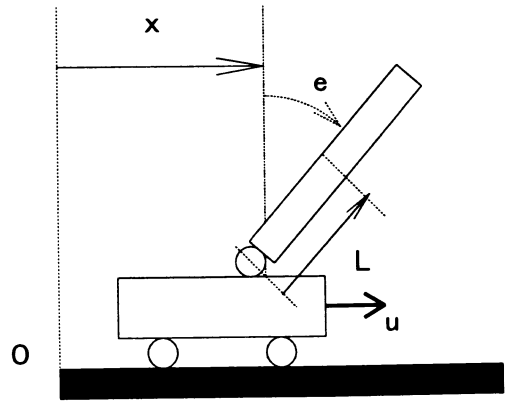


図1 倒立振子システム

倒立振子は次の(1)、(2)式に示す非線形方程式で表される。

$$mL\ddot{x}\cos e+(I+mL^2)\ddot{e}-mgL\sin e+D_e\dot{e}=0 \quad (1)$$

$$(m+M)\ddot{x}+mL\ddot{e}\cos e-mL\dot{e}^2\sin e+D_x\dot{x}=u \quad (2)$$

x ：台車の位置偏差　e ：振子の角度偏差

またこのときの倒立振子のパラメータを以下のようにしている。

表1 倒立振子のパラメータ

振子の質量	m	0.1	k g
台車の質量	M	5.01	k g
回転軸から振子の重心までの距離	L	0.115	m
重力加速度		9.8	m／s^2
振子の重心回りの慣性モーメント	I	0.00214	k g・m^3
台車の摩擦係数	D x	24.5	k g／s
回転軸の粘性摩擦係数	De	0.000589	k g・m^3／s

本研究ではシミュレータとして式(3)、(4)を用いる

$$\ddot{e}=\{mLu\cos e-ml(m+M)g\sin e+(m+M)D_e\dot{e} \\ m^2L^2\dot{e}^2\sin e\cos e-D_x\dot{y}m\cos e\}/\{m^2L^2\cos^2 e \\ -(m+M)(mL^2+I)\} \quad (3)$$

$$\ddot{x}=\{m^2L^2g\sin e\cos e-D_e\dot{e}mL\cos e-(mL^2+I)u- \\ (mL^2+I)mL\dot{e}\sin e+(mL^2+I)D_x\dot{x}\}/\{m^2L^2\cos^2 e- \\ (m+M)(mL^2+I)\} \quad (4)$$

3　遺伝的アルゴリズムを用いた学習型ファジィ制御システム

学習型ファジィ制御システムの学習過程を以下に示す。

(1)　振子の台車をランダムに操作し、そのときの振子が倒れるまでの操作量、角度偏差、角速度、台車の位置偏差、台車の速度のデータ群をいくつか取得する。

(2)　倒立振子の初期ファジィモデルを作成する。前件部メンバーシップ関数のパラメータを遺伝子とする初期個体集団を生成し、GAによりメンバーシップ関数のパラメータ調整を行う。後件部は関数型推論法により、後件部線形式のパラメータを重み付き最小２乗法により同定する。各個体ごとに評価を行い、最終世代の最大適応度個体を最良ファジィモデルとする。

(3)　コントローラのファジィ制御ルールを作成する。前件部メンバーシップ関数のパラメータと、後件部のシングルトンを遺伝子とする初期個体集団を生成する。各個体ごと先に作成したファジィモデルを制御、評価し、GAによりパラメータ調整を行う。後件部の操作量は簡略推論法により推論する。最終世代の最大適応度の個体をファジィコントローラとする。

(4)　作成したファジィコントローラにより実際に振子の倒立制御を試みる。この時に得られたデータを先のモデリング時に使用したデータ群に加え、さらにファジィモデリングを行う。

(5)　以上の動作を繰り返して学習していき、最終的に得られた制御ルールを最良コントローラとする。

4　遺伝的アルゴリズムによる制御ルールの最適化

4.1 ファジィモデルルールの生成

ファジィモデルの構造を以下に示す。

ファジィモデルルール i

$$if\ u(k)\ is\ A_{i1}, e(k)\ is\ A_{i2}, \Delta e(k)\ is\ A_{i3}, x(k) is\ A_{i4}, \Delta x(k) is\ A_{i5}$$

$$then\ e^i(k+1) = a_{i1}z_1 + a_{i2}z_2 + \cdots + a_{i5}z_5$$

$$x^i(k+1) = b_{i1}z_1 + b_{i2}z_2 + \cdots + b_{i5}z_5$$

$$(i = 1,\ 2, \cdots, 243)$$

$u(k)$：操作量，　$e(k)$：振子の角度，　$\Delta e(k)$：振子の角速度，　$x(k)$：台車の位置，　$\Delta x(k)$：台車の速度

z_i：後件部説明変数

$$z_1 = u(k) \quad z_2 = e(k) \quad z_3 = \Delta e(k)$$

$$z_4 = x(k) \quad z_5 = \Delta x(k)$$

a_{ii}, b_{ii}：後件部線形式のパラメータ

$A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, A_{i4}, A_{i5}$：前件部ファジィ集合,3分割メンバーシップ関数（Negative, Zero, Positive）

である。

ファジィモデリングにおいて第一世代の６０個体をランダムに生成する。各個体は操作量u、角度e、角速度Δe、台車の位置ｘ、台車の速度Δｘ　の各メンバーシップ関数のパラメータｌi、ｒi、ｈi（ｉ＝u、ｅ、Δe、ｘ、Δｘ）の値を遺伝子情報としている。図２にメンバーシップ関数のパラメータの位置を示す。

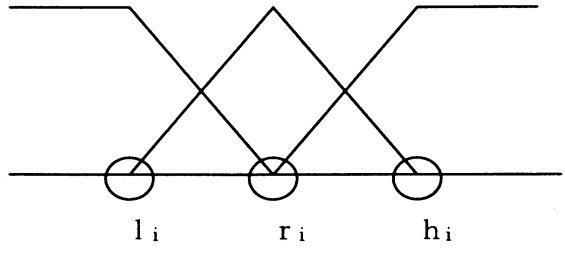


図２　メンバーシップ関数のパラメータ（遺伝子部分）

これらの各個体に対してファジィモデルルール後件部線形式のパラメータを実際の倒立振子を制御した時に得られた操作量、角度、角速度、台車の位置、台車の速度、の各データ群をもとに関数型推論法によりパラメータ同定を行う。この時得られたファジィモデル６０個に対して、モデルの評価関数および適応度関数をそれぞれ(5)、(6)式で与える。

$$f_{MODEL} = \sum_{k=1}^{data} \{(e_m(k) - e_r(k))^2 + (x_m(k) - x_r(k))^2\}/2 \tag{5}$$

$$g_{MODEL} = \frac{1}{1 + a \cdot f_{MODEL}/data} \tag{6}$$

$e_m(k)$：ファジィモデルからの角度応答

$e_r(k)$：実際の系からの角度応答

$x_m(k)$：ファジィモデルからの位置応答

$x_r(k)$：実際の系からの位置応答

$data$：ファジィモデリング用のデータ群数

a：パラメータ

適応度の大きい上位４個体をエリートとして次世代に残し、その他の個体に対してルーレット選択により高い適応度の個体が次世代に子を残すように選択を行い、交叉、突然変異を繰り返し最終世代の最大適応度の個体を最良ファジィモデルとする。

4.2 ファジィ制御ルールの生成

ファジィ制御ルールの構造を以下に示す。

ファジィ制御ルールi

$$if\ e(k)\ is\ B_{i1}, \Delta e(k)\ is\ B_{i2}, x\ is\ B_{i3}, \Delta x\ is\ B_{i4}$$
$$then\ u(k)\ is\ b_i$$
$$(i=1,2,\cdots,81)$$

$u(k)$： 操作量, $e(k)$： 振子の角度, $\Delta e(k)$： 振子の角速度, $x(k)$： 台車の位置, $\Delta x(k)$： 台車の角速度

b_i： 後件部シングルトン

$B_{i1}, B_{i2}, B_{i3}, B_{i4}, B_{i5}$： 前件部ファジィ集合,3分割メンバーシップ関数（Negative, Zero, Positive)

ファジィコントローラにおいて第一世代の６０個体をランダムに生成する。各個体は角度 e、角速度Δe、台車の位置x、台車の速度Δxの各メンバーシップ関数のパラメータの値と後件部シングルトンの値を遺伝子情報として、一個体を一つのコントローラとしている。ここで最良ファジィモデルで得られた角度、角速度、位置、台車の速度のメンバーシップ関数のそれぞれの広がり（l、hの値）に含まれる範囲でファジィ制御ルールの前件部変数である角度、角速度のメンバーシップ関数のパラメータを乱数により決定する。また後件部シングルトンはランダムに生成する。

次に、最良ファジィモデルを制御対象として、６０個体のファジィコントローラで簡略推論法によるファジィ制御を行い、式(7)の評価関数および式(8)の適応度関数

$$f_{CTRL} = \frac{\sum_{k=0}^{t_{fall}} \{e(k)^2 + x(k)^2\}/2}{t_{fall}} \quad (7)$$

t_{fall}： 振子の倒れるまでの時間

$e(k)$： 振子の角度応答

$x(k)$： 台車の応答

$$g_{CTRL} = \frac{1}{1+a \cdot f_{CTRL}} \quad (8)$$

a： パラメータ

から、各個体の適応度を計算し、ファジィモデリングと同様に上位4個体をエリートとして次世代に残し、その他をルーレット選択により選択する。選択された個体間で交叉を行い、各個体毎に突然変異を行う。最終世代の最大適応度の個体を最良制御ルールとして、このファジィ制御ルールにより実際の系である倒立振子を制御する。この時の振子の応答データを先のモデリングに使用したデータに加え再びモデリングを行い、ファジィ制御ルールを作成する作業を繰り返すことで、ファジィ制御ルールの学習を行う。

以上の処理を繰り返し、学習的に倒立振子の制御を実現する。

5 学習制御結果

5.1 初期ファジィコントローラ

倒立振子をランダム操作して得られたファジィモデリング用のデータを用いてファジィモデルを作成する。このファジィモデルを制御対象とし、GAによりファジィ制御ルールのパラメータ調整を行う。最終世代での最大適応度のファジィ制御ルールを初期コントローラとする。この初期最良ファジィコントローラを用いて実際の系を制御する。その結果を図3、4に示す。

また実線は角度応答、点線は位置応答である。

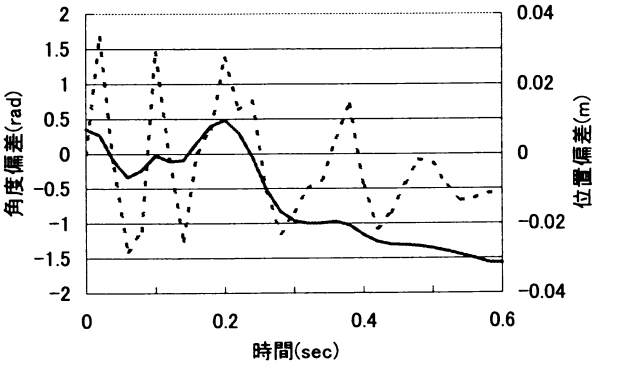


図3 初期最良ファジィコントローラによる制御結果
(初期値 e=0.3 Δe=1.0)

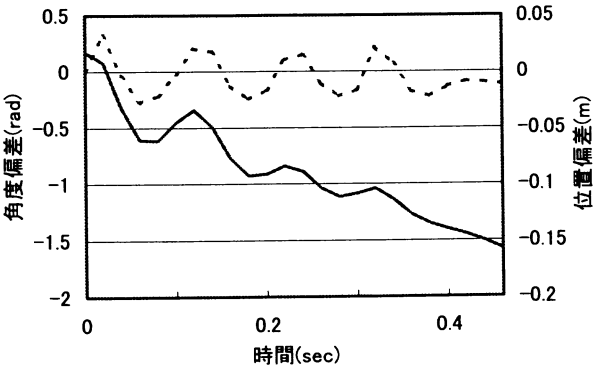


図4 初期最良ファジィコントローラによる制御結果
(初期値 e=0.175 Δe=0.5)

5.2 最終学習結果

学習制御系における最終的な学習制御結果を示す。学習回数として今回は3回行い学習を重ねた。最終学習で作成したファジィコントローラの実系の制御結果をそれぞれ図5, 6に示めす。

また実線は角度応答、点線は位置応答である。

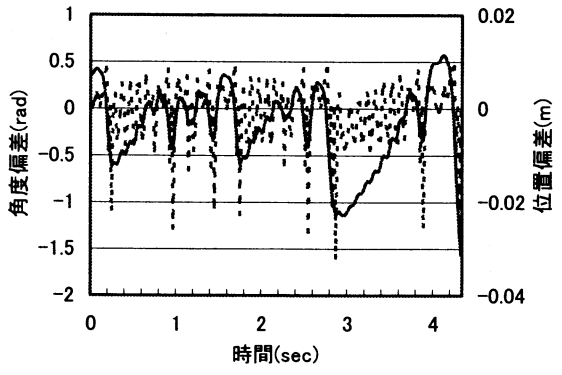


図5　最終ファジィコントローラによる制御結果
(初期値 e=0.3　Δe=1.0)

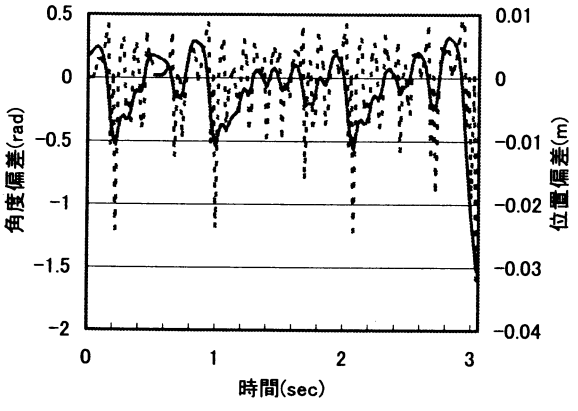


図6　最終ファジィコントローラによる制御結果
(初期値 e=0.175　Δe=0.5)

6　シミュレーション結果の考察

前節の結果より、今回提案したアルゴリズムを用いての振子の直立制御の考察を行う。

(1)　ファジィモデル

モデリングデータが少ない場合において、あるデータに当てはまらない規則が生じ、重み付き最小2乗法での重み行列の成分が0となり後件部線形式のパラメータがすべて0になる場合もでてくる。このため、本手法においてはある程度の振子データ数の必要がある。また、後件部説明変数の数を限定し、ファジィモデリングを進めたが、実際の系からの応答とモデルからの応答の誤差を減らすために説明変数を増やす方法も考えられる。しかし、これは計算時間の増加につながるので統計的なモデル基準であるAIC などを評価基準として誤差が少なくかつ説明変数が少ない関数を同定することも考えられる。

(2)　ファジィ制御ルール

今回は学習回数を 3 回に限定したために評価の良いファジィコントローラの導出はできなかったが、学習回数を増やすことである程度のファジィ制御ルールの導出はできると考える。これはファジィモデルからの学習ではなく、シミュレータを用いてファジィコントローラを作成した場合の結果から確認できた。しかし、本手法は実際の系からではなく、ファジィモデルの制御により、ファジィ制御ルールの導出を試みているためモデルの精度に大きく依存しており、モデルの精度向上がファジィ制御ルールの向上につながると考えられる。

7　まとめ

本研究では、倒立振子の角度制御と位置制御を同時に行うファジィコントローラを設計したが、今後最初に角度制御を行い、振子の直立を達成したのちに位置制御に切り替えるようなファジィコントローラの設計を考えている。また前件部変数の増加によりルール数が増加したため、ルールを統合するなどの処置が必要であると考える。

8　参考文献

[1] 日本ファジィ学会：ファジィ制御、日刊工業新聞社 (1993)

[2]三宮信夫他、遺伝的アルゴリズムと最適化、朝倉書店 (1998)

[問い合わせ先]
〒804-8550　北九州市戸畑区仙水町 1-1
九州工業大学 工学部 電気工学科 情報工学教室
村 上 周 太
Tel&Fax 093-884-3244
E-mail: murakami@comp.kyutech.ac.jp

WB3−2

遺伝的プログラミングにおける初期値依存問題を改善するための学習法

An Extended Genetic Programming Approach for Initial Condition Problem

吉家 悟司, ○瀬名波 強, 新美 礼彦, 田崎 栄一郎
Satosi Yosiie , ○ Tsuyoshi Senaha, Ayahiko Niimi and Eiichiro Tazaki

桐蔭横浜大学 工学部 制御システム工学科
Department of Control and Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract: In general genetic programming techniques, input data is often fixed to calculate fitness value easily. Therefore, genetic programming depends on input data according to the characteristics of search space, and there is a possibility that fitness value of the individual is difficult to be improved. In this paper, we defined it as initial condition dependence problem. To improve the problem, we propose combined learning method of genetic programming with bootstrap method. To inspect the effectiveness of the proposed method, we apply it to an identification problem of function.

1 はじめに

遺伝的プログラミング (GP) はいくつかの問題点を抱えている。それらの問題点を解決するために、GP に対するさまざまな拡張が提案されている。

通常の遺伝的プログラミングでは、適応度の計算を簡単にするために、入力データを固定することが多い。このため、解空間の性質によっては、入力データに依存してしまい、個体の適応度が改善されにくい可能性がある。そこで、この問題を初期値依存問題と定義して改善する学習法を検討する。

本論文では、GP とブートストラップ法を組み合わせる学習法を提案する。そして、提案した組み合わせ学習法により、初期値依存問題の改善への有効性を検証する。

2 GPについて

遺伝的プログラミングは拡張型遺伝的アルゴリズムの一つであると考えられる。遺伝的アルゴリズム (GA) は、文字列を使って学習を行うのに対し、GP は染色体表現をグラフ構造や木構造といった構造的表現を取り扱えるように拡張されている。[1, 3] 構造学習を行えるということは探索空間が拡大される可能性がある。これにより複雑な問題に対しても遺伝的学習が適用できると考えられる。

GP の問題点として、初期値に依存して局所解に停留してしまうことがある。原因として、解空間の性質においては最適解に到達しづらいことが考えられる。さらに、一般に遺伝的探索においては解が離散的に存在するために次の状態に移ったとしても適応度が改善されない可能性もある。

2.1 GP で用いられる選択方式

GP で学習を行うとき、さまざまな選択方式を用いることで個体を評価する。選択手法として、トーナメント選択方式、ランク選択方式、ルーレット選択方式がある。

通常の選択方式では、次の世代になったとき適応度が悪くなる可能性がある。

エリート戦略とは、適応度の良い親（のいくつか）を常にコピーして、次の世代に残す方式である。このため一般に前の世代より悪くなることはなくなる。よって探索能力が優れているとされる。しかし、親の適応度をソートする手間がかかるため、計算時間の増加をまねくことがある。

今回の実験では、トーナメント選択方式とエリート戦略を併用した。

3 ブートストラップ法

観測されたデータの中に含まれる母集団の情報を、種々の統計的手法を用いて分析し母集団全体の特性を推測する。この統計的推測における誤差の評価を、コンピュータを用いた大量の反復計算によって実行する手法がある。この新しい手法を「ブートストラップ法」という。[2]

テスト集団から、いくつかデータをサンプリングする。そして、学習とサンプリングを繰り返し行うと、学習アルゴリズムに推測された、母集団全体の特性が反映されることが容易に行われる。

4 提案する改善法

通常のGPでは、適応度の計算を簡単にするため入力データが固定されることが多い。そして、解が離散的に存在するため、入力データに依存して次の状態になったとしても適応度が改善されない可能性がある。ここで入力データの取り方に影響されることが初期値依存問題として定義した。このような問題において、適応度計算をする際、GPにブートストラップ法を組み込むことにより、データを統計的にとることができ、精度と学習速度が良くなる可能性がある。(図1参照)

GPの適応度計算において、ブートストラップ法を5世代、10世代、20世代に一回づつ組み込み、入力データを変化させる。組み込む世代数を変えることにより、精度が変化すると考えられる。

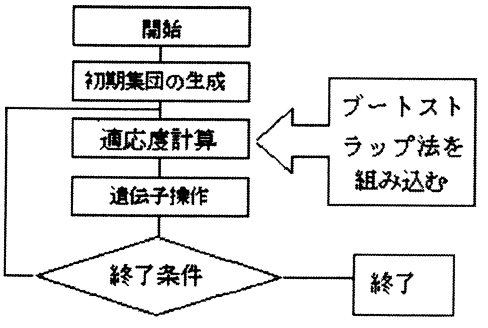


図 1: 提案するGPのフローチャート

表 1: 実験のパラメータ

設定項目	設定
個体数	100,500,1024
世代数	100
交叉（関数ノードの入れ替え）	0.2
交叉（すべての入れ替え）	0.2
突然変異	0.5
再生	0.1
エリート戦略	最良個体1個体
ブートストラップの組み込み間隔（世代数）	なし、5,10,20

5 実験

ここでは、関数同定問題により検証実験を行った。$y = x^2/2$ を使い、終了世代数は100世代とし、集団数を100、500、1024と3種類の場合を計算する。

ブートストラップ法も5世代、10世代、20世代に一度づつと変化させ最適な組み合わせを調べた。(その他のパラメータについては表1を参照)

適応度 (fitness) は、遺伝的プログラミングで計算したものと正解との差をとり、その誤差の絶対値の和をとる。テスト成績 (validation fitness) は、入力データをランダムにとったもので誤差の計算のときに適応度計算と同じ計算をする。

適応度 (fitness) とテスト成績 (validation fitness) の関係、個体数の違いによる学習の変化、そしてブートストラップ法を組み込む世代数による学習の変化を考える。

遺伝的プログラムのみ (Simple GP:S-GP) による学習の結果と、提案した組み合わせによる遺伝的プログラミング (Combination GP:C-GP) とで結果をだし、その2つの学習を比較し、初期値依存問題が改善されているかを検討する。

5.1 結果

予備実験として行った、「適応度とテスト成績の違い」「初期値による学習の違い」「集団数の違いによる学習の変化」は、それぞれ、図2,3, 4のようになった。

組み込み世代数の違いによる学習の変化の

様子を図5に、最終世代の様子を表2に示す。ただし、図5は終了世代付近を拡大したものである。

表 2: 組み込み世代数による学習の変化

	最良世代	適応度	テスト成績
GP のみ	67 世代	0.00144	0.00144
5 世代	99 世代	0.00011	0.00012
10 世代	50 世代	0.00029	0.00029
20 世代	96 世代	0.00015	0.00015

5.2 考察と結論

予備実験より、適応度とテスト成績には差が見えた。しかし最終世代に近づくにつれて差が少なくなっている。よってこの2つの評価尺度が差がなく扱えることが確認できた。(図2参照)

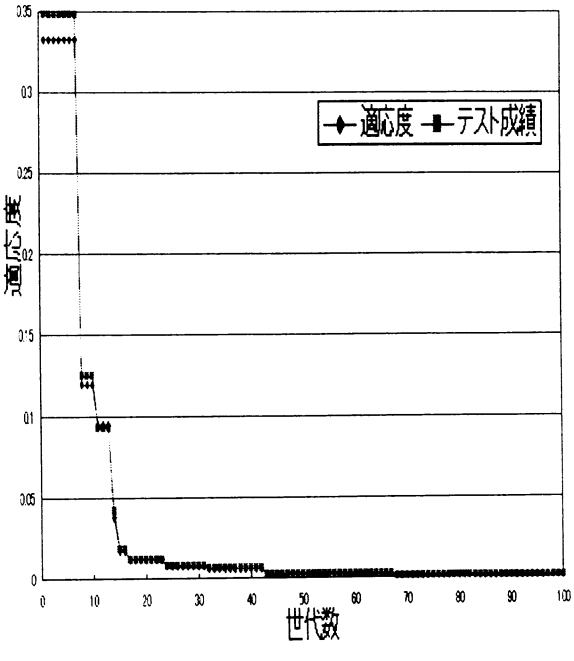


図 2: 適応度とテスト成績の違い

また、初期値の違いによって学習の差が見られた。(図3参照) これにより、関数同定問題では、初期値依存問題の起こる可能性があるということが確認できた。

世代数が早いとき個体数が多ければ適応度が良くなっている。ただし集団数が500、1024の時はほぼ同じ位の値になった。個体数が多くなると学習時間がかかってしまうので、この問題に関しては集団数500ぐらいでも、ある程度の精度が出ると考えられる。(図4参照)

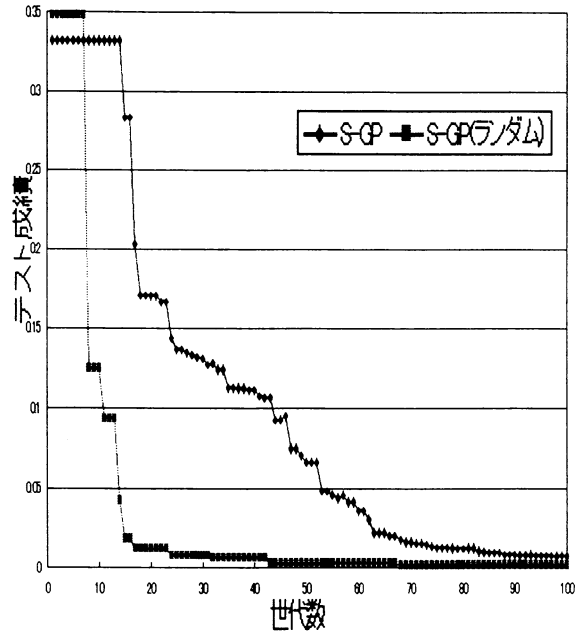


図 3: 初期値による学習の違い

図5から解るように、ブートストラップ法をいれて計算を行うと適応度が変化したのが見られた。組み込む世代数に関係なくテスト成績が良くなり、学習速度も良くなった。(表2、図5参照)

S-GP より C-GP のほうが精度が良くなっているからブートストラップ法を組み込んだほうが、適応度計算の初期値により学習が停留するのを防ぐ事ができた。これにより、初期値に依存せず学習が進むと考えられる。

以上のことから、GP にブートストラップ法を組み込む学習法は初期値依存問題に効果があるといえる。

6 おわりに

本論文では、GP の初期値依存問題を改善するために、GP にブートストラップ法を組み込み学習を行う手法を提案した。提案した学習法の有効性を検証するため、関数同定問題による検証を行った。検証の結果、GP の学習に改善

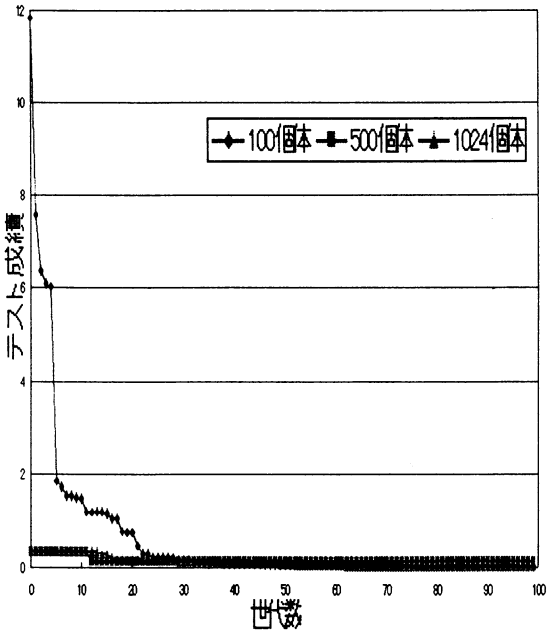


図 4: 集団数の違いによる学習の変化

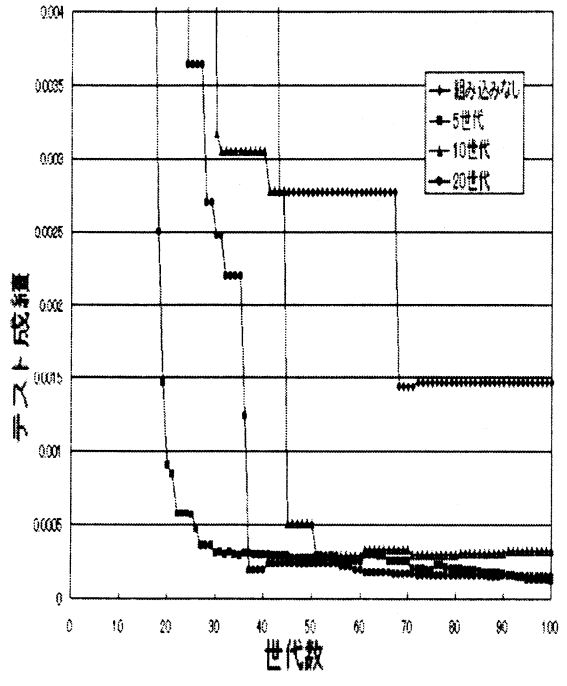


図 5: 組み込み世代数による学習の変化

が見られた。

現在、他の関数同定問題に対しての適用において、良好な結果を得ている。今後は、関数同定問題以外への適用によりその有効性の検証を試みる予定である。

参考文献

[1] 伊庭 斉志, 遺伝的プログラミング, 電気大出版, 1996

[2] 村上 征勝, 田村 義保, パソコンによるデータ解析, pp123, 朝倉書店, 1998

[3] 伊庭 斉志, 遺伝的アルゴリズムの基礎 ～ＧＡの謎をとく～, オーム社, 1994

[問い合わせ先]

〒 225–8502
神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614
桐蔭横浜大学 工学部 制御システム工学科
田崎　栄一郎
TEL:045–974–5070
FAX:045–978–1311
E-mail:tazaki@intlab.toin.ac.jp

WB3−3

異種個体集団が共存するGAによるファジィ推論ルールの獲得手法
— 既存手法との比較および考察 —

A Method for Acquiring Fuzzy Reasoning Rules by Genetic Algorithms Based on the Coexistence of Heterogeneous Populations
— Comparison with Existent Methods and Discussion —

梶谷 賢司 Kenji Kajitani 大阪工業大学 Osaka Institute of Technology
増田 達也 Tatsuya Masuda 大阪工業大学 Osaka Institute of Technology
井上 純一 Jun-ichi Inoue 三菱電機 Mitsubishi Electric Corporation

Abstract We have proposed an acquiring method of fuzzy reasoning rules by genetic algorithms based on the coexistence of heterogeneous populations before. In this method, we form plural populations (i.e. heterogeneous populations) which consist of some individuals with same rule number. And, it repeats study using these populations, then each individual concentrates on a particular population which fits the subject. In this paper we apply this method and existent methods to the auto-run vehicle control problem and the trailer-track back-up control problem. We demonstrate the effectiveness of our method by comparing it with existent methods.

1.まえがき

我々は先に異種個体集団が共存するGAによるファジィ推論ルールの自動獲得手法[1]を提案した。本手法は、ルール数の異なる個体毎に複数の異種個体集団を形成し、これらの個体集団間で個体の移動操作を行うことによって、最終的に必要最小限の推論ルールを含む集団に個体が集中するようになっている。

本稿では、本手法を自動走行車両制御問題とトレーラートラック後退制御問題に適用し、既存のファジィ推論ルール獲得手法[2][3]との比較実験を行うことによって、本手法の有効性を明らかにする。

2.異種個体集団が共存するGAによるファジィ推論ルールの獲得手法

<2.1>コーディング方法

本手法で用いる個体の染色体は図1に示すように、メンバシップ関数の形状を記述する部分とファジィ推論ルールを記述する部分とで構成される。メンバシップ関数の形状記述部分では、各メンバシップ関数の頂点位置の調整量$\Delta\alpha_{ik}$をコーディングする。また、推論ルール記述部分では、各推論ルールの前件部メンバシップ関数A_{ik}と後件部実数値w_{jh}をコーディングする。したがって各個体の染色体長はその個体がもつルール数によって異なってくる。

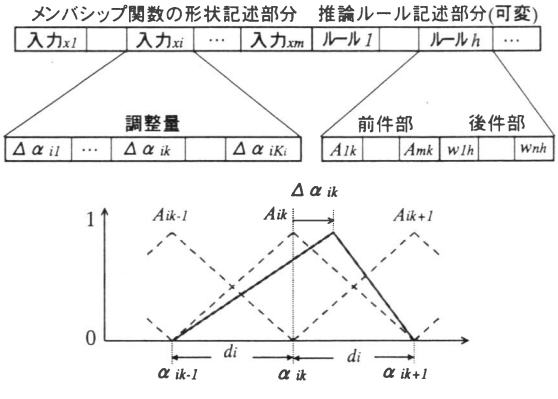


図 1: コーディング法

<2.2>アルゴリズム

本手法で用いる個体の染色体長は前節で述べたように個体に含まれる推論ルール数によって異なっている。そこで、本手法では染色体長の等しい(言い換えると、ルール数の等しい)個体ごとにグループ分けを行い、図 2 に示すような複数の異種個体集団を形成する。そして、通常の遺伝的操作「選択・交叉」および「突然変異」はこれら個体集団ごとに独立して行われる。さらに、本手法では上記の遺伝的操作以外に新たに「異種個体集団間の個体の移動」操作を導入することによって、各個体を現在所属する集団から別の個体集団へ移動できるようになっている。

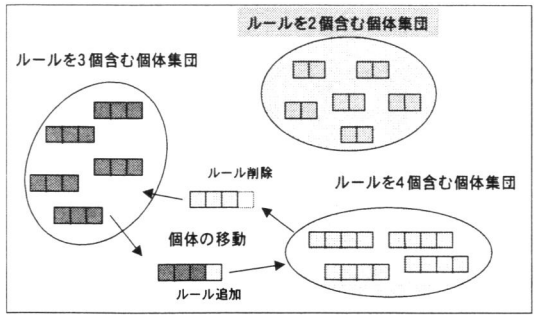


図 2: ルール数によってグループ化された異種個体集団

以下に、図 3 のフローチャートに従って、アルゴリズム

の概要を説明する

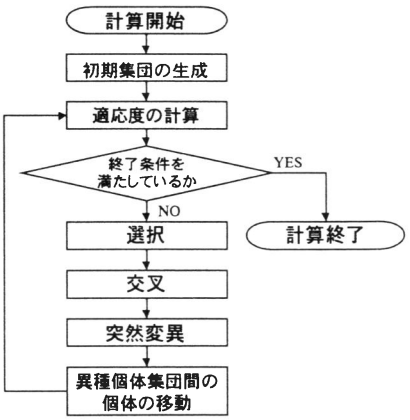


図 3: 学習アルゴリズムのフローチャート

《初期集団の生成》

様々な推論ルール数を持つ個体を十分に生成し、その後、推論ルール数の等しい個体毎に複数の異種個体集団を形成する。

《適応度の評価》

個体の適応度は式(1)に示すように、各出力二乗誤差 e_i、二乗誤差が予め定めている閾値を超えた数 n_i、ルール数 r にそれぞれ重みを付けたもので定義する。

$$F = \frac{\alpha}{\sum_{i=0}^{out}(\beta_i e_i + \gamma n_i) + r} \quad (1)$$

ただし、out:出力変数の数、α :スケーリング定数、β_i:出力 i の誤差の重み定数、γ :閾値を超えた数に対する重み定数。

《選択・交叉》

エリート保存戦略、適応度比例選択に従って個体の半数を親として残し、その他を淘汰する。次に選択で生き残った個体を同一集団内で選び、メンバシップ関数の形状記述部分は遺伝子座毎に、推論ルール記述部分は推論ルール毎に一様交叉をさせ新たな子を生成し、淘汰した個体を補う。

《突然変異》

式(2)の突然変異確率 P_m に従って、染色体の遺伝子を別の対立遺伝子に置き換える。

$$P_m = P_{m0} \cdot (1-kF) \quad (2)$$

ただし、P_{m0} : 基本突然変異率、k : 温度係数、F : 適応度。

《異種個体集団間の個体の移動》

各個体に対して、式(3)の移動確率 P_t に従って、強制的にルールの追加・削除を行うことで個体を別の個体集団に移動させる。まず、ルールの追加は、個体に新たに推論ルールを1つ追加することにより、染色体長を長くして隣接する個体集団への移動を行う。ただし、追加される推論ルールは、既に個体に含まれている推論ルール群と前件部が異なっていなければならない。また、ルールの削除は個体に含まれる推論ルールを任意に 1 つ削除することにより、個体を移動させる。

$$P_t = P_{t0} \cdot (1-kF) \quad (3)$$

ただし、P_{t0} : 基本移動確率。

3.比較実験

<3.1>自動走行車両制御問題

図 4 に示すように自動走行車両制御問題の入力変数としては、進行方向と道路との相対角 θ_r[deg]、車から道の右端までの距離 d_r[m]、車の速度 v[m/sec]、ハンドル角 θ [deg]の 4 変数を、出力変数としてはアクセルの変化分 Δv[m/sec]、ハンドル角の変化分 $\Delta\theta$ [deg]の 2 変数を用いる。

学習用入出力データとしては、図 5 の教示コースを人間が実際に車両を手動で走行させて、そのときの入出力の時系列データを用いた。

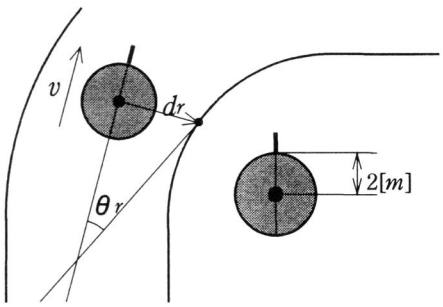


図 4: 入出力変数

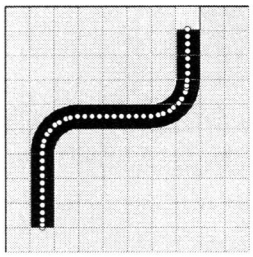


図 5: 教示したコース及び手動走行パターン

<3.1.1>本手法の適用結果

実験は初期集団を変えて 10 回行った。

実験で得られた解のうち、最良の制御結果を示した解が得られるまでの探索過程を図 6 に示す。探索初期では各集団に個体が分散しているが、探索を進めるにつれてルール数が多すぎたり、少なすぎたりする集団の個体は減少し、最適な個体集団(ルール数 10 の集団)へと大部分の個体が収束しているのがわかる。

次に、最大適応度を示した個体に対応する推論ルールを用いて、教示コースおよび未教示コースを走行させた結果を図 7 に示す。

教示コースだけでなく、未教示コースに関してもうまく制御してゴールにたどり着いていることがわかる。つまり、汎化能力に優れた必要最小限の推論ルールを獲得しているといえる。

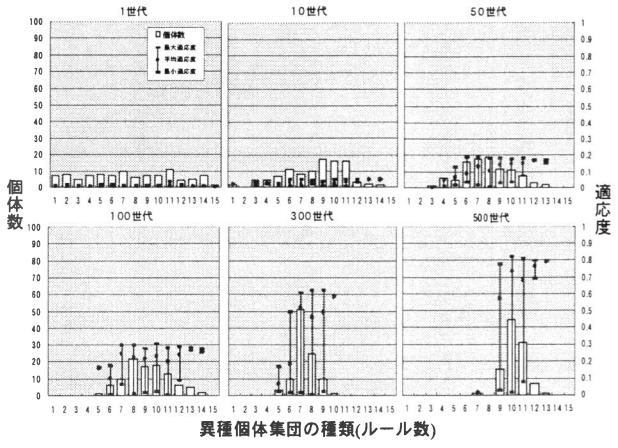


図 6: 各集団での個体数と適応度の変化

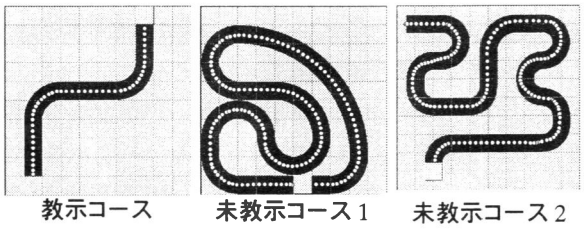


図 7: 走行結果

<3.1.2>既存手法の適用結果

次に本手法の有効性を明らかにするために、GA を用いた既存の 2 つの獲得手法

比較手法 1:スキーマ抽出法を用いた手法[2]

比較手法 2:超円錐形メンバーシップ関数を用いた手法[3]

との比較実験を行う。

実験は本手法の場合と同様に初期集団を10回変えて行った。表1に本手法と比較手法の10回試行して得られた最良個体の平均の結果を示している。

表 1: 10 回の平均結果

	ルール数	誤差と閾値を超えた数				適応度
		加速度		ハンドル角		
本手法	10.8	0.0144	1.8	0.00046	1.6	0.6104
比較手法1	13.4	0.0171	2.4	0.00062	2.3	0.4903
比較手法2	7.6	0.0416	13.9	0.00055	2.3	0.2799

表 1 によると、本手法が最も誤差が小さく、閾値を超えた数も少なくなっているため、適応度が最も高くなっていることがわかる。また、獲得された推論ルール数は比較手法 1 が最も多く、次いで本手法、比較手法 2 といった順になった。

次に比較手法によって獲得された推論ルールによる走行結果を図 8, 9 に示す。比較手法 1 は、コースの中央を走行できておらず、比較手法 2 はスタート地点でのアクセル変化が不十分で教示データに忠実でないことがわかる。また、本手法は全てのコースを走行できたのに対して、比較手法 1, 2 はともに教示コースと未教示コース 1 しか走行できなかった。このことから比較手法 1,2 で得られた推論ルールは本手法で得られたルールに比べて汎化能力はあまり優れていないことがわかる。

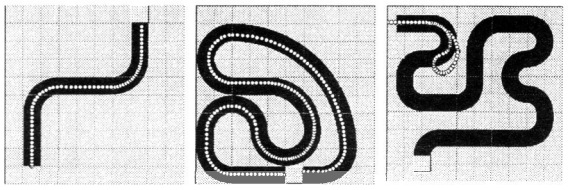


図 8: 比較手法 1 の場合の走行結果

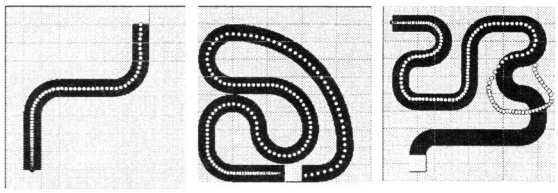


図 9: 比較手法 2 の場合の走行結果

<3.2>トレーラートラック後退運転制御問題

トレーラートラック後退運転制御問題の入力変数としては図 10 に示すように、トレーラー後部中心からプラットホームまでの距離 l[m]、トレーラーのホームに対する角度θ [deg]、トレーラートラックの連結角度ϕ [deg]の 3 変数を、出力変数として車体角度の変化分δ [deg]の 1 変数を用いる。図 11 に教示データとして用いた初期位置 0 度、180 度からの手動操作パターンを示す。

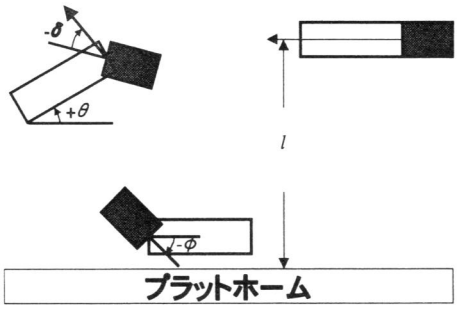


図 10: 入出力変数

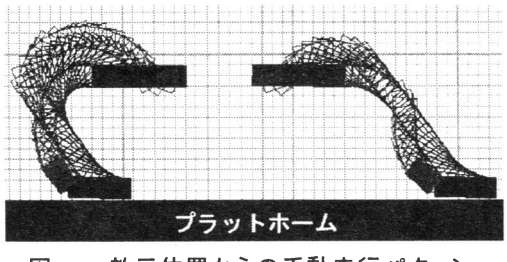


図 11: 教示位置からの手動走行パターン

<3.2.1>本手法の適用結果

実験は初期集団を変えて 10 回行った。

実験で得られた解のうち、最大適応度を示した個体に対応する推論ルールを用いて教示位置、未教示位置から制御した結果を図 12 に示す。

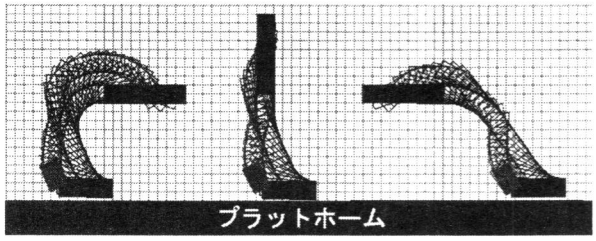


図 12: 0, 90,180[*deg*]からの制御結果

自動走行車両制御問題同様、教示位置、未教示位置とも良好な制御結果が得られた。

<3.2.2>既存手法の適用結果

実験は同様に初期集団を 10 回変えて行った。表 2 に本手法と比較手法の 10 回試行して得られた最良個体の平均の実験結果を示している。

表 2: 10 回の平均結果

	ルール数	誤差と閾値を超えた数		適応度
		トラックの車体変化角		
本手法	9.6	0.0035	3.8	0.4477
比較手法1	11.4	0.0053	8.3	0.2986
比較手法2	9.3	0.0120	20.1	0.1474

自動走行車両制御問題と同様に、本手法が最も誤差が小さく、閾値を超えた数も少なくなっているため、適応度が最も高くなっていることがわかる。また、獲得された推論ルール数は比較手法 1 が最も多く、次いで本手法、比較手法 2 といった順になった。

次に比較手法によって獲得された推論ルールによる制御結果を図 13, 14 に示す。

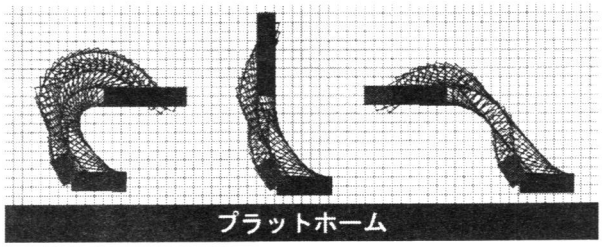


図 13: 0, 90,180[*deg*]からの制御結果<比較手法 1>

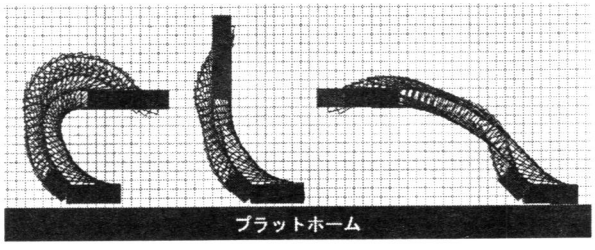


図 14: 0, 90,180[*deg*]からの制御結果<比較手法 2>

比較手法 1 の制御結果は本手法の制御結果と比べて横付け位置の距離が離れており教示データに忠実でないことがわかる。また、比較手法 2 は、教示データと全く違う制御を行っており、特に 180 度からの制御は横付けするまでの距離が教示データに比べてかなり長くなっていることがわかる。このことから比較手法 1,2 で得られた推論ルールは本手法で得られた推論ルールに比べて汎化能力はあまり優れていないことがわかる。

4.考察

本手法は、ルール数の異なる個体毎に個体集団を複数形成し、これらの個体集団間の移動操作を行いながら探索領域を絞り込むことによって、効率の良い探索を行うといった特徴を持っている。そして、その特徴を生かして獲得された個体は必要最小限の推論ルール数を持ち、汎化能力にも優れた良質な解であった。比較手法 1 は本手法のようにルール数の等しい個体集団毎で探索を行っていないため、探索領域が絞り込めず効率の悪い探索を行っていた。その結果、本手法ほどの良質な制御結果を示す解を得ることはできなかった。また、比較手法 2 での探索結果も本手法ほどの良質な制御結果を示す解を得ることはできなかった。その原因として、本手法や比較手法 1 の交叉のように個体間のルールの交換ではなく、同じルール番号の染色体同士で一点交叉を行っているので、世代ごとに推論ルールが全て変化をしてしまい、前世代の推論ルールが全く残らず、次世代に必要な推論ルールが残っていかないことが挙げられる。

参考文献

[1] 井上 純一, 増田 達也,「異種個体集団が共存するGAによるファジィ推論ルールの自動獲得」, 第 14 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 長良川国際会議場, 1998 年 6 月 3 日(水), pp.275-278(1998)

[2] 杉浦 弘幸, 川合 隆光, 安藤 秀樹, 島田 俊夫,「積和標準形可変長遺伝子におけるスキーマ抽出を用いた論理回路設計」, 第 14 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 長良川国際会議場, 1998 年 6 月 3 日(水), pp.279-282(1998)

[3] 井上 博行, 亀井 且有, 井上 和夫,「遺伝的アルゴリズムと超円錐形メンバーシップ関数によるファジィルール自動生成手法の提案」, 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.6, pp.1104-1115(1996)

[問い合わせ先]

〒535-8585
大阪市旭区大宮5－16－1
大阪工業大学 工学部 電気工学科
増田達也
Tel and Fax (06)6954-4234
Email: masuda@ee.oit.ac.jp

WB4−1

実環境下での進化における評価負荷の軽減化

Reducing a Evaluation Cost in Evolution under the Real Environment

山本 雅哉* 橋山 智訓** 大熊 繁*

Masaya Yamamoto Tomonori Hashiyama Shigeru Okuma

名古屋大学* 名古屋市立大学**

Nagoya University Nagoya City University

Abstract — Recently evolutionary robotics have been developing for designing the appropriate controllers of autonomous mobile robots. Most of these studies are based on simulation. It is claimed that there exists serious problems when implementing the evolved controller on the real robot. They need parameter tuning/optimization again in the real environment. This paper presents a new approach for evolving the controllers and the shape of the body in the real environment. The evolution in the real environment needs much time and effort. In this paper we propose a technique of reducing time and effort for the evolution in the real environment using fitness estimation.

1 はじめに

近年遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) [1] などの進化的計算手法を用いた自律移動ロボットの行動の獲得に関する研究が盛んに行なわれている。このような研究ではロボットの形状が固定されていてコントローラのみを獲得するものが多い。しかし、あらかじめ与えられた形状は必ずしも所望のタスクを達成する上で最適なものとは限らず、自律移動ロボットの行動を制限してしまう可能性も考えられる。

Sims は仮想生物の形状とコントローラをGAを用いて共進化させるシミュレーションを行なっている[2]。また Lee らは自律移動ロボット Khepera の形状とコントローラ の進化的獲得をシミュレーションにより行なっている[3]。このように形状とコントーラを同時に獲得することにより、タスクを達成する上で優れた形状とコントローラ構成を獲得することが可能となる。また、形状とコントローラを同時に設計することは、探索空間が広くなる反面、制約条件が緩くなった分タスクを実現する形状とコントローラ構成を容易に発見できる可能性も考えられる。

行動を進化的に獲得する研究は実環境をモデル化したシミュレーション上の環境を用いて行なわれることが多い。このようなシミュレーションベースの研究では、シミュレーション環境が実環境を精密にモデル化できていない場合、獲得された行動は実環境においては不適切な場合が多い。そこでシミュレーション環境を実環境に近付ける研究 [4] どが行なわれているが、実環境を精密にモデル化することは非常に困難である。また、シミュレーション環境を設計せずに実際のロボットの動作を基に評価値を算出する場合には、人間に対して多大な時間と労力が必要となる。そこで本研究では評価値推論システム [5] を用いて、実環境で進化を行いながら人間の評価負荷を軽減することを考える。

2 評価値推論システム

評価値推論システムは GA の進化加速を目的として提案された手法である。この手法では過去に実際に評価を行なった染色体から構成される評価値データベースを用いて、染色体の評価値を推論する。また、推論式を簡略化することで、推論にかかる時間と労力を大幅に節約できる。評価値推論システムでは、簡略化による誤差が生じても計算時間を短縮することで、多くの世代を計算でき、結果として所望の解を短時間で探索できることを期待している。

具体的には、この手法では推論対象の染色体$i(i = 1, 2, ..., n)$と、データベース中の染色体$j(j = 1, 2, ..., m)$との類似度$S(i, j)$の重み付け線形和により求める。また、染色体間の類似度は、適応する問題に応じて適切に設定する必要がある。この類似度を重みとした重み付け線形和により、染色体iの評価値f_i'を式 (1) のように推論する。

$$f_i' = \frac{\sum_{j=1}^{m} f_j \cdot S(i,j)}{\sum_{j=1}^{m} S(i,j)} \tag{1}$$

ここでf_iはデータベース中の染色体jの実評価値であり、mはデータベース中の染色体数である。

この評価値推論システムが観測者の行う実評価と並列に実行されることで、実評価の補助システムとして動作することを期待する。

3 形状と行動の同時獲得

本研究では、ユーザが自由にその形状を組み換えることができ、かつ、コントローラをプログラム可能な LEGO 社の Mindstorms キットを用いた。このキットを用いて自律移動ロボットの行動と形状を同時に、実環境下で獲得することを試みる。

実環境で進化を行うことの利点は、シミュレーション環境を設計する必要がなく、進化結果をそのまま利用可能な点である。また、本研究では進化中の評価を人間が行うことで柔軟な進化を可能としている。しかしながら、提案システムでは実環境で人間が評価を行なうため、人間に対しての負荷が大きくなる可能性が考えられる。そこで、人間の負荷軽減を目的として、著者らが提案している評価値推論システム [5] を導入した。

3.1 Mindstorms

LEGO Mindstorms (図1) はブロック玩具であり、ブロックを組み合わせることで様々な形状を構成可能である。また、プログラムをダウンロード可能なモジュールを用いることでコントローラを構成可能である。このモジュールは3入力3出力を持つ。入力には接触センサと光センサが利用できる。また、出力にはモータを用いることができる。本実験ではセンサは光センサを1つ、モータは Mindstorms の左右に1つずつ用いた。図2に本実験でのセンサの取り付け位置を示す。ここで、○で示された6ヶ所の中のどこに光センサを付けるか決定することを形状の進化的獲得と呼ぶことにする。光センサからの入力値は明るさに応じて0から100までの整数値で表されており、明るい方が大きい値となる。また、モータへの出力は-8から8までの整数値で回転トルクを表している。ここでMindstormsはモータへの出力値がともに負の値の時は前進し、正の値の時は後退する。

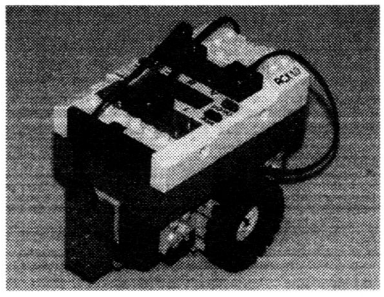


図 1: Mindstorms

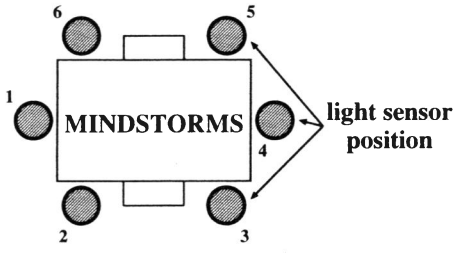


図 2: 光センサの取り付け位置

3.2 タスク

本研究で自律移動ロボットが達成すべきタスクは図3に示す環境の中で、円周に沿って周回することとした。スタートの位置は図3の一番手前とする。ここで、周回する方向は右左どちら回りでもよいとする。円周は黒色で描かれており、それ以外は白色である。Mindstorms が下の環境が白か黒か判断するための光センサの閾値はあらかじめ与えることとした。

4 実験結果

4.1 形状を固定したコントローラの獲得

4.1.1 コーディングと遺伝オペレータ

まず、従来の手法を検証する意味で、形状を固定し、コントローラのみを進化的に獲得することを試みた。本実験での染色体は図4に示す様にコーディングした。この染色体には光センサの状態が dark の状態と bright の状態でのモータへの出力値がコーディングされている。光センサの位置は Mindstorms の前方（図2の1）に固定した。一世代当たりの個体数は10個体とし、10世代実験を行なった。初期世代はランダムに生成し、選択淘汰にはルーレット選択とエリート戦略を用いた。交叉オペレータは1点交叉を用い、突然変異オペレータは-4から4までのランダムな整数値を加えることとした。

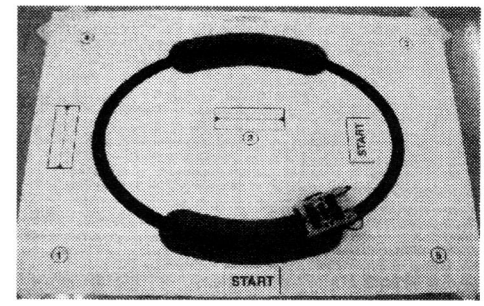


図 3: 実験環境

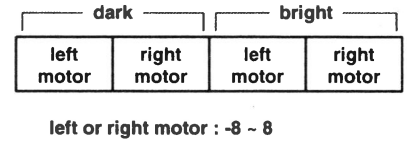


図 4: 染色体構造

4.1.2 評価方法

本研究のロボット進化における各個体の評価は以下の様に行なった。実際の Mindstorms の行動、軌跡を観測し、観測者が主観的に評価値を与えた。その際の評価の基準には以下の項目を考えた。

1. 黒線上に留まることができるか
2. 黒線に沿って進むことができるか
3. カーブを曲がることができるか
4. トラックを周回することができるか
5. スムーズに周回することができるか

Mindstorms の行動がこれらの基準をクリアする毎に高い評価値を与えた。最終的には速くスムーズに周回する個体が最も大きい評価値を得ることができる。

4.1.3 実験結果の軌跡とコード

初期世代、第4世代、第6世代、第8世代、第10世代(最終世代)における最良個体の軌跡の概略と染色体を図5～図9に示す。図中 " ○ " 印がスタート地点を表す。第8世代において、ほぼタスクを達成する個体が現れた。第8世代と第10世代では、染色体の値が一つ異なるのみである。第8世代の方が速く周回することが可能であるが、初期位置によっては周回できない場合もある。それに比べて、最終世代の個体はより安定して周回することが可能である。3 回の実験を行ない平均 7 世代で所望のタスクを達成する個体を獲得することができた。

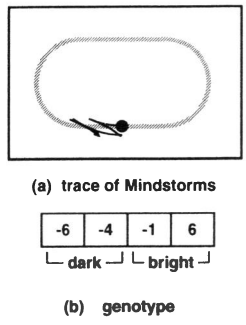


図 5: 初期世代での最良個体の軌跡と染色体

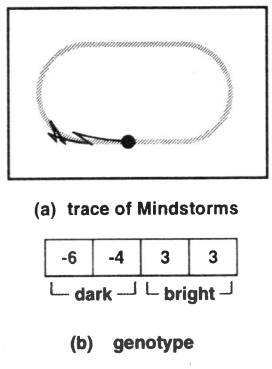


図 6: 第4世代での最良個体の軌跡と染色体

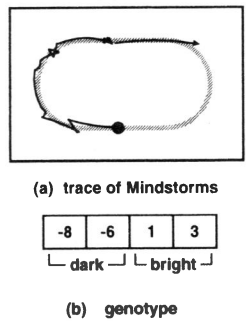


図 7: 第6世代での最良個体の軌跡と染色体

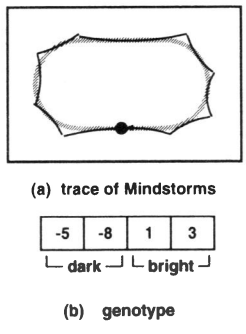


図 8: 第8世代での最良個体の軌跡と染色体

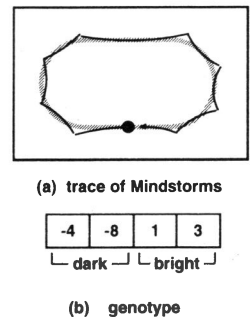


図 9: 最終世代での最良個体の軌跡と染色体

4.2 形状とコントローラの同時獲得

4.2.1 コーディング

本実験では、形状とコントローラの同時獲得を試みた。本実験における染色体を図10に示す。光センサの位置は前後を表す遺伝子と左右を表す遺伝子を用いて表現した。その他の設定、遺伝的演算は 5.1 と同様とした。

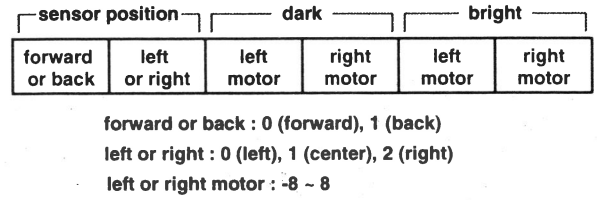


図 10: 染色体構造

4.2.2 実験結果の軌跡とコード

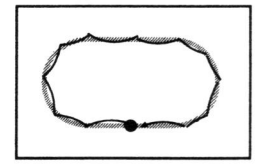
10 世代進化を行なう予定だったが、それよりも早い世代でタスクを達成する個体が獲得できた。3 回の実験を行ない平均 3 世代で所望のタスクを達成する個体を獲得できた。代表的な個体の軌跡と染色体構造を図11に示す。

これらの実験で獲得することができたコントローラが対応する形状にどれほど依存しているか検証するために、センサの位置を付け換えた個体を用いて同様の環境で行動を行なった。その結果、それらの個体はタスクを達成することができなかった。この結果から共進化により獲得されたコントローラは対応する形状に大きく依存していることが分かる。つまり、人間があらかじめ形状を設計する場合、その形状はロボットの能力を制限してしまう。そこで、形状の適切な設計ができないような場合は、形状とコントローラを同時に獲得することが望ましいと考えられる。

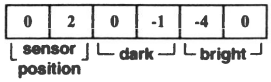
4.3 評価値推論を用いた進化

4.3.1 実験概要

つぎに評価値推論を用いてロボットの行動の進化を行なうことを考える。この手法を用いることによりすべての染色体を実評価することなく進化を行なうことができ、人間が行う評価負荷が軽減できると考えられる。この手法を用いることにより、世代数は多く必要になる可能性があるが、実評価回数を削減することができ、人間の評価負荷の軽減につながると考えられる。



(a) trace of Mindstorms



(b) genotype

図 11: 最良個体の軌跡と染色体

この実験での実験環境や実験条件は先に示した実験と同様とした。この手法を用いて実験を行ない、先の実験よりも実評価回数を減らすことができれば、この手法を用いることの有用性を示すことができる。

本研究では類似度の計算には (2) 式の正規分布を用いることとした。

$$S(i,j) = \prod_{k=0}^{5} \exp\left[-\frac{(X_k - Y_k)^2}{a} \right] \qquad (2)$$

ここで、X_k は評価値を求めたい染色体 i の遺伝子の値、Y_k はデータベース中の染色体 j の遺伝子の値である。また、$\prod$ の範囲は扱う染色体長を表している。また、a の値は正規分布の分散を表している。そこで、この数値は染色体内の遺伝子によって変更するべきであると考えられるので、本実験ではセンサ位置を表す遺伝子では 2 とし、モータのトルクを表す遺伝子では 8 とした。

本実験では、実評価個体の選択にはルーレット選択を用いた。また、推論された評価値が最も大きい染色体は優先的に実評価を行なうこととした。また、同じ構造の染色体を再び実評価することがないようにした。

4.3.2 実験結果

本実験では初期の世代での実評価個体は 4 個体とし、その他の世代では 2 個体とした。評価値推論を用いて進化を行うことにより平均実評価回数を 14 回まで削減することができた。従来手法では 1 世代当たりの個体数を 10 個体とした場合に平均で3 世代必要だったので、それに比べると約半分の実評価回数で進化を行うことができたそれぞれの手法での所望のタスクを達成するまでに必要であった平均の世代数、実評価回数を表 1 に示す。

表 1: 平均の世代数と実評価回数の比較

	世代数	実評価回数
コントローラのみの進化	7	70
形状とコントローラの同時進化	3	30
評価値推論を用いた形状とコントローラの同時進化	6	14

5 まとめと今後の課題

自律移動ロボットを用いて、形状とコントローラの同時獲得を試みた。今回の実験では形状とコントローラを同時に探索した方が早い世代でタスクを実現する個体を発見できた。このような簡単な問題においても人間があらかじめ設計した形状が最も適しているとは限らず、形状を行動と同時に獲得することが望ましいことが分かる。また、本手法ではすべて実環境で評価を行なっているため、獲得したコントローラをそのまま実装することが可能である。

ただし、この実験では対象としたタスクが非常に簡単であったためすべて実機を用いても評価を行なう人間への負担が軽かったが、さらに複雑なタスクを対象とすると実機で行なうには限界がある。そこで、評価値推論システムを用いて実評価回数を減らしながら進化を行なうことで、評価による人間への負担を軽減することができた。

本研究で用いた類似度の計算式は試行錯誤で設計したものであり、類似度の計算式の定式化が今後の課題である。また、得られた類似度の計算式とデータベースの分布から問題の解空間のおおまかな形状を解析することにより、進化の効果的な加速法について検討したい。また、さらに複雑なタスクに対して評価値推論システムが適応できるか調査し、実際に評価値推論システムを用いて進化を行なう予定である。

参考文献

[1] 伊庭 斉志 : "遺伝的アルゴリズムの基礎", オーム社,1994

[2] Karl Sims : "Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition,"Artificial Life IV,pp.28-39,1994

[3] Wei-Po Lee , John Hallam , Henrik Hautop Lund : "A Hybrid GP/GA Approach for Co-evolving Controllers and Robot Bodies to Achieve Fitness-Specified Tasks,"In Proceeding of IEEE 3rd International Conference on Evolutionary Computation,IEEE Press,1996

[4] Henrik Hautop Lund , Orazio Miglino and Stefano Nolfi : "From Simulated to Real Robots,"In Proceedings of IEEE 3rd International Conference on Evolutionary Computation,IEEE Press,1996

[5] 花木 康 : "適応度の推論による進化的アルゴリズムの計算時間の短縮", 電学論 C,Vol.120,No.1,pp.123-129,2000

問い合わせ先

〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院
工学研究科電気工学専攻 大熊研究室
山本 雅哉
TEL (052)789-2777
FAX (052)789-3140
E-mail : masaya@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp

WB4−2

群集流理論を用いた遺伝的アルゴリズムによる通路作成

The passage making by Genetic Algorithm which used crowd flow theory

○西山　信宏　　椎塚　久雄
Nobuhiro Nishiyama　　Hisao Shiizuka
工学院大学
Kougakuin University

Abstract When taking refuge necessity occurs with the disaster and so on, the people try when they will take refuge using the various passages. Crowds of human beings say that the flow which moves to the direction of the purpose of the becoming is a crowd flow to the group. In this paper, we try the simple passage making which had a purpose of placing an emphasis in the safety by using crowd flow analysis's evaluation in the step of the individual evaluation using the genetic algorithm.

1 はじめに

災害などにより避難の必要が生じた場合、人々は様々な経路を用いて避難しようと試みる。大勢の人間が群になり目的の方向に移動する流れを群集流といい、本論文では、遺伝的アルゴリズムを用いて、個体評価の段階で群集流解析による評価を用いることにより安全性に重点を置くことを目的とした単純な通路作成を試みた。

2 群集流理論

大勢の人間がかたまりとなって目的の方向に動く流れを群集流という。中でも避難行動をとる人間の流れ、即ち“避難群集流”は、ある通路の中ではある通路の中では逆方向の流れが生じない、前方が空いている限り絶え間なく流れといった特徴をもつ。従ってある通路の中での人の動きは一次元の流れとしてとらえることが可能である。

ある通路内での群集の流れを定量的に表現するために図1のような通路ユニットを考える。この通路ユニットにおいて位置αから通路βを通過し位置γに至るときの通路βにおける群集移動は以下の式で表わされる。

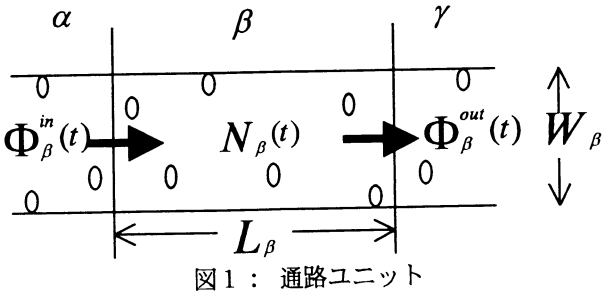


図1： 通路ユニット

$$\Phi_\beta^{in}(t) = \min[P\{\phi_\beta \cdot W_\beta \cdot \Delta t\}, q_\alpha(t)]$$

$$\Phi_\beta^{out}(t + \tau_\beta(t)) = \Phi_\beta^{in}$$

$$\tau_\beta(t) = L_\beta / \upsilon(\bar{\rho}_\beta(t))$$

$$\bar{\rho}_\beta(t) = N_\beta(t) / L_\beta \cdot W_\beta$$

但し
$\Phi_\beta^{in}(t)$：通路β流入人数
$\Phi_\beta^{out}(t)$：通路β流出人数
ϕ_β：通路βにおける群集流出係数（通常 1.5 人／m・s）
$P\{\phi_\beta \cdot W_\beta \cdot \Delta t\}$：単位時間Δtに通路$\beta$に流入する人数
$q_\alpha(t)$：位置α滞留人数
$\tau_\beta(t)$：通路β通過所要時間
$\upsilon(\rho)$：群集歩行速度
$\bar{\rho}_\beta(t)$：通路β内平均群集密度
$N_\beta(t)$：通路β中歩行者数
$L_\beta \cdot W_\beta$：通路β面積

以上の式をもとに、各通路ユニットとユニット間相互における群集流の状態方程式を作成することにより、作成通路での群集流シミュレーションを求めることが可能である。

3 通路のコード化・GA処理

本手法では、通路レイアウト作成のためにポーランド表記を用いた染色体のコード化を行った。この手法は、Mitsuo Gen , Runwei Cheng [1]によって提案されたものであり、ユーザーによる出入口の入力を制約条件として、カットオペレータにより領域を分割し通路を作成することを試みた。

交叉オペレータとしては、片方の親染色体からカットオペレータ、もう片方の親染色体から各々の領域を遺伝させた。突然変異オペレータについては、カットオペレータにおいて隣接する一部のオペレータを入れ替えるスワッピング（swapping）、カットオペレータを逆転させる（altering）を用いた。

4 群集流を用いた適応度関数

作成された通路より適応度を求めるために図2のように通路を幾つかに分割した通路ユニットを用いた。各ユニットには作成された段階において適当な歩行者が存在すると仮定し、単位時間におけるユニットへの歩行者の流入、流出をもとに各々のユニットにおける群集流の状態方程式から求めた評価値C_nを用いて、その通路における全体の適応度を次式を用いて求めた。これはユニットからユニットへの移動の際、群集流がいかにスムーズに移動することが可能であるか、即ち災害などの避難を要する際に、いかに安全に避難行動をとれるかというところに重点を置いた関数である。

$$f = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_i$$ 但し、f：総合評価値

i ：ユニット数

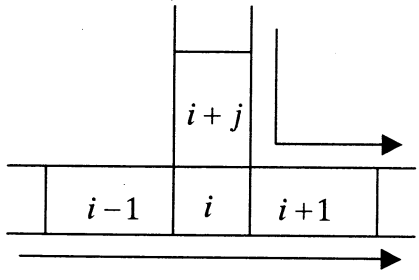


図2：ユニット分割

但し、各ユニットへの流入、流出は一方向のみ、通路幅は一定であると仮定する。

5 処理手順

本手法の遺伝的アルゴリズムを用いた処理手順を図3に示す。まずユーザーにより通路レイアウトにおける通路出入口の設定を行う。この情報によりカットオペレータを用いた領域分割を用いて通路配置を行っていく。各世代毎に適応度関数には群集流理論を用いた関数を用いて各個体毎の評価値を求める。

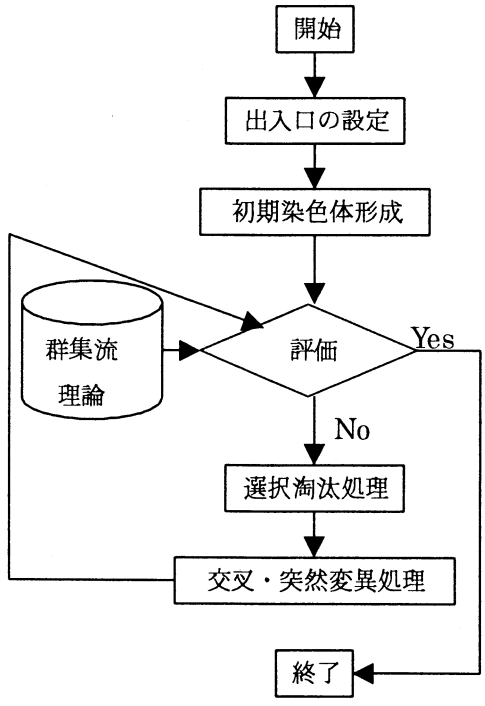


図3：処理手順

6 まとめ

本論文では、群集流理論を遺伝的アルゴリズムの評価関数に用いて避難しやすい、即ち安全性に重点をおいた単純な通路作成を提案した。この手法は現在検討中ではあるが、群集流を用いることにより避難時に対応した通路を作成するステップになると考えている。

更なる応用としては、勾配のある通路、3次元空間通路における配置などが考えられえる。

文献

[1] Mitsuo Gen,Runwei Cheng 著：Genetic Algorithms & Engineering Design

[2] 上田 晃 著：群集流理論を用いた大都市における緊急時の避難行動シミュレーション

WB4−3

進化的計算によるケーブル配線経路計画問題の解法
Cable Wiring Route Plan by Evolutionary Computation

飯田 一弘 Kazuhiro Iida　馬 火玄 Ma Xuan　白井 治彦 Haruhiko Shirai　西野 順二 Junji Nishino　小高 知宏 Tomohiro Odaka
小倉 久和 Hisakazu Ogura
福井大学 工学部
Faculty of Engineering, Fukui University

Abstract : In this paper, we introduce a genetic algorithm for a cables routing problem. A logical algorithm doesn't exist to solve with many cables to put over a tray network under capability constraints. For the proposed GA for a cables routing, chromosome consists of some subgoals that indicates redundant routes. They are evaluated by amount of total cable length and maximum tray occupation rate. The report of some experimental results with over 40 trays and 20 cables have shown that feasible solutions could be obtained by the method.

1 はじめに

本研究は遺伝的アルゴリズムを配線問題における最適経路を求めるのに適用し、簡便かつ高速な最良解探索システムを構築することを目的とする。大規模な発電所、変電所における屋内配線の総量は数千本から数十万本に及び、その最適配線を簡易に求める方法が必要とされている。配線一本についての最適経路を求めるのは容易である。しかし全体でもっともバランスのとれた経路を探るのは現在の手法では困難である。それに対して、遺伝的アルゴリズムなどの進化的手法は、全体での評価値を最適化するということに適している。本システムでは遺伝的アルゴリズムを用いて、トレイデータと配線されるケーブルのスタート、およびゴール地点の近接トレイのデータをあたえ、そこから各ケーブルごとに通るトレイの経路を探索するシステムを作成し、実験を行う。

2 配線問題の構造

大規模な発電所や変電所における配線は、図1のようにトレイと呼ばれる容器にケーブルを通すことによって行われる。各機器に接続されるケーブルごとに、その開始点の機器と終着点の機器をトレイネットワークの上で配線する。たとえば図1で機器2と機器3を接続するときはトレイC,トレイD,トレイEと通す。各機器の近接トレイがどこであるかはあらかじめ与えられておりケーブルの端点はそのケーブルごとに固定されていて、ここで扱うのはスタートトレイ、ゴールトレイの間にどのトレイをどういった順番で通っていくかということである。一つのトレイに接続する他トレイの数は最低1つ、最大で6つである。

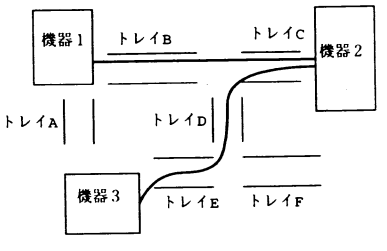


図 1: ケーブルの配線

トレイの断面積、トレイ長などは一定ではなくトレイにより異なる。与えられるデータは、トレイネットワークの接続状況と各トレイの断面積、トレイ長、そしてケーブルごとのスタート地点の近接トレイとゴール地点の近接トレイである。

本研究では、トレイネットワークの構築、及び最適化には触れない。トレイネットワークはなんらかの手法ですでに構築されているものとし、開

始点のトレイから終着点のトレイに至る、トレイネットワークの経路探索問題のみを扱う。

ケーブル一本あたりの最適経路を求めるのは容易である。しかし、複数のケーブルを配線するときにはトレイには断面積が定められておりこの断面積を超えて、ケーブルを通すことは出来ない。現在、使われている一般的な手法は、ケーブル一本ずつ最適経路を求めていき、ケーブル通過数ががトレイ断面積を超えたトレイにはそれ以降はあらたなケーブルを通さないという手法である。しかしこれでは、全体として見たときに、もっともバランスのとれた最適経路を求められるとは限らない。それに対して遺伝的アルゴリズムを適用することによって、配線全体での評価を最適化することを試みる。

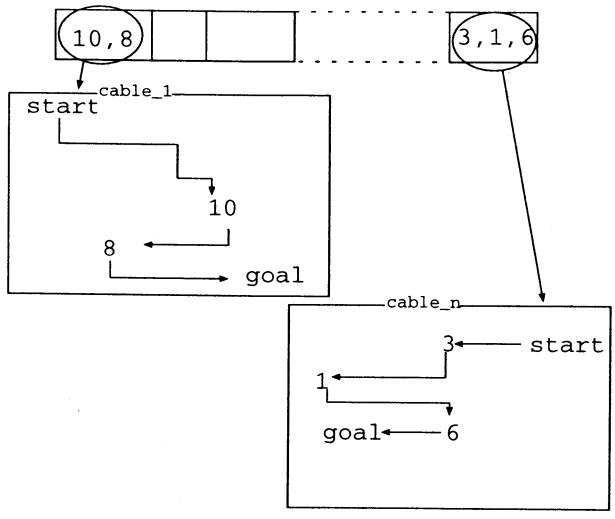


図 3: 遺伝子コーディングと実際のルート

3 遺伝的アルゴリズムの適用

遺伝子表現のためにトレイネットワークを、トレイの交点をノードとしたネットワークとして扱う。以後はトレイではなくこの交点をノードとしたネットワークにおける経路を探索するものとする。

3.1 遺伝子コーディング

本研究での遺伝子コーディングの個体は図2のようにケーブル一本に対してコドンを一つ持つ。コドンは可変長の整数の列である。ノード数をmとしたときコドン内の整数値Iは $0 <= I < m$ である。

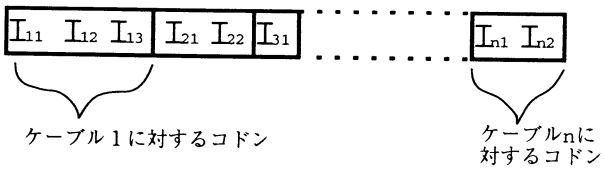


図 2: 遺伝子コーディング

またこの遺伝子による実際のルートは図3のようにして導出する。

これはケーブルがどのようなルートとなっても無意味なループなどは含まず、最短経路で迂回を行うこととする。経路は、特定のノードを通過しその他はダイクストラ法で求めた最短経路であると仮定した。よって遺伝子は各ケーブルがスタートノードからゴールノードまでの間に通過しなければならない中継地点の集合とした。ケーブルの迂回についての情報はスタートからゴールまでの間に通過しなければならないノードを通過ノードとし、ケーブルごとの通過ノードの配列をコドンとする。

3.2 遺伝子の評価

断面積をオーバーしたトレイが一つでもあったらその遺伝子は解としては存在できず、通常は致死遺伝子として扱われる。しかしここで取り上げた配線問題においては制約の厳しさによってはほぼすべての組合せが致死遺伝子となる可能性もあり、致死遺伝子を即座に排除しては進化を行うことも不可能となる。これを避けるため本研究ではトレイあふれが存在する遺伝子でも生存することができることとした。

遺伝子の評価は、

$$\sum_{i=1}^{ln} L_i + 200 \sum_{i=1}^{tn} Tover(i) \qquad (1)$$

の式で行う。Li はi番のケーブルの経路長、lnはケーブルの総数、tnはトレイの総数、$Tover(i)$ はi番のあふれケーブル量である。この値が低いものほど優秀な遺伝子である。

3.3 交差

交差では迂回ルートの組合せのみを行う。具体的にはケーブルごとのまとまりをコドンとし、コドンを受け継ぐコドン単位の一様交差を行う。

3.4 突然変異

突然変異では、ランダムに通過点が消失および発生するものとする。まず一定の確率で各遺伝子に突然変異を行うか判断する。突然変異すると決定された遺伝子に対しては各ケーブルごとに一定確率で通過点を変更するか決定する。そこで変更すると決定されたら、それぞれ５０％の確率で通過点を増やすか減らすか決める。減らす場合は、ランダムに一つ通過点を消す。増加すると決定した場合は存在するノードからランダムに一つ通過点に追加する。

4 実験

4.1 テストデータの作成

実験に使用するテストデータはランダムに作成した。テストデータのトレイネットワークは、例として図4のようなものである。格子上に配置されたトレイにたいして、長さと断面積を設定する。現実ではトレイそれぞれ長さがことなる場合には

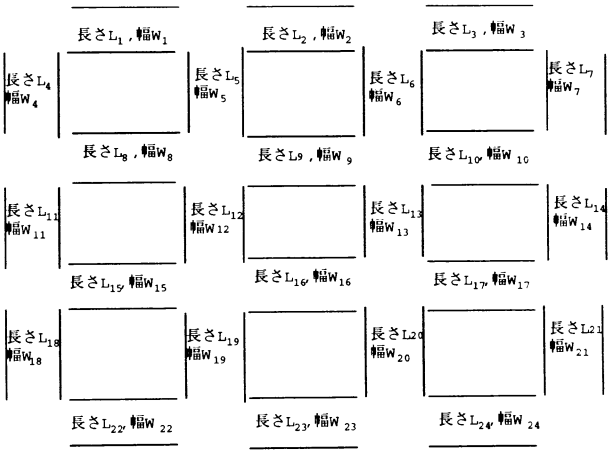


図 4: テストデータでのトレイネットワークの例

必ずしもこのような格子状となるわけではないが、トレイの長さを単なるコストとし、格子状になっていると仮定しても問題の本質には影響がないと思われる。そのため、本研究では格子状のネットワークの各辺にコストと通過可能ケーブル数を設定した。またテストデータではその値はランダムにした。

またケーブルのテストデータはトレイネットワーク上のトレイを２つランダムに選択し、片方をスタート地点、もう片方をゴール地点とした。

4.2 結果と考察

図5はケーブル４０本、トレイ６０個のテストデータを作成し、そのデータに対して１００世代、個体数４０のGA を行ったものである。またこのときのテストデータではi番目のトレイ容量を W_i トレイの長さを L_i としたときにこのテストデータでは $5 <= W_i <= 15, 5 <= L_i <= 25$ の範囲でデータを作成した。また遺伝子の個体に対して突然変異を行う確率は１０％とし、突然変異を行う個体でのコドンごとの突然変異確率は５％とした。

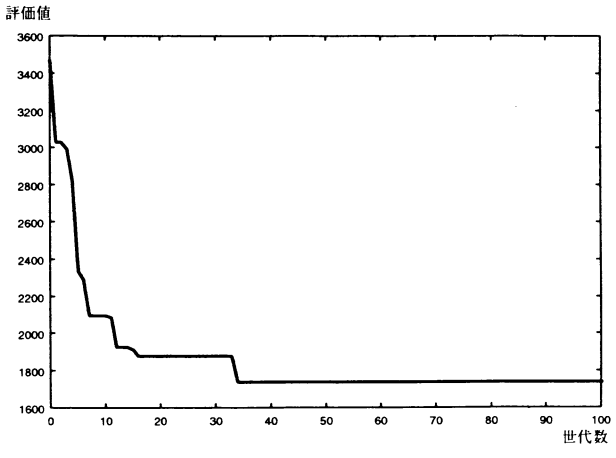


図 5: ケーブル数４０本、トレイ数６０個での進化過程

この問題で、すべての配線をダイクストラ法で寄り道なしで結んだときの、トレイあふれの総数は１１で評価値は３７１５であった。

これにGA を１００世代行った結果得られたエリートはあふれ０、で総延長が１７４０で評価値も１７４０となった。この解はあふれがなく制約を満たしている。

同様の実験をトレイ数、ケーブル数を変えて行った。

トレイ数：40,60,84,112,144 ケーブル数:20～70 まで５きざみにたいして、テストデータの作成および１００世代のGA をそれぞれ１００回ずつ試行した。

結果を表１に示す。表中の値は括弧外がGA 一回あたりのトレイあふれの平均値であり、括弧内の値は１００回のGA のうちに解の求まった回数である。TN がトレイの個数、CN がケーブルの個数である。

表1 GA100 回のトレイあふれと解の求まった回数

CN \ TN	40	60	84	112	144
20	0.05(96)	0.04(96)	0.0(100)	0(100)	0.0(100)
25	0.08(94)	0.03(97)	0.0(100)	0.02(98)	0.04(96)
30	0.41(77)	0.23(84)	0.16(90)	0.18(86)	0.14(89)
35	1.32(45)	0.85(62)	0.67(64)	0.65(70)	0.29(77)
40	2.00(28)	2.02(31)	1.62(38)	1.36(43)	1.33(49)
45	3.99(12)	3.04(22)	3.22(22)	3.34(18)	2.14(29)
50	5.60(5)	6.62(8)	5.33(8)	4.84(12)	4.8(5)
55	10.79(0)	8.51(8)	8.49(1)	7.21(5)	7.93(2)
60	13.43(1)	13.7(1)	11.72(0)	11.28(0)	11.5(0)
65	18.67(0)	19.02(0)	16.60(0)	16.13(0)	15.93(0)
70	24.28(0)	23.76(0)	21.8(0)	21.17(0)	21.3(0)

この結果は、全体でのトレイあふれの数はトレイ数に関係なく、ケーブル数に比例している。しかしトレイ一つあたりの平均あふれ数で考えるとトレイ数が増えれば値が向上しているといえる。しかし、トレイ数を増加してもトレイ一つあたりのあふれ数は改善されていくが、全体でみたときには改善されていない。ケーブル数何本に対して解が求まるかはトレイ数には依存しないと思われる。

5 まとめ

本研究では制約が $5 <= W_i <= 15$ であるテストデータに対してGAを行った結果、ケーブル数２０本～３５本の間で安定して解を得る事に成功した。今後はさまざまなパターンのデータでの実験を行い、本システムを改良しつつその有効性を検証する。特に現実に用いられているデータに対しての実験を行う予定である。またケーブル数が数千本から、数十万本にいたる規模のデータに対する実験も行う。

参考文献

[1] 馬火玄, 飯田一弘, 白井 治彦, 西野 順二, 小高 知宏, 小倉 久和,「２段階型GAと階層分散型GAの最適配線経路選定」, 情報処理学会平成１２年度全国大会2-163

問い合わせ先：
〒９１０－８５０７
福井市文京３－９－１
福井大学工学部知能システム工学科
小倉久和
ogura@rook.fuis.fukui-u.ac.jp
TEL&FAX: 0776-27-8582

WB5−1

遺伝的アルゴリズムを用いた物資配送計画
Fuzzy Transportation Scheduling of Supplies Using Genetic Algorithm

前田　幹夫[1]　新居　龍治[2]　岡部　隆男[1]　村上　周太[1]
Mikio MAEDA　Ryuji NII　Takao OKABE　Shuta MURAKAMI
[1]九州工業大学　工学部
Faculty of Engneering Kyushu Institute of Technology
[2]（株）日立製作所
Hitachi,Ltd.

Abstract: This paper deals with a fuzzy transportation scheduling of supplies using genetic algorithm. The first, each interval times between shop i and shop j is designed by the fuzzy number. Second, using genetic algorithm, the solutions of order around the shops are obtained by fuzzy evaluations under some conditions. Finally, from simulation results,the usefulness of this method is discussed.

1　はじめに

本研究では，遺伝的アルゴリズムを用いて，企業などにおいてセールスマンが営業活動をするときに，ある目的に沿うような巡回順序を定める順序付け問題すなわち，物資配送計画を提案する．この問題は，まずそれぞれの配送経路間での移動時間，各営業先への到着時間制限，営業先の優先順位付けを，ダイナミックな配送時間を考慮し，ファジィ理論を用いて，ファジィ物資配送計画モデルとして定式化する．次に，ファジィ物資配送計画モデルに対する評価基準を定め，実際規模のファジィ物資配送計画を考慮したいくつかの条件パターンでの解を求め，その結果について述べる．

2　配送順序の評価

物資配送計画において順序を決定する際には，それぞれの順序に対しての評価基準が必要となる．そこで，各順序を評価するための関数を目的関数として設定し，目的関数から得られた値を最大化または最小化するような配送順序を求める．

主な目的関数を以下に示す．

2．1　総配送時間

ポイント数nの物資配送計画において，配送順序をベクトル$X=(x_1,x_2,\cdots,x_n,x_{n+1})$で表す．本研究では，始点$x_1$（*start*）と終点$x_{n+1}$（*end*）は同等で固定である．ポイント$x_i$からポイント$x_{i+1}$までの移動時間を$t_{x_i,x_{i+1}}$，ポイント$x_i$での滞在時間を$s_{x_i}$とし，ポイント$x_{i+1}$での配送終了時間$f_{x_{i+1}}$は次のように計算される．

$$f_{x_1}=0 \tag{1}$$

$$f_{x_{i+1}}=t_{x_i,x_{i+1}}+s_{x_{i+1}}+f_{x_i}\ (i=1\sim n-1) \tag{2}$$

ポイントx_nを出発して，終点x_{n+1}で配送終了するまでの時間は，滞在時間は考慮しなくてよいので，$t_{x_n,x_{n+1}}$となる．これをふまえて，配送開始から終了までの時間f_{end}は，

$$f_{end}=f_{x_n}+t_{x_n,x_{n+1}} \tag{3}$$

2．2　総約束到着時間遅れ

ポイント数nで，ポイントx_iの約束訪問時間をl_iとする．ポイントx_iの約束訪問時間遅れは，約束より遅れて到着した時間と約束時間との差をT_{x_i}とすると，

$$T_{x_i}=\max(f_{x_i}-s_{x_i}-l_i,0)\quad (i:1\sim n) \tag{4}$$

となる．また，帰社時間遅れRは，約束帰社時間をl_{end}とすると，

$$R=\max(f_{end}-l_{end},0) \tag{5}$$

と表すことができ，

$$\max(T_{x_i})\rightarrow\min$$
$$R\rightarrow\min \tag{6}$$

となるような配送路を求める．

2．3　優先順位

物資配送計画において，仕事上の関係などから，優先順位を考慮しなければならない場合がある．そのときにはその優先順位の重要度をもとに，優先順位を満たすような配送路を探す．重要度は0から1までの実数値とし，重要度が1のときは絶対に満たさなければならないし，重要度が0.1や0のときは必ずしも満たさなくてもよいということになる．

3　物資配送計画へのファジィ理論の導入

3．1　物資配送計画のファジィモデル化

物資配送計画を行う際，まず対象をモデル化しなければならない．ファジィ物資配送計画では，配送ポイント間の時間をファジィ数で表し，ポイントごとの約束訪問時間，優先順位をファジィ制約条件として与え，ファジィ物資配送計画モデルとする．

移動時間が“だいたい r である”と分かっているとき，各移動時間ごとのメンバーシップ関数は r を基準として，図1のような三角型ファジィ数で設定する．移動時間が厳密に分かっている場合にはクリスプ数でもよい．

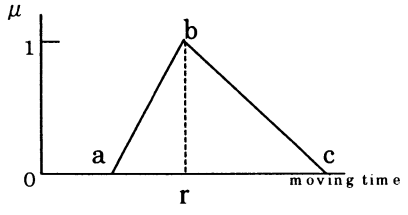


図1　移動時間のメンバーシップ関数

3．2　目的関数の設定

本論文では目的関数として，総配送時間と到着時間条件，優先順位を考える．しかし，総配送時間，到着時間条件がファジィメンバーシップ関数となり，それらを単純に比較評価することは難しい．そこで，いくつかの目的関数を組み合わせて，それを評価値とする．

a.　総配送時間

配送順序を評価する1つの方法として，総配送時間を考える．総配送時間は，2.1項で述べたように f_{end} として表すことができ，この三角型メンバーシップ関数である f_{end} の重心を取り，それを総配送時間の評価 f_E とし，f_E を最小化するような順序を求める．

b.　ファジィ目標と到着時間の一致度（ファジィ目標満足度）

まず，1つの配送ポイント到着時間について，“だいたい α 以下に到着したい”という目標を定め，メンバーシップ関数で表す．これをファジィ目標と呼ぶ．ファジィ目標は，図2のような概形で $p \le q$，$p \ge 0$ である．

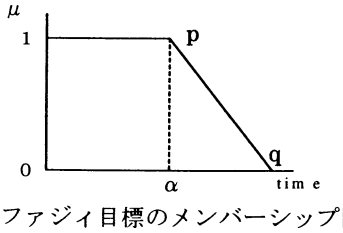


図2　ファジィ目標のメンバーシップ関数の概形

いまファジィ目標のメンバーシップ関数を μ_G とし，2つのパラメータ p,q を用いて $\tilde{N}(p,q)$ で表す．また配送ポイント i の到着時間に対するメンバーシップ関数を μ_{A_i} とし，ファジィ数 $\tilde{N}(a,b,c)$ とする．このときファジィ目標メンバーシップ関数 μ_{G_i} を数式で表すと

$$\mu_G = \begin{cases} 1 & (x \le p) \\ \dfrac{1}{p-q}x + \dfrac{q}{q-p} & (p \le x \le q) \\ 0 & (q \le x) \end{cases} \tag{7}$$

となる．ここで x は，横軸の値のことである．

図3に示すファジィ目標と到着時間の一致度を f_{G_i} とし，これを求めることを考える．

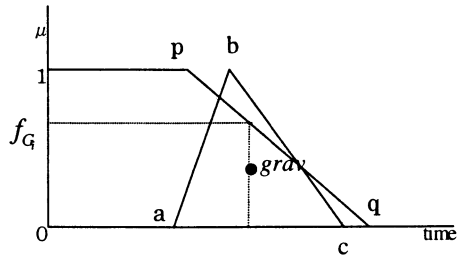


図3ファジィ目標と到着時間の一致度

配送ポイントの到着時間メンバーシップ関数 μ_{A_i} とファジィ目標メンバーシップ関数 μ_{G_i} の一致度を求めるために，まず μ_{A_i} の重心 $grav$ を次式で求める．

$$grav = \frac{1}{3}(a+b+c) \tag{8}$$

a,b,c の横軸（ここでは $time$ 軸）の値をそれぞれ $a_{time}, b_{time}, c_{time}$，この横軸の値を $grav_{time}$ とすると，

$$grav_{time} = \frac{1}{3}(a_{time} + b_{time} + c_{time}) \tag{9}$$

と表すことができる．この値を(7)式の x として代入して，それを配送ポイント i において一致度 f_{G_i} とする．

これを，全ての配送ポイント $(i:1 \sim n)$ について計算し，その最小値を順序の一致度 f_G として，f_G を最大化するような順序を求める．

$$f_G = \min_{1 \le i \le n}\left(f_{G_i}\right) = \min\left(f_{G_1} \wedge \ldots \wedge f_{G_n}\right) \tag{10}$$

帰社時間に対する一致度 f_R も(7)，(9)から求めることができ，f_R を最大化するような順序を求める．

c.　優先順位

ポイントを巡回するときに，仕事の都合上などから，あるポイントよりも優先して行かなければならないポイントがある．そのような条件を満たさない場合には，各優先順位の重要度に応じて優先順位の一致度 f_p を変化させる．

ポイント i をポイント j より優先するとき，その重要度を p_{ij} とする．ある配送順序について，優先条件 $(i \to j)$ に反する順序の組 (i, j) の集合を $\mathbf{r}$ とすると，一致度 f_p は次式で表される．

$$f_p = \prod_{(i,j) \in \mathbf{r}} (1 - p_{ij}) \tag{11}$$

優先条件を侵していない場合は $f_p = 1.0$ である．

d. **総合評価**

以上述べた４つの目的関数(f_E, f_G, f_R, f_p)のうち，３つのf_G, f_R, f_pに重みをつけ，総合したものを総合一致度Aとする．

$$A=W_G(1-(1-f_G))\times W_R(1-(1-f_R))\times W_p(1-(1-f_p)) \quad (0\le W_G\le 1,\ 0\le W_R\le 1,\ 0\le W_p\le 1) \tag{12}$$

これらをもとに，配送順序の総合評価Eは，

$$E = f_E / A \tag{13}$$

この総合評価Eが小さいほど配送順序として良いものであるとする．

３．３　未知データの補完

今までは，配送時間のデータがすべての配送路に対して存在していることが前提としてあったが，もし，配送ポイント間データの一部が欠けていて，そのままだと正しいと思われる配送順序がおかしくなってしまうこともある．これを解決するために，欠けているデータの補完を行うことを考える（４ポイント以上の場合）．

ステップ１：到着地点の近隣のポイント（出発地点，到着地点除く）を２つ見つける．

ステップ２：出発地点から，到着地点に１番近いポイントまでの距離$(d1)$と時間$(t1)$，出発地点から到着地点までの距離(d)をもとに，出発地点から到着地点までの時間$(ans1)$を求める．これを式に表すと(14)式のようになる．

$$ans1 = \frac{d1\times t1}{d} \tag{14}$$

ステップ３：出発地点から，到着地点に２番目に近いポイントまでの距離$(d2)$と時間$(t2)$，出発地点から到着地点までの距離(d)をもとに，出発地点から到着地点までの時間$(ans2)$を求める．これを式に表すと(15)式のようになる．

$$ans2 = \frac{d2\times t2}{d} \tag{15}$$

ステップ４：出発地点をS，到着地点の近隣の２点を近い方から順に$N1, N2$とすると，$\angle N1SN2$のなかに到着地点が含まれていれば，$ans1, ans2$をもとに

$$ans = \frac{(m1\times ans2)+(m2\times ans1)}{m1+m2} \tag{16}$$

として，求めたい配送時間ansを求める．$\angle N1SN2$のなかに到着地点が含まれていなければ，到着地点に１番近いポイントから得られた$ans1$を採用して，

$$ans = ans1 \tag{17}$$

として，ansを求める．

３ポイントの場合は出発地点と到着地点以外のもう１つのポイントをもとに(14)式と(17)式から求める．

４　遺伝的アルゴリズムの導入

仕事の数が多くなると発生する順序がその階乗に比例して増加していく．このような場合，完全列挙法は全ての順序を完全に探索するので計算回数が飛躍的に増加してしまい実用的でなくなる．計算量を少なくした厳密解法はいくつか提案されているが，それらは１つの最適解を求めることを前提に考えられているので，ファジィ物資配送計画に対し，複数の最適解を提案する場合，逆に計算回数が増加することが考えられ，適用させることが難しい．

そこで，ある程度の大きな規模の物資配送計画に対する有効な解法として，遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ物資配送計画手法を考える．

４．１　個体集団の生成

本論文では，遺伝子を配送ポイント番号として，配送ポイント番号が重複しないように並べたものを遺伝子列とする．このときの遺伝子列はすなわち配送順序であり，個体は１つの遺伝子列，つまり配送順序を持つものとする．また個体のサイズ，つまり遺伝子の数はポイント数nとなる．ポイント数６の場合の個体集合の例を図４に示す．

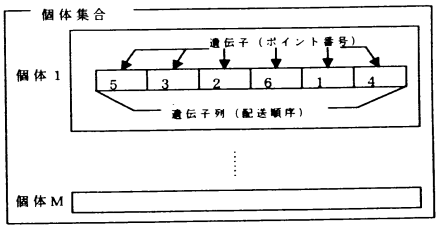


図４　個体集合の構成

４．２　個体の評価法

Ｍ個の個体集合の各個体（配送順序）について，3.2で定めた評価関数を用いて評価値を計算する．この評価値Eを用いてGA空間における個体の適応度を

$$g = 1/E \tag{18}$$

として定め，評価値の小さい配送路を持つ個体ほど優秀であり，適応度が高いものであるとする．このとき世代数が決定した最終世代であれば，個体集合の中で適応度の上位数個の個体を準最適解として終了する．そうでないときは，世代の更新を行う．

５．　配送シミュレーションとその結果

配送ポイント数を 10 として，以下のシミュレーションを行った．

１）完全列挙法と GA を用いて，条件なしでの探索を行う．なお，GA の各パラメータは世代数 500，個体数 40，エリート数 2，突然変異率 0.3 とし，GA

探索は 1000 回行い，その統計をとり，精度を検証する．

2）条件をいろいろ加えて，完全列挙法を用いて探索を行う．

3）2）と同様に条件をいろいろ加えて，GA を用いて探索を行う．GA の各パラメータは 1）と同様である．

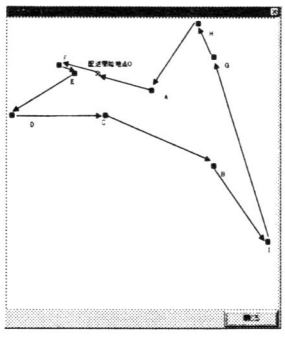
1）の結果を表 1，2 に示す．また，条件なしと条件ありのときの結果を図 5，図 6 に示す．

表 1　完全探索法の結果

順位	得られた解（配送順序）	配送時間（分）
1	O,F,E,D,C,B,I,G,H,A,O	175.667
2	O,F,E,D,C,B,I,H,G,A,O	176.000
3	O,F,E,D,C,I,B,G,H,A,O	176.000
4	O,A,G,H,B,I,C,D,F,E,O	177.667
5	O,F,E,C,D,B,I,G,H,A,O	178.000

表 2　GA を用いて探索したときの結果

順位	得られた配送順序	配送時間（分）	得られた確率
1	O,F,E,D,C,B,I,G,H,A,O	175.667	66.1%
2	O,A,G,H,B,I,C,D,F,E,O	177.667	19.3%
3	O,F,E,B,I,G,H,A,C,D,O	181.000	5.3%



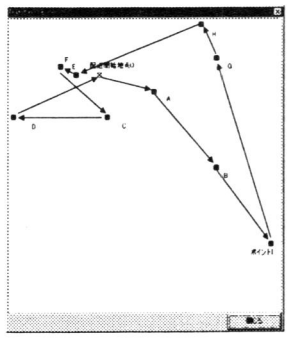


図 5　条件なし最適解　　図 6 条件あり最適解

表 1 と表 2 より，完全探索法と GA による結果は，順位 1 では同一である．また，優先順位（A→F,B→H,I→C 重要度 1.0）の重み 1.0，到着条件（G（60~120），E（120~180））の重み 1.0，帰社時間条件（180~240）の重み 1.0，という条件を加えた場合の解も GA によって得られている．計算回数から 2 つの探索法を比較すると，GA は完全探索に比べ 1/180 の計算回数で同一解が得られた．1000 回の試行のうち最適解は 661 回得られた．また，準最適解も含めると 80%以上の確率で得られた．

6．　まとめ

ファジィ理論を導入した物資配送計画では，配送の順番が遅いポイントほど作業時間の幅が大きくなり，それにより配送完了時間，帰社時間の幅も大きくなる．通常，配送の完了時間は先に延びた仕事ほど不確定となるので，その意味でファジィ物資配送計画は現実に則しているといえる．しかし，それと同時に不確定要素が大きくなるほど評価が難しくなり，順序の優劣に差がなくなる．

本論文では，配送優先条件を考慮した遺伝的アルゴリズムによる物資配送計画を提案し，ファジィ評価をもとに，配送順序を求めた．シミュレーション結果では必ずしも最適解（最短配送経路解）が得られたわけではないが，高い確率で最適解または最適解に近い解（準最適解）を得ることができた．さらに，条件をいろいろ加えたときのシミュレーション結果では，条件の重要度に応じて，高い確率でその条件を満足する解が得られた．現実の物資配送計画では，条件を満たすということが大変重要なので，このことにおいても GA の有用性は期待できる．

今後の課題としては，さらに配送ポイント数が増えた場合や，その他様々な条件を考えた場合の探索効率の変化の検証，また他の近似解法を利用した場合との比較などが挙げられる．

参考文献

[1]　村上周太，向殿政夫，本多中二，前田幹夫，和多田淳三，坂和雅敏，ファジィシステム演習問題集，**pp.9-10,49-56,171-187(1992)**工業調査会

[2]　森雅夫，森戸晋，鈴木久敏，山田善靖，オペレーションリサーチⅠ，**pp.131,142-145,148,149(1991)**朝倉書店

[3]　坂和正敏，田中雅博，遺伝的アルゴリズム，**pp17-30,115-123(1995)**朝倉書店

[4]　三宮信夫，喜多一，玉置久，岩本貴司，遺伝アルゴリズムと最適化，**pp.1-51(1998)**朝倉書店

[5]　北野宏明，遺伝的アルゴリズム **pp43-60(1993)**産業図書

[6]　岡部隆男，遺伝的アルゴリズムによるファジィスケジューリングに関する研究 九州工業大学，情報工学教室，卒業論文**(1999)**

[7]　Takao Okabe, On the Fuzzy Scheduling for Flow Shop Jobs by Using Genetic Algorithm**(1999)**

連絡先：

〒804-8550　北九州市戸畑区仙水町１－１
九州工業大学工学部電気工学科
前田　幹夫
TEL　(093)884-3249
E-mail　mmaeda@comp.kyutech.ac.jp

WB5−2

Intelligent Prediction Method for Power Consumption

Alejandro ASCUA Seiji YASUNOBU

Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

Abstract: The modeling of time series is a subject with a broad application in many fields. This thesis is specifically for a real application, in a water decontamination plant, in this application it is needed a good prediction of the total energy consumption during the daytime. A Fuzzy Model is proposed and a Genetic Algorithm is used to search the fuzzy rule base. This combination has shown good performance yielding improvements in the modeling of fast-changing data.

1 Introduction

The problem is the price of the electric energy, which during the day, is higher than the energy price at night. The main idea is to charge NiCd batteries during the night and use their energy during the day, but the batteries must be discharged until near zero to preserve their life. In this application, depicted in Fig.1, it is needed a good prediction of the decontamination plant total consumption during the day. Here it is developed a computer aid design with Genetic Algorithms for Fuzzy Models.

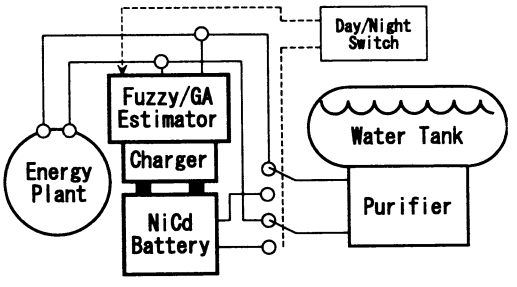


Figure 1: System Scheme

The aim was to get improvements in the modeling of the fast-changing energy consumption data obtained from the water decontamination plant.

2 Data Observations

The energy consumption was sampled every 30 minutes, over a period of 31 days (1488 samples). The prediction time must be 12 hours in advance. From the observation of the Fig.2 it can be seen that the mean of the lasts 48 hours (96 samples), is a good predictor of the behavior of the mean taken 12 hours (24 samples) after. Also it can be seen in Fig.2 that some errors still remain, but in general the errors are small and the slopes of "Data A" have a small difference with the slopes of "Data B". The purpose is to minimize the errors, towards that end they are predicted by using previous data of both curves, the actual one (Data A) and the 12 hours after one (Data B).

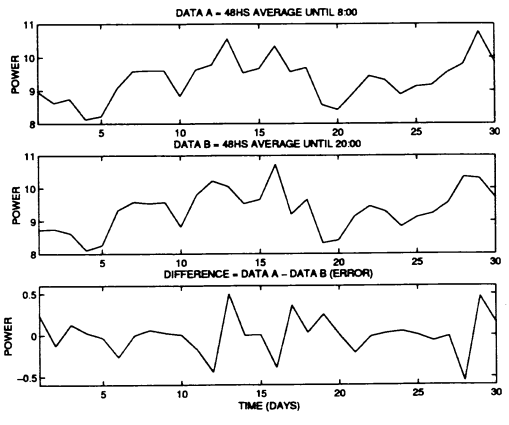


Figure 2: Data Comparison

3 Fuzzy/Genetic Model

3.1 Fuzzy Structure

A Fuzzy Model with a Takagi-Sugeno structure with constant consequents makes the prediction; the inputs are past values of the slopes of the "Data A", slopes of "Data B", and their difference (error), which is the value to be minimized by the algorithm. But looking at equation (1) and Fig.3, which is the best combination of past values that gives the best prediction accuracy? According to the human reasoning, if a certain combination of values, recurrently gives the same results, it means that in the future the same combination is likely going to give the same results, based on the premise that the system is deterministic. For example if we have a combination like this:

$$\begin{aligned} \text{if} \quad & DAS_{(k-2)} = Neg \text{ and } DAS_{(k-1)} = Pos \text{ and} \\ & DIF_{(k-2)} = Neg \text{ and } DIF_{(k-1)} = Zero \\ \text{then} \quad & DIF_{(k)} = Pos. \end{aligned} \tag{1}$$

Where the past two samples of the slope of "Data A" was written as $DAS_{(k-2)}$, the actual difference between "Data A" and "Data B" was writen as $DIF_{(k)}$, and so on. The combination is depicted in Fig.3.

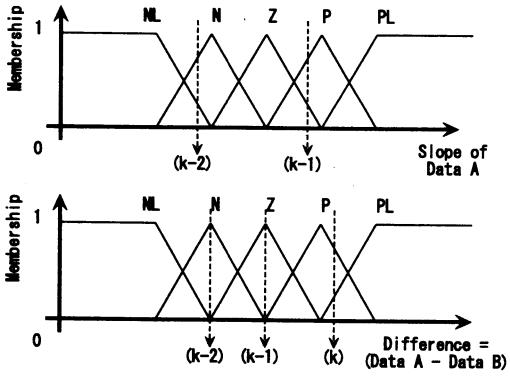


Figure 3: Fuzzy Model

If every time a specific combination rises, it gives the same result, e.g.: $DAS_{(k)} = Pos$, then that is a good rule for the predicting task. The problem is how to pick that kind of rules in a big space of possibilities; there is where the Genetic Algorithm works.

3.2 Genetic Algorithm

The basic points in the design of a Genetic Algorithm are the codification of the individuals and the fitness function used. The individual codification has been done as a fixed-position stream, e.g.: in the first position always it is the $DAS_{(k-3)}$ value, in the second the $DAS_{(k-2)}$ value and so on. The values at each position can be NL, N, Z, P, PL (Negative Large, Negative, Zero, ...). So each individual looks like:

	Data A Slope		Difference		Differ.
...	$(k-2)$	$(k-1)$	$(k-2)$	$(k-1)$	$\longrightarrow (k)$
...	NL	P	Z	N	$\longrightarrow N$

e.g.: Individual 1 : $P\ N\ N\ NL\ Z\ Z \longrightarrow P$
Individual 2 : $N\ NL\ P\ P\ P\ N \longrightarrow Z$

The individuals are divided in groups and each group yields only one kind of output; e.g.: for the output "$DIF = Neg$", every individual who yields only that output belongs to that group. The fitness function is a fuzzy inference system depicted in Fig.3 and an accumulator. For a given output if the membership degree of an individual is low at every data sample, the accumulation is going to be low showing that the individual (fuzzy rule) is not a good predictor for that output. If the accumulation is high the individual is a good predictor and is going to be selected by the Genetic Algorithm.

4 Prediction Results

The use of a fuzzy fitness function by the Genetic Algorithm to select the fuzzy rule base has some advantages, among them, the selected individuals can be used by the Fuzzy Model without preprocessing, the defuzzify function not only yields the final prediction, also give an indication of the prediction's truth degree. The prediction of the Fuzzy/Genetic Model is depicted in Fig.4 and compared with the predictions yielded by a Moving Average Model and an Auto Regressive Model, both of 4^{th} order. In this test the Fuzzy Model was trained only until the 15^{th} day, while the other models were trained until the 30^{th} day.

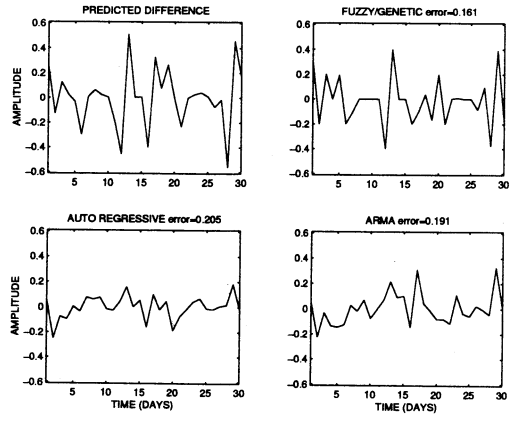


Figure 4: Prediction Comparison

5 Conclusion

In this thesis, a Fuzzy Model with a Genetic rule search method was applied to a predicting task, showing better performances than other methods tested like ARMA or Auto Regressive and showed good generalization ability from the simulation results.

References

[1] A. K. Palit, Fuzzy Logic Based Automatic Rule Generation and Forecasting of Time Series, *IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings*, vol. 1, pp. 360-365, Aug. 1999.

[2] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, March 1998.

Inquiries

〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学機能工学系安信研究室
Ascua Rafael Alejandro
Tel: (0298)53-6186
E-mail: ascua@esys.tsukuba.ac.jp

WB5−3

遺伝的アルゴリズムを用いた自動火災判断システム

A Fire Alarm System Using Genetic Algorithm

秋田 真吾† 海川 至幸‡ 吉川 大弘‡ 篠木 剛‡ 鶴岡 信治‡
Shingo AKITA Noriyuki KAIGAWA Tomohiro YOSHIKAWA Tsuyoshi SHINOGI Shinji TSURUOKA

†三重大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Mie University

‡三重大学工学部
Faculty of Engineering, Mie University

Abstract Recently, every building has fire alarm systems to detect a fire in its early stages and not to make it big. These systems are essential to protect human lives and properties. However, the lack of reliability in these systems, in which false alarms arose many times, has been a serious problem. This paper propose a new intelligent fire alarm system with feature extraction from the time series of smoke density using Genetic Algorithm (GA). The GA in this paper uses selective elements method for rule generation. This system shows high reliability for the fire alarm systems through computer experiments. This paper also shows that effective features can be extracted using this method.

1. はじめに

自動火災判断システムは，火災を確実に早期発見し，本格的な火災を未然に防ぐことを目的として，現在様々な環境下において設置されている．しかし現状では，火災報知機の誤動作（非火災報）がまだかなり見受けられる．そのため，人々が警報に慣れ，本当の火災時に，適切な非難を行えないことが危惧されている．また，多くの人が集まる場所では，混乱を避けるために，管理者が火災報知設備や自動通報システムを停止させることも多く，これにより火災発見が遅れ，被害が拡大したという例も生じており，自動火災報知設備における火災判断システムの信頼性の低さが問題点として指摘され始めている[1]-[4].

これに対し我々は，より信頼性の高い火災判断システムの開発を目指して，煙濃度時系列データを対象とし，統計的なアプローチを用いることにより，火災判断を行うシステムの構築を行ってきた[5]．文献[5]では，このシステムを用いることにより，現行のシステムと比較して有効な火災判断が行えることが報告されている．しかしこのシステムでは，統計的な手法により各煙発生原因に対する特徴を得ているため，人間の考えたルールと異なる記述方式であり，特徴量の意味を解釈することが難しいといった問題点があった．

そこで本稿では，文献[5]で用いられている煙濃度時系列データから，各カテゴリに対する特徴を自動で抽出する手法について検討を行い，得られた特徴を用いた新しい火災判断システムを提案する．予備実験として，人間による特徴抽出および火災判断を行い，本システムにより得られた特徴及び火災判断正答率の比較を行う．本システムでは，特徴抽出に選択型ルール生成法を用いた遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)を用いる．未学習煙濃度時系列データに対して実験を行い，本システムにより有効な特徴抽出，および火災判断が行えることを示す．

2. 実験に使用したデータ

ここでは比較のため，文献[5]で用いられているデータを，同様の条件で用いる．学習用データ数は246個，未学習データ数は233個であり，サンプリング時間は3秒，煙濃度値が5%/mを越える前90秒，後60秒の波形（計50点）を用いて実験を行う．煙発生原因（カテゴリ）は，火災原因として着炎火災と燻焼火災の２カテゴリ，非火災原因（誤報の原因となるもの）として煙草･湯気･調理の３カテゴリを用いる（表１）．着炎火災とは，十分な酸素の供給を受けるような状況下で，炎を立ち上げながら燃える火災であり，燻焼火災とは，布団などに使われている綿のような材質が燻されながら燃え，煙を多量に発生する火災である．また，煙草は，喫煙時の煙であり，特に誤報の原因になりやすい状況は，煙草から出る高濃度の煙が，拡散する前に直接センサ内部に流入する場合が多い．湯気は，ホテルなどの浴室ドア付近に設置された煙センサに対し，ドアの開閉により湯気が発生し，小さな水滴として検出される場合である．調理は，調理時に発生する煙と湯気，あるいは，それらが混合したものが煙センサで検出されたものである．

3. 人間による特徴のルール化

予備実験として，２．で述べた煙濃度時系列データを用いて，人間による各カテゴリに対する特徴抽出および火災判断を行う．

3.1 人間による特徴抽出・火災判断

学習用データの波形全てに対し，４人の被験者がそれぞれの目で見て各カテゴリに対する特徴抽出を行い，その特徴を個別に辞書化する．特徴抽出終了後，未学習データをランダムに表示し，各被験者がそれぞれの辞書を用いて表示された波形を各カテゴリに分類する．図１に，典型的な着炎の波形の例を示す．また，着炎に対して被験者が抽出した特徴の例を以下に示す．

「緩やかな右上がり」 (1)

「煙濃度の最終値が 6～14.5」 (2)

表１ 煙発生原因（カテゴリ）の種類

火災		非火災		
着炎	燻焼	煙草	湯気	調理

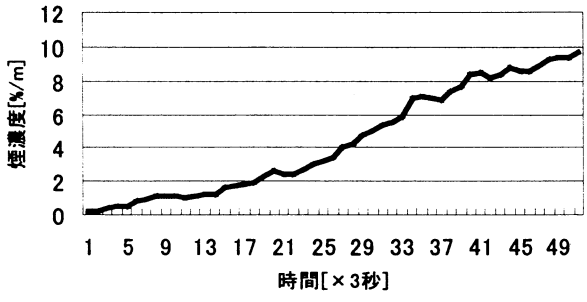


図１　着炎の煙濃度時系列データ

3.2　抽出した特徴のルール化

人間によって得られた特徴は，言語で表されたものの他に，大まかな波形の形状（図）によるものや，数値的なものも存在する．また，被験者の頭で抽象的にとらえられているものもあり，実際の判断に用いられる特徴の数は明確ではない．そこで，得られた各カテゴリに対する特徴（辞書）の中で，信頼性の高いものを言語により表現し，その言語表現された特徴のルール化を行い，これを用いて計算機による自動火災判断を行う．以下に，３．１の特徴(1),(2)に対して得られたルール(3),(4)を示す．

(1)「緩やかな右上がり」

for(t = 1; t ≦ 50 ; t++)

　if (0.0 < data[t] - data[t − 1] ≦ 0.35)　n++ ;

IF　n≧20　THEN 着炎　　(3)

(data[t]: t 番目の煙濃度値[%/m])

(2)「煙濃度の最終値が 6~14.5」

if(6 < data[50] < 14.5)　flag=1;

IF　flag=1　THEN　着炎　　(4)

(data[50]: 煙濃度の最終値[%/m])

以上の方法により，最終的に得られたルール数は 27 個であった．

4.　遺伝的アルゴリズムの適用

３．で述べた方法では，５．の表３に示すように，火災判断正答率の面では高い評価が得られているが，学習･判断時間および人間の労力の面から，実用的な方法ではない．そこで本稿では，遺伝的アルゴリズムを用い，３．で行った特徴抽出および火災判断ルールの生成を，自動的に行う手法について検討する．

4.1　火災判断ルールの生成

具体的には，例えば(3)，(4)式で示される火災カテゴリ判断ルールを，いくつかの要素に分け，各要素を用意した候補から選択することで，火災判断ルールを生成する（選択型ルール生成法）．３.で述べた火災判断ルールには，複数の条件が複雑に絡み合ったものも存在する．しかし，それら全てのルールに対して本手法により生成可能とするためには，各要素における選択候補を多種用意しなければならず，コーディングは極めて複雑なものになる．また，その場合，要素の組み合わせの大部分が意味のないものになり，探索に無駄が生じる．そこでここでは，人間が抽出した特徴をルール化する際，主に用いられていた for 文と if 文に着目し，これらの条件を，ある程度の範囲内で自由に生成できるコーディング方法を用いる．また，評価には，学習用データに対して火災判断を行ったときの正答率を用いる．以下に，選択型ルール生成法（コーディング方法）について述べる．

4.2　選択型ルール生成法（コーディング）

従来，GA におけるコーディングでは，各遺伝子座はそれぞれのパラメータ等に対応した値を持っており，そのコーディング方法により生成される染色体は，各問題に固有のものである．本稿では，染色体を従来のコーディングから独立させ，すべての遺伝子座を 0.0～1.0 までの実数で表現する．このように表現された染色体に対し，表現型への変換の際（ここでは火災判断ルールの生成時）に，各遺伝子座の持つ実数を，対応する範囲内の整数もしくは実数に均等分布で変換することで，選択する要素を決定する．従来のコーディングは，ここでは各遺伝子座と選択する要素との対応表に相当する．このようなコーディング方法には，筆者らの“DNA コーディング法”[6]がある．文献[6]では，生物の DNA を模倣して４種類の塩基配列により染色体を表現しているが，本稿では，実数への変換を考慮して染色体を実数で表現する方法について検討する．

図２に染色体の例を，また，表２に染色体の各遺伝子座と，判断ルールを形成する各要素との対応表をそれぞれ示す．ただし図２において，実際の各遺伝子座は 0.0～1.0 までの実数で表現されているが，ここでは対応する整数または実数に変換して示してある．図のように１つの染色体は２次元の配列で表される．各列は１つのルールを表し，列の長さは 70 である．染色体長（行の長さ）は染色体の持つルール数となる．

以下に，図２の染色体において，ルール１の列から対応表により，判断ルールが形成される過程を説明する．図２(b)において，色付けされた部分が判断ルールに用いられる遺伝子座（以下，行とする）を表している．

１つの列(ルール)は，大きく３つの部分に分けられる．1～49 行は for 条件部，50～68 行は if 条件部，69，70 行は後件部（THEN 部分）をそれぞれ表す．ただし，for 条件部においては，2，14，26 行により指定された範囲において 5～10，17～22，29～34 行により決定される条件を１点でも満たしていれば flag を立て(flag=1)，また，それらの条件を満たす点の数を数える(n++)．これにより得られた flag，n に対して，38～49 行により，if 条件部における使用／不使用を決定する．図２(b)において，ルール １ の１行目が 2 であることから，for 文を２つ生成することが決まる．

for 文 1，for 文 2 はそれぞれ 2～13，14～25 行の部分で対応表２-１の基づいて決定され，それらにより以下の２つの for 文が作成される．

for 文 1 : 2 行目により指定される範囲が 0≦t≦50 となる．次に，5 行目により差分(data[t] - data[t-1])を用いることが，6，9，10 行目により，差分が 0.0 から 0.35 の範囲内(0.0<data[t] − data[t−1]<0.35)であることがそれぞれ決定され，条件部が作成される．これにより，プログラム上では以下の for 条件部が生成される．

```
flag1 = 0;
n1 = 0;
for(t = 1 ; t ≦ 50 ; t++){
  if((0.0<data[t] − data[t−1]) && (data[t] − data[t−1]<0.35)){
    flag1 = 1;
    n1++ ;
  }
}
```

for 文 2 : for 文 1 と同様にして，14～19 行により範囲が 10≦t≦29 で（極大値）≧15.0 と決まる．

遺伝子座		ルール1	ルール2	……	ルールn
	1:				
	2:				
	:	:	:	:	:
	70:				

(a) 染色体の構造

遺伝子座															
1:	2	11:	1	21:	0.5	31:	1.9	41:	0	51:	1	61:	-0.9
2:	0	12:	1.84	22:	2.8	32:	22.0	42:	20	52:	4	62:	11.7
3:	7	13:	4.50	23:	6	33:	1.2	43:	11	53:	5	63:	8
4:	29	14:	3	24:	4.0	34:	2.4	44:	2	54:	31	64:	6
5:	0	15:	10	25:	1.5	35:	2	45:	17	55:	6.0	65:	3
6:	4	16:	29	26:	0	36:	4.1	46:	24	56:	13.5	66:	44
7:	12.5	17:	2	27:	31	37:	-2.6	47:	1	57:	4	67:	3.5
8:	7.8	18:	2	28:	19	38:	2	48:	3	58:	1	68:	12.3
9:	0.0	19:	15.0	29:	4	39:	0	49:	8	59:	33	69:	0
10:	0.35	20:	4.1	30:	2	40:	1	50:	1	60:	31	70:	0.9

(b) ルール1の例

図2　染色体の例

表2-1　対応表(遺伝子座 1~37)

	0	1	2	3	4	5	6
遺伝子座 1	for 文の個数						
遺伝子座 2,14,26	0~50	0~29	30~50	t_1~t_2			
	for 文の範囲						
遺伝子座 3,15,27	t_1 : 0~50 の整数値（遺伝子座 2,14,16 が 3 のとき用いる）						
遺伝子座 4,16,28	t_2 : 0~50 の整数値（遺伝子座 2,14,16 が 3 のとき用いる）						
遺伝子座 5,17,29	差分	連続差分	極大値	極小値	data[t]		
遺伝子座 6,18,30	> 0.0	< 0.0	≧ a	≦ a	a< <b	<a ‖ b<	= 0.0
遺伝子座 7,19,31	a: -1.0~25.0 の実数値（遺伝子座 5,17,29 が 2~4 のとき用いる）						
遺伝子座 8,20,32	b: -1.0~25.0 の実数値（遺伝子座 5,17,29 が 2~4 のとき用いる）						
遺伝子座 9,21,33	a: -5.0~5.0 の実数値（遺伝子座 5,17,29 が 0,1 のとき用いる）						
遺伝子座 10,22,34	b: -5.0~5.0 の実数値（遺伝子座 5,17,29 が 0,1 のとき用いる）						
遺伝子座 11,23,35	> 0.0	< 0.0	≧	≦	a< <b	<a ‖ b<	= 0.0
	（遺伝子座 5,17,29 が 1 のとき用いる）						
遺伝子座 12,24,36	a: -5.0~5.0 の実数値（遺伝子座 5,17,29 が 1 のとき用いる）						
遺伝子座 13,25,37	b: -5.0~5.0 の実数値（遺伝子座 5,17,29 が 1 のとき用いる）						

次に，38，39 行目と表2-2より，for 文 1 では n_1 を if 条件部で使用し，for 文 2 は使用しないことが決まる．n_1 は，41，42 行目により $n_1 \geqq 20$(5)として火災判断の前件部で使用される．50 行目（表2-3）より，上記の条件($n_1 \geqq 20$)の他に，if 文を 1 つ生成することが決まる．51，52 行目（表2-4，5）により a<data[50]<b という条件ができ，55，56 行目（表2-6）より a = 6.0，b = 13.5 となる(6).

以上の過程より，(5)(6)式で表される 2 つの条件式が生成される．これらは，3.(b)で述べた(3)，(4)式を表しており，この条件が満たされる時，69，70 行目および表2-7より着炎の適応度に 0.9 を与えるルールが生成される．

表 2 に示すように，各遺伝子座の組み合わせにより，自由度の高い様々なルールの生成が可能となり，これにより，人間が抽出した特徴（判断ルール）に近いルールや，逆に，人間では予想が困難なルールが自動的に生成されることが期待される．

if ($n_1 \geqq 20$) (5)

if (6.0 < data[50] < 13.5) (6)

表2-2　対応表(遺伝子座 38-49)

	0	1	2
遺伝子座 38	for 文 1 未使用	$flag_1$ 使用	n_1 使用
遺伝子座 39	for 文 2 未使用	$flag_2$ 使用	n_2 使用
遺伝子座 40	for 文 3 未使用	$flag_3$ 使用	n_3 使用
遺伝子座 41,44,47	$n \geqq$ a	$n \leqq$ a	a≦n≦b
遺伝子座 42,45,48	a: 0~25 の整数値(a)		
遺伝子座 43,46,49	b: 0~25 の整数値(b)		

表 2-3　対応表(遺伝子座 50)

遺伝子座	0	1	2	3
50	if 文の個数			

表 2-4　対応表(遺伝子座 51,57,63)

遺伝子座 51,57,63	0	1	2
	data[0]	data[50]	data[30]
	3	4	5
	data[t]	最大値	data[50]-data[0]
	6		7
	data[29]-data[0]		data[50]-data[30]
	8		9
	$data[t_2]-data[t_1]$		data[30]-data[28]

表 2-5　対応表(遺伝子座 52,58,64)

遺伝子座 52,58,64	0	1	2	3
	> 0.0	< 0.0	≧ a	≦ a
	4	5	6	
	a< <b	<a ‖ b<	==0.0	

表 2-6　対応表(遺伝子座 53~56,57~62,63~68)

遺伝子座 53,59,65	t_1: 0~50 の正数値 (遺伝子座 51,57,63 が 8 のとき用いる)
遺伝子座 54,60,66	t_2: 0~50 の正数値 (遺伝子座 51,57,63 が 8 のとき用いる)
遺伝子座 55,61,67	a: -1.0~25 の実数値 (遺伝子座 52,58,64 が 2~5 とき用いる)
遺伝子座 56,62,68	b: -1.0~25 の実数値 (遺伝子座 52,58,64 が 4,5 とき用いる)

表 2-7　対応表(遺伝子座 69,70)

	0	1	2	3	4
遺伝子座 69	着炎	燻焼	煙草	湯気	調理
遺伝子座 70	0.0~1.0 の実数(適応度として与える値)				

5.　実験結果

表 3 に人間による特徴抽出・火災判断の実験における 4 人の被験者の，それぞれの火災判断の正答率を示す．ただし，判断は 5 つの煙発生原因に対して行っているが，ここでは火災・非火災の判断が正しく行えているものは正答とした．すなわち，煙草のデータを湯気と判断しても正答としてある．この実験に要した時間は，被験者により個人差はあるが，学習に約 1 分/データ，認識に約 30 秒/データかかっている．異なるデータを学習するたびに膨大の時間がかかり，また，未知データに対する火災判断にも時間がかかるため，労力および火災の早期発見という面からも，実用的な方法ではないといえる．

表 4 に(I)文献[5]の手法，(II)人間が抽出した特徴，(III)本システムを用いて火災判断実験を行った場合の正答率を示す．ただし，(II)の(a)，(b)は，それぞれ 3.1，3.2 を用いたものであり，(II)(a)では 4 人の被験者の平均を示してある．(III)における，遺伝的演算のパラメータは，(染色体数，初期染色体長（ルール数），淘汰・増殖確率，交叉確率，突然変異確率，世代数）＝（30,30,0.2,0.3,0.2,350）とした．ここでも火災・非火災の判断が正しく行えているものを正答とした．

現在広く使用されているシステムを用いて本時系列データに対して実験を行った結果，平均正答率は 56%であった．表 4 および現行のシステムとの正答率の比較から，本システムが火災判断において，十分な性能を有していることがわかる．本システムにより得られたルールの例を次に示す．

if (8.0 < 極大値 < 14.0)　n++;
IF (4 < n <12)　THEN 着炎　(7)

表 3　各被験者の火災カテゴリ判断結果の正答率[%]

	被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D
着炎	96.1	96.2	92.3	96.2
燻焼	78.8	57.6	69.7	78.8
煙草	96.4	96.4	92.9	100
湯気	97.4	100	96.1	100
調理	80.6	83.3	69.4	83.3
平均	89.9	86.7	84.1	91.7

表 4　火災判断の正答率[%]

	(I) 文献[5]	(II)人間		(III) 本手法
		(a)	(b)	
着炎	96.2	95.2	100	96.2
燻焼	75.6	71.3	86.4	89.4
煙草	82.1	96.3	71.4	82.1
湯気	100	98.4	98.7	100
調理	58.3	79.1	80.6	94.4
平均	85.5	88.2	87.4	92.4

これは，人間が抽出した(1)の特徴に類似したルールとなっている．また一方で，人間が(3)式において煙濃度値の差分（傾き）を用いたのに対して，極大値を用いて同様のルールを獲得している．このことは，人間では予想が困難なルールの発見に対する本システムの可能性を示している．

6.　まとめ

本稿では，遺伝的アルゴリズムを用いて特徴を抽出し，その特徴を用いて火災判断を行う新しい火災判断システムを提案した．選択型ルール生成法を用い，火災判断に有効なルールが自動的に生成されることを示した．煙濃度時系列データを用いて実験を行い，本システムが火災判断において高い性能を有することを示すとともに，人間が抽出した特徴に類似したルールや，予想が困難なルールの発見に対する本システムの可能性を示した．今後，ルール生成の過程に対する検討を加えることで，汎化性の高い火災判断ルールの獲得，及び火災判断において高い性能を示すことが期待される．

参考文献

[1]小野,石井,室井: “初期火災における判定アルゴリズム”, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.8, pp.48-55 (1986)
[2]小野,石井,室井: “初期火災の多次元計測-ベクトル軌跡と非火災領域-”,計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.8, pp.22-29 (1988)
[3]中西,野村,栗尾,兼田,佐藤,河関,細川: “ファジィ防災システムについて”,日本ファジィ学会誌, Vol.5,No.1, pp.370-381 (1993)
[4]James A. Milke : “Application of Neural Networks for Discriminating Fire Detectors”, Proc. of 10-th International Conference on Automatic Alarm Systems (AUBE'95), pp.213-221 (April 1995)
[5]若林,吉川,鶴岡: “煙濃度時系列データを用いた統計的な初期火災判断システム”,PRMU98-219,pp.205-212 (1999)
[6]吉川，古橋，内川: “DNA コーディング法を用いた遺伝的アルゴリズムによるファジィルール発見”, 電気学会 C 分冊, Vol. 116-C, No.1, pp. 125-132 (1995)

[問い合わせ先]
〒514-8507
三重県津市上浜町 1515
三重大学工学部電気電子工学科情報処理研究室
秋田 真吾
Tel: 059-231-9737
Fax: 059-231-9737
E-mail: shinsp@ip.elec.mie-u.ac.jp

WC1−1

ファジィノードファジィグラフを応用したソシオグラム分析

Sociogram Analysis Applying Fuzzy Node Fuzzy Graph

上江洲 弘明　山下 元　稲井田 次郎　佐藤 章　須田 宏　津田 栄　箭内 顕彦　箭内 美智子
Hiroaki Uesu　Hajime Yamashita　Jiro Inaida　Akira Sato　Hiroshi Suda　Ei Tsuda　Akihiko Yanai　Michiko Yanai
早稲田大学　早稲田大学　日本大学　東洋大学　慶応大学　國學院高校　早稲田実業　淑徳高校
Waseda Univ.　Waseda Univ.　Nihon Univ.　Toyo Univ.　Keio Univ.　Kokugakuin　Waseda Jitsugyou　Shukutoku

Abstract The sociometry is one of the measurement and evaluation methods of social structure with which we could effectively analyze by applying fuzzy graph theory.

According to the data obtained from the simple questionnaires, we could measure the fuzzy relations among the members of the group and observe the human structure by applying it.

In this paper, we would explain the fuzzy node fuzzy graph, quesi logical product and their effective application to the fuzzy sociogram analysis.

1．ファジィノードファジィグラフ

ファジィノードファジィグラフ G は，次のように定義される．

定義１：ファジィノードファジィグラフ

$G=(V, Y)$: $V=\{v_i(u_i)\}$, $Y=(y_{ij})$

ただし，$u_i \in [0, 1]$ はノード v_i のファジィネス，$y_{ij} \in [0, 1]$ はノード v_i から v_j へのアークのファジィネスを表す．

また，$u_i=1$ $(i=1, 2, \ldots, n)$ の場合には，$G=(V,Y)$ をクリスプノードファジィグラフという．これは通常のファジィグラフに一致する．

ファジィノードファジィグラフ G は，次の方法でクリスプノードファジィグラフに変換することができる．

$G=(V, F)$: $V=\{v_i\}$, $F=(f_{ij})$

ここで，ノード v_i から v_j へのアークのファジィネス f_{ij} は，ノード v_i のファジィネス u_i と，ノード v_i から v_j へのファジィネス y_{ij} とのT−ノルム$T(u_i, y_{ij})$で定義される．

T−ノルム T(p,q) には，(1),(2),(3),(4) などがある．

（１）論理積：$T_L(p, q)=p \wedge q$

（２）代数積：$T_A(p, q)=p \times q$

（３）限界積：$T_B(p, q)=(p+q-1) \vee 0$

（４）激烈積：$T_D(p, q)=\begin{cases} 0 & (p \vee q<1) \\ p \wedge q & (p \vee q=1) \end{cases}$

ここで，(1) の「論理積」と(4) の「激烈積」をつなぐT−ノルム族として，新しく定義２の「準論理積」を提案する．

定義２：「準論理積」

$$T_\lambda(p, q)=\begin{cases} 0 & , p \vee q<1-\lambda \\ p \wedge q & , p \vee q \geqq 1-\lambda \end{cases} , 0 \leqq \lambda \leqq 1$$

補題１：準論理積は次の性質をみたす：

（１）$T_\lambda(p, q)=T_\lambda(q, p)$

（２）$T_\lambda(p, T_\lambda(q, r))=T_\lambda(T_\lambda(p, q), r)$

（３）$p \leqq q$, $r \leqq s \Rightarrow T_\lambda(p, q) \leqq T_\lambda(r, s)$

（４）$T_\lambda(0, q)=0$, $T_\lambda(1, q)=q$

補題２：「準論理積」は $\lambda=1$ のとき「論理積」，$\lambda=0$ のとき「激烈積」である．

$\lambda=1 \rightarrow T_\lambda(p, q) = T_L(p, q)$

$\lambda=0 \rightarrow T_\lambda(p, q) = T_D(p, q)$

補題３：$\lambda<\mu$ であれば，$T_\lambda(p, q) \leqq T_\mu(p, q)$

補題１より，「準論理積」はT−ノルムであることが解る．また，補題２，３より，それぞれ「準論理積」の境界値と単調性が解る．

ファジィグラフ $G_A=(V,F)$,$V=\{v_i\}$,$F=(f_{ij})$ と $G_B=(V,H)$,$V=\{v_i\}$,$H=(h_{ij})$ において，$f_{ij} \leqq h_{ij}$, $1 \leqq i, j \leqq n$, であれば，G_A は G_B のファジィパーシャルグラフであるといい，これを $G_A \preceq G_B$ と表す．

ファジィノードファジィグラフGをT_λで変換したファジィグラフをG_λ $(0 \leqq \lambda \leqq 1)$とする．$0 \leqq \lambda_1 \leqq \lambda_2 \leqq 1$なる任意の λ_1 , λ_2 に対して$G_{\lambda 1} \preceq G_{\lambda 2}$であれば，この$G_\lambda$をファジィパーシャルグラフ列という．

ファジィノードファジィグラフ G=(V,Y) を「準論理積」$T_\lambda(u_i, y_{ij})$で変換したファジィグラフを$G_\lambda=(V, F)$ とする．

補題 4：G_λはファジィ・パーシャル・グ

ラフ列である．

補題 5：$(G_\lambda, \preceq)$ は全順序集合となり，最大元は G_1 $(\lambda=1)$，最小元は G_0 $(\lambda=0)$である．

2．ソシオグラム分析への応用

ソシオメトリー分析への応用として，16人の生徒にアンケートを行った．その結果から，図1のファジィノードファジィグラフ G=(V,Y)ができる．

G を準論理積 T_λ, $0 \leqq \lambda \leqq 1$を用いて変換するとグラフ $G_\lambda=(V,F)$ができる．また，これを近似すると 図 2,図 3 などのグラフ $G^*_\lambda=(V,F^*)$ができる．

クラスの担任の先生から，次のようなコメントが得られた．

（1）生徒 v_{12} はオピニオンリーダーである．

（2）生徒 v_2 と v_5 はテニス部で仲がよい．

（3）生徒 v_6 は孤立ぎみの生徒である．

これらのコメントと，近似グラフ G^*_λ から考察される関係は、ほぼ一致している．これから，ファジィノードファジィグラフを応用したソシオグラム分析は，かなり有効であるといえる．

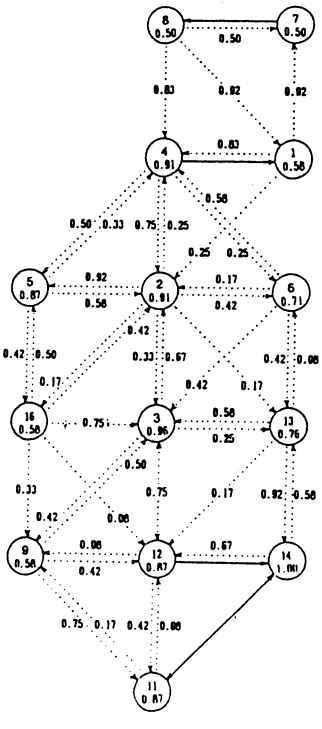


図 1 G=(V,Y)

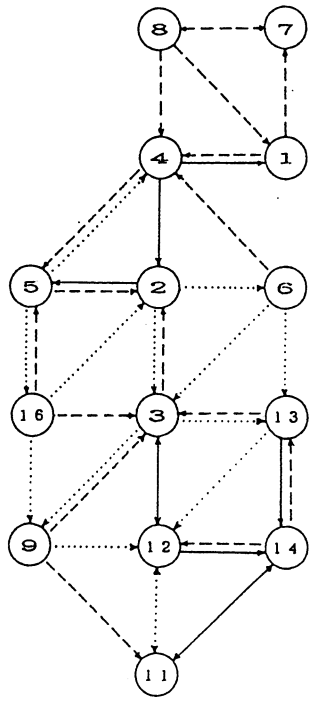


図 2 $G^*_\lambda=(V,F^*)$, $\lambda=1$

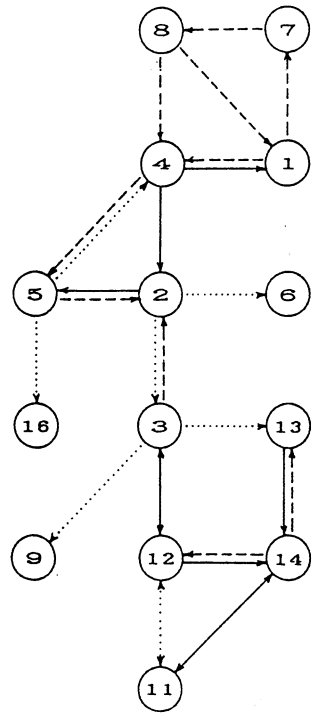


図 3 $G^*_\lambda=(V,F^*)$, $\lambda=0.2$

参考文献

[1] 山下，稲井田：ファジィグラフの近似分析と応用 I ～VI，日本数学会大会応用数学分科会，1990 ～ 1997.

[2] 津田，山下：ファジィグラフを応用したソシオメトリー分析，日本ファジィ学会誌 Vol.6 No.3, 1994.

[3] W.Pedrycz : An Introduction to Fuzzy Sets , MIT Press, 1988.

[4] H.Uesu, H.Yamashita, J.Inaida : Fuzzy Sociogram Analysis Applying Fuzzy Node Fuzzy Graph, Int'l Congress of Fuzzy Systems Association Ⅷ pp.1019 ～ 1023, 1999.

[5] 上江洲，山下，稲井田： T－ノルムを応用したファジィノードファジィグラフの解析 I ～ II，日本数学会大会応用数学分科会，1999 ～ 2000.

連絡先 〒115-0043 東京都北区神谷 1-3-1-613 上江洲 弘明 (Tel 03-3911-8473)

WC1−2

手書き風文字生成のためのファジィルールの構成

Representation of Fuzzy Rules for Generation of Handwritten-like Characters

但馬　文昭　　宮武　直樹　　中島　洋一
Fumiaki Tajima　Naoki Miyatake　Yoichi Nakajima
横浜国大　　法政大　　空知教育研究所
Yokohama Nat. Univ.　Hosei Univ.　Sorachi Edu. Center

Abstract —If handwritten-like characters can be inputted via a keyboard of a personal computer or a word processor, it will make users feel friendly for the computer or the processor. Then it will promote the improvement of computer education. Handwritten characters have personality and character variation of the writer in shape. So there is a need of gathering all categories of characters which include many characters written repeatedly by one person. To decrease such a troublesome problem, this paper examined fuzzy rules for generating characters.

1　まえがき

近年，ワープロやパソコンの普及により，活字体の印刷が容易にできるようになり，手書き文字の文書を見る機会が減少している．しかし，手書きの文書には筆記者の個性が感じられるため，根強い要望があり，情報教育の視点からも教育効果の改善が期待できる．このため，キーボードから入力した文書の印刷を手書き風の文字で印刷することを目的として，手書き風文字の生成を行う研究が行われている[1, 2]．前者は，1文字種につき1文字の入力文字から，後者は，1文字種から60文字以上の多数の反復入力文字から手書き風文字を生成するものである．前者の方法は，収集するサンプル文字が少なく，筆記者の負担が少ないが，1文字種につき1文字を生成するものであり，後者は，多数のサンプルを収集する必要はあるが，生成する文字は1文字種につき多数の文字を生成できる．すなわち，個性と変動を伴った文字が生成できる．従って，後者の方法で生成した文字を使用すれば，より個性を感ずる文書が作成できる．本研究で検討したファジィルールを用いた方法は，1文字種につき1文字の入力文字からも手書き風文字生成が可能であるが，前述の後者の方法のようにある程度多くの入力文字に基づいても手書き風の文字を生成できる方法と考えられる．また，ファジィルールによる方法は，単に手書き風文字を生成するだけでなく，ユーザが例えば「右上がり」等の字形を変形させることばに対応させて字形を編集できる可能性があり，文字生成方法として有用な方法の一つと考えられる．ここでは，文字生成のためのファジィルールとその生成方法について述べる．

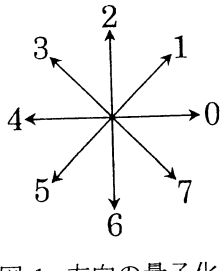


図 1: 方向の量子化

2　ファジィルールによる文字生成

2.1　前処理

液晶タブレットを用いて収集した手書き文字をファジィルール生成用に用いた．液晶タブレットによりストローク毎に時系列データとして文字を収集できるため，交差点等の抽出や容易になる．収集した文字は重心一致，広がり量（2次モーメント）一致の正規化処理により，複数の文字を重ね合わせた際に各ストロークが重なるようにした．次に，各ストロークを方向線素パターンに変換し，ストローク毎の始点，終点，交差点等に位置する線素を抽出した．方向線素は$0, 1, 2, \cdots, 7$の8方向に量子化した（図1）．方向線素のパターン空間は64×64とした．

2.2　ファジィルールモデル

図2のストロークを変換した方向線素の列を例に文字生成のためのファジィルールについて説明する．あるストロークを構成するn個の方向線素の集合を$\tilde{B}$とし，始点から$p(=1, 2, \cdots, n)$番目に位置する方向線素を$e_p = e_p(x_p, y_p)$で表す．このとき，(x_p, y_p)はe_pの線素平面上の座標を表す．また，方向量子を$\acute{e}_p = e_p \in \{0, 1, 2, \cdots, 7\}$とする．

一方，$d(\in \{0, 1, 2, \cdots, 7\})$方向に対応する方向線素の平面を図2のように座標軸をそれぞれ$K(\geq 2)$個の

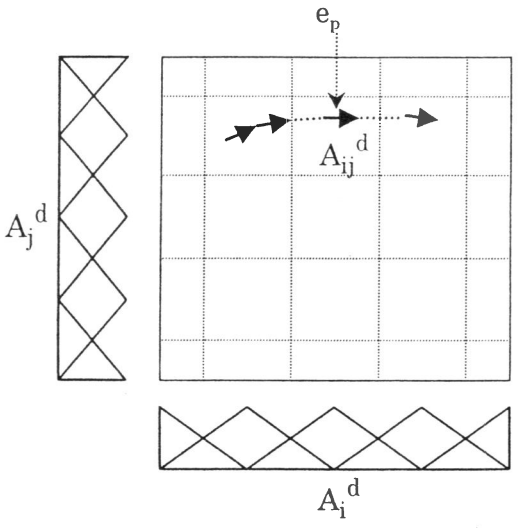


図 2: 方向線素とファジィ分割

三角型メンバーシップ関数に対応させることにより K 個にファジィ分割する．方向線素 e_p が与えられたとき，d 方向線素平面におけるファジィ集合 A_{ij}^d への e_p 適合性を次のファジィルールにより表す．

$$R_{ij}^d: \ If \ x_p \ is \ A_i^d \ and \ y_p \ is \ A_j^d \\ then \ e_p \ belongs \ to \ A_{ij}^d \ with \ W_{ij}^d \qquad (1)$$

このルールは以下の手順で生成される．ユーザの手書き文字のサンプルストロークの方向線素の集合 $\tilde{B}$ が与えられたとして，

(1) e_p の A_{ij}^d への適合度を次式により求める．

$$\mu_{A_{ij}^d}(e_p) = \mu_{A_i^d}(x_p) \cdot \mu_{A_j^d}(y_p) \qquad (2)$$

(2) ストロークの方向毎，A_{ij} 毎に適合度の合計 β_{ij}^d を次式により求める．

$$\beta_{ij}^d = \sum_{e_p \in \tilde{B}^d} \mu_{A_{ij}^d}(e_p) \qquad (3)$$

ここで，$\tilde{B}^d$ はストロークの線素集合 $\tilde{B}$ のうち，d 方向の方向線素の集合である．

(3) β_{ij}^d の最大値 β_M を次式により求める．

$$\beta_M = \max_{i,j,d} \beta_{ij}^d \qquad (4)$$

これにより，

$$W_{ij}^d = \beta_{ij}^d / \beta_M \qquad (5)$$

となり，ルールが生成される．

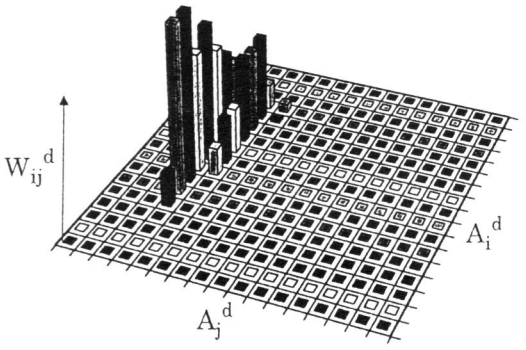


図 3: 生成したファジィルール例

3 ルール生成実験

図 3 に生成したファジィルール例を示す．これは，$K = 17$ としたときの「ま」の第 1 ストロークの R_{ij}^0 である．

4 むすび

ファジィルールを用いた手書き風文字生成方法について検討し，見本の手書き文字に基づいてファジィルールを生成する方法の概略を示した．ファジィルールにより字形を表現することは，字形を表現することばと対応させることができ，ユーザに分かりやすいシステムを構築できると考えられる．現在，ファジィルールに基づく文字生成実験を試みており，手書き風文字生成が可能であることを確認しているところである．

参考文献

[1] 安本 護，池田尚志，堀井 洋:“大域的個人性と局所的個人性に基づく手書き風フォント生成，” 信学論 D-II，vol. J80-D-II，no. 10，pp. 2930–2939，Nov. 1997.

[2] 但馬文昭，張　軍:“遺伝的アルゴリズムによる個性と変動を伴った手書き風文字の生成，” 信学技報，ET98–89，pp. 125–132，Nov. 1998.

問い合わせ先

〒 240-8501, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2
横浜国立大学 教育人間科学部　但馬 文昭
TEL (045)339-3448，E-mail tajima@ynu.ac.jp

WC1−3

アクセスlog取得型知的CAIシステム

An intelligent CAI system using log acquisition methods.

坂東 正規† 菅野 直敏†† 米山 忠暲††

Masanori Bando Naotoshi Sugano Tadaaki Yoneyama

†玉川大学大学院工学研究科
Master Program in Engineering
Tamagawa University

††玉川大学工学部
Faculty of Engineering
Tamagawa University

Abstract. In this study, we examine whether an intelligent CAI (Computer Aided Instruction) system is adapted to academic ability of students or not. This system files all of the past result of students as a personal log. In this case log is any record of progress or occurrences. For example, access date, access time, IP address of client PC, URL, errors, ID number, etc. We analyzed this log to know how students use the CAI system and how students make progress in each step of basic electronics experiments. The student-log also can point out defects in the CAI system as a human interface.

1．はじめに

我々は、電子工学実験（基礎編）[18),19)]においてインターネット上のWWW及びCGIを利用し、学習者レベルに応じた知的CAIシステムの開発を行ってきた[1)-13)]。CAIシステムをどのように利用したかを“log”に記録する事で、利用状況と学習状況を見ることができる[6),8),10)-13)]。本研究では、そのlogからCAIシステム及び学習者をどのように評価できるか検討した。WWWを用いた知的CAIシステムは、以前にも研究されている[16),17)]。しかし、彼等の研究では、logの取得は提案されていない。また、1999年の原田の研究には、logを取得し、分析する手法がとられているが、本研究で提案する手法に比べ制約やCAIシステムにそぐわない部分が存在する[14),15)]。本システムにおけるlogとは「誰が、いつ、どこから、どこで、何を調べ、設問ではどのような解答をしたか」を記録したものである。

2．知的システムの概要[13)]

本研究においての知的システムのイメージを図1に示す。まず、ユーザ（学習者）が、ヒューマンインタフェース（本知的CAIシステム）にアクセスする。そのとき、サーバ上に置かれたlog取得専用のプログラムが、4種類のlogを自動的に取得する。logを分析評価する。ヒューマンインタフェースの欠点は、logによって明らかにされる。そこで明らかになった問題を改善し、システムに反映する。この作業を繰り返すことにより、システムはより高い完成度を持ち、その結果logから学習者の評価が可能になると考えている。

3．システムの概要[5)-13)]

通常画面：図2はCAIシステムの画面例である。多くのページは図のように3フレームで構成されている。実験の回路図は常に左上のフレームに提示されており、学習者はいつでも確認できるようになっている。その下のフレームには、実験の手順を示したフローチャートをこちらも常に提示できている。フローチャートの各ブロックをクリックする事で右のフレームに詳しい内容が表示されるようになっている。

辞書画面：実験を進めて行くと学習者によっては、よくわからない内容や素子がでてくる。また、内容や素子についてより詳しく探求したいと考える学習者もいる。このようなときに関連項目を簡単に調べることができるページを用意した。これを辞書と言っている。この辞書にはあらゆるところからリンクが張られ、見たいときにすぐ調べることができる。

疑似回路作成シート：フローチャートの示す実験手順の中に、擬似回路作成シートがある。そのブロックをクリックすると新しいウインドウが開き、実際に回路素子をつなぐ前に学習者の考えている回路で、本当に実験が可能か判断することが出来る。このシートは実験内容をシミュレ

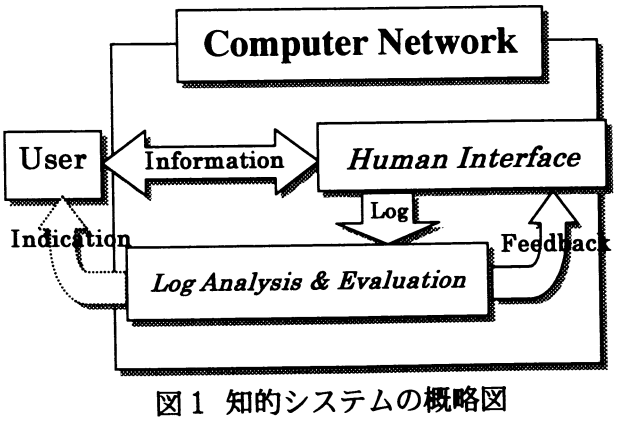


図1 知的システムの概略図

ートするのではなく、回路が正しいかどうかを判断するにとどめている。このシートを使うことにより誤配線の回数や、どのように間違えたのかを知ることが出来る。また回路素子、実験器具の破壊や故障を未然に防ぐこともできる。

グラフシート：実験で測定した値を入力してその概型をグラフに表示するページである。学習者に測定した値の分布を確認しながら実験を行ってもらうことも１つの目的だが、値を入れることによって「いつ、どのような値を取ったのか」がlogに記録される。そのlogから学習者がグラフの正しい書き方をしているか見ることもできる。

４．logの取得法[5),7),9),11)-13)]

本システムはWeb上におかれているので、多くのコンテンツはHTML(Hyper Text Markup Language)によって記述されている。しかし、logを取得する事はHTMLだけではかなわず、サーバにアクセスデータ(log)を残す何らかの方法を講じなければならない。そこで、通常画面、辞書画面ではページを開くと指定したファイルにアクセスするイメージタグを使用している。本来イメージタグは画像ファイルにアクセスするためのタグであるが、本システムでは画像ファイルではなくlogを取得するCGIプログラムにリンクしている。ページから画像ファイルとしてアクセスされたCGIはサーバにlogを保存し、ページにはダミー画像を返す。この手法を使うことでlogが取得でき、コンテンツは従来通りHTMLで記述できる。また、擬似回路作成シート及びグラフシートは、CGIにより作成されているので、イメージタグを使わずともlogが取得できる。

５．logの内容

図４は通常画面から取得できるFundamental logに残る情報である。アクセス日時（ページを開いたときの、年、月、日、時、分、秒)、IPアドレス（学習者が使っているコンピューターごとに与えられているユニークな番号。詳しくは「Internet Protocol[20)]で使用される宛先や送信元を特定するためのアドレス。32ビットによって構成される。８ビット毎に区切られ、それぞれ10進数で表現する。」)、参照URL（開いたページのディレクトリ名とファイル名)、学習者識別番号（学籍番号など）である。辞書画面から取得できるDictionary logに残る情報は、基本的に前述のFundamental logと変わらない。しかし、学習者がわからない事があったのか、興味を持っているのか、慎重に確認のために見ているのか、等の重要な情報が詰まっているlogである。そのため、Fundamental logとはファイルを分けて保存している。Simulation display logは回路を変えるごとに変更時間と変更箇所を含めた回路上の全素子を記号として保存している。ダイオードなら[D]、抵抗なら[R]といった具合である。学習者が一つの素子を入れるごとにlogを取得でき、間違えた回答をした学習者のlogからは、どこをどのように間違えたのかを容易に読みとることができる。Graph display logからは学習者が正しいグラフの書き方をしているかが判るほか、学習者がどのような値を取って実験を終了したかの経過が取得できる。

一つの実験課題において、一人の学習者からおよそ50のlogが取得できる。さらに、Fundamental log、Dictionary log、Simulation display logそしてGraph display logの４つのlogの関係を考えればさらに多くの情報を読みとることが出来る。

６．実験の手法

学習者にはWebブラウザのセットアップされたPC端末と実験に必要な器具一式が与えられる。PCはネットワーク上にあり、CAIシステムを提供するサーバにつながっている。今回行った電子工学実験には、安定化電源、配線ボード、電圧計、電流計、抵抗、ダイオード、そして発光ダイオードが必要である。また、学習者が参照できるのはCAIシス



図２ CAIシステムの画面例（通常画面）

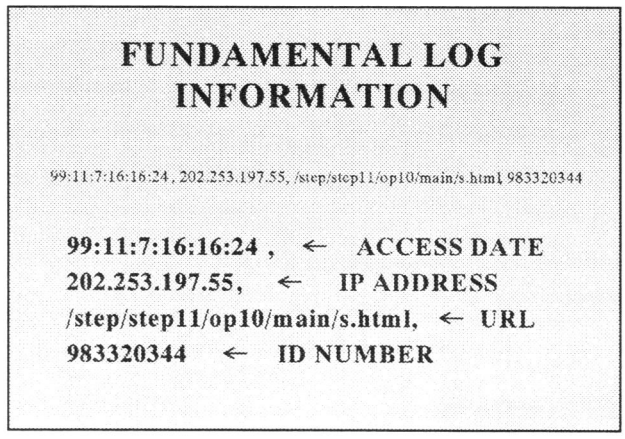


図３ logに残る情報

テムのみとした（指導書は見ないで実験を行う）。私たちはシステムに関する質問には対応したが、実験に関しての質問には対応しなった。電子工学基礎実験は通常のカリキュラムでは２年生を対象にしており、２人一組のペアーで実験を進める。そこで、被験者を２年生にするときには、２人一組で行い、４年生の場合は一人で実験を行ってもらった。20人の学生に参加してもらい、14のlogデータを取得した（６組の２年生と８人の４年生）。

７．結果

以上のことから「誰が、いつ、どこから、どこで、何を調べ、設問ではどのような解答をしたか」が取得できたわけである。表１は一つの実験課題におけるそれぞれの学習者の合計参照ページ数と累計時間に関して平均と標準偏差を示したものである。この表は図４と対応している。グラフ上段には合計参照ページ数の分布を示し、下段には累計参照時間の分布を示した。合計参照ページの平均は 25 ページであり、累計参照時間の平均は 3454 秒であった。グラフ下段に他の学習者に比べて非常に長い log を持つ波線で示された学習者を確認できる。彼は最も早く実験を終わった学習者のおよそ４倍もの時間をかけている。図５はそれぞれのページの推移を示したものである。上部に表示されている数字は累計参照時間であり、左にはそれぞれのページの名前が記されている。横線はそれぞれのページの滞在時間を示し、縦線はページの推移を示している。図中３つの矢印で示した小さな縦線は同一のページを連続して参照した場合に表示される。

システムへのフィードバック

多くの学習者が長い時間特定のページにとどまっている場合、そのページが学習者にとってわかりにくいのではないかと考えた。それらのページは修正や改良がおそらく必要である。今回システムに関する問題を log から２つ発見した。８組中５組の学生が擬似回路作成シートへのリンクがはられたページを一度通り過ぎるか、または最後まで気がつかないで実験を終わっていた。擬似回路作成シートへのリンクが他のリンクと色が違うことや、明確にリンクと分かる指示が出されていなかった為と考えられる。また、ある一つのページはすべての学習者の log に含まれていなかった。原因は、日本語コードに EUC を使うべき所に、Shift-JIS を使っていたために起こった問題であった。以上のようなシステム上の欠陥を log から発見し、システムへフィードバックする事は本研究の大きな特徴である。

学習者の行った実験の流れを示した図５に加えて、Simulation display log 及び Graph display log を用いて検討した。そして、一人の学習者(983320(2))log に関して３つの奇妙な点を発見した。1)s.html と 2.html の間を２回も行き来している。2)他の学習者に比べて、非常に長い時間を実験に費やしている。3)実験終了後、次の実験に進まず、スタート地点に戻っている。以上の３点について、log からの解釈を以下に示す。1)彼は、擬似回路の作成を２回行っていた（Simulation display log より）。2)彼は、LED の特性を２回測定していた（Graph display log より）。 3)実験結果を再確認していた（すべての log より）。以上のことから、「彼は慎重に実験を進めている」もしくは、「実

表１　１つの実験課題における学習者データ

Student ID	No. of pages	Total required time
963320(0)	14	2144
963320(1)	43	7190
963320(2)	15	3240
963320(3)	26	4267
963320(4)	29	6473
973320(0)	12	2552
983320(0)	35	1403
983320(1)	20	1555
983320(2)	35	4153
983320(3)	25	1567
Average	25.4 pages	3454.4 sec
S.D.	10.3 pages	2059.4 sec

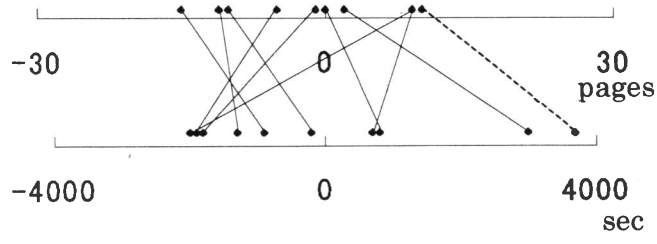


図４　参照ページ数と累計時間の関係

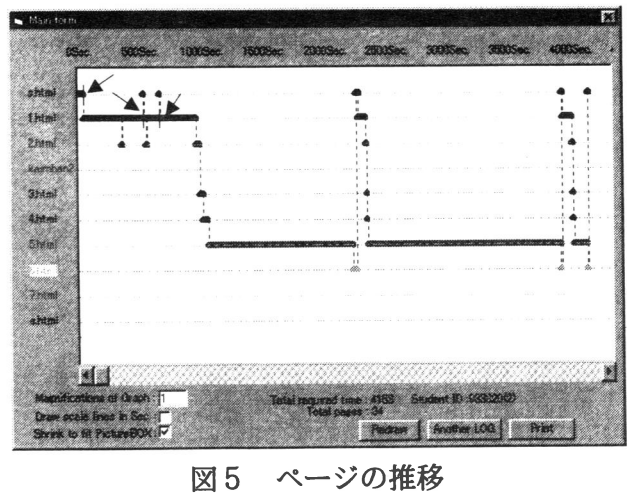


図５　ページの推移

験の主旨を理解していない」などの要因が考えられる。

8．現在の進行と今後

完成している実験課題から学習者に使ってもらい log を取っているのだが、システムの完成度が低いためにバリエーションにとんだ log の取得がなかなか出来ないのが現状である。そこで、さらにシステムを拡充し学習者が自由に学習できるシステムの構築をしていきたい。log がそろえば、どのような場所で多くの学習者がつまずくのかが分かり、システムの改善が速やかに行えると考えている。将来的にシステムが完成すれば、取得したデータを基に、CAI システムが自ら判断し学習者に最適な実験課題を提供できると考えている。

9．まとめ

人間と計算機に関するヒューマンインターフェスを研究する上で、ユーザとして学習者（学生）、プログラム本体を CAI プログラムとして進めてみた。従来の CAI の欠点（①開発コスト、②機種依存性と移植コスト、③システムの配布、④インストール）[16),17)]を解決するためにWWWを用いた CAI システムを開発してきた。このシステムを評価するためには、ユーザとしての学習者にシステムを評価してもらい学習効果が上がれば良いシステムということになる。一般的には、優れたユーザインターフェス [21)]は①今どういう状況下にいるか、②次に何ができるか、③それを行うために具体的にどうすべきかをユーザに提示してくれるものである。したがって、ユーザによる評価だけでなくユーザのシステム利用状況（①誰が、②どこのコンピュータからアクセスしているか、③何時から何時まで同一画面を見ているか）および学習状況（④指示にしたがっているか、⑤解答が正しいかどうか）をすべて記録し、この log を分析する。つまり、CAI 上において学習者がどのように学習してきたかを log として蓄積し、ユーザの態度・行動、判断力および積極性とログ（時間および数）の関係を分析しようと考えている。結果はシステムに繰り返し反映して行き、システムが完成すれば学習者の評価も可能となる。

参考文献

1) 阿達、柏木、菅野（1997）：ホームページ制作法を利用した知的 CAI．ノンエンジニアリング・ファジィ研究会 第 7 回ワークショップ 講演論文集 pp.72－73
2) 酒井、菅野（1997）：WWW を用いた知的 CAI システムの開発．日本ファジィ学会 関東支部・東北支部 第 9 回ファジィ・ワークショップ in 秋田 講演論文集 pp.32－39
3) 酒井、菅野（1998）：WWW を用いた知的 CAI システム．日本ファジィ学会 東海支部 第 6 回東海ファジィ研究会 講演論文集 pp.71－74
4) 酒井、菅野、米山（1998）：WWW を用いた知的 CAI システム．日本ファジィ学会 第 14 回ファジィシステムシンポジウム 講演論文集，pp.143-146
5) 酒井、菅野、米山（1998）：WWW を用いた知的 CAI システム I．日本ファジィ学会 関東支部・北信越支部 第 11 回ファジィ・ワークショップ in 佐渡 pp.27－32
6) 坂東、酒井、菅野（1998）：WWW を用いた知的 CAI システム II．日本ファジィ学会 関東支部・北信越支部 第 11 回ファジィ・ワークショップ in 佐渡 pp.33－38
7) 酒井、坂東、菅野、米山（1999）：WWW を用いた知的 CAI システム I．日本ファジィ学会ソフトサイエンス研究部会 第 9 回ソフトサイエンス・ワークショップ講演論文集 pp.113－116
8) 坂東、酒井、菅野、米山（1999）：WWW を用いた知的 CAI システム II．日本ファジィ学会ソフトサイエンス研究部会 第 9 回ソフトサイエンス・ワークショップ講演論文集 pp.117－120
9) 酒井、菅野、米山（1999）：WWW を用いた知的 CAI システム I．日本ファジィ学会 第 15 回ファジィシステムシンポジウム 講演論文集，pp.425-428
10) 坂東、酒井、菅野、米山（1999）：WWW を用いた知的 CAI システム II：学習者 log の分析と評価方法の検討．日本ファジィ学会 第 15 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.429-432
11) 坂東、酒井、菅野、米山（1999）：LOG 取得型知的 CAI システム．日本ファジィ学会関東支部・北信越支部 第 13 回ファジィ・ワークショップ講演論文集，pp.30-35
12) Y.Sakai M.Bando N.Sugano T.Yoneyama "An intelligent CAI system for basic electronics experiments on the WWW", Proceedings of the 7th International Conference on Computers in Education, 1999, Vol.2 pp.870-871 in English.
13) M.Bando Y.Sakai N.Sugano T.Yoneyama "An intelligent CAI system using log acquisition methods", Proceedings of the 4th Asian Fuzzy Systems Symposium, 2000 (to be appeared), in English.
14) A.Harada, Y.Harada "Kansei oriented parallel design method using WWW" KANSEI Engineering International, 1999, Vol.1 No.1 pp.67-74 in English.
15) 原田（1999）：感性評価構造モデルのためのアクセスログ解析．日本感性工学会 第 1 回日本感性工学会大会予稿集，pp.137
16) 岡崎、渡辺、近藤（1997）：WWW を利用した知的 CAI．電子情報通信学会論文誌 D－II Vol.J80－D－II No.5. pp.1304－1307
17) 仲林、小池、丸山、東平、福原、中村（1997）：WWW を用いた知的 CAI システム CALAT．電子情報通信学会論文誌 D－II Vol.J80－D－II No.4. pp.906－914
18) 後藤、米山、春名、菅野、寺沢（1997）：身につく電子工学実験コースの開発．日本工学教育協会 平成 9 年度工学・工業教育研究論文集 pp.287－290
19) 後藤、米山、春名、寺沢、菅野（1998）：発見の喜びのある新電子工学基礎実験．工学教育 46 巻 3 号 pp.24－28
20) 小泉(1997)：図解でわかる サーバーのすべて 日本実業出版社 pp.33
21) 社団法人 電子情報通信学会（1988）：電子情報通信ハンドブック オーム社 pp.1978

問合せ先
〒194-8610 東京都町田市玉川学園６－１－１
玉川大学 工学部 ３３６
坂東 正規
Tel:042-739-8402
Fax:042-739-8858
E-mail: van@fuzzy.ele.eng.tamagawa.ac.jp
sugano@eng.tamagawa.ac.jp

WC2−1

大量の入力ユニットを必要とするニューラルネットワークの学習

Hybrid Neural Networks of Multi-Layer Network and Kohonen Network for the Data needs a Large Number of Input Units

小野 能嗣[1] 池田 進也 菊池 浩明 中西 祥八郎
Yoshitsugu Ono Shinya Ikeda Hiroaki Kikuchi Shohachiro Nakanishi
東海大学工学部電気工学科
Faculty of Engineering, Tokai University

Abstract The main purpose of this paper is to propose the hybrid learning algorithm for data of a large information content which needs a large number of input units. For this aim, we use kohonen network to classify data of large information content. We verify that the hybrid neural network can learn effectively the data of large information content.

1 はじめに

ニューラルネットワークは現在様々な手法が提案されている．しかし，画像データのように大量の入力ユニット数を必要とする大情報量データ用いる場合，階層型ネットワークにおける学習は非効率である．また，顔画像認識のように学習に用いる入力パターンに共通な特徴を持つ場合，学習に不要な入力ユニットというものが存在してくる．

一方，コホーネンネットワークは競合型学習機能を持っており入力データを与えることによって競合層において特徴地図を描くことができる．本研究では大量のユニット数を使用する階層型ニューラルネットワークに対して学習を行う前にコホーネンネットワークを用いて各入力パターンの情報を圧縮させることを目的とする．また，このコホーネンネットワークで圧縮された入力情報を遺伝的アルゴリズムを用いて復元させることも試みる．

2 学習アルゴリズム

2.1 学習ネットワーク

学習には図1のようにコホーネンネットワークと階層型ネットワークを組み合わせたものを使用する．階層型ニューラルネットワークに大情報量データを入力することは認識としては可能であるが極端に時間がかかってしまう．また，大量の入力ユニットを必要とする割にはパターン数が少ない場合，学習効率としても悪くなってしまう．しかし，大情報量データを扱う際に学習に必要なのは入力データそのものよりも入力パターンの特徴である．そこで，入力パターンの特徴を抽出するためにコホーネンネットワークを用いることにする．コホーネンネットワークは教師信号を持たずに互いの入力パターンを類別する自己組織機能を持っている．また，コホーネンネットワークの訓練は階層型ネットワークの学習回数と比較して早期段階で識別が可能である．そこで，本研究では学習の前段階にこのコホーネンネットワークを使用し，各パターンの類別を行った後に階層型ネットワークでの学習を行う方式を採用する．

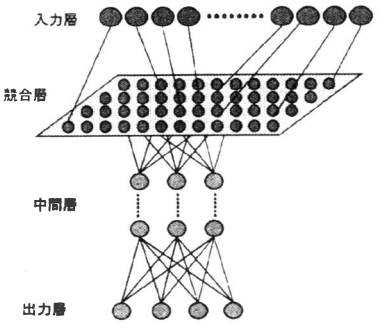


図 1: ネットワークの概形

2.2 コホーネンネットワーク

コホーネンネットワークにおいて入力パターンは類似するもの同士に勝利ユニットを持つことになる．しかし，その際に異なるパターンにおいても同じユニットが勝利ユニットとなってしまう可能性がある．本システムにおいてコホーネンの勝利ユニットは階層型ネットワークの入力ユニットになるため，異なるパターン同士から同じ勝利ユニットがでることは矛盾した入出力関係が出ることになってしまう．そこで本手法では競合層における勝利ユニットにランクづけをし，同じパターンが同じランキングを持たないようにする．

入力値 x_i と j 番目の競合ユニットと結合する重みを w_{ij} とすると以下のような距離関数 D_j を求める．

$$D_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^{I} |x_i - w_{ij}|} \tag{1}$$

ただし I は入力ユニット数とする．ここで従来ならば

[1] 著者の小野は現在 (株) 日立製作所に勤務しており，本稿は東海大学在籍中の研究をまとめたものである．

D_jの値が一番大きいユニットを勝利ユニットとして出力値を$y_j = 1$にし，そのユニットに結合する重みとその近傍ユニットに結合する重みの更新を行うが，勝利ユニットを一つのみにしてしまうと異なるパターン同士が同じ勝利ユニットを持ってしまうため，本手法ではその確率を減らすために勝利ユニットを複数取り上げ，それぞれにランキングづけをする．各ランキングによる出力値y_jは以下の式によって決まる．

$$y_j = \begin{cases} 0 & (n > N) \\ 1 - \frac{n-1}{N} & (n \leq N) \end{cases} \quad (2)$$

ここでD_jの値が最も少なかったユニットを勝利ユニットとし，そのユニットにのみ以下のような更新を加える．

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha(t)(x_i - w_{ij}(t))y_j \quad (3)$$

ただし，$\alpha(t)$はt回目の訓練における係数とする．

3 GAによる入力データの復元

ここで遺伝的アルゴリズム (以下GA) を用いてコホーネンネットワークによる入力データの復元方法を説明する．遺伝子座の中には復元を行う入力データの値がはいる．フィットネス関数はコホーネンネットワークにより求められた勝利ユニットの距離関数D_jとGAにより求められたデータを入力した勝利ユニットの距離関数d_jの誤差から以下のように求められる．

$$d_j = \frac{1}{1 + |d_j - D_j|} \quad (4)$$

この距離関数の誤差が縮まるようにGAの探索を行う．

4 画像認識への応用

ここで本システムの有効性を確認するために顔画像認識でシミュレーションを行った．学習には20個の顔画像を用い，教師信号は出力層ユニット20個をそれぞれ一つずつ出力値を持つを持つようにした．顔画像はそれぞれ200 × 160のビットマップ用い，32000個の入力ユニットを使用する．学習後にGAを用いて画像の復元を行ったところ元通りの画像に復元できたことを確認した．ここで従来の階層型ネットワークで学習した時との学習効率を比較してみることにする．従来の階層型ネットワークの入力-中間層間と中間-出力層間のユニット数とパターン数や学習回数を合計すると処理ユニットは以下のようになった．

$$\begin{aligned} & (I*J + J*K)*p*e_m \\ = \ & (32000*30 + 30*20)*20*1000 \\ = \ & 19212000000 \end{aligned} \quad (5)$$

ここでJは中間層のユニット数を表し，Kは出力層のユニット数を，pはパターン数を，e_mは学習回数を意味する．次に本システムにおける処理ユニットは以下のようになる．

$$\begin{aligned} & (I*L)*p*e_k + (L*J + J*K)*p*e_m \\ = \ & (32000*100)*20*100 \\ & +(100*30 + 30*20)*20*1000 \\ = \ & 6472000000 \end{aligned} \quad (6)$$

Lは競合層のユニット数を表し，e_kはコホーネンの学習回数を意味する．表1に従来の階層型と提案ネットワークの処理ユニットと処理時間を記しておく．表1

表 1: 提案ネットワークの効率比較

	従来の階層型	提案ネットワーク
処理ユニット	19212000000	6742000000
処理時間	42266[sec]	9708[sec]

の結果を比較してみてもわかるようにコホーネンネットワークの学習回数が極端に少ないために処理ユニット数が減少したといえる．

5 結論

大情報量データの学習にコホーネンネットワークと階層型ニューラルネットワークを階層的に接続するシステムを提案した．本手法を用いることにより顔画像のような共通な特徴を持った入力データをより効率よく学習させることができた．また，GAを用いて学習後のネットワークから入力データを復元させることもできた．コホーネンネットワークにおいて重複した勝利ユニットを持たないために勝利ユニットにランキングづけをしたが完全なる勝利ユニットの重複は避けられていないため新たな勝利ユニットの決定法が今後の課題となる．

参考文献

[1] 小野 能嗣, 菊池 浩明, 上村 龍太郎, 中西 祥八郎,"ニューラルネットワークによるファジィ推論の抽出", 第15回ファジィシステムシンポジウム, pp. 495–498, 1999.

東海大学工学部電気工学科
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117
0463-58-1211 内線 4025
yoshi@ep.u-tokai.ac.jp

WC2−2

複数種類の知識を扱った多種入出力ニューラルネットワーク

Neural Networks with Multi-kind Inputs

小野 能嗣*[1] 菊池 浩明* 上村 龍太郎** 中西 祥八郎*
Yoshitsugu Ono* Hiroaki Kikuchi* Ryotaro Kamimura** Shohachiro Nakanishi*

*東海大学工学部電気工学科
*Faculty of Engineering, Tokai University
**東海大学計算センター
**Information Science Laboratory, Tokai University

Abstract The main purpose of this paper is to construct the neural network which can unify and recognize the different kinds of information for an object as the same thing. To achieve this purpose, we use three layers network in which the units in a hidden layer are only connected with the units in its neighborhood. We verify that the network proposed in this paper can unify the different kind information for an object at hidden layer by the simulations, as human brain. Finally, we verify that the neural network proposed in this paper have a filtering function and associative function for noised input data.

1 はじめに

人間の脳は色，形，音など種類が異なる知識を自然と識別し，種類が異なっていても意味が同じ物に対しては同一なものと判断することができる．一方，ニューラルネットワークは脳をモデルに作られた手法であり，パターン認識等に使用することは可能ではあるが，人間の脳のように複数種類の知識を同時に学習する機能は持っておらず，通常は一種類の知識を学習するために扱うものである．我々はニューラルネットワークの入出力層に複数の入出力領域を設け，それぞれに異なる種類の知識を入力させることのできるネットワークを提案してきた [1]．本稿では，これまで提案してきた多種入出力ネットワークのフィルタリング機能と連想機能に着目し，ノイズで汚れたデータの認識や異種情報への連想能力に応用することを目的とする．

2 多種入出力ネットワーク

2.1 学習ネットワーク

本手法で用いるネットワークは図1のように構成されており，入力層と出力層には複数の入出力領域が作成できるものとする．図1では2つの入出力情報を例に各領域を確保している．各層間のユニット同士は全て結合されており，中間層ユニットにおいては8近傍にあるユニットとも結合されているものとする．このネットワークの入出力層に複数の入出力領域を作成するのは種類の違う情報がそれぞれ違う入力領域に入力し，出力においてもそれぞれ違う出力領域に出力するためである．中間層に関しては全ての知識に対して共通なユニットを使用するが，ここで，同じ意味を持つ知識は同じユニット，または近傍のユニットに発火するように知識を一致させる操作を行う．

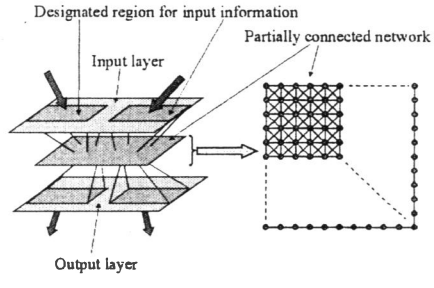


図 1: 学習ネットワーク

2.2 学習手順

異なる種類の知識の中で意味が同じものに対しては同じ中間層領域内に発火させることをここでは一致操作と呼ぶことにする．複数種類の情報を学習する際にそれぞれの情報に番号を予め決定し，学習情報1に関しては基本知識と名付けることにした．学習アルゴリズムは以下のようになる．

Step 1: 入力層と出力層にそれぞれ N 個の入出力領域を割り当てる．

Step 2: 基本知識を b 回学習させる．学習回数 b はあらかじめ決めておくものとする．

Step 3: 学習情報2から学習情報 N までを順番にそれぞれ b 回学習させる．また，一致操作を用い

[1] 著者の小野は現在 (株) 日立製作所に勤務しており，本稿は東海大学在籍中の研究をまとめたものである．

て中間層の発火領域を基本知識に近付けるようにする．

Step 4: 中間層同士の関係が強いものには結合重みを持たせる．

Step 5: 終了条件を満たしていれば終了．満たしていなければ Step 2 に戻る．

Step 3 において N個目の学習情報を終了した段階で基本知識の学習内容から結合重みが大きく変化してしまうため，Step 2 から Step 4 の操作は誤差が収束するまで，何回か繰り返すことにする．

2.3 基本知識の重みの更新

基本知識の重みの更新は以下のように行う．まず，出力層と中間層の結合重みの更新は誤差逆伝搬法により，出力と教師信号の誤差を減少させるようにする．次に中間層内の結合重みも誤差逆伝搬法を用いて更新するが，結合のないユニット同士は更新を行わないものとする．そして，中間層から入力層に関しても同じく誤差逆伝搬法を用いるが，それと平行してエントロピー法を用いることにする．ネットワークに部分結合ネットワークを中間層として入力層と出力層を設けたのは，部分結合ネットワークだけでは全ての情報が出力に伝わりにくいためである．部分結合ネットワークの入力はできるだけ少ない方が望ましいが，パターンごとの識別も必要である．そこでエントロピー法を用いて誤差逆伝搬法と同時に部分結合型ネットワークの入力を減少させることにする．エントロピー法のエントロピー Hは次のように定義される．

$$H = -\sum_{j=1}^{J} p_j \log p_j \tag{1}$$

ここで，p_jは次式のように与えられる．

$$p_j = \frac{y_j}{\sum_{h=1}^{J} y_h} \tag{2}$$

中間層の発火値のエントロピー Hを最小化させることがエントロピー法の目的であるため，中間層から入力層の結合重みの更新式Δw_{ij}は次のように定義される．

$$\Delta w_{ij} = \alpha \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + \beta \frac{\partial H}{\partial w_{ij}} \tag{3}$$

Eは教師信号と出力との二乗誤差を表し，α，βはそれぞれ二乗誤差 E と エントロピー H にかかる微分係数を表す．エントロピー法を用いることにより，学習の初期状態で発火していた中間層のユニット数が図2のようにしだいに減少し，最終的にはわずかな中間層しか発火しないようになる．この操作を誤差逆伝搬法と平行して行っているため中間層の発火ユニット数が減少すると同時に，二乗誤差 E を減少する競合作用が働き，中間層の発火ユニットは自己組織的に各々の発火ユニットをパターンごとに持つことになる．

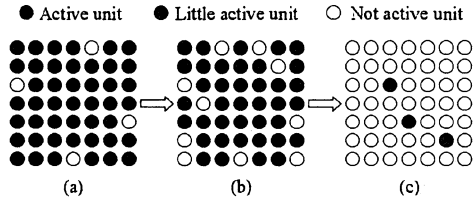


図 2: 中間層の出力の変化

2.4 基本知識以外の学習情報の重みの更新

基本知識以外の学習情報に対する重みの更新について説明する．まず出力層と中間層の結合重みの更新は基本知識と同様に誤差逆伝搬法を用いる．中間層ユニット同士の重みの更新は誤差逆伝搬法と平行して異なる種類の知識を同じユニットに発火させるための一致操作を行なう．基本知識と，n 番目の知識の中間層の発火値をそれぞれ z_{1k}、z_{nk} とすると発火誤差 D は次のようになる．

$$D = \sum_{k=1}^{K} \frac{1}{2}(z_{nk} - z_{1k})^2 \tag{4}$$

この発火誤差は同じ意味を持つ知識同士が中間層のユニット k においてどれだけの発火値の誤差が出ているかを表す．よって，中間層ユニット同士の重みの変化量ΔW_{jk}は次のようになる．

$$\Delta W_{jk} = \begin{cases} 0 & (W_{jk} = 0) \\ \alpha \frac{\partial E}{\partial W_{jk}} + \gamma \frac{\partial D}{\partial W_{jk}} & (W_{jk} \neq 0) \end{cases} \tag{5}$$

αとγはそれぞれ二乗誤差 E と発火誤差 D の微分係数を表す．発火誤差 D の結合重み W_{jk} による微分は次のように導出される．

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial W_{jk}} &= \frac{\partial D}{\partial z_{nk}} \frac{\partial z_{nk}}{\partial Z_{nk}} \frac{\partial Z_{nk}}{\partial W_{jk}} \\ &= (z_{nk} - z_{1k})(1 - z_{nk}) z_{nk} y_j \end{aligned} \tag{6}$$

この一致操作を用いることによって学習の初期段階では別々のユニットで発火していた同じ意味を持つ知識も学習が進むにつれて次第に同じユニットで発火するようになる．そして中間層から入力層に結合する重みの更新は以下のように誤差逆伝搬法とエントロピー法と一致操作の三つを同時に行う．

$$\Delta w_{ij} = \alpha \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + \beta \frac{\partial H}{\partial w_{ij}} + \gamma \frac{\partial D}{\partial w_{ij}} \tag{7}$$

3 文字認識によるシミュレーション

ここでは，学習に用いる学習情報はアルファベットの大文字と小文字をそれぞれビットマップで表したものの 2 種類である．教師信号は入力と同じオートエンコーダを用い，図3のようにして入出力領域を決定する．我々人間の目でみればアルファベットの"A"と"a" はおなじものと判断できるが，ネットワークからしてみればこの二つは種類が違う情報と判断するため，本シミュレーションでは大文字と小文字を異種情報として学習させることにした．入力層と出力

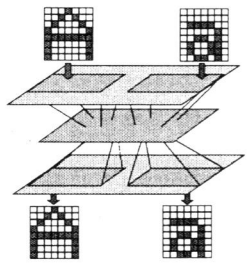


図 3: オートエンコーダ

層は 7 × 8 の 56 ユニットをそれぞれ入出力領域として二つずつ設定し，中間層のユニット数は 8 × 8 の 64 ユニットを用いる．学習内容はアルファベットの"A"，"C"，"G"，"M"，"N"，"O"の 6 個の大文字と小文字を使用し，基本知識はアルファベットの大文字とする．二乗誤差がある程度減少したところで文字が認識されたことを確認し，そのときの中間層の発火領域について調べた．図 4に大文字と小文字のおおよその発火領域を示す．結果からわかるようにほとんど

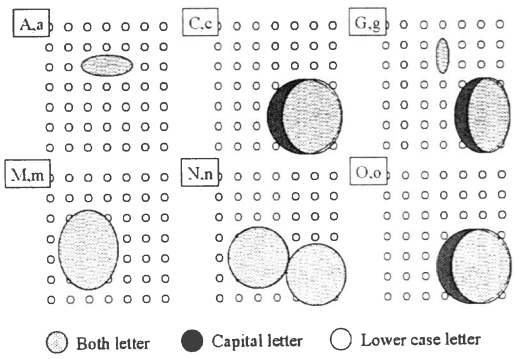


図 4: 大文字と小文字の発火領域

のパターンが同じ意味を持つ知識に対して同じユニットで発火している．

以上のようにしてシミュレーションを行い，複数種類の知識を各入出力領域からネットワークに学習させ，中間層においては同じ意味をもつ知識をほぼ同じ領域に発火させることができた．

3.1 ノイズ付きデータ及び部分的データ

ノイズ付きデータを入力し，中間層の発火ユニット及びネットワークの出力値を確認したところ，ノイズ付きデータを入力しても中間層内において学習結果とほぼ同じ中間層領域が発火した．つまり，ノイズで汚れたデータにおいても正確な出力データに復元することができるわけである．また，図5のような部分的な入力データに関してもそれぞれ 6 文字の中での独自の特徴を入力するため，正確に認識することが出来るといえる．図では"A" の上の三角形の部分だ

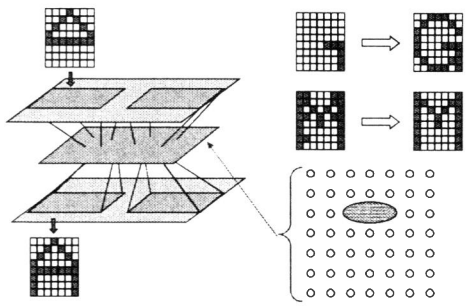


図 5: 未知入力データの認識

け入力しているが，中間層においては同じ発火領域で発火し，100.0%の復元率で出力値を正確に復元できたといえる．ここでいう復元率は出力値が 0.7 を越えれば 1 に，0.3 以下ならば 0 にしたときの教師信号と一致した割合を意味する．また，図5のように"G" の右下のほんの一部分のみの入力においても他の学習データにはないその文字の特徴を捉えているために 84.0%の復元率で復元することができた．他の文字に関しても学習データにないその文字独自の特徴さえ入力すれば正しく認識することができたといえる．

全てのデータが正しく認識出来たのは，ノイズで汚れたデータまたは部分的なデータを入力しても，中間層の発火領域がほぼ共通なためである．

3.2 異種情報の連想機能

ここでは，一致操作での効果を利用し，異種情報への連想を行った．図 6のように基本知識を基本知識の入力領域から入力し，順伝搬操作を中間層まで行った．その後中間層で発火した際に出力層へは異種情報の出力領域へ伝搬し，出力を求める．アルファベットの大文字である基本知識による中間層の出力値を z_{1k}，学習情報 2 である小文字の出力層における l番目の出力ユニットの出力値を u_{2l}とすると他種情報へ連想させるために中間層内のユニットの出力値を $z_{1k} = z_{2k}$ と変換し，以下のようにネットワークの出力を求める．

$$u_{2l} = f(\sum_{k=1}^{J} z_{1k}\omega_{kl}) \tag{8}$$

ただし，ω_{kl} は中間層と出力層の結合重みを表す．ア

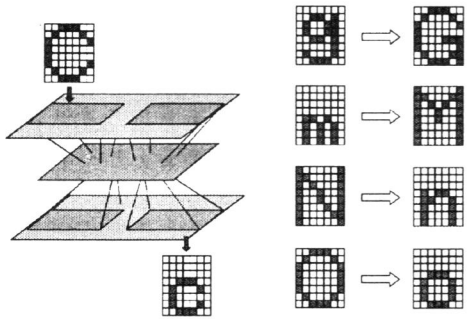


図 6: 異種情報への連想

ルファベット 6 文字の大文字を入力したところ，中間層における発火領域が同じなため，全てのパターンにおいて 100%の復元率で小文字を出力した．また,"C" と"O" のようにほとんど発火領域が同じパターンにおいても異種情報へ連想させることができた．そして学習情報 2 である小文字を入力させてもすべてのパターンにおいて 100%の復元率で大文字を復元させることができた．これらは中間層内で異種情報が同じ中間層領域で発火したためにできたことである．これらのことを利用して，ノイズの入った入力データにおける異種情報への連想を行ってみた．ノイズの入ったデータや部分的な入力データを入力させても中間層の発火領域は学習したデータと同じ中間層の発火領域を持つわけである．また，一つの学習情報を入力させて中間層内で出力を他の学習情報へ変換させても共有している中間層領域が同じのため，正確に意味の同じ学習パターンがでることがわかった．そこで図 7のように一つの入力領域にノイズ付きデータを入力し，異種情報へ出力を変換させたところ，表 1のような復元率となった． 例えば，図で入力した"G" のデータ

表 1: ノイズデータを入力したときの異種情報への連想の復元率

文字	ノイズ率	大文字から小文字	小文字から大文字
A	10.7%	78.6%	85.8%
C	3.5%	100.0%	100.0%
G	26.7%	98.3%	78.6%
M	3.5%	98.3%	98.3%
N	3.5%	98.3%	100.0%
O	3.5%	100.0%	100.0%

には 26.7%のノイズが含まれており，98.3%の復元率で大文字"G" を復元し，78.6%の復元率で小文字"g" を連想させることができた．また，他のパターンに関しても表 1でわかるようにノイズ付きデータに対して正確に復元させることができた．以上のことより，一つの学習情報が曖昧であってもそのパターンの特徴さえ捉えていれば，そのパターンは正確に復元でき，異種情報への連想もすることができた．

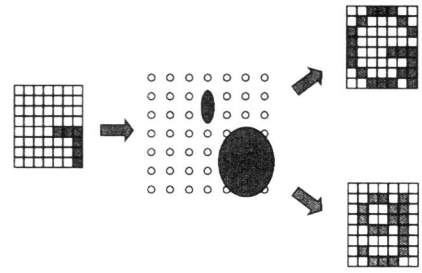


図 7: 連想情報への復元

4 結論

本研究ではニューラルネットワークに複数の入出力領域を設け，同じ意味を持つ知識には同じ中間層領域に発火させることに試みた．本手法を用いることにより，異なる種類の知識は同じ中間層領域で発火させることができ，文字認識でシミュレーションしたところノイズつきの入力データや部分的なデータに関しても正確に復元し，フィルタリング機能があることが確かめられた．また，ノイズに汚された学習情報を入力した際に中間層内で他の学習情報へ連想もできることも確認した．

参考文献

[1] 小野 能嗣, 菊池 浩明, 上村 龍太郎, 中西 祥八郎, “ニューラルネットワークにおける多種入力”, 第 15 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 171–174, 1999.

[2] Yoshitsugu Ono, Hiroaki Kikuchi, Ryotaro Kamimura and Syohachiro Nakanishi,"Recognition of multi-kinds inputs at hidden layer of neural networks", 3rd International Conference on Engineering Design and Automation, pp. 420–426, 1999.

[3] 小野 能嗣, 菊池 浩明, 上村 龍太郎, 中西 祥八郎, “ニューラルネットワークにおける中間層の多種入力認識”, 電子情報通信学会技術研究報告, NC 99-58, pp. 31–37, 1999.

[4] Y.Ono, H.Kikuchi, R.Kamimura and S.Nakanishi, "Unification of Multi-Kind Information in Partially Connected Neural Networks", Group Technology/Cellular Manufacturing World Symposium - Year 2000, pp. 321–326, 2000.

東海大学工学部電気工学科
〒 259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117
0463-58-1211 内線 4025
yoshi@ep.u-tokai.ac.jp

WC2−3

ニューラルネットワークによる識別可能な入力の探索

Identification of Input Data of Neural Networks producing the Same Output After Lerning

小野 能嗣*[1] 菊池 浩明* 上村 龍太郎** 中西 祥八郎*
Yoshitsugu Ono* Hiroaki Kikuchi* Ryotaro Kamimura** Shohachiro Nakanishi*
*東海大学工学部電気工学科
*Faculty of Engineering, Tokai University
**東海大学計算センター
**Information Science Laboratory, Tokai University

Abstract The purpose of this paper is to search the input data which can identify each pattern. For this purpose, we use the genetic algorithm. We pay attention to hidden layer, and search the input data. We evaluate the produced input data from GA by the output of hidden units. We also compare the effect two neural networks with back propagation and the original entropy algorithms.

1 はじめに

現在，ニューラルネットワークはパターン認識等の知識獲得手法に利用されている．それは例えば入力データが部分的に欠けていたり，ノイズを含んでいても正しく認識できるという特徴を持っている．しかし，その認識を正確に行うことができる適応範囲というのは特に考えられていない．階層型ニューラルネットワークの学習は出力から入力の方向に行われ，データは入力から出力へと伝搬するが，この出力から入力を求めることは非常に困難とされてきた．これが出来るとすれば画像の復元等にも活用できるわけである．階層型ニューラルネットワークの一つの入力データからは一つの出力データしか存在しないが，一つの出力データからは複数の入力データが存在する．つまり，類似した入力は同じ出力に対応しているわけである．本稿では，遺伝的アルゴリズム (以下 GA) より，学習後の階層型ニューラルネットワークから入力パターンの入力を探索することを目的とする．

2 提案システム

2.1 システムの流れ

ニューラルネットワークの学習には学習用データが必要となる．学習用データによる全てのパターンの入出力関係を対応させることがニューラルネットワークの目的である．しかし，この学習後のニューラルネットワークでは同じ出力に基づく入力パターンは複数存在することもある．本稿では，この異なる入力パターンを GA により探索することを目的とする．システムの全体的な流れは以下のようになる。

Step 1: 学習用データとなる知識の入力と教師信号を決定しておく．

Step 2: 階層型ニューラルネットワークで学習用データを学習させる．

Step 3: 各パターンの中間層の発火ユニット求める．

Step 4: 遺伝的アルゴリズムを用いて識別可能な入力範囲を抽出する．

Step 5: 入力パターンを抽出すれば終了．

2.2 GA による探索法

学習後の階層型ニューラルネットワークは各パターンに固有の中間層の発火ユニットを持つことになる．中間層の出力値は各パターンを識別しているため，中間層ユニットの出力値が同じまたは近い値であればネットワークの出力値も同じになるわけである．この中間層ユニットの出力値が同じになる入力範囲を GA により探索する．コーディング方法は図 1のように入力ユニットの数だけ存在する遺伝子座に対し，0 または 1 の入力値が入る．GA の探索法は選択，交叉，突然変異を繰り返し行い，評価基準はニューラルネットワークの中間層の出力値とする．GA のフィットネス関数

[1]著者の小野は現在 (株) 日立製作所に勤務しており，本稿は東海大学在籍中の研究をまとめたものてある．

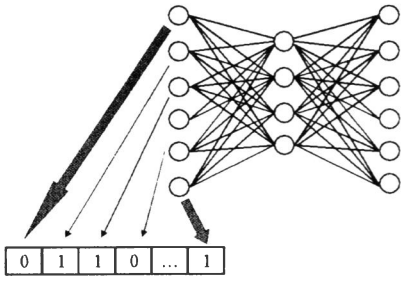


図 1: コーディング方法

は以下のようになる．

$$fitness = \sum_{j=1}^{J}(1 - ||y_j - d| - Y_j|) \qquad (1)$$

y_jは学習用データからの中間層の出力値を表し，Y_jはGA により発生したデータによる中間層の出力データを表し，Jは中間層のユニット数を意味する．また，dは毎回の探索の微小誤差を表す．ここで微小誤差 d を用いるのは複数の入力を抽出したいためである．$d = 0$にすると GA により求められる解は当然ニューラルネットワークで学習用データを入力したパターンが最高のフィットネス値を持つことになる．この場合，学習用データよりもフィットネス値が高い個体は存在しないわけである．そこで GA のフィットネス関数にわずかな誤差を与えて，学習用データとは異なる入力データを抽出するのである．d を考慮したフィットネス値の高い個体を抽出した後に，この d をパラメータとして増加させながら再び別の個体を抽出する．これを繰り返すことによりそれぞれ異なる入力パターンを複数個抽出することができるわけである．ここで得られたフィットネス値の高い個体を発生データと呼ぶことにする．d の値を増加させて発生データがネットワークにおいて正確な出力を出さなくなったところで GA の探索を終了する．GA の流れは以下のようになる．

Step 1: 初期集団生成として個体に 0 か 1 の乱数を与える．この個体が発生データとなる．

Step 2: 選択，交叉，突然変異の順に GA の操作を行う．

Step 3: GA によって得られたフィットネス値が最も個体を獲得する．

Step 4: d の値を増加させ，Step 1 に戻って再び GA の探索を行う．

Step 5: 発生データからネットワークの出力値が正確に識別されなくなったところで終了する．

これらのことより GA で獲得した入力パターンが学習用データでの中間層の出力値に近い値を持てば高い評価が得られるわけである．つまり微小誤差 d が適用できる範囲の限界まで探索を行うのである．

3 エントロピーアルゴリズム

3.1 BP 法における問題点

ここでBP 法による中間層の出力値について考えてみる．BP 法の学習後に求められた中間層ユニットの出力値は図 2のようにばらついた値を持っている．シグモイド関数の性質からして図 3のように中間層の出力値が 0.5 あたりの閾値の境目になってしまうとΔw_jによる出力値Δy_jの範囲は大きなものになってしまう．このため，同じ出力値を持つ入力パターンは極端に少なくなってしまう．つまり BP 法によって学習された

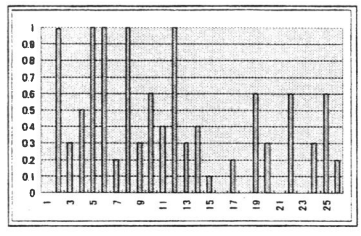


図 2: BP 法による中間層の出力例

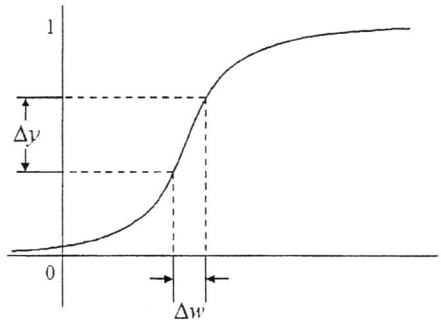


図 3: Δw_jによる出力値Δy_jの影響

知識は未知の入力に対してはそれほど許容範囲が広くないのである．

3.2 アルゴリズム手順

エントロピーアルゴリズムは中間層の出力値を集中させる効果を持っている．BP 法との違いは重みの更新の際に入力層と中間層間の更新に以下のような改良を加えることである．

$$\Delta w_{ij} = \alpha \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + \beta \frac{\partial H}{\partial w_{ij}} \qquad (2)$$

ここでαとβは係数を表し，w_{ij}は入力層から中間層の間の結合重みを表す．Eは教師信号との二乗誤差であり，通常の誤差逆伝搬法でも用いる方式である．Hは中間層の出力を次式のようにエントロピーで定義したものである．

$$H = -\sum_{j=1}^{J} p_j \log p_j \tag{3}$$

ここで，p_jは次式のように与えられる．

$$p_j = \frac{y_j}{\sum_{h=1}^{J} y_h} \tag{4}$$

このエントロピー法を用いることにより学習の初期段階では図2のように複数の発火ユニットを持っていたが，学習が進むにつれ図4のようにほんのわずかな発火ユニットを持つようになる．この手法を用いることにより，図5のようにΔw_jによる出力値Δy_jの範囲は小さく収まり，より多くの発生パターンが獲得できる．

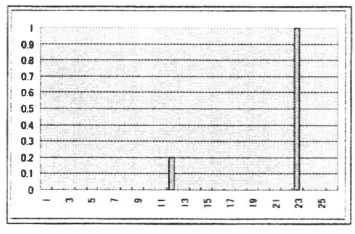


図 4: エントロピー法による学習後の中間層の出力例

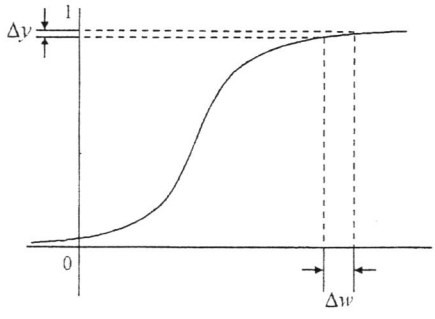


図 5: エントロピー法における出力値Δy_jの影響

4 シミュレーション

ここでは，アルファベットの文字認識のシミュレーションを行うことにする．アルファベットは26文字を使用し，図6のように入力データと教師信号が同じとなるオートエンコーダで学習を行う．入出力層のユニット数は56ユニット用い，アルファベットは7×

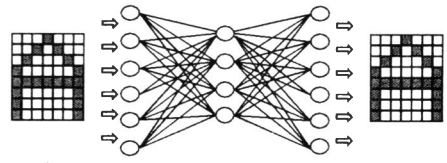


図 6: オートエンコーダ

8のビットマップで表すことにする．誤差が収束したところで学習を終了させ，この学習後の結果をもとにGAの探索を行った．フィットネス関数の微小誤差dを増加させて発生データが正確に認識できなくなったところでGAの探索を終了する．図7に学習用データの学習パターンと獲得した入力パターンの例を記す．図のように発生データは学習用データと異なっている

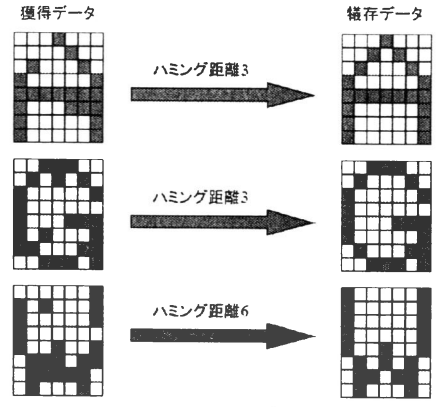


図 7: GAにより発生した入力パターン例

が，この発生データを学習後のネットワークに入力したところ中間層の出力値はほぼ同じ値を持ち，出力層において同じ出力値を出すことができた．ここで学習した全てのパターンの学習用データとGAにより発生した入力パターンの中のノイズ率eが最大なものを表1に記す．この表では発生したデータの中で最も学

表 1: 学習用データからの発生データの最大ノイズ率

文字	e	文字	e	文字	e
A	5.4%	B	3.5%	C	1.7%
D	3.5%	E	3.5%	F	3.5%
G	5.4%	H	5.4%	I	3.5%
J	7.1%	K	0%	L	3.5%
M	3.5%	N	5.4%	O	1.7%
P	1.7%	Q	1.7%	R	3.5%
S	3.5%	T	5.4%	U	0%
V	5.4%	W	10.7%	X	5.4%
Y	5.4%	Z	5.4%		

習用データから遠いものを記してある．表1でわかるように識別可能な入力は入力パターンに依存する．こ

こでわかることは学習したパターン同士が類似していればいるほどその解空間は狭くなるわけである．例えば"C"，"O"，"Q"のような類似した形を持ったパターンは他のパターンとの識別がとりにくいため，広範囲な探索ができなかった．また，"J"，"W"のような他にはない特徴を持った文字は比較的広範囲な探索ができたといえる．"K"や"U"に関しては学習用データ以外の入力パターンは発生しなかった．

次にエントロピー法で学習したときの同じシミュレーションを行った．表2に学習用データからのGAにより獲得した入力パターンのノイズ率eが最大なものを記す．この表でわかるように従来のBP法と比べ

表2: エントロピー法による獲得データの最大ノイズ率

文字	e	文字	e	文字	e
A	12.5%	B	5.4%	C	7.1%
D	7.1%	E	8.9%	F	7.1%
G	12.5%	H	10.7%	I	7.1%
J	10.7%	K	7.1%	L	7.1%
M	8.9%	N	8.9%	O	7.1%
P	5.4%	Q	12.5%	R	16.0%
S	7.1%	T	10.7%	U	10.7%
V	7.1%	W	10.7%	X	10.7%
Y	7.1%	Z	7.1%		

てエントロピー法で行った学習のほうが学習用データと異なる入力パターンが得られるといえる．図8に発生したデータの例を示す．図でわかるように発生した

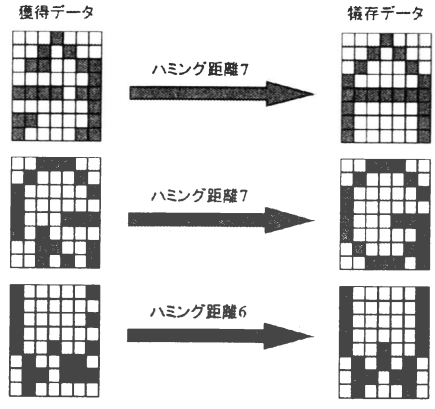


図8: エントロピー法を用いて発生した入力パターン例

データは学習用パターンと異なっていてもそのパターンの特徴をとらえている．例えば，"A"に関していえば図で取り上げた発生データ例以外のデータを見てもほとんどが"A"の上部の三角は残ったままである．この上部の三角の特徴はアルファベット26文字において"A"以外にはないためである．"C"と"O"においては二つの識別が困難なため原型から無関係な部分にノイズを含んだデータがほとんどだった．また，"Q"の発生データには全てに右下の斜め線が残っていた．図の"G"では発生データに右下の部分がついており，"W"に関しては原型が崩れないほどのノイズで汚れたデータが抽出できた．全ての発生データを調べたところ，発生されたデータは学習用データの独自の個性を残した部分が抽出されたことがわかった．つまり，GAを用いて探索した入力というのはその学習用パターンの特徴以外である，識別に不要な入力データであることがわかった．学習用パターンの識別に不要な部分が多ければそれだけ多くの入力が抽出できるといえる．また，表1と2を比較すると従来のBP法よりもエントロピー法の学習のほうがノイズに強いことがわかった．

以上より本システムによるニューラルネットワークの入力を探索することができ，従来のBP法とエントロピー法の学習後における入力パターンの比較もできた．

5 結論

本稿では，学習用データからニューラルネットワークで学習を行い，その学習結果を評価基準にして入力パターンの入力を探索することに試みた．本システムを用いることによりニューラルネットワークの学習結果から正しく認識できる入力パターンを抽出することができた．また，ここで探索した発生データは学習用データにおいてパターンを識別する要素が多いほど多くの入力が抽出できることがわかった．本手法を用いることによりノイズを含んだ画像の復元や中間層の出力値による画像の圧縮を行うことが今後の課題となる．また，従来のBP法とエントロピー法を比較し，エントロピー法のほうがBP法よりも認識できる入力が広いこともわかった．

参考文献

[1] 小野 能嗣，菊池 浩明，上村 龍太郎，中西 祥八郎，"ニューラルネットワークによるファジィ推論の抽出"，第15回ファジィシステムシンポジウム，pp. 495–498，1999.

東海大学工学部電気工学科
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117
0463-58-1211 内線 4025
yoshi@ep.u-tokai.ac.jp

WC3−1

階層型ニューラルネットワークにおける中間層ユニット数の特性

The Design of Neural Networks Structure

大村 明弘　小野 能嗣　菊池 浩明　中西 祥八郎

Akihiro Ohmura　Yoshitsugu Ono　Hiroaki Kikuchi　Shohachiro Nakanishi

東海大学工学部

Faculty of Engineering, Tokai University

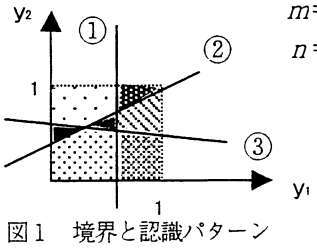
Abstract: The structure optimization of multi-layer neural network is one of the most general problems. This paper is geometrically analyzing learning ability of multi-layer neural networks to optimize the number of hidden units.

1．はじめに

階層型ニューラルネットワーク（N.N.）は脳をモデルに構築されたシステムでありパターン認識に有力である反面、ネットワークの学習能力に密接に関係する中間層構造は、技術者の感と経験で決定されている。本稿では、N.N.の構造決定の指標として学習とそれに必要な中間層ユニット数について検討する。

2．中間層構造とクラス認識

N.N.（中間層ユニット数m、出力層ユニット数n）における出力層の出力は中間層空間（m次元）中のn個の境界により表現される。



$m=2$,
$n=3$

図1　境界と認識パターン

中間層ユニット数2個、出力層ユニット数3個のN.N.について考えると、図1のように中間層空間（2次元）は3個の境界により最大7個の領域に分離可能である。これは、このN.N.が最大7種類の教師信号クラスについてパターン認識できることを意味している。

ここで重要なことはm次元空間においてn個の境界を用いて空間を分離した時、分離可能な最大数S_{mn}は

$$S_{mn} = \sum_{i=0}^{m} {}_nC_{m-i} \quad \cdots (1)$$

となることである。

よって、実際に学習する教師信号クラスの数をP_t個とすると、学習に成功する最低条件として以下のようなことが言える。

$$P_t \leqq S_{mn} \quad \cdots (2)$$

この条件をグラフにすると図2のようになる。

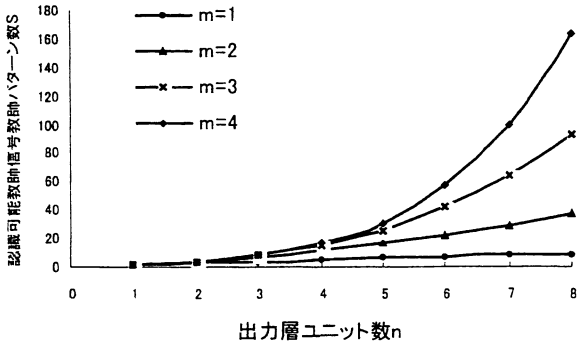


図2　中間層構造と認識能力の限界

図2はN.N.が学習によって認識可能な教師信号クラス数と出力ユニット数の関係を中間層ユニット数ごとにグラフにまとめたものである。この図より、学習によりパターン認識に成功する教師信号クラスの数は中間層ユニット数mによりかなり制限されていることがわかる。

3．入力パターンの内部表現

(2)式で表されるクラス分割の条件を満たせばN.N.の中間層空間は、教師信号のクラスごとに分割できる。しかし、以上の条件は学習が成功するための必要条件であり、条件(2)式だけからは学習が成功するのに中間層ユニット数が十分かどうか断定できない。

以下では条件(2)式を基に、N.N.の学習能力における中間層ユニット数と入力データの関連性について考察する。条件(2)式において学習が収束するということは、中間層空間内において教師信号クラスごとに分割された領域に入力空間からの各入力パターンの写像が適切に属するようにできるということである。よって、仮に各入力パタ

ーンの中間層空間への写像が自由に調整できるならば条件(2)式を満たすようにさせることで学習は成功する。しかし、中間層空間内において、各入力パターンの写像は、互いに影響を及ぼしあう。つまり、中間層空間内において、各入力パターンの写像がどの程度お互いの行動を拘束し合うのかを調べることにより、N.N.の学習の困難さを調べることが出来る。

例として、入力層ユニット数2、中間層ユニット数2のN.N.について考える。中間層ユニットの入出力関数はシグモイド関数を用いる。各入力パターンの中間層空間への写像は、(3)式の各中間層ユニットへの全入力 u に依存する。ここで、(3)式を変形した(4)式 (u=0) を考えると、図4のように各入力パターンごとの全入力 u は(4)式との距離によって決定するといえる.

$$u = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 \quad \cdots (3)$$

$$x_2 = -\frac{w_1}{w_2} x_1 - \frac{w_0}{w_2} \quad (u = 0) \quad \cdots (4)$$

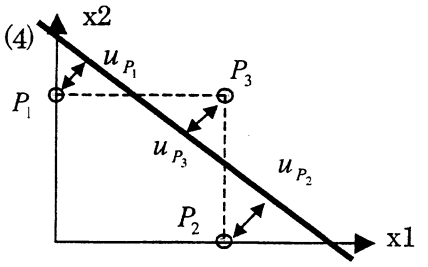


図3　入力データと中間層空間への像

本例では入力パターン P_1 と P_2 は線形独立である。この時、仮に学習入力パターンが P_1 と P_2, の2パターンだけであったなら、明らかに学習によって(4)式を適切に調整することにより、お互いに独立して自由に(4)式との距離 u を決定することができる。よって、学習する入力パターンが互いに線形独立なものだけなら条件(2)式は必要十分条件となり、これを満たすことによりN.N.は学習可能であるといえる。

実際に、条件(2)式を満たさないと、どんな簡単なデータでも学習に失敗する。図4は、8bit で各パターンそれぞれが1bit だけ1の最も単純な線形独立な入力データ8個を学習した時の誤差収束の様子を示したものである。

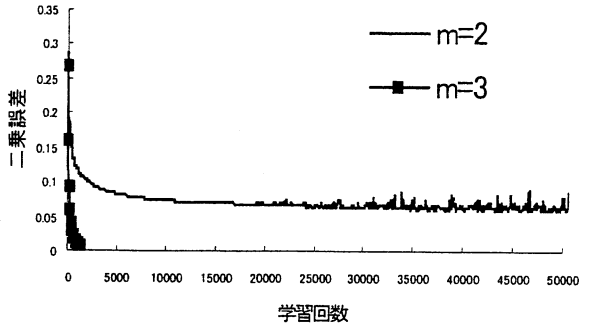


図4 中間層ユニット数と誤差習得

条件(2)式を満たす中間層ユニット数3個(m=3)のネットワークでは急速に誤差が収束するが、条件(2)式を満たさない中間層ユニット数2個(m=2)のネットワークでは誤差が振動し収束できなくなっている事が確認できる。

また、入力データが線形独立で条件(2)式を満たすならば、学習は入力データの複雑さに関係なく成功する。図5では、16bit の入力データで各入力データが1bit だけ1の最もシンプルなデータとランダムに生成された線形独立な入力データ各8個の誤差収束の推移を示している。

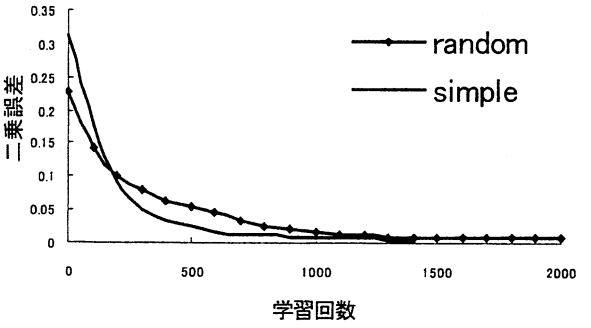


図5 入力データと誤差収束

ランダムな入力データは複雑なだけシンプルな入力データより誤差の収束にばらつきがあるが、入力データが線形独立で条件(2)式を満たすならば、誤差は一様に収束することが確認できる。

4．結論

学習する入力パターンが互いに線形独立なものだけなら、条件(2)式を満たすだけで階層型ニューラルネットワークによる学習が可能であるといえる。

しかし、図3の線形従属パターン P_3 は、P_1, P_2, を適切に学習したとするとそれに依存して決定し、必ずしも条件(2)式を満たすとは限らない。よって、入力パターンに線形従属なものがある場合には、線形従属の個数に依存して中間層ユニット数を増加させる必要がある。

以上の結果から、階層型ニューラルネットワークは、条件(2)式を基に入力データの線形独立性から中間層ユニット数を決定することができる。

[参考文献]

[1] 松葉 育雄, “ニューラルシステムによる情報処理”, 昭晃堂, 1993

[2] 今井 浩 他, “計算幾何学 (情報数学講座 12)”, 共立出版株式会社, 1994

[問い合わせ先]

〒259-1292

神奈川県平塚市北金目 1117

東海大学大学院工学研究科電気工学専攻電気第5研究室

Tel　0463-58-1211 ext 4025

WC3-2

ニューラルネットワークにおける獲得済み知識の利用

Pattern Recognition System by Acquired Knowledge in Neural Network

池田 進矢* 小野 能嗣* 菊池 浩明* 上村 龍太郎** 中西 祥八郎*
Shinya Ikeda Yoshitsugu Ono Hiroaki Kikuchi Ryotaro Kamimura Shohachiro Nakanishi

*: 東海大学工学部電気工学科
Faculty of Engineering, Tokai University

**: 東海大学計算センター
Information Science Laboratory, Tokai University

Abstract The Entropy Minimization Algorithm is a learning method that makes to be possible for interpretation of acquired knowledge in the neural network. We Propose the neural network system which can recognize the composed pattern of the training patterns. Finally, we verify that the system can recognize accurately the composed pattern of the artificial patterns.

1 はじめに

ニューラルネットワーク(N.N.)の最も顕著な特徴は、何らかの関係を持った一組のパターンを提示することにより、それらの間にある関係を自立的に獲得するところにある。この過程は学習と呼ばれ、N.N.が持つ特徴の中でも最も重要なものである。しかしながら、学習後の N.N.から、学習によって獲得された知識の内容を理解することは一般に困難である。本稿では、獲得した知識を活用して、未学習パターンの類推を行なうシステムを提案する。

2 学習アルゴリズム

階層型 N.N.では、学習によって獲得した知識がユニット間の結合重みや中間層ユニットの出力値として表現されると考えられている。しかし、これらはネットワーク内に広く分散されて表現されるため、獲得された知識を一見して理解することは困難である。そこで、中間層の出力にエントロピーの概念を導入し知識の表現をある程度集中化させることにより、N.N.が獲得した知識の理解が容易になる。

中間層ユニットの出力に関するエントロピー H は次式により定義される。

$$H = -\sum_i p_i \log p_i \tag{1}$$

$$p_i = \frac{y_i}{\sum_i y_i} \tag{2}$$

ここで、p_i は中間層の i 番目のユニットの出力を規格化したものであり、y_i は中間層の i 番目のユニットの出力である。

ここでは、中間層と出力層の間の学習には誤差逆伝搬法を用い、中間層と入力層の間の学習には誤差逆伝搬法とエントロピーの概念を併せて用いるものとする。入力層の j 番目と中間層の i 番目のユニットの間の結合重みを w_{ij} とすると、学習則は以下のように表される。

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t) \tag{3}$$

$$\Delta w_{ij} = -\alpha\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} - \beta\frac{\partial H}{\partial w_{ij}} \tag{4}$$

ただし、α および β は学習に関するパラメータである。

3 ダミーネットワーク

学習後の N.N.では、獲得した知識は結合重みと中間層ユニットの出力値によって総合的に表される。本稿で用いる学習アルゴリズムを使用すると、あるパターンに対してそれに対応した中間層ユニットのみが反応する仕組みになる。従って、獲得した知識が集中的に反応することとなる。この特性を生かして、未学習パターンが如何なるパターンであるかを獲得した知識から類推するシステムを提案する。

学習後の N.N.に学習パターンの合成パターンのような複雑なパターンを入力すると、N.N.は適切な解答を与えることが出来ない場合が多い。これは、学習後の N.N.には多数の知識が獲得されており、これらが互いに影響しあって、適切に反応しないものと思われる。そこで、図 1 に示すように入力パターンに関連する知識だけを抽出し、この知識を用いたダミーネットワークを構成する。このネットワークを用いて入力パターンの認識を行なう。

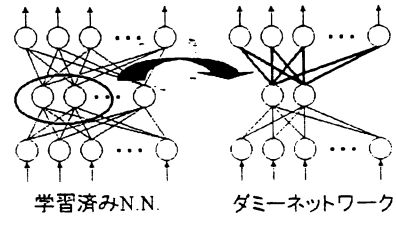


図 1 ダミーネットワーク

本システムの手順は以下のようになる。

(1)N.N.の出力で判定不可能の場合、中間層ユニットの出力値を調べる。

(2)中間層の全てのユニットがほぼ同等の小さな値を出力している場合は判別不能。特定の中間層ユニットが特異的に反応している場合には、上位数個を選び出す。(関連する知識の抽出)

(3)これらの結合重みを仮想的に用意したもう一つの階層型 N.N.に複写する。この際同じ位置にある出力側の結合重みの符号が反転していた場合にはプラスに統一する。(ダミーネッ

トワークの構成）
(4)中間層の出力を増幅しダミーネットワークに伝える。
(5)ダミーネットワークの出力を入力と比較する。入出力パターンが一致した場合は抽出した知識に対応するパターンの合成として捉える。
(6)手順(5)で判定不可能な場合には学習パターンでは判定不可能と判断する。
(7)ダミーネットワークをクリアにして次に備える。

4 シミュレーション

4.1 知識の獲得

まず、階層型 N.N.に、横 7 画素、縦 8 画素からなる 5 つのビットマップをエントロピー法により学習させた。図 2 に学習に用いたパターンを、表 1 に各々の入力に対する中間層ユニットの出力を示す。表 1 より、中間層の各ユニットが特定のパターンに対して特異的に反応していることが分かる。

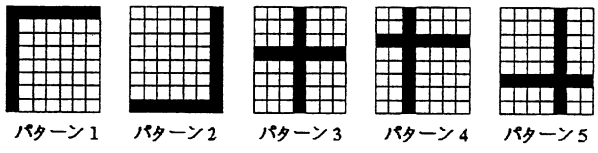


図 2 学習に用いたパターン

表 1 中間層出力

		ユニット							
		1	2	3	4	5	6	7	8
パターン	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	1	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	1	0
	5	0	1	0	0	0	0	0	0

4.2 獲得した知識の活用

次に学習済みのパターンの内の 2 つを重ね合わせることで、学習済みのパターンと関連性を持った未学習のパターンを作成し、学習済みの階層型 N.N.に入力した。その結果、学習に用いたパターンの如何なる組み合わせの合成入力パターンも認識不可能であった。従って、これら合成パターンが入力された時はダミーネットワークを使用して判定することになる。

パターン 1 と 5 の合成パターンを例に取り説明する。図 3 はパターン 1 と 5 の合成パターンを示している。この合成パターンに反応した中間層ユニットはユニット 1 と 2 であった。これら 2 つのユニットに接続されている結合重みをダミーネットワークに複写する。この際符号の反転する場合の結合重みはプラスにして複写する。さらに、中間層出力は増幅して使用するものとする。その結果、ダミーネットワークの出力はパターン 1 と 5 それぞれの出力を加え合わせたパターンを出力することとなる。さらに、ここではオートエンコーダを用いているので、入力と出力は同一のパターンとなる。従って、入出力を比較し、それが合致した場合は、N.N.は正しく認識していることになる。その場合に使用したダミーネットワークに複写された中間層ユニットを調べ、そのユニットに対応するパターンの合成が結果となる。図 3 の場合にはユニット 1 と 2 がダミーネットワークに使用されており、これらのユニットに対応するパターンは、表 1 よりパターン 1 と 5 であることが分かる。これらの結果を表 2 に示す。表 2 の誤差は、合成パターンとダミーネットワークの出力との 2 乗誤差を表している。さらに、表2の第2列は活用した知識を表している。

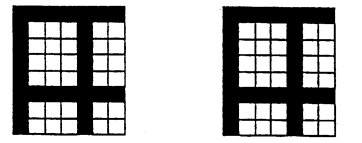


図 3 合成パターンとダミーネットワークの出力

表 2 判定結果

入力パターン	複写されたユニット	誤差
1&2	1, 4	0.00
1&3	1, 6	0.00
1&4	1, 7	0.00
1&5	1, 2	0.00
2&3	4, 6	0.00
2&4	4, 7	0.00
2&5	2, 4	0.00
3&4	6, 7	0.00
3&5	2, 6	0.00
4&5	2, 7	0.00

5 まとめ

エントロピー法により学習された階層型 N.N.において、学習済みのパターンを重ね合わせたパターンが入力された際に、学習済みの結合重みを活用して認識する手法を提案し、各種のパターンが入力された際の振る舞いから、提案手法による認識が可能であることを示した。

参考文献

[1] 長峰 伸明, R. R. Yager, 土村 龍太郎, 中西 祥八郎, ファジィ集合表現を用いたエントロピーアルゴリズムによるニューラルネットワークの意味理解, 第 10 回ファジィシステムシンポジウム, pp703-706, 1994

[問い合わせ先]

〒259-1292
神奈川県平塚市北金目 1117
東海大学電気工学科電気第 5 研究室
Tel: 0463-58-1211 ext. 4025
Fax: 0463-59-4014
Email: shinya@ep.u-tokai.ac.jp

WC3−3

階層学習を行なう自己増殖型自己組織モデルの提案

A Proposal of Self-Creating and Self-Organizing Neural Networks with Hierarchical Learning

○岩崎 正宏　橋山 智訓　大熊 繁
Masahiro IWASAKI　Tomonori HASHIYAMA　Shigeru OKUMA
名古屋大学　名古屋市立大学　名古屋大学
Nagoya University　Nagoya City University　Nagoya University

Abstract We propose a new self-creating and organizing neural network with hierarchical learning. It is well known that the columnar structure in the human brain plays an important role in visual information processing. The columnar network has hierarchical structure. In the columnar network, there are many cells which are excited by features that have close resemblance. It is said that this characteristic is effective for robust information processing. To realize the columnar structure in the computer, we introduce a hierarchical learning method for the self-creating and organizing neural network. A new node is created by duplicating the weights of the mother node. The mother-daughter relationships are represented hierarchically. As the result of the hierarchical learning, the nodes which represent similar features are created in the same tree structure. Simulations are carried out to show the feasibility of the proposed model.

1 はじめに

近年、第1次視覚野やTE野では生理学研究が進んでおり、視覚情報は、線分の傾きや色に関わるニューロン集団からなる単位構造ごとに分解して処理されていることが知られている [1] [2]。この単位構造は、コラムと呼ばれる類似した特徴に反応する細胞群からなる。コラム内のニューロンは、その反応性にばらつきが見られ、最適刺激にのみ反応する細胞と準最適刺激に反応する細胞とがあることが知られている [3]。これらの性質により、ノイズや物体の回転に対しても、頑健な情報処理を可能にしていると考えられている。

脳内にコラムを構成することは遺伝的に決定されているが、各コラムがどのような特徴に反応するかは後天的に形成されることが知られており、環境に依存した学習を行う自己組織的機能を持っている。計算モデルとしての自己組織化モデルは、Self-Organizing Maps(SOM)[4]が良く知られている。SOMは、入力層と競合層からなる2層構造をなす。競合層では、入力ベクトルに対しユークリッド距離が最小の結合荷重ベクトルを持つノードが発火し、そのノードの結合荷重ベクトルが入力ベクトルに近づくように競合学習を行う。さらに、競合層内の近傍ノードを学習に参加させることで、類似特徴を競合層内の近傍に表現することが可能である。しかしながらSOMは、入力ベクトルの分布によっては、いかなる入力ベクトルにも反応しないデッドノードが発生することが知られている。デッドノードの発生がデータクラスタ間の境界の生成を阻害することになり、コラムのように類似した特徴群を単位構造として獲得することは難しい [5]。

デッドノード問題を解決する手法として、自己増殖型モデルが提案されている [6] ～ [8]。これらのモデルも、SOMと同様に2層構造であるが、競合層のノードが入力情報に応じて増殖する。増殖した新しいノードに対する結合荷重ベクトルは、増殖元のノードの結合荷重ベクトルと新たな入力ベクトルとを合成することで、新たなノードの結合荷重ベクトルを生成するものが多い。しかしながら、この手法では、新たに増殖したノードは、増殖前のノードが代表する特徴とは強い相関を持たないため、類似した特徴群を単位構造として獲得することは難しい。

筆者らはこのような観点から、結合荷重の複製を行いながらノードを増殖する手法を提案する。複製により、親ノードと子ノードは、類似特徴を表現することが可能である。また、脳のコラムのように類似特徴を表現するノード群を単位構造として獲得し、入力に対する反応性にばらつきを持たせるためには、階層構造とすることが有効であると考える。提案モデルでは、ある1個のノードを起源とした階層構造をなす。起源となるノードが大まかな特徴を表し、増殖により生成したその派生ノード群を含めて単位構造と考える。競合層において、ノードは親子関係を生成しながら増殖する。階層関係で結ばれたノード群はユークリッド距離の近い結合荷重を持つことになる。競合層のノードの結合荷重は、生成した階層関係に基づく階層学習により更新する。これにより、上位のノードは下位のノード群の影響をうけ、下位のノードほど詳細な特徴を表現することが可能である。

2 提案モデル

提案モデルは、図1に示すように入力層と競合層からなる2層であり、SOMと同じ構造をもつ。競合層の

初期ノード数を1個とし、発火頻度がある閾値を越えると新たにノードを増殖する。増殖ノードの結合荷重は、増殖元のものを複製する。同時に競合層で親ノードと子ノードの階層関係を生成する。この時、親ノードは不応期を持つ。この操作により、不応期中は子ノードのみが学習に参加することになり、結果として親子間でユークリッド距離の近い結合荷重ベクトルを持つことになる。複製を行うことで、新しいノードもすぐに学習に参加することになり、デッドノードが生じにくく、かつそれまでの学習結果を壊すことはない。結合荷重の更新は競合学習により行い、近傍学習は行わない。また、長期間発火しないノードは消滅する。

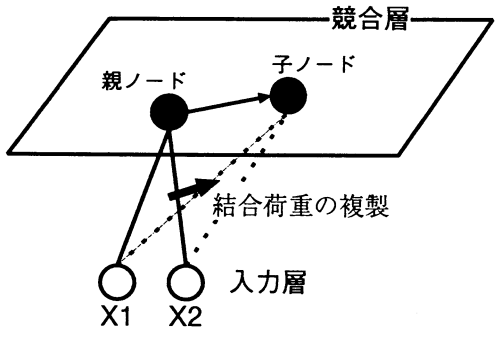


図 1: 提案モデル

2.1 競合学習

入力ベクトルと競合層の各ノードが持つ結合荷重ベクトルとのユークリッド距離を次式で計算する。

$$d_j^2 = \sum_i^{n-1}((x_i(t) - w_{i,j}(t))^2, \quad (1)$$

ここで、iは、入力層のi番目のノードを示し、入力ベクトル$\mathbf{x}$は、

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n\}, \quad (2)$$

で表される。

入力ベクトルと最小距離の結合荷重を持つノードが発火し、そのノードについて次のように結合荷重を更新する。

$$w_{i,win}(t+1) = w_{i,win}(t) + \alpha(x_i(t) - w_{i,win}(t)), \quad (3)$$

ここで、αは学習係数であり、学習時間に依存せず一定の値とした。また、winは発火したノードを示す。

2.2 階層学習

新たに子ノードを増殖する時に図2のように親ノードと子ノードの親子関係を生成する。これを繰り返すことにより、競合層で階層構造が生成される。結合荷重の更新は、(4) 式に従い階層を遡って行う。

$$w_{i,mo}(t+1) = w_{i,mo}(t) + 0.1\alpha(w_{i,da}(t) - w_{i,mo}(t)), \quad (4)$$

ここで、$w_{i,mo}$は親ノードの結合荷重を示し、$w_{i,da}$は子ノードの結合荷重を示す。図2の例では、ノードB、Aの結合荷重が順次更新される。

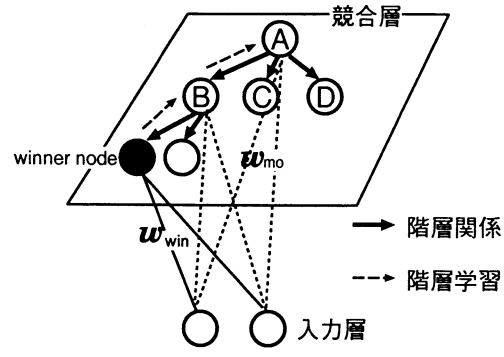


図 2: 階層学習

2.3 競合層内の結合荷重の更新

提案モデルでは、競合層ノード群の階層関係とともにノード間に結合荷重を持つ。この結合荷重は、競合層のノードの類似度を判定するために用いる。

競合学習で発火したノードと、2番目に入力ベクトルに近い結合荷重ベクトルを持つノードがそれぞれj, kの場合、以下のように2個のノード間に結合を生成する。

$$ws_{jk}(t+1) = ws_{jk}(t) + \beta - \gamma, \quad (5)$$

また、その他のノード間の結合荷重に対しては、忘却をかけるものとする。

$$ws_{jk}(t+1) = ws_{jk}(t) - \gamma, \quad (6)$$

ここで、$ws_{jk} > 0$とする。

2.4 学習法

提案モデルの学習法を以下にまとめる。

(a) 初期化:

競合層のノードは1個とする。入力層とは全結合とし、結合荷重はランダムに決定する。

(b) winner node の決定: データを入力し、(1) 式により入力ベクトルと最小距離の結合荷重ベクトルを持つノードを選択する。

(c) 結合荷重の更新: 発火したノードの入力層との結合荷重を (3) 式により更新する（競合学習)。発火したノードの親ノードに関する結合荷重を (4) 式により更新する（階層学習)。競合層において、発火したノードと2番目に強い発火を示すノード間の結合を (5) 式により更新する。

(d) 複製による増殖: ノードの発火頻度が閾値を超えた場合、親ノードの結合荷重を複製することで増殖を行う。親ノードは増殖後に不応期を持つ。また、親ノードと子ノードの階層関係を生成する。

(e) 統合による増殖 : 図 3 に示すように、競合層内のノード $d1$ と $d2$ 間の結合荷重が閾値を超えた場合、新たなノード s を 2 個のノードの上位に増殖する。この時、ノード s の結合荷重は 2 個のノードの結合荷重を統合したものとする。

(f) ノードの消去: 一定期間発火しないノードは、消去する。消去するノードに関するすべての結合荷重も消去する。この時、消去されたノードの子ノードは最上位のノードになる。(b) へ。

(g) (b) から (f) を設定した学習回数 T まで繰り返す。

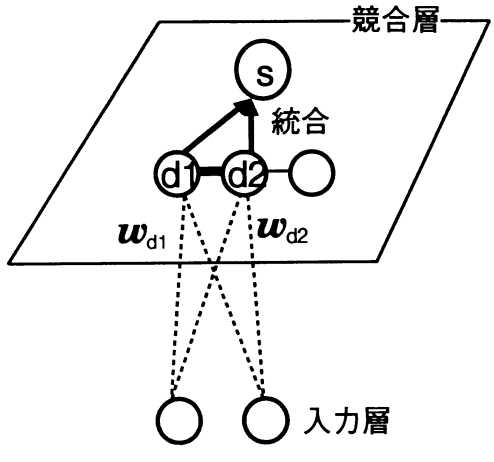


図 3: 結合荷重の統合

階層学習を行なうことによって、最上位層には、図 5 のように入力データ分布を大まかに表現する 5 個のノードが生成された。それぞれの最上位ノードは、図 4 において□で囲んだ 100 個の入力データに対して発火する。また、それぞれのノードは、クラスタのほぼ中心に位置しており、データ分布を大まかに表現可能である。最終的に、階層は 4 階層生成された。それぞれの階層ごとのノードについて、図 5-8 に示す。図 5 に 1 層と 2 層のノードの階層関係を示した。2 層目の各ノードは、同一のクラスタを表現する 1 層のノードから派生していることが分かる。図 8 が最終結果である。

表 1 に、階層ごとの MSE(Mean Square Error) を示す。ここで, MSE は以下のように計算することができる。

$$MSE = \int \|x - w_{win}\| p(x) dx, \tag{7}$$

$$\|x - w_{win}\| = \arg\min_j \{\|x - w_j\|\}, \tag{8}$$

ここで, $p(x)$ は, 入力分布の確率密度関数である。

階層を下るごとに、誤差が小さくなっているのが分かる。提案モデルでは、分離したデータに対しても最上位層でデータ分布を大まかに表現可能であり、最上位のノードからの派生ノードで 1 個のクラスタを表現しているため、派生ノード群で構成する階層構造を単位構造としてみなすことができる。そのため、データ分布を単位構造として抽出することが可能である。

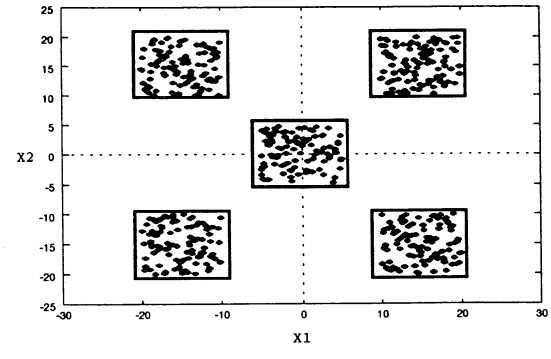


図 4: 入力データ分布

3 シミュレーション

提案モデルが脳のコラム構造のように類似した特徴群を、単位構造として獲得できるかを調べた。シミュレーションでは、図 4 のように 5 箇所に分布した 2 次元の入力データを用いた。各クラスタには 100 個、合計 500 個の入力データとした。また、学習回数 $T = 20000$ とした。

表 1 各階層ごとの MSE

階層	ノード数	MSE
1	5	16.80
2	26(21)	5.65
3	66(40)	1.50
4	96(30)	0.94

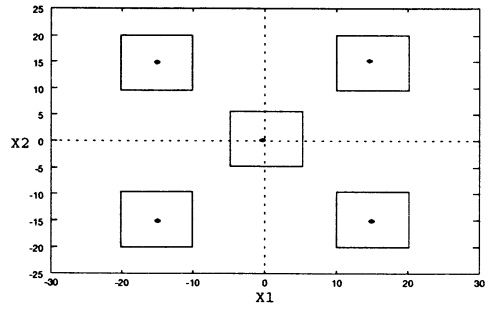


図 5: 生成された 1 層目のノード

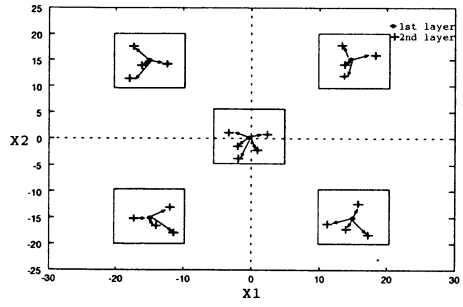


図 6: 生成された 1 層と 2 層目のノード

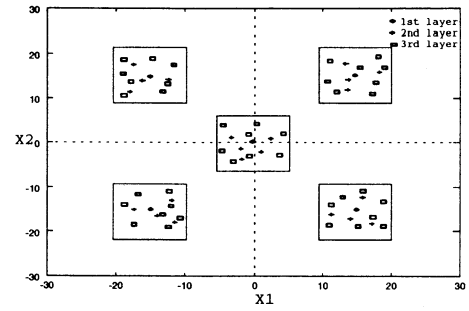


図 7: 生成された 1,2,3 層目のノード

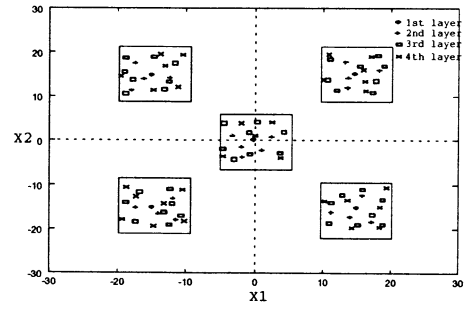


図 8: 学習結果

4 まとめ

結合を複製しながらノードを増殖し、階層を生成する自己組織モデルを提案した。明確に分離したクラスタから生成されるデータ分布に対して、提案モデルでは、階層学習を行うことで、1 個のクラスタを 1 個の階層構造として獲得し、脳のコラムのように単位構造として抽出可能なことを示した。また、最上位のノードは、データ分布を大まかに表現することが可能であり、入力データの多少のばらつきを許容することができる。そのため、物体の回転や照明の変化等の微妙な環境変化を許容することが期待できる。さらに、階層を下るほどデータ分布を精細に表現することが可能である。この性質は、計算時間が制限されたリアルタイム処理等を行う場合に、状況に応じた精度で処理を行うシステムの構築に有効であると期待できる。

なお、本研究は（財）名古屋産業科学研究所 創発型ソフトコンピュータプロジェクトの一部として行なわれた。

参考文献

[1] 外山敬介, 杉江昇：「脳と計算論」, 朝倉書店, (1997)

[2] J.G.Nicholls, A.R.Martin, B.G.Wallace: "From neuron to brain," Sinauer Associates, Inc., (1992)

[3] Fujita I. et al. : "Columns for visual features of objects in monkey inferotemporal cortex," Nature, 360, 343-346, (1992)

[4] T.Kohonen, "Self-Organization and Associative Memory (2nd Ed)," Springer-Verlag, (1988)

[5] 岩崎正宏, 橋山智訓, 大熊繁：「結合の複製による自己増殖型自己組織モデルの提案」, 第 9 回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集, pp.638–643, (1999)

[6] B.Fritzke: "Growing Grid - a self-organizing network with constant neighborhood range and adaptation strength," Neural Processing letters, Vol.2, No.5, 9–13, (1995)

[7] D.Choi, S.Park :"Self-Creating and Organizing Neural Networks,"IEEE Trans. Neural Networks, Vol.5, No.4, (1994)

[8] 堀田健一, 岩田彰, 松尾啓志, 鈴村宣夫:「大規模ニューラルネット "CombNET-II"」, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J75-D-II, No.3, pp.545–553, (1992)

連絡先：〒 464-8603 名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻
岩崎 正宏
Tel:052-789-2777 Fax:052-789-3140
E-mail: iwasaki@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp

WC4−1

投資変化最小化のための階層型ボルツマンマシンの構成[1]

A Hierarchical Boltzmann Machine to Minimize a Fluctuation of Investment

渡辺輝幸* 和多田淳三* 小田憲志**

Teruyuki Watanabe* Junzo Watada* Kenji Oda**

*大阪工業大学 **人間情報学研究会

*Osaka Institute of Technology **Human Infomatic Laboratory

Abstract– In a real market, considering influence of investing on a market, a large trade should not be a good strategy.

In this paper we propose a method to take the investing pattern of a preceding term under the consideration. In this model, we will evaluate the distance of the investing patterns between the present term and its preceding term. And we propose the method to solve our model which selects limited number of stocks employing the Two-Layered Boltzmann Machine.

1 はじめに

実際の投資では，取引によるマーケットへの影響を小さくすること，取引の手数料を最小にすることを考慮すると，証券の売買量が少ないことが望ましい．また，運用資金の上限問題を考えると投資する銘柄数を限定して投資する必要がある．

そこで本論文では，投資変化最小型ポートフォリオ選択問題 [4] を和多田らによる階層型ボルツマンマシン [6] を用いて投資銘柄数を限定して解く方法を提案する．

2 投資変化最小型ポートフォリオ選択問題

投資変化最小型モデルは，H. Markowitz のモデルに距離項を付加した以下のモデルとして定式化される．

[定式 1]

$$\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sigma_{t,(ij)}x_{t,i}x_{t,j} \tag{1}$$
$$+\frac{1}{n}\sum(x_{t,i}-x_{(t-1),i})^2$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i=1}^{n}\mu_{t,i}x_{t,i}\geq R \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n}x_{t,i}=1 \tag{3}$$

$$x_{t,i}\geq 0 \quad (i=1,2,\ldots,n) \tag{4}$$

ただし，Rは目標期待収益率，$\sigma_{t,(ij)}$はt期における第i証券と第j証券の収益率の共分散，$\mu_{t,i}$はt期の第i証券の期待収益率，$x_{t,i}$はt期の第i証券への投資比率，$x_{(t-1),i}$は$t-1$期の第i証券への投資比率である．

(2) 式において，第1項はMarkowitz のモデルと同じくリスクを表しており，第2項が距離を表している．距離には，$t-1$期第i証券とt期第i証券との差の2乗和の平均値を用いている．

3 投資変化最小化のための階層型ボルツマンマシンの構成

階層型ボルツマンマシンは和多田らによって提案されたモデルで [6]，上位階層にホップフィールドネットワーク [3]，下位階層にボルツマンマシン [2] を配置したモデルである．本論文では，上位階層で証券数の絞り込みを行い，下位階層で投資比率を求めている．

提案モデルを階層型ボルツマンマシンを用いて解くためのエネルギー関数を以下に示す．

上位階層

$$E_u = -\frac{1}{2}(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sigma_{t,(ij)}x_{t,i}x_{t,j} \tag{5}$$
$$+ \frac{K_d}{n}\sum(x_{t,i}-x_{(t-1),i})^2)+K_u\sum_{i=1}^{n}\mu_{t,i}x_{t,i}$$

下位階層

$$E_l = -\frac{1}{2}(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sigma_{t,(ij)}x_{t,i}x_{t,j} \tag{6}$$
$$+ \frac{K_d}{n}\sum(x_{t,i}-x_{(t-1),i})^2$$
$$+ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}x_{t,i}x_{t,j})+\sum_{i=1}^{n}x_{t,i}+K_l\sum_{i=1}^{n}\mu_{t,i}x_{t,i}$$

ここで，K_dは距離項にかかる重み，K_u, K_lは各階層での期待収益にかかる重みで，それぞれ0以上の実数である．

K_uを大きくするとより多くの銘柄を上位階層で選択する．また，K_lの値を大きくするとより期待収益率

[1]本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究 (c-2)(Grant No. 11680459) の助成を受けた．

表 1: 計算結果 ($K_d = 0.3$ のとき)

上位階層

K_u	東レ	大林組	雪印	帝人	花王	旭硝子	ダイキン	日立
0.3	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0

K_u	本田技研	大日本印刷	大正海上	東武	全日空	大阪ガス	松竹	
0.3	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	
1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	

下位階層 ($K_l = 0.0, K_d = 0.3$)

K_u	雪印	日立	大日本印刷	大阪ガス	松竹			
0.3	0.3880	0.1092	0.2054	0.1713	0.1260			

	雪印	花王	日立	大日本印刷	東武	全日空	大阪ガス	松竹
1.0	0.3681	0.0906	0.0882	0.1837	0.0004	0.0138	0.1491	0.1062

期待収益率，リスク，距離 ($K_d = 0.3$)

K_u	期待収益率	リスク	距離
0.3	0.016123	0.000859	0.000678
1.0	0.016340	0.000712	0.000015

期待収益率，リスク，距離 ($K_d = 0.0$)

K_u	期待収益率	リスク	距離
0.3	0.016082	0.001453	0.010500
1.0	0.016745	0.000826	0.003995

最大化傾向の投資比率が得られる．

4 数値例

提案手法の有効性を確かめるために，東レ，大林組，雪印，帝人，花王，旭硝子，ダイキン，日立，本田技研，大日本印刷，大正海上，東武，全日空，大阪ガス，松竹，の 15 銘柄を用いたシミュレーションを行う．

数値例で用いる前期パターンは，Markowitz モデルを用いて数理的に得られた結果を用いている．ただし，目標期待収益率 $R = 0.01$ とする．

本数値例では，$K_u = \{0.3, 0.5, 1.0\}$ ，$K_l = \{0.0, 0.3, 1.0\}$ ，$K_d = \{0.0, 0.3, 1.0\}$ と設定する．また，その他の数値は，開始温度が 100.0，再構成をするときの温度が 0.0001，終了温度を 0.00001 とする．10,000 回実行ごとに開始温度/実行回数に温度を下げる．提案手法ではこの温度を下げるときに上下階層で値のやりとりを行う．上位階層は一度のやりとりごとに 45 回動作させる．本予稿は紙面の都合で選択証券と投資比率は $K_u = 0.3, 1.0, K_l = 0.0, K_d = 0.3$ の場合のみを掲載する．期待収益，リスク，距離は $K_d = 0.0$ の場合も掲載する．

結果より，銘柄数を限定した解が得られていることが分かる．また K_dの値を大きくすれば距離が小さくなっていることも分かる．

5 おわりに

本論文では階層型ボルツマンマシンを用いて投資変化最小型ポートフォリオ選択問題を銘柄数を限定して解く方法を提案した．

数値例により，銘柄数の限定ができていることを示した．またパラメータを変化させることで様々な解を得ることができた．

参考文献

[1] H. Markowitz,“ Mean-Variance Analysis in Portfolio Choice and Capital Markets”, Blackell, 1987

[2] D. H. Ackley, G. E. Hinton and T. J. Sejnowski,“A Learning Algorithm for Boltzmann machines”, *Cognitive Sci.*, Vol.9, 1985

[3] J. J. Hopfield : Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, Proc.Natl.Acad.Sci., pp.2554-2558,1982

[4] 渡辺輝幸，和多田淳三，“投資パターンの変化を最小にするポートフォリオ選択”，第 14 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp121–122，1998

[5] Teruyuki Watanabe, Kenji Oda and Junzo Watada, “Hierarchical Decision Making of Strategic Investment”, International Journal on Fuzziness, Uncertainly, and Knowledge-Based Reasoning (IJUFKS), Vol.7, No. 4, pp.429–437, 1999

[6] Junzo Watada and Kenji Oda, “ Formulation of a Two-Layered Boltzmann Machine for Portfolio Selection”, International Journal of Fuzzy Systems, Vol.2, No.1, pp.39–44, 2000

[問い合わせ先]

和多田　淳三
大阪工業大学　工学部　経営工学科
〒 535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-i
TEL 06-6954-4327　FAX 06-6952-6197
E-mail:watada@dim.oit.ac.jp

WC4−2

ニューラルネットの発見的モデル選択規範ーディストータII

A Heuristic Model Selection Criterion for Artificial Neural Networks - Distorter II

○ 市橋 秀友，縄舟 守，本多 克宏
○H.Ichihashi, M.Nawafune, K.Honda
大阪府立大学 大学院工学研究科 電気情報系専攻
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : In this paper we propose an Unbiasedness Criterion using DistorterII (UCD2) which is a heuristic model selection criterion and apply it to determine the number of parameters of Neural Networks. The new criterion is defined as the difference between outputs of two NN; the one trained to minimize training error with a gradient parameter τ_1 and the other trained to minimize the error with a different gradient parameter $\tau_2(\neq \tau_1)$.

1. はじめに

ニューラルネットワークモデルを適用する際の課題のひとつに，最適なパラメータ数をどう決定するかというモデル選択の問題がある．適応学習ネットワークのモデル選択にAIC[1]などの統計的な基準を用いる際には，ローカルミニマムの問題や，パラメータの非一意性に起因する問題点が指摘されている．そのため，さまざまな方法が提案されているが，その1つとして発見的モデル選択規範，ディストータが提案されている[2]．これはモデルに2次関数などの非線形変換を加えるものであるが，その発見的規範の意味合いを直感的に理解することが容易ではない．そこで，本論文では誤差の評価関数の降下方向を変化させる学習法を用いる新たな発見的規範，ディストータIIを提案する．

2. 発見的モデル選択

ニューラルネットワークモデルをyとし，入力データをx，出力の教師信号をy^*とする．yの未知パラメータをw，その更新量をΔwとする．逐次射影法に基づく学習則は次の最適化問題より導かれる[3]．

[問題1]

$$\min . \sum_{r=1}^{R} (\Delta w_r)^2 \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \sum_{r=1}^{R} \frac{\partial y}{\partial w_r} \Delta w_r = \delta \tag{2}$$

ただし$\delta = y^* - y$である．問題1はデータペア$(\mathbf{x}, \mathbf{y}^*)$の1件について考えたものである．解は

$$\Delta w_r = \frac{\frac{\partial y}{\partial w_r}\delta}{\sum_{r=1}^{R}(\frac{\partial y}{\partial w_r})^2} \tag{3}$$

となる．したがって学習則は

$$w_r^{new} = w_r^{old} + \eta \Delta w_r \tag{4}$$

である．緩和係数ηは通常1よりやや小さめに設定する．逐次射影法では線形近似を用いて各トレーニングデータ毎に誤差を0に近づける．(1)式に示すように，ベクトルΔwは誤差の評価関数の最急降下方向に一致している．この学習則をNLMS(Normalized Least Mean Square)と呼ぶ．本研究で提案する学習則は最急降下方向とは異なる方向へ未知パラメータwを更新するが，NLMS学習と同様にデータ1件毎に誤差の評価関数を近似的に0とする方法である．次の問題を考える．

[問題2]

$$\min . \tau \sum_{r=1}^{R} p_r \log p_r - \sum_{r=1}^{R} p_r \left| \frac{\partial y}{\partial w_r} \right| \tag{5}$$

$$\text{s.t.} \sum_{r=1}^{R} p_r = 1, p_r > 0, r = 1, \cdots, R \tag{6}$$

この問題はラグランジュ関数

$$L = \tau \sum_{r=1}^{R} p_r \log p_r - \sum_{r=1}^{R} p_r \left| \frac{\partial y}{\partial w_r} \right| + \lambda(\sum_{r=1}^{R} p_r - 1) \tag{7}$$

の最小化問題に書き換えることができ，Lの最適性条件より$r = 1, \cdots, R$について

$$p_r = \frac{\exp(-1 + |\frac{\partial y}{\partial w_k}|/\tau)}{\sum_{r=1}^{R} \exp(-1 + |\frac{\partial y}{\partial w_k}|/\tau)} \tag{8}$$

となる．p_rはτが大きいとき$r = 1, \cdots, R$についてほぼ均等になり，τが小さいと$|\frac{\partial y}{\partial w_k}|$の大きな$p_r$が大きくなる．$\tau = 0$のときは問題2は線形計画問題であり，解は端点で得られ，p_rは1つが1となり他は0となる．

w_rの更新量$\Delta w_r (r = 1, \cdots, R)$を

$$\Delta w_r = \text{sgn}(\delta \frac{\partial y}{\partial w_r}) p_r C \tag{9}$$

$$C = \frac{|\delta|}{\sum_{r=1}^{R} |\frac{\partial y}{\partial w_r}| p_r} \quad (10)$$

とすると

$$\begin{aligned} y^{NEW} &= y^{OLD} + \sum_{r=1}^{R} \frac{\partial y}{\partial w_r} \Delta w_r \\ &= y^{OLD} + \mathrm{sgn}(\delta)\, C \sum_{r=1}^{R} \left| \frac{\partial y}{\partial w_r} \right| p_r \\ &= y^{OLD} + \delta = y^{*} \end{aligned} \quad (11)$$

すなわち，更新後の$w_r^{NEW} = w_r^{OLD} + \tau \Delta w_r$に対して$y^j = y^{j*}$となり誤差$\delta$は近似的に0となる．そして，UCD2を次のように定める．

$$\mathrm{UCD2} = \sum_{j=1}^{\alpha \times n} (Y_1(x^j) - Y_2(x^j))^2 \quad (12)$$

ただし，Y_1はτを大きくして学習した後のニューラルネットワークモデルの出力yで，Y_2はτを小さくして学習した後のモデルの出力yである．τは大きい方をτ_1，小さい方をτ_2とする．$j = n+1$から$\alpha \times n$までのx^jは乱数を用いて人工的に作成する．UCD2を用いる多層型ニューラルネットのモデル選択規範をディストータIIと呼ぶ．

3. 数値実験

本章では，ガウス関数を活性化関数としたニューラルネットワークでのモデル同定の数値実験結果を示す．ディストータIIの有効性を示すため，逐次射影法で最急降下方向に学習させたもの(問題1)のチェッキングデータに関する誤差の平均(誤差(C))およびAICと比較した．まず，トレーニングデータとしてsin関数に$N(0,0.05^2)$に従う正規乱数を付加した15個のデータを用いて実験を行った．緩和係数ηを0.07とし，学習回数をすべての学習過程において誤差の平均が十分に収束する5000回としたときの結果を表1に示す．ディストータIIにおけるτ_1,τ_2は1.0,0.7とし，αは4とした．表1より提案法のUCD2は3個を選択し，チェッキングデータ(75件)に関する誤差，AICはともに3個を選択した．次に，提案法のτの値の一方を変化させ，UCD2を比較した結果を表2に示す．τの値によらず，ほぼ同じ基底数を選択している．

続いて，3入力の関数

$$y = x_1 + x_2 \log(x_3 + 1.0) \quad (13)$$

に$N(0,0.05^2)$に従う正規乱数を付加したものをトレーニングデータとして実験を行った．500個のデータを用い，緩和係数ηを0.03，学習回数を5000回としたときの結果を表3に示す．ディストータIIにおけるτ_1,τ_2は5.0,3.0とし，αは3とした．表3より，提案法のUCD2は，チェッキングデータ(500件)に関する誤差およびAICとともに，5個を選択した．

表 1: sin関数の近似での各規範の比較

	ディストータII	逐次射影法	
基底	UCD2	誤差(C)	AIC
2	0.0378	0.1555	-3.396
3	**0.0023**	**0.0490**	**-32.327**
4	0.0028	0.0531	-28.649
5	0.0107	0.1103	-19.853

表 2: τの値によるUCD2の比較

	(τ_1,τ_2)のときのαUCD				
基底	(1.0,0.3)	(1.0,0.5)	(2.0,1.0)	(3.0,1.0)	(5.0,1.0)
2	0.3779	0.1308	0.0029	0.0051	0.0081
3	**0.0168**	**0.0080**	0.0033	0.0054	**0.0076**
4	0.0562	0.0280	**0.0015**	**0.0021**	0.0192
5	0.0730	0.0306	0.0125	0.0133	0.0142

表 3: 式(14)の近似での各規範の比較

	ディストータII	逐次射影法	
基底	UCD2	誤差(C)	AIC
2	9.1299	1.4007	-1348.60
3	0.7245	0.6555	-1744.55
4	1.2296	1.0159	-1523.89
5	**0.0163**	**0.6107**	**-1803.13**
6	0.0532	1.3675	-1325.49
7	0.1330	1.1930	-1389.48
8	0.1096	0.9136	-1576.15
9	0.7364	1.2967	-1347.39

4. おわりに

本研究では，ニューラルネットワークモデルの最適なパラメータ数を決定するための新たな発見的規範を提案し，チェッキングデータやAICによる場合とよく似た基底数を選択することを数値例を通して示した．

参考文献

[1] H. Akaike: "A New Look at the Statistical Model Identification" *Autom. Control*, Vol. AC-19, pp. 716-723 (1974)

[2] 田渕 創，三好 哲也，市橋 秀友，田中 洋司: "ディストータによる発見的モデル選択規範とRBFNの隠れユニット数決定への応用"，システム制御情報学会論文誌，Vol. 11，No. 99，pp.61-70 (1998)

[3] 巽 啓司，福島 雅夫: "逐次射影法としての誤差逆伝搬法"，システム制御情報学会論文誌，Vol. 8，No. 5，pp. 204-211 (1995)

[問い合わせ先] 〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学大学院工学研究科電気情報系専攻 市橋秀友
TEL: 0722-54-9352 FAX: 0722-54-9915
E-mail: ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

WC4−3

TAM Network のプルーニング手法の一提案
A Study on Pruning Methods for TAM Network

林　勲
Isao Hayashi
阪南大学 経営情報学部
Hannan University

前田 利之
Toshiyuki Maeda
福山平成大学 経営学部
Fukuyama Heisei University

Abstract The TAM Network (Topographic Attentive Mapping Network) based on a biologically-motivated neural network model is an especially effective model. When the network makes an incorrect output prediction, the attentional feedback circuit modulates the learning rates and adds a node to the category layer in order to improve the network's prediction accuracy. In this paper, a pruning method for reducing the number of category and feature nodes is formulated. We discuss here the formulation and show its usefulness through some examples.

1　はじめに

人間の視覚系では，網膜へ入力された光情報は桿体細胞や錐体細胞の光受容細胞からガングリオン細胞に入り，外側膝状体を介して第1視覚野に入力され，コラム構造で方位や方向，色などが識別処理された後，側頭葉で形状が認識される [1]. この視覚系をモデル化したニューラルネットワークに，ネオコグニトロン [2]，ARTMAP[3]，fuzzy ARTMAP[4]，TAM[5] などがある．特に，ARTMAP, fuzzy ARTMAP, TAM は共振学習とビジランス・パラメータをネットワーク内部に持ち，パターン認識において有効な手法である．

TAM(Topographic Attentive Mapping) ネットワークは，入力層，カテゴリー層，クラス層の3層構造からなる．入力層はガングリオン細胞に対応し，受容野の ON センター OFF サラウンド反応 (OFF センター ON サラウンド反応) の機能を模擬するため，属性データを分布データとして取り扱う．カテゴリー層は外側膝状体に対応し，視覚野への中継機能と興奮性・抑制性学習を構造化している．出力層は第1視覚野のコラム構造あるいは側頭葉を構造化している．出力値と教師値に差がある場合，視覚野からカテゴリー層への選択的注意のフィードバック回路を模擬してカテゴリー・ノードの増加とビジランス・パラメータによる抑制性学習を行う．興奮・抑制性学習とカテゴリー・ノードの自己増加により，パターン・データに対して高精度の認識を導出できる．しかし，カテゴリー・ノードの増加は正のみに限定されているので，学習データに対して過剰学習となり，必ずしも評価データに対して有用な結果が導出できない場合がある．

本研究では，入力層，カテゴリー層，出力層の各ノードのプルーニングを行う新たな手法を提案する．一般に，ニューラルネットワークのプルーニング手法には，付加的評価関数を用いて学習する方法と学習後に各ノードの増減に対する精度を測定する方法とがある [6]. 付加的評価関数を用いる方法では，誤差関数に情報量などの評価関数を追加し学習パラメータの更新関数に減少関数を加えて，パラメータ値を衰退させる．一方，ノード増減の精度を測定する方法では，学習後の各層のノード数や結合値を増減させ，誤差関数を評価する．本研究では，これらの2つの手法とは異なる新たな方法を提案する．提案するプルーニング過程では，情報量 [7][8] を用いて入力層の各属性の重要度を順次計算し，3層間の結合の強さを評価して結合を削減する．結合の強さを評価するため，占有度を用いた3種類のプルーニング・ルールを定義する．このプルーニング・ルールを用いてアルゴリズムを定式化した．ネットワークでは，属性値が順序付けられるだけでなく，カテゴリー・ノードも重要度の順序付けできる．ここでは，本手法の定式化とアルゴリズムを説明し，数値例を用いて本手法の有効性を検証する．

2　TAMネットワーク

TAM ネットワークの構造を図1に示す．カテゴリー層では，属性ノード f_i への分布データ f_{ih} と学習パラメータ w_{jih} との活性値 x_{ji} を計算し，出力層への出力 y_j を得る．

$$x_{ji} = \frac{\sum_{h=1}^{L} f_{ih} w_{jih}}{1+\rho^2 b_{ji}} \tag{1}$$

$$y_j = \prod_{i=1}^{M} x_{ji} \tag{2}$$

ただし，ρ はビジランス・パラメータ，b_{ji} は抑制パラメータである．

TAM ネットワークの出力値 K は次式より得られる．

$$z_k = \sum_{j=1}^{N} y_j p_{jk} \tag{3}$$

$$K = \{k | \max_k z_k\} \tag{4}$$

ただし，p_{jk} は出力ノードでのカテゴリーに対する学習パラメータである．

いま，K^* を正しい教師値としよう．K が K^* と一致しない場合には，"選択的注意" を発動し，ビジランス・パラメータ ρ は初期値 $\rho=0$ から上昇し，b_{ji} とともにカテゴリーの各ノードの活性値を抑制する．ρ は $z_{K^*}/z_K \geq OC$ の条件が満足されるか最大値になるまで上昇し，最大値になった場合には，カテゴリー層のノードを1個分増加させる．

$$\begin{aligned} &\text{If } z_{K^*}/z_K < OC \text{ then repeat} \\ &\quad (a)\ \rho = \rho + \rho^{(step)} \\ &\quad (b)\ \text{equation } (1)-(4) \\ &\text{until either } z_{K^*}/z_K \geq OC \text{ or } \rho \geq \rho^{(max)} \end{aligned} \tag{5}$$

ただし，OC は評価のためのしきい値である．

一方，$z_{K^*}/z_K \geq OC$ を満足する場合には，学習モードに入る．まず，カテゴリー層へのフィードバック信号 y_j^* を計算する．

$$z_k^* = 1 \text{ if } k = K^*; \quad z_k^* = 0 \text{ otherwise} \tag{6}$$

$$y_j^* = \frac{\prod_{i=1}^{M} x_{ji} \times \sum_{k=1}^{U} z_k^* p_{jk}}{\sum_{j'=1}^{N} \prod_{i=1}^{M} x_{j'i} \times \sum_{k=1}^{U} z_k^* p_{j'k}} \tag{7}$$

各学習パラメータ w_{jih}, p_{jk}, b_{ji} は次式で更新する．

$$\triangle n_j = \alpha y_j^* (1 - n_j) \tag{8}$$

$$\beta(M) = \frac{\lambda^{1/M}}{1 - \lambda^{1/M}}, \quad \lambda \in (0,1) \tag{9}$$

$$p_j^{(rate)} = \frac{\alpha}{\alpha + n_j} \tag{10}$$

$$\triangle w_{jih} = \frac{\alpha y_j^* (f_{ih} - w_{jih})}{\alpha\beta(M) + n_j} \tag{11}$$

$$\triangle p_{jk} = \frac{\alpha p_j^{(rate)} y_j^* (z_k^* - p_{jk})}{\alpha + n_j} \tag{12}$$

$$\triangle b_{ji} = b_j^{(rate)} y_j^* (x_{ji} - b_{ji}) \tag{13}$$

パラメータの調整はネットワークへデータが逐次的に投入されるごとに行い，全学習データを1エポックとして数エポック回数分の学習を行う．

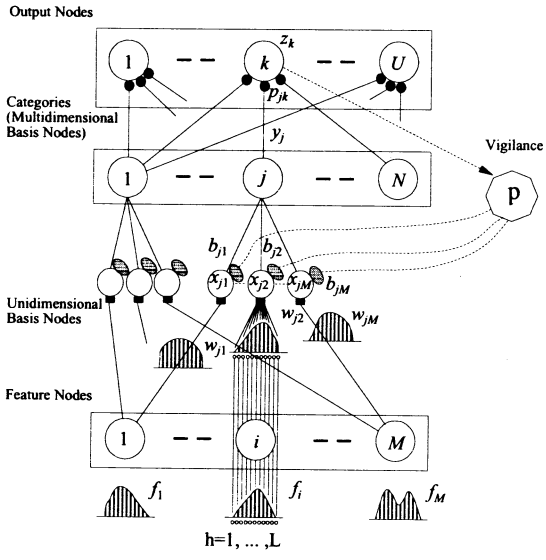


Figure 1: TAM Network

3 プルーニング・アルゴリズム

いま，R 個の属性データ f_{si}, $s = 1, 2, \cdots, R$ と教師値のクラス k からなる学習データ D が与えられたとする．プルーニング過程では，まず全データを学習用データと評価用データに分割する．次に，学習データを用いて入力層の各属性の重要度を次式の情報量 $H(i)$ により計算し，値の大きい属性から順に選択する．

$$H(i) = -\sum_{j=1}^{N} g_j \sum_{k=1}^{U} G_{jk} \log_2 G_{jk} \tag{14}$$

ただし，

$$g_j = \frac{\sum_{s=1}^{R} x_{jis}}{\sum_{j=1}^{N} \sum_{s=1}^{R} x_{jis}} \tag{15}$$

$$G_{jk} = \frac{\sum_{s \in \psi_k} \gamma_{js} \times p_{jk}}{\sum_{s=1}^{R} \gamma_{js} \times p_{jk}} \tag{16}$$

$$\gamma_{js} = \prod_{i \in I^*} x_{jis} \times x_{jis} \tag{17}$$

ここで，ψ_k は D でのクラス k をもつデータの集合とし，I^* はいままでに選択された属性の集合とする．

(15) 式の g_j は，全てのカテゴリーにおける j 番目のカテゴリーの活性値の占有度を表し，(16) 式の G_{jk} は，D における $s \in \psi_k$ のデータ s の活性値の累積占有度を表す．

選択する属性 i^* は次式より求める．

$$i^* = \{i | \max_i H(i)\} \tag{18}$$

(14)〜(18) の属性を順に選択する過程において，次の3つの観点から入力層，カテゴリー層，出力層での各結合の強さを評価する．

- 第 j 番目のカテゴリーにおいて，各クラスとの結合の強さを評価する．
- 第 j 番目のカテゴリーにおいて，入力層の各属性との結合の強さを評価する．
- 第 k 番目のクラスにおいて，各カテゴリーとの結合の強さを評価する．

これらを次のプルーニング・ルールとして表現する．

【プルーニング・ルール 1】
第 j 番目のカテゴリーにおいて，第 k 番目のクラスとの間で次の条件を満足した場合，第 j 番目のカテゴリーと第 k', $k' = 1, 2, \cdots, U$, $k' \neq k$ 番目のクラスとの結合を削除する．同時に，第 j 番目のカテゴリーと第 $i' \notin I^*$ 番目の属性との結合を削除する．ただし，η はしきい値である．

$$G_{jk} \geq \eta \tag{19}$$

プルーニング過程において，次の性質は有用である．

【性質 1】
次のプルーニング過程で，$\sum_{s \in \psi_k} x_{ji''s} \geq \sum_{s \notin \psi_k} x_{ji''s}$ を満足する属性 i'' が選択された場合には，そのプルーニング過程でも (19) 式は満足される．

【プルーニング・ルール 2】
第 j 番目のカテゴリーにおいて，次の条件を満足した場合，第 j 番目のカテゴリーと i 及び $i' \notin I^*$ 番目の属性との結合を削除する．ただし，θ はしきい値である．

$$\frac{1}{R} \sum_{s=1}^{R} \gamma_{js} < \theta \tag{20}$$

【性質 2】
カテゴリー j において，(20) 式が一度満足されると，次のプルーニング過程でもこの条件は満足される．

いま，クラス k において，TAM ネットワークの出力値と教師値とが一致する第 s 番目のデータに対して，全カテゴリー

における第 j 番目のカテゴリー出力の累積占有度を次式で定義する.

$$\varphi_{jK} = \frac{\sum_{s\in\Gamma_K} \gamma_{js} \times p_{jK}}{\sum_{j=1}^{N} \sum_{s\in\Gamma_K} \gamma_{js} \times p_{jK}} \tag{21}$$

ただし, $\Gamma_K = \{s|\ K = K^*,\ K = \max_k \sum_{j=1}^{N} y_j p_{jk}\}$.

φ_{jk} は, 出力値と教師値とが一致する場合の j 番目のカテゴリーの占有度を表しているので, この値により, 各クラス k において, それぞれのカテゴリー・ノードの結合の強さを順序付けできる.

【プルーニング・ルール 3】

クラス K において, 次の条件を満足した場合, 第 K 番目のクラスと第 $j' \neq j$ 番目のカテゴリーとの結合を削除する. ただし, ξ はしきい値である.

$$\varphi_{jK} \geq \xi \tag{22}$$

【性質 3】

ξ が次式を満足する場合には, 出力値と教師値との一致度は維持される.

$$\xi \geq \max_{k\neq K} \frac{\sum_{s\in\Gamma_K} \sum_{j=1}^{N} p_{jk}}{\sum_{s\in\Gamma_K} \sum_{j=1}^{N} y_{js} p_{jk}} \tag{23}$$

プルーニング・アルゴリズムを次のように定式化する.

[Step 1] 学習データに対して, 第 i 番目の属性に対する情報量 $H(i)$ を計算する.

$$H(i) = -\sum_{j=1}^{N} g_j \sum_{k=1}^{U} G_{jk} \log_2 G_{jk} \tag{24}$$

$$g_j = \frac{\sum_{s=1}^{R} x_{jis}}{\sum_{j=1}^{N} \sum_{s=1}^{R} x_{jis}} \tag{25}$$

$$G_{jk} = \frac{\sum_{s\in\psi_k} \gamma_{js} \times p_{jk}}{\sum_{s=1}^{R} \gamma_{js} \times p_{jk}} \tag{26}$$

$$\gamma_{js} = \prod_{i\in I^*} x_{jis} \times x_{jis} \tag{27}$$

[Step 2] 次式の i^* を選択し, $I^* = \{i^*\}$ とする.

$$i^* = \{i|\max_i H(i)\} \tag{28}$$

[step 3] 評価データに対して次の条件を満足した場合には, プルーニング・ルール 1 により, 第 j 番目のカテゴリーと第 $k' \neq k$ 番目のクラスとの結合を削除し, 第 $i' \notin I^*$ 番目の属性との結合を削除する.

$$G_{jk} \geq \eta \tag{29}$$

[Step 4] 評価データに対して次の条件を満足した場合には, プルーニング・ルール 2 により, 第 j 番目のカテゴリーと i 及び $i' \notin I^*$ 番目の属性との結合を削除する.

$$\frac{1}{R} \sum_{s=1}^{R} \gamma_{js} < \theta \tag{30}$$

[Step 5] 評価データに対して次の条件を満足した場合には, プルーニング・ルール 3 により, 第 K 番目のクラスと第 $j' \neq j$ 番目のカテゴリーとの結合を削除する.

$$\varphi_{jk} \geq \xi \tag{31}$$

[Step 6] 全クラスまたは全属性への結合が削除されたカテゴリー・ノードを削除する. また, 全カテゴリーからの結合が削除されたクラス・ノードや属性ノードを削除する.

[Step 7] ステップ 2 において, 全ての属性が選択されるまで, ステップ 1 からステップ 6 までを繰り返す.

プルーニング・アルゴリズムの終了後, 不要なリンクやノードが削除されたネットワークが得られる. また, 各属性と各カテゴリーに重要度が付加できる. なお, TAM ネットワークの処理過程はファジィ推論と同じであるので, 本手法のプルーニング手法は, ファジィルールの属性数とクラス数およびルール数を調整するチューニング手法であるとも言える.

4 数値例

ここでは, 簡単な数値例を用いて本手法の特徴を議論し, 有効性を検証する. いま, 図 2 と図 3 の学習データが与えられたとする.

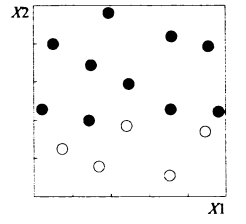


Figure 2: Training Data 1

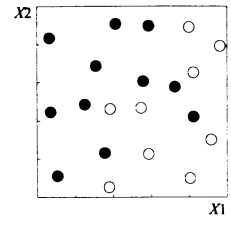


Figure 3: Training Data 2

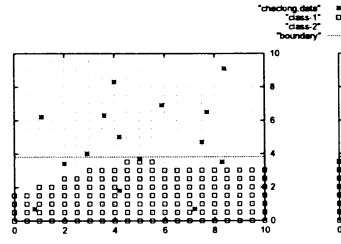


Figure 4: TAM Network

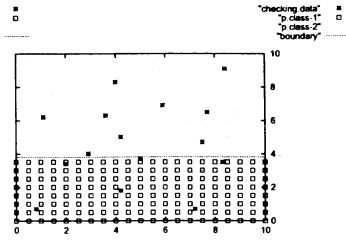


Figure 5: TAM Network after Pruning

学習のためのパラメータ値を次のように設定する.

$epoch$	=	10	$category\ init$	=	0
L	=	0	$rho\ init$	=	0.0
OC	=	0.8	$rho\ step$	=	0.1
α	=	0.0000001	$rho\ max$	=	100.0
λ	=	0.33	b_j^{rate}	=	0.01

学習を行った結果, 図 2 の学習データに対する TAM ネットワークの正解率が 97.8%, 図 3 のデータに対して, 81.7%が得られた. 学習後に評価用データを用いて, TAM ネットワークとプルーニング・アルゴリズム後の TAM ネットワークの正解率の比較を行った. 実験は 3 回行い, 結果の正解率の平均値と各ノード数 (入力層 — カテゴリー層 — 出力層) を表 1

と表2に示す．ただし，プルーニング前のTAMネットワークの正解率とノード数は，図2に対しては82.2%と2-4-2，図3に対しては71.7%と2-10-2になった．

Table 1: Results of Checking Data 1

η	θ \ ξ	0.1		0.4		0.8	
0.005	0.05	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2
	0.005	73.3	1-2-2	97.8	1-2-2	75.5	1-2-2
	0.0005	91.1	1-3.7-2	84.4	1-3.3-2	86.7	1-4-2
0.2	0.05	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2
	0.005	73.3	1-2-2	95.5	1-2-2	75.5	1-2-2
	0.0005	93.3	1-3.7-2	88.9	1-3.3-2	88.9	1-4-2
0.5	0.05	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2
	0.005	73.3	1-2-2	97.8	1-2-2	0.76	1-2-2
	0.0005	91.1	1-3.7-2	84.4	1-3.3-2	86.7	1-4-2

Table 2: Results of Checking Data 2

η	θ \ ξ	0.1		0.4		0.8	
0.005	0.05	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2
	0.005	63.3	1-9.3-2	58.3	1-9.7-2	58.3	1-9.7-2
	0.0005	71.7	2-10-2	71.7	2-10-2	71.7	2-10-2
0.2	0.05	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2
	0.005	63.3	1-9.3-2	56.7	1-9.7-2	56.7	1-9.7-2
	0.0005	71.7	2-10-2	71.7	2-10-2	71.7	2-10-2
0.5	0.05	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2	0.0	0-0-2
	0.005	63.3	1-9.3-2	58.3	1-9.7-2	58.3	1-9.7-2
	0.0005	71.7	2-10-2	71.7	2-10-2	71.7	2-10-2

図2のデータに対する学習後のTAMネットワークの出力値の境界図の一例と評価データを図4に示し，$\eta = 0.005$，$\theta = 0.005$，$\xi = 0.4$としたプルーニング・アルゴリズム後の境界図の一例と評価データを図5に示す．また，学習回数に対する学習データと評価データの正解率の変化を図6に示し，ネットワーク構造を図7に示す．属性x_1と第1番目と第2番目のカテゴリー，及びそれらの結合が削除され，カテゴリー数から2個のファジィルールが抽出できることがわかる．

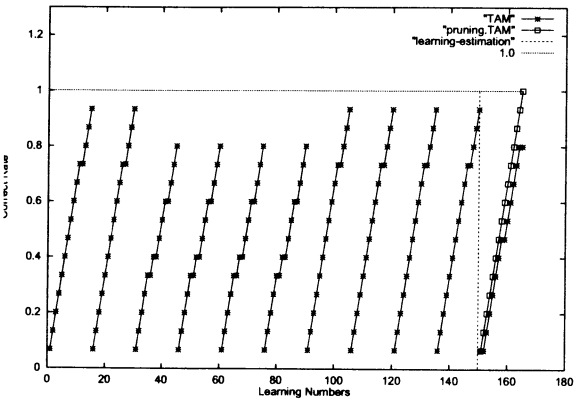


Figure 6: Correct Rate

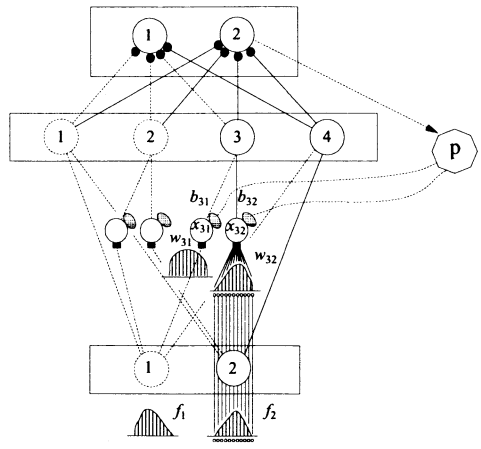


Figure 7: TAM Network after Pruning

5 おわりに

TAMネットワークのプルーニング手法を定式化し，その有効性を確認した．しかし，より高い精度のネットワークを得るには，η，θ，ξの最適値を得る新たな手法が必要である．今後，この手法や学習中での新たなプルーニング手法について検討する必要がある．

参考文献

[1] 松村 道一："ニューロサイエンス入門"，サイエンス社 (1995)

[2] K.Fukushima: "Neocognitron: A Self-Organizing Neural Network Model for a Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position," *Biological Cybernetics*, Vol.36, pp.193-202 (1980)

[3] G.A.Carpenter, S.Grossberg and J.Reynolds: "ARTMAP: Supervised Real-time Learning and Classification of Nonstationary Data by a Self-organizing Neural Network," *Neural Networks*, Vol.4, pp.565-588 (1991)

[4] G.A.Carpenter, S.Grossberg, N.Markuzon, J.Reynolds and D.B.Rosen: "Fuzzy ARTMAP: A Neural Network Architecture for Incremental Learning of Analog Multidimensional Maps," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol.3, pp.698-713 (1992)

[5] J.R.Williamson: "Self-organization of Topographic Mixture Networks Using Attentional Feedback," *Technical Report CAS/CNS TR-99-027* (1999)

[6] R.Reed: "Pruning Algorithms - A Survey," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol.4, pp.740-747 (1993)

[7] M.Umano, H.Okamoto, I.Hatono, H.Tamura, F.Kawachi, S.Umezu and J.Kinoshita, "Fuzzy Decision Trees by Fuzzy ID3 Algorithm and Its Applications to Diagnosis System," *Proceeding of Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol.3, pp.2113-2118 (1994)

[8] I.Hayashi, "Acquisition of Fuzzy Rules Using Fuzzy ID3 with Ability of Learnining for AND/OR Operators," *1996 Australian New Zealand Conference on Intelligent Information Systems*, pp.187-190 (1996)

[連絡先]

Isao Hayashi,
Hannan University,
5-4-33, Amami-higashi, Matsubara,
Osaka 580-8502, JAPAN
tel. 0723-32-1224, fax. 0723-36-2633
e.mail ihaya@hannan-u.ac.jp

WC5−1

ニューラルネットワークによる情報教育TAのスキル向上支援システムの設計

Computer assisted instruction system for teaching assistants in Informatics Education by neural networks

栗山 裕
Yutaka KURIYAMA
桐蔭横浜大学工学部
Faculty of Engineering,
Toin University of Yokohama

市村 匠
Takumi ICHIMURA
広島市立大学情報科学部
Faculty of Information Sciences,
Hiroshima City University

山下 利之
Toshiyuki YAMASHITA
東京都立科学技術大学工学部
Faculty of Engineering,
Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Abstract: This paper presents the computer assisted instruction system for teaching assistants in informatics education by neural networks with lattice architecture. The neural network is trained the teachers selected educational contents and curriculums for informatics education according to students' comprehension. Human Teaching Assistants answer simple questions and introducing topics by the neural network. This study aims to provide the teaching assistants with improving his/her skill and maximizing the benefit to the students. It was found that our technique would give the useful information for the teaching assistants to improve their teaching approach

1. はじめに

現在の高度情報化社会では，情報技術・機器の発展が著しく速く，それに応じた授業内容・授業運営が必要とされている．情報教育には演習が必要不可欠であると考えられるが，演習を行うためには一般の講義とは異なり少人数の教育方法が有効であるとされている[1]．実際の教育場面では，教授者（教師）と学習者（学生）との関係，またTA(Teaching Assistant)と学習者（学生）の関係が授業理解において重要となっている．一般的な大学情報教育課程では，教師とTA複数名により授業が運営されているが，TA個人が持っている情報処理に関する知識および操作技術には”バラツキ”があったり，また情報技術が急速に進歩していることにより，従来の専門的な技術では対応しきれない場合がある．しかしながら，このようなことにより，学習者の授業内容の理解を妨げることになっている事実もまたある．

そこで本研究では，授業内容に関連した専門技術確認システムを提案し，これをTA個々人が利用することにより授業の予習作業に伴う負荷の軽減を試みる．このシステムは，学生の情報教育に対する意識分析を表現した格子構造型ニューラルネットワーク[2]を用いることによって授業内容のコースウェアに沿った問題をTAに提示することにより，情報技術の再確認を行うとともに，学習者の誤りやすい個所を認識することを目的とする．このシステムにより，TAの技術レベルの確認を行うことが可能になり，教育現場における学生からの質問に適切に回答できることが期待される．本研究で開発したシステムを，私立大学法学部に対し行われた一般情報教育科目「情報処理」担当TAに適用した結果をここに報告する．

2. 格子構造ニューラルネットワーク[2]

格子構造ニューラルネットワークは，中間層に格子状にニューロンが割り当てられる．これらの中間層ニューロンは，ネットワークへの入力信号とそのニューロンの近傍にあるニューロンの状態により，結合重みを変化させる．図1は，3層からなる格子構造ニューラルネットワークである．出力ニューロンIN個と入力ニューロンの数OUT個があるならば，$IN \times OUT$個の中間層ニューロンが存在することになる。また，入力層−隠れ層間と隠れ層−出力層間では動作が異なっており，図2は入力層と隠れ層間での信号の流れを示している．

格子上のニューロンn_{ij}には、2つの変数p_{ij}とy_{ij}があり，p_{ij}はpre-sigmoidal activation levelであり，y_{ij}はpost-simodidal activation levelである．これらの変数p_{ij}とy_{ij}は，次式を満たしている．

$$p_{ij}[n] = a_1 F\left(Met\left(x[n] w_{ij}^{IH}\right)\right) + a_2 \sum_{k \in N_{ij}} y_k[n-1] \mu_{ij,k} \quad (1)$$

ここで，$p_{ij}[n]$は時刻nでニューロンn_{ij}のpre-sigmoidal activation levelであり，$x[n]$は$x = (x_1, x_2, \Lambda\ x_i, \Lambda\ x_{IN})$を満たす入力信号ベクトルである．

また，$w_{ij}^{IH} = \left(w_{ij,1}^{IH}, w_{ij,2}^{IH}, \Lambda, w_{ij,i}^{IH}, \Lambda, w_{ij,IN}^{IH}\right)$は入力重みベクトルと呼ばれ，$w_{ij,i}^{IH}$は入力$x_i$とニューロン$n_{ij}$との間の結合重みを示している（ただし，$1 \le i \le IN$）．$F(\ )$は正の単調現象関数で，パターン空間で入力ベクトルと入力重みベクトルとが接近しているとき，高い活性値を出力する．$Met(\ )$は距離空間でこれらの2つの距離を示す．

N_{ij} はニューロン n_{ij} の近傍集合である．y_k は格子上のニューロン n_k の出力活性値を示す．$\mu_{ij,k}$ はニューロン n_{ij} とニューロン n_k を関連づけている重みであり，双方の相対的な位置のみに依存しており，$\mu_{ij,k} = \eta(\lambda_{ij} - \lambda_k)$ である．ここで λ_{ij}, λ_k はそれぞれニューロン n_{ij} と n_k の格子状の指標である．

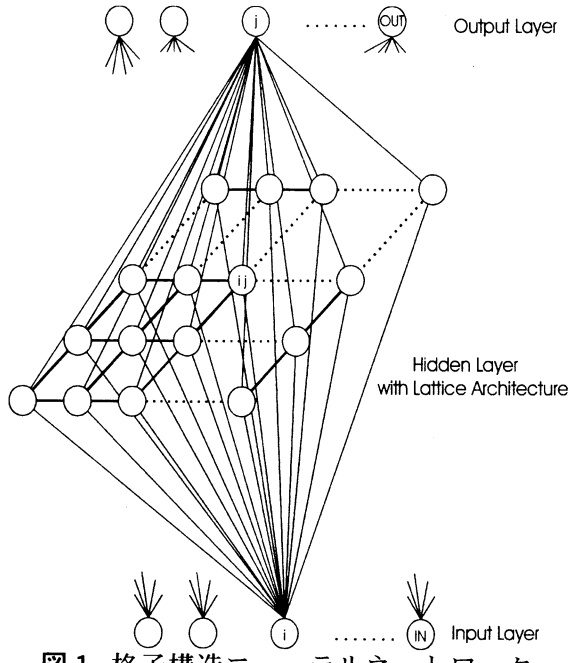


図1 格子構造ニューラルネットワーク

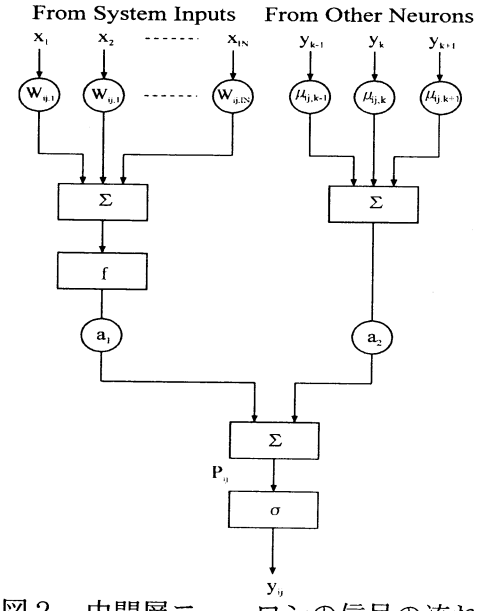


図2　中間層ニューロンの信号の流れ

$\eta(\ )$ は，図3に示されるような spatial impulse 応答関数であり，通常，高いパスフィルタの形となる．a_1 や a_2 は，システムへの入力と他のニューロンからの入力に重みづけるための定数である．

ここで $Met(\ )$ にユークリッド距離を用いるならば，$F(\ )$ は次のように書くことができる．

$$F\left(x, w_{ij}^{IH}\right) = f\left(\sqrt{\sum_{i=1}^{IN} g\left(w_{ij}^{IH}, x_i[n]\right)}\right) \quad (2)$$

ここで，$g(\ )$ は次式を満たす．

$$g\left(w_{ij}^{IH}, x_i[n]\right) = \left(w_{ij}^{IH} - x_i[n]\right)^2 \quad (3)$$

また，$f(\ )$ は次式を満たす．

$$f(z) = e^{-\lambda z} \quad (4)$$

ニューロン n_{ij} に対する出力は，

$$y_{ij}[n] = \sigma\left(p_{ij}[n]\right) \quad (5)$$

となり，$\sigma(\ )$ はシグモイド関数である．

3．教授者の意識を生かした授業

人間は多くの知識を長期記憶として蓄積しており，対話するとき，必要な知識が活性化され，これは作業記憶と言われているが，１つの文脈をもつようにまとめられ，それらは固定化されて表現されるわけではない．同じ内容の知識であったとしても，具体的には個々の「事例」をあげて表現したり，抽象化一般化して「法則・公理・ルール」として表現することもある．さらには，概念に揺さぶりをかけ強固なものにするために「反例」を出したり，「間違った事例（負事例）」を出したりする．また，質やレベルを高めたり下げたり，単純化したり，自由に話題を作り出して対話する．

人間教師が日常の授業を計画し，実行するプロセスもまた同じものと考えられる．１．指導する目標・内容を詳細に検討する．２．検討した結果，その目標を達成させるための指導内容を組み立て，豊富な知識・教材を駆使して学習内容を盛り込み，「指導案」をつくり，それを詳細化して「授業案」を書く．３．実際に授業を進める．[3]

ところが，演習のように TA を含めると教授者が複数人いる場合には，立案した指導案・授業案をそのとおりに実施できるとは限らない．これには，TA 個人にも立案した指導案・授業案を理解し，不足している知識・技術に関しては事前に再確認する必要があると考えられる．このために，次のような学習モデルを設定する．

4．一般情報教育の学習モデル

私立大学法学部で行われた一般情報処理科目の

学習モデルを作成し，これに基づいてエージェントを用いたスキル支援システムを設計する．

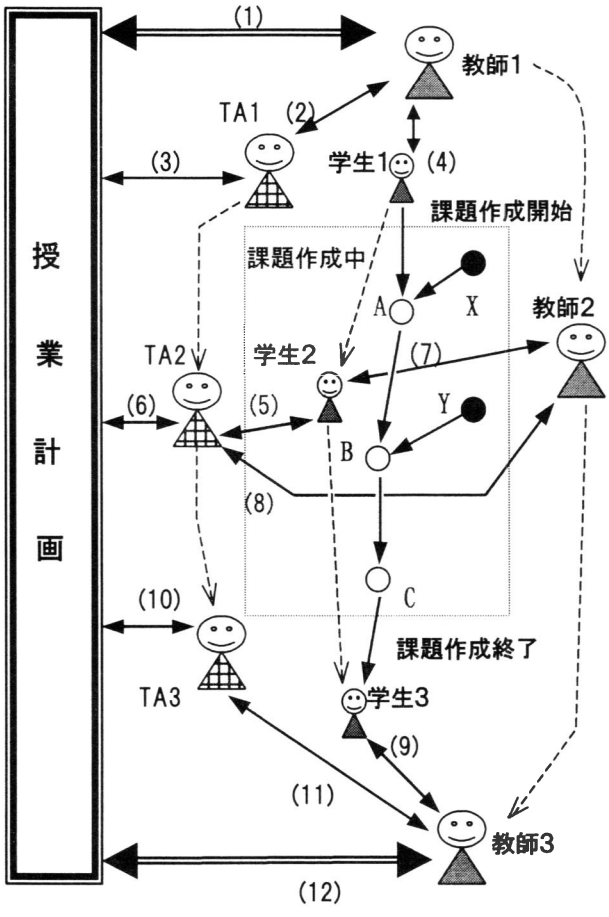


図３　情報教育の学習モデル

白丸： ○ **A,B,C**
課題作成における重要なポイントを示す．

黒丸： ● **X,Y**
授業計画になく，学生にとって有益な知識，操作技術を示す．

授業計画の検討 ⟷
授業計画に基づくコースウェアの実施状況の把握，および授業計画を検討する．

行　動 ⟷
質問，回答，意見交換，指示，提出，評価などを示す．

課題作成の流れ ⟶
重要ポイント，有益な知識および技術の伝達を示す．

人物の移動を示す ----------＞

課題作成の進捗状況により各場面に移動する．

学生が課題を作成し提出するまで，主な場面は次の３つになる．

１：課題作成開始
教師から課題作成にあたり説明を受ける

２：課題作成中
テキスト等の資料やTAのアドバイスを受けながら課題作成を行う

３：課題作成終了
課題を提出し教師より評価を受ける

教師，TA，学生に付加されている数字1,2,3は，主な場面を示し，ここでは同一人物が各場面に対応した行動をとる．



図４．教師，TA，学生に付加された数字

また，(1)～(12)の数字は各場面での行動を整理するために付けたものであり，各場面について4.1，4.2，4.3で簡単に説明する．

4.1 **「１：課題作成開始」**(1)～(4)
(1) 授業計画に基づきコースウェア，課題内容および評価方法を決める．
(2) コースウェアの内容および評価方法について指示する．
(3) 授業計画に基づいた専門知識および操作技術を確認する．
(4) コースウェアの内容，課題内容，評価方法を説明する．

4.2 **「２：課題作成中」**(5)～(8)
(5) 学生からの質問等に対応する．
(6) 学生からの質問内容から授業計画を確認する．欠如している専門知識に対して対処する．
(7) 学生からの質問および学習進行状況を確認する．
(8) 全体の学習状況より欠如している専門知識等について指示する．

4.3 **「３：課題作成終了」**(9)～(12)
(9) 課題を提出し教師が評価する．
(10) 各自のスキルレベルを確認する．
(11) 今後の授業計画および運営に反映するために意見交換する．
(12) 授業計画に基づけられたコースウェア内容および評価方法が適切に実施されたかを検討する．

5．スキル向上支援システムの設計

本研究で適用した，一般情報教育における授業項目は，「1.Windows の基本操作」「2.日本語ワープロソフト」「3.Wed ブラウザによる情報検索」「4.電子メール」である．今回は，授業項目１と２を受講した学生に対しての行われた課題作成に必要とされる TA の専門技術を確認した．授業項目１，２のコースウェアは，以下のようになる．

5.1 Windows の基本操作

「1.ソフトウェアの説明」「2.ハードウェアの説明」「3.パソコンの電源(ON/OFF)」「4.キーボード」「5.デスクトップ画面」「6.文字の入力」「7.日本語の入力」「8.マウス」「9.ウィンドウ」

5.2 日本語ワープロソフトの操作

「1.Word の起動と終了」「2.印刷」「3.文書保存」「4.文字の大きさ」「5.文字の強調（太字，斜体，下線）」「6.書体」「7.文字の位置」

5.3 課題作成

本研究において，実際に課題として学生に提示した『日本語ワープロによる課題』について述べる．

課題内容の一部資料

(1)テーマ：
『私と情報化社会』
（または、『私とコンピュータ社会』）
サブタイトルを各自でつけること
(2)用紙サイズ：
Ａ４縦 必ず１枚以内にすること。
(3)提出期限　：　＊月＊日(＊)
授業終了までに、Ａ４縦で印刷されたもの
(4)文 字 数　：２００文字以上
(5)設定指示　：
フォント種類、フォントサイズ、余白などの指示が．『見本』 に書かれています。

準備

(1)課題資料をもとに TA に指導方法と該当領域の専門的知識および操作技術を確認する．
(2)担当教員および TA に該当領域における専門知識および操作技術の優先順位を付ける．
(3)優先順位の高い項目について，格子構造ニューラルネットワークで学習を行い，その後，学生が陥りやすい誤りを見つける．これが「図３．情報教育の学習モデル」における重要なポイントになる．

教師エージェント

重要なポイントにおいて，学生が質問すると思われる項目を発生させる．すなわちスキル支援システムが「図３．情報教育の学習モデルの(5)」の役割を果たす．

質問内容（一部）

1. 何をしたか分からないけど突然変なことが起こった時の対処方法
2. 読めない漢字の入力方法
3. 間違って文節で区切れてしまった時の対処方法
4. 一部分が正しく変換されないの対処方法
5. フォント種類，フォントサイズの設定方法
6. 文字数，行数，余白の設定方法
7. ヘッダー，フッターの設定方法
8. 用紙サイズの設定方法
9. 文字数のカウントの方法
10. 印刷方法

6．おわりに

本研究では，格子構造型ニューラルネットワークを用いて教師のエキスパート意識を反映した授業内容確認システムを構築し，これを演習授業の TA に利用してもらい，情報処理の知識や操作技術の再確認を行った．授業終了後に学生（学習者）に質問紙調査を行った結果，システムの有効性を確認できた．しかしながら，ニューラルネットワークに存在する具体的な知識を明確に表現してはいない．ネットワークから知識を獲得可能にする手法の開発が急がれるところである．

参考文献

[1]山下，栗山，「大学の情報教育における人間関係」，日本教育工学雑誌,Vol.18,No.2(1995)
[2]市村，栗山，山下，「ニューラルネットワークによる大学生の情報に関する意識構造の分析」，日本教育工学会第 14 回大会講演論文集,pp501-502(1998)
[3]中山和彦，木村捨雄，東原義訓，「コンピュータ支援の教育システムーCAI」，pp252-277，東京書籍(1987)

問い合わせ先：
〒225-8502 横浜市青葉区鉄町 1614 番地
桐蔭横浜大学工学部電子情報工学科
栗山裕
E-mail:kuri@aoba.toin.ac.jp

WC5−2

ニューラルネットワークによる医療データベースからの述語論理の抽出

An extracted method of predicate logic from medical database by neural networks

市村　匠
Takumi ICHIMURA
広島市立大学情報科学部
Faculty of Information Sciences,
Hiroshima City University

吉田　勝美
Katsumi YOSHIDA
聖マリアンナ医科大学予防医学教室
Department of Preventive Medicine,
St.Marianna University

Abstract: Neural networks are often used as a black box where the knowledge is stored in the connection weights of these network. Many researchers have been attracted to make this problem transparency. In this paper, a neural network is trained by our proposed Structure Level Adaptation method that enables to generate new hidden neurons or eliminate redundant ones to grow suitable configuration of network. In order to mime classification rules from database with focus on articulating the classification rules represented by the trained neural networks, we apply extended logical function with the probability into the symbolic inductive learning. To verify the effectiveness of the proposed method, we develop medical diagnostic system related to hepatobiliary disorders.

1．はじめに

データの分類は、与えられたデータ集合を互いに素なグループに分割するルールを発見することが含まれているが、これはデータマイニング問題の１つであるといえる。大容量のデータベースにおけるデータの分類方法は、C4.5[1]のようなシンボリック学習に基づく決定木である。

一方、データにノイズが含まれる場合には、ニューラルネットワークを用いた学習が有効である。このため、学習済みのニューラルネットワークによる分類を明確に表現することに研究の関心が集まっている。ニューラルネットワークの入出力間に、一般的な記号，非記号データを用いる学習[2]や、あらかじめネットワークの構造にルールを表現した知識ベースに基づくニューラルネットワーク[3]などがある。これらの学習済みのネットワークから決定木を用いて、存在するルールを発見することも種々提案されているが、学習された知識の解釈が難しい点が弱点となっている。

この論文では、我々が既に提案した構造適応型ニューラルネットワークにより、学習期間中に訓練事例集合に最適だと考えられるネットワーク構造を定め、その後、Yuanhui により提案された SB アルゴリズムによりルールの抽出を試みる。さらに、大須賀が提案している非記号処理方式による論理表現に、真偽の程度を表す確率分布関数を付加する方法から、SB アルゴリズムで用いられている閾値を状態遷移過程が論理的含意に適切に近似し、データベースからルールを発見する方法を提案する。

提案したシステムの有効性を検証するために、肝胆道系疾患に関する生化学データベースを用いて学習を行い、そこからルールの発見を行った結果をここに報告する。

2．構造適応型ニューラルネットワーク

学習期間中に隠れニューロンの最適な数を決定する構造適応型ニューラルネットワークの方法[2]がある。これは、ネットワークの訓練中に次の隠れニューロンの動作を観察する。すなわち、

1）ネットワークにおいて、ニューロンが不十分であるときは、長時間の訓練後でさえも、重みベクトルは発散する。このとき、属性を継承するように、ニューロンを新しく生成する必要がある。
2）ネットワークにおいて、十分なニューロンがあるとき、重みベクトルはある値のまわりの小さな近傍に収束する。ところが、計算に不要なニューロンが存在するときがあるので、この場合、冗長なニューロンを消去する。

この観察に基づいてニューロン生成／消去を行うアルゴリズムについて簡単に述べる。

2．1　ニューロンの生成

ニューロンの生成は、ネットワークの表現能力が不十分である場合必要となる。仮に隠れニューロンが十分に存在しているならば、よい精度をもつネットワークが形成されることが期待される。そのため、この方法ではネットワークが新しいニューロンを生成する必要の有無を決定する指標として誤差を利用する。

また、新しく生成されたニューロンの隠れ層内での位置を、ネットワークのニューロンの学習動作をモニターすることにより決定する。高い表現能力のために、重みベクトルの振動を通じて、誤差をネットワーク全体に分配するニューロンが必要となる。長時間の訓練後において、重みベクトルの変化がまだ大きいならば、学習するであろう対象の部分的な領域に対し、十分な表現能力がないことを示唆している。このような場合には、該当するニューロンを２つに分割することで、ネ

ットワークの表現能力を高め、同じ結合をもつように他のニューロンを付加する。

2．2　ニューロンの消去

一方、ニューロンの消去に対しては、ニューロンがネットワークに機能していないか、あるいは冗長なニューロンであるときの２つの場合が考えられる。前者の場合は、ニューロンからの出力を調べることにより、そのニューロンが機能しているかどうかを観察することができる。後者は２つのニューロンが互いに依存し合っている場合で、２つのニューロンの出力値が同じ値が得られるものである。この場合、同じ働きをもったニューロンであると考えられるので、どちらか１つを消去してもネットワークの動作に影響を及ぼさない。

2．3　ニューロンの生成／消去の履行

図１は、ニューロンの生成／消去の過程を履行するための制御の流れ図である。最初に信号処理として前向きの計算が行われ、その後、ニューロンの生成／消去がそれぞれ行われる。

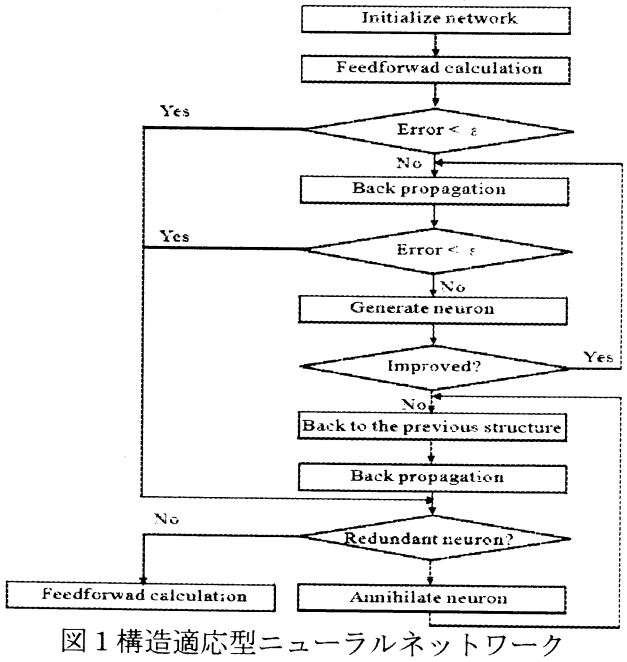


図１構造適応型ニューラルネットワーク

3．ＳＢアルゴリズム

構造適応型ニューラルネットワークにより、ネットワークは事例に対して最適と考えられる構造をもっている。このネットワークからそこに存在する知識を明確にする方法は試みられているが、この論文では、ＳＢ(Searching-based)アルゴリズム[5]を用いる。これは、入力層から隠れ層の空間を通じて、ヒューリスティック探索を行うアルゴリズムである。この結果、ルールがカバーしている空間に存在する事例は、有効な活性値を出力すると考えられる。探索の初期段階では、単一の隠れニューロンに対し、抽出される有効な区間があり、ＳＢアルゴリズムはそれぞれのニューロンからルールを抽出する。これはKTアルゴリズム[6]のような探索ベースのアルゴリズムとは異なり、正と負の重みを合成したヒューリスティック探索に基づいている。このアルゴリズムは負の重みから正の重みに変換し、重みを減少する順序でソートし、解の関数や後ろ向き深さ探索で本質的な最大一般化ルールを再帰的に抽出する。重みが減少する順番でソートすることにより、探索は最適なオーダーで行われ、重要でないルールは生成されない。探索過程において境界条件に対する関数は、次式で与えられ、部分集合解にならない不要なパスを消去する。

$$\sum_{j=1}^{k} w_j x_j + \sum_{j=k+1}^{n} w_j \geq T, \quad \sum_{j=1}^{k-1} w_j x_j < T \qquad (1)$$

kは現在のパスの木の深さを示し、$k=0,\cdots,n$であり、x_jは$\{0,1\}$である。１番目の項は選択された重みの和を示し、２番目の項はそれ以外の重みの和の最大値を示している。探索木における解の関数はどんな部分集合の不必要な超集合でも生成されないことを保証する。また解の関数は

$$\sum_{j=1}^{k} w_j x_j \geq T, \quad \sum_{j=1}^{k-1} w_j x_j < T \qquad (2)$$

であり、ここでkは現在のパスの木の深さを示し、$k=0,\cdots,n$であり、x_jは$\{0,1\}$である。

ＳＢアルゴリズムは、後ろ向き探索とは次の２点で異なっている。つまり、

a）ＳＢアルゴリズムは$a<\sum W_{ij}h_i<b$のように閉じた区間からルールを抽出可能である。正のすべての葉を生成するときには、$a<\sum W_{ij}h_i$をつくり、これらの正の葉から探索しつづけ、$\sum W_{ij}h_i<b$となるような負の葉を生成する。最終的に、根から葉まで２値的なコードにより負の葉からルールを生成する。

b）ＳＢアルゴリズムは隠れノードに対して、区間集合からルールを抽出する。実行時間による複雑性を減少する目的で、探索を終了するために１度だけ後ろ向き探索を行う。最初に増加するように区間をソートし、下界を$a_i \in A$、上界を$b_i \in B$とした２つのグループに分割する。Aの要素となるとき、$a_k<\sum W_{ij}hj$となるような正の葉を生成し、この葉から探索しつづける。Bの要素となるとき、$\sum W_{ij}hj<b_k$となるような負の葉を生成し、$b_k<\sum W_{ij}hj$となるような正の葉から探索が続けられる。この過程は上限もしくは下限になるまで続けられる。

ＳＢアルゴリズム

すべての隠れノードに対し、

Step0)現在の隠れノードの有効な区間をその入力の区間に変換する。

Step1)増加する方向に有効な区間の境界をソートし、これをSにいれる。

Step2)Sのすべての要素に対し、この次元により次の処理を行う。

Begin

Step2-1) $s_i < \sum W_{ij} x_i$ となるようなすべての正の葉を生成し、平均して$s_i > \sum W_{ij} x_i$ となるようなすべての負の葉をするために、後ろ向き探索アルゴリズムを用いる。

Step2-2)要素s_iが区間の下限であるならば、区間の上限はない。２値コード化により根から正の葉の方向でルールを抽出する。要素s_iは区間の上限であるならば、２値コード化により根から負の葉の方向へルールを抽出する。

Step2-3)このループは正の葉から続けられる。

End

抽出されたルールの書き直し

ＳＢアルゴリズムが終了した後、予め定義された属性や概念に一致しないものが含まれている場合には、ルールを書き直す必要がある。このためには２つの方法があるが、１つは隠れノードを表しているシンボルを消去する方法と、もう１つはすべての隠れノードから抽出されるルールを合成する方法である。

しかしながら、ＳＢアルゴリズムでは閾値Tは、存在する重みの値を変化させることにより、領域に生じた変化をそのまま閾値に加えたものであり、データの存在確率を考慮して決定されているとは言い難い。この論文では、論理表現を非記号処理に拡張し表現することにより、データの存在確率に基づく、閾値Tを与える方法を提案する。

４．非記号処理方式による論理推論の表現

データベースを述語への変換の試みにおいて、述語の可用性を高くしているのは、IF-THEN 形式で表される含意関係式である。データベース内のデータは記号，非記号の混在の場合がほとんどであるが、ニューラルネットワークは非記号処理を取り扱うため、非記号情報から述語論理への変換について考える。

ニューラルネットワークでは、ある特定の出力のみが真(1)で他は偽(0)にはならず、可能な出力のいくつかあるいは全てが値域(0,1)に分散した値となる。このような処理は、述語論理では正しく表現されない。これは表現範囲の差によるものである。

含意式$(\forall x)[F(x) \to G(x)]$, $x \in D$がある。Dの要素数をnとする。$F(a)$を「要素aは性質Fをもつ」であるとすると、$F(a)$もしくは$-F(a)$となる。また各要素の状態ベクトルをSF_I $(I = 0,1,2,\cdots,N-1)$とおく。だたし、Dの取り得る異なる性質の数を$N = 2^n$とする。さらに、全ての状態の集合を$\mathbf{Sf} = (SF_0, SF_1, \cdots SF_{N-1})$とする。

Dのどれかの要素の性質すなわち論理値$F(x)$, $x \in D$が変化すれば、集合Dの状態が変化する。この変化が確率的に起こるものとし、状態SF_Iである確率をpf_Iとし、状態ベクトル$\mathbf{Sf}$に対し確率ベクトル$\mathbf{Pf}$を定義する。同様に$\mathbf{Sg}$に対して$\mathbf{Pg}$を定義する。

論理的推論$F \wedge [F \to G] \Rightarrow G$が確率的プロセスの数学的表現を用いて、状態遷移の形で表される。遷移行列を$M = |m_{ij}|$とすると、この方程式は$\mathbf{Pg} = \mathbf{Pf} \times M$となる。ただし、$m_{ij}$が行列$M$の要素であり、$D$の要素ごとに、遷移の結果が論理の含意関係を満たすように決められる。

一方、非記号処理を表現するためには、論理表現に真偽の程度を表す測度をもたさせることである。$x \in D$に対して$F(x)$が真となる確率を$p(x)$とする。これを用いて「Dの全ての要素xについて、確率$p(x)$で$F(x)$である」を表す論理表現を$(\forall x)\{F(x), p(x)\}$とする。同様にして、「$D$の全ての要素に対して$x$について、確率$r(x)$で$G(x)$である」を表す論理表現を$(\forall x)\{G(x), r(x)\}$とする。

$(\forall x)\{[F(x) \to G(x)], q(x)\}$を通常の論理部分の推論

$[(\forall x)F(x), (\forall x)\{F(x) \to G(x)\}] \Rightarrow (\forall x)G(x)$

と確率部分の演算

$r(x) = f(p(x), q(x))$

に分け、fすなわち$r(x)$を求める演算をそれぞれの述語内に含まれている$p(x)$, $q(x)$の関数として得られるようにする。これによって、論理部分を大きく変更することなく、状態遷移に対する確率を付加することが可能となる。ただし、これはまったく制約を取り除いた一般化ではなく、近似的な論理化である。そのために、確率計算を状態遷移過程よる表現に対応づけ、近似化をはかる。

$\mathbf{Pf}$におけるpf_Iについて、対応する状態SF_Iに含まれるn個の要素のうち、i番目の要素の状態が真であるものの和を$\Sigma *_{i \in I} pf_I$で表す。これはDのi番目の要素xが$F(x)$という性質をもつ確率$p(x)$を表すので、$\Sigma *_{i \in I} pf_I = p(x)$である。また、

表１　肝胆道系疾患の生化学データ

疾　患　名	性別	GOT	GPT	LDH	GGT	BUN	MCV	MCH	TBiL	CRTNN
アルコール性肝障害	Male	108	114	344	176	114.8	99.7	33.1	0.6	0.9
原発性肝癌	Male	354	104	1047	265	21.4	95.9	33.5	4.8	1.0
肝硬変	Male	38	17	389	23	19.2	89.8	30.4	0.7	1.0
胆石	Male	21	11	318	40	12.1	88.6	29.4	0.7	0.6

結果の確率は、

$$r(x_i)=\Sigma_{*j\in I}\, pg_I=\Sigma_{*i\in I}\left(\Sigma_I\, pf_I\times t_{IJ}\right)$$

ここでx_iはDのi番目の要素である。これを求めるには常に遷移行列を保持しなければならないが、困難であるため、これを近似化する。

$$q(x_k)=\Sigma_{*k\in I}\, t_{NJ}$$

$$r'(x_k)=\left(\Sigma_{*k\in J}\, t_{NJ}\right)\left(\Sigma_{*i\in I}\, Pf_I\right)$$

ここでx_kはDのk番目の要素である。また、$r'(x_k)$は遷移行列のすべての列についてIJ要素を最終列NJで置き換えたもの、すなわち$m_{IJ}-m_{NJ}$として作られる結果である。実際の値と$r'(x_k)$との差は、

$$\begin{aligned} r(x)-r'(x_k)&=\Sigma_{*k\in J}\left[\left(\Sigma_I\, pf_I\times m_{IJ}\right)-m_{NJ}\times\left(\Sigma_I\, pf_I\right)\right]\\ &=\Sigma_{*k\in J}\left(\Sigma_I\, pf_I\times\left(m_{IJ}-m_{NJ}\right)\right)\\ &=\Sigma_I\left(\Sigma_{*k\in J}\, pf_I\times\left(m_{IJ}-m_{NJ}\right)\right)=\delta(x_k)\end{aligned}$$

これは一般の非記号処理の場合について言えば無視できない大きさであるが、この誤差は論理表現に近い遷移過程では減少する。ここでは論理表現から離れている誤差範囲の大きなものは棄却する。この近似のもとでは確率的結論の確率分布$r(x)$は、$(\forall x)F(x)$と$(\forall x)[F(x)\rightarrow G(x)]$のそれぞれの確率分布$p(x)$と$q(x)$の内積として得られる。

$$r(x)=f(p(x),q(x))=p(x)\bullet q(x)$$

$q(x)$はデータベースから直接求める。データベースに存在するデータは、すべて正しいとして、３つの場合、すなわち１）含意式に適合する場合，２）含意式を否定する場合，３）欠落している場合がある。データに事前知識がない場合、初期値はすべての要素に対して0.5を与える。その他の値には、予見を含むことになる。すべてのデータに対して確率を求め、確率分布$q(x)$を求める。

このように求まった$q(x)$を式(1),(2)における閾値Tとして与える。

５．医療データベースからの知識の抽出

肝胆道系疾患の生化学データに対するデータベースがある。これらは、４疾患に対し性別および９項目の生化学検査を行った被験者のデータの集まりである。[7]

ネットワークの学習には、５３６人の被験者のデータベースのうち、ランダムに選び取られた１０７個のデータを教師信号として与えている。表１はこのデータベースの１例を示している。提案した方法によりネットワークを訓練した後、そこからルールの抽出を試みた結果、IF-THEN 形式のルールが抽出できた。抽出されたルールの１例は、xを入力として、yを出力としたとき、

IF x_1 is not "LDH" and x_2 is "GGT" and x_3 is "MCV" Then y is "肝硬変".

である。

６．結論

本論文では、訓練事例に最適であると考えられるニューラルネットワークの構造を構築し、そこから状態遷移の確率をＳＢアルゴリズムの閾値に与えることで、IF-THEN ルールを抽出した。しかしながら、データベースが不完全でデータの集積によっては強化されるものの場合、非存在が否定であるとはいえない。そのため、否定に関しては、明確に否定情報としてデータベースに付加する必要がある。医療データベースの場合、被験者の検査結果に基づいているため、完全であるとは言い難く、検査結果データレベルで明確な否定情報を付加することは難しい。このために、専門家の事前知識を表現可能な知識ベースニューラルネットワークからの知識の抽出が有効であると考えられ、今後の課題となっている。

参考文献

[1]J.R.Quinlan, "C4.5: Programs for Machine Learning". Morgan Kaufmann(1993)

[2]市村ら，「構造適応型ニューラルネットワークを用いたファジィルールの推論と学習」，第９回ファジィシステムシンポジウム，pp597-603(1993)

[3]吉田，市村ら，「医療データベースからのファジィニューロによる知識獲得」，日本ＭＥ学会誌，Vol.13, No.5, pp.44-51(1999)

[4]S.Ohsuga, "Integration of Different Information Processing Methods", Deep Fusion of Computational and Symbolic Processing, Springer(1999)

[5]Zhou Yuanhui, Lu Yuchang, Shi Chunyi, "A Connectionist Approach to Extracting Knowledge from Databases", Advances in Intelligent Data Analysys (IDA-97), pp.465-475(1997)

[6]LiMin Fu, "Rule Generation from Neural Networks", IEEE Trans. on SMC, Vol.24, No.8(1994)

[7]市村ら，「構造適応型ニューラルネットワークを用いたファジィルールの学習と抽出」，第 10 回ファジィシステムシンポジウム，pp.683-686(1994)

問い合わせ先：

〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

広島市立大学情報科学部

市村匠

Phone&Fax:082-830-1690

E-mail:ichimura@its.hiroshima-cu.ac.jp

WC5－3

遺伝的アルゴリズム学習を用いたニューラルネットワークによる天気予報システムの構築
Construction of a Weather Forecast System using Neural Networks trained by Genetic Algorithm

向根 美和、 ○添川 真、 ケネスJ.マッキン、 田崎 栄一郎
Miwa Mukaine, ○Makoto Soekawa, Kenneth J.Mackin, Eiichiro Tazaki
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract: In general, weather prediction is a very complex problem, and construction of an accurate weather forecast system based on meteorology is technically very difficult and requires a large system. For this research, we reduce the problem complexity by limiting the forecast to selected numerical weather data for a predefined location. We compared different training and network structures, and were able to construct a highly accurate weather forecast system using a combination of neural networks and genetic algorithm (GA).

1 はじめに

現在、天気予報は私たちの生活環境において身近なものである。一般的に、気象予測は非常に複雑な問題であり、気象学に基づいた正確な天気予報を行うシステムは大変大掛かりで、構築するのも困難である。気象庁発信の天気予報も大規模かつ大型のコンピュータで分析して行っている。本研究では、この気象予測の範囲を固定地点の決められた種類の気象データの予測に絞ることにより問題を簡略化し、ニューラルネットワークを用いて小型でかつ高い気象予測率を確保できるシステムの構築を行った。

天気予報システムは、数式で計算するのが難しい為、予測が困難である等の問題点がある。ニューラルネットワークは一般的にデータパターン識別に適しており、学習をブラックボックス的に扱うことができる。また、ニューラルネットワークには多くの種類の構造や、様々な学習法も提案されている。それぞれの構造や学習法には特徴があり、問題によって適す場合とあまり適さない場合がある。

本研究では、ニューラルネットワークにおいて一般的に使用される誤差逆伝播（BP）学習を利用し天気予報システムに適したニューラルネットワークの検討を行った。BPのみの学習では、最適解まで到達せず局所最適解で留まってしまう場合があるため、これを避ける為に遺伝的アルゴリズム（GA）を取り入れての学習も行った。その他、学習方法やネットワーク構造の違いによる学習効率を比較し、高い気象予測率を確保できるシステムを構築した。

2 ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークとは、脳における神経回路網の信号伝達系をモデルとした情報処理法である。これはニューロンと呼ばれる多くのノードを網目のように結合させ、その結合における重みにより、情報の処理手順や量的な関係を修得させる方法である。このようにして作られたネットワークにより、データのパターン識別を行う事ができる。また、ある入力パターンに対して望ましい値が出力されるようにニューロン間の結合重みを調節することを学習という。

今回、天気予報システム構築にあたって以下の学習方法とネットワーク構造を検討し、学習効率の違いを比較した。

2．1 階層型ニューラルネットワーク

階層型ニューラルネットワークとは図1に示すように、ニューロンを層状に結合したものである。これは、ネットワーク外部より入力信号を受け取る入力層、外部にネットワーク全体としての出力信号を供給する出力層、及びこの２つの層間に１つないし複数存在する隠れ層から構成される。このネットワークの入力層にデータを入力すると、ニューロン間にある結合重みにより計算処理を受けた信号が次の層へと伝わっていき、出力層からある値が出力される。

2．2 誤差逆伝播（BP）学習

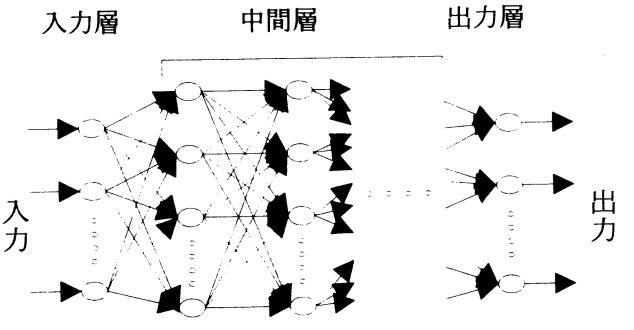


図1 階層型ネットワーク

誤差逆伝播（BP）学習は、出力と教師信号との誤差がネットワークを構成するすべてのユニットおよび結合から生じているとみなし、それぞれの重みを調整していく。つまり、結合を通じて出力と教師信号の誤差を前の層へと伝えることにより、各ニューロンの重

み、閾値を変動させ、ニューラルネットワークを求める学習法である。

学習は、誤差関数をなるべく0にするように結合の重みを修正し、学習信号を求める。その後、結合の重みの修正を再度行い、最後に閾値の修正をする。この動作を繰り返し、誤差を小さくする。

ＢＰ学習を行う時には、隠れ層数や各隠れ層でのユニット数といった構造パラメータを事前に決定することが必要である。

２．３ 遺伝的アルゴリズム（GA）学習

遺伝的アルゴリズム（GA）学習は、進化論的な考え方に基づいてデータを操作し、最適化の問題や学習、推論を扱う学習法である。

GAでは、探索空間中の探索点を一点ずつ順番に探索するのではなく、複数個の探索点を同時に用いる。また、各探索点が遺伝子を持つ仮想的な生物であると見なし、各固体に対してそれぞれ環境との適応度を計算する。ここで、低い適応度を持つ固体を淘汰させ、高い適応度を持つ固体を増殖させ、親の形質を継承した遺伝子を持つ子孫の固体を生成する世代交代シュミレーションを実行する。この際、遺伝子の交差、および突然変異と呼ばれる操作を行う。GAでは、最終的に最も高い適応度の固体を求める事により、探索問題を解決する。

２．４ 入力データの正規化

入力データの範囲はそれぞれ異なるので、それらの範囲を統一させるデータの正規化を行う事により、出力誤差を確実に0から1の範囲にする事が出来る。これにより、それぞれのデータを区別することなく取り扱う事が出来る。

今回は最大値を使って正規化する手法を用いる。 今回のニューラルネットワークの入力は0から1の範囲に制限する。そこで、データを0から1の範囲で入力させる為、実際のデータの最小値を0へシフトし、最大値で入力データを割る。これを行う事により、データの最大値は1になり、最大値から遠ざかるにつれて0になる（図2）。

また、正規化の別の手法として、データを0から1の間に離散的に分配する手法も行い、比較する。これにより、特定の範囲内のデータは同じ値をとる事になり、学習に違いが見られることが期待される（図3）。

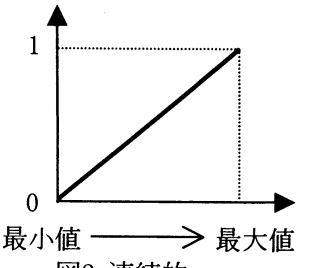


図2 連続的

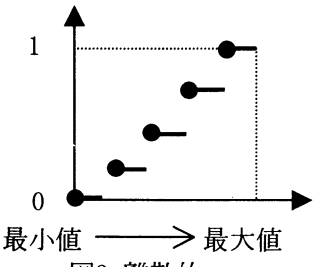


図3 離散的

３ 実験方法

調べたい日から過去4日分の天気データを入力し、調べたい日の天気を予測することが可能なシステムの構築にあたり、以下の手順で実験を行った。

(1) 教師データとなる天気データ（雨量、風速、日照、気温）を気象庁発行気象データCD-ROMより収集する。

(2) (1) で収集したデータを利用し、天気予報システムを構築する。入力数は、過去4日分 のそれぞれ4種類（雨量、風速、日照、気温）の天気データ、つまり、16個のデータとした。出力数は雨量、風速、日照、気温がそれぞれ出力するように4個のデータとした。

(3) 天気予報システムの性能向上の為 、以下に述べる条件に着目して検討した。中間層の数と中間層一層あたりのニューロン数の精度への影響を調べる為に学習データを 固定（1地点分×1年分）し、BP学習を行い中間層の数と中間ニューロンの数をそれぞれ変化させ比較した。

①学習データ件数の影響をみる為、中間層の数2層、中間ニューロンの数16個、年数を1年分に統一しBP学習を行い、地点1点分のデータで学習した場合と、地点を15地点分に増やして学習した場合の精度の比較

②学習データ件数の影響をみる為、中間層の数2層、中間ニューロンの数16個、学習データ件数を15地点分と統一し、BP学習を行い過去1年分のデータで学習した場合と、過去5年のデータで学習した場合の精度の比較

③入力データの正規化を連続的な値にした場合と、離散的な値にした場合の精度の比較をみる為、中間層2層、中間ニューロンの数16個、学習データ件数を1年分、1地点分と統一し、BP学習を行った。

④BPのみで学習した場合と、BPとGAを組み合わせた場合の比較をみる為、中間層2層、中間ニューロンの数16個、学習データ件数を5年分、15地点分と統一し、BP学習とBP+GA学習を行った。

４ 実験結果

実験の結果は以下の通りになった。

①中間層の数と中間層一層あたりのニューロン数をそれぞれ変化させた場合の精度

表1. 中間層の数(L)と中間層一層あたりのニューロンの数(N)を変化させた時の出力誤差

L	N	雨量[mm]	風速[m/s]	日照[h]	気温[℃]
1	8	8.79	1.91	3.55	4.04
1	16	8.71	1.83	3.39	3.86
1	32	7.91	1.82	3.97	3.42
2	8	10.85	1.80	3.60	3.62
2	16	8.65	1.84	3.56	4.02
2	32	6.14	2.18	3.71	3.12
4	8	9.84	1.68	3.50	3.57
4	16	8.23	2.03	3.57	3.51
4	32	7.06	2.05	3.78	3.45

②学習データ件数を確保する為、1地点から15地点に増やした場合の精度

表2. 地点1点の時と地点15地点の時の出力誤差

	雨量[mm]	風速[m/s]	日照[h]	気温[℃]
地点1	8.65	1.84	3.56	4.02
地点15	7.83	1.10	3.57	2.65

③学習データ件数を確保する為、1年分を5年分に変えた場合の精度

表3. 過去１年分と過去５年分の時の出力誤差

	雨量[mm]	風速[m/s]	日照[h]	気温[℃]
1年分	7.83	1.10	3.57	2.65
5年分	7.13	1.19	3.44	1.42

④入力データの正規化を連続した場合と離散的な値で学習した場合の精度

表4. 連続的な値で正規化した時と離散的な値で正規化した時の出力誤差

	雨量[mm]	風速[m/s]	日照[h]	気温[℃]
連続的	8.65	1.84	3.56	4.02
離散的	8.31	1.89	3.79	4.07

⑤BPだけで学習した場合と、BPにGAを取り入れて学習した場合の精度の変化

表5. BPとGAを変化させた時の出力誤差

	雨量[mm]	風速[m/s]	日照[h]	気温[℃]
BP	7.13	1.19	3.44	1.42
BP+GA	4.54	1.01	3.75	1.39

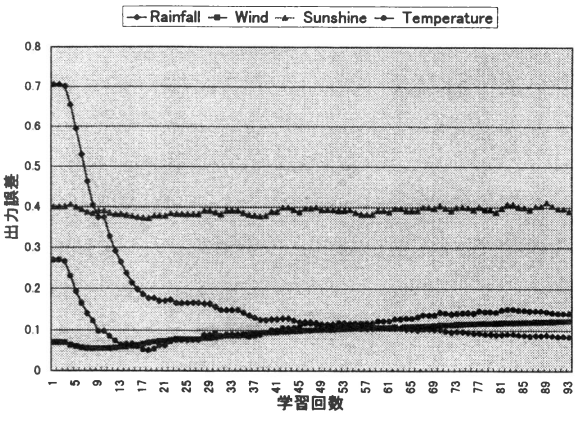


図4.1 中間層2層、中間ニューロン数8個の場合の出力誤差

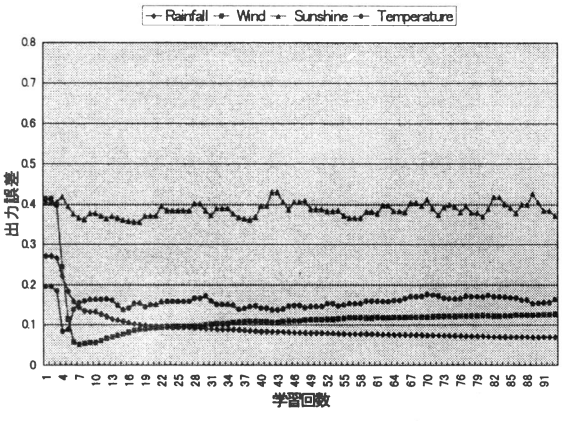


図4.2 中間層2層、中間ニューロン数16個の場合の出力誤差

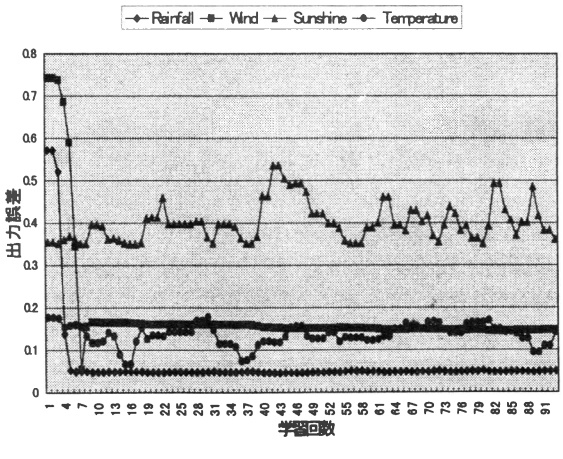


図4.3 中間層2層、中間ニューロン数32個の場合の出力誤差

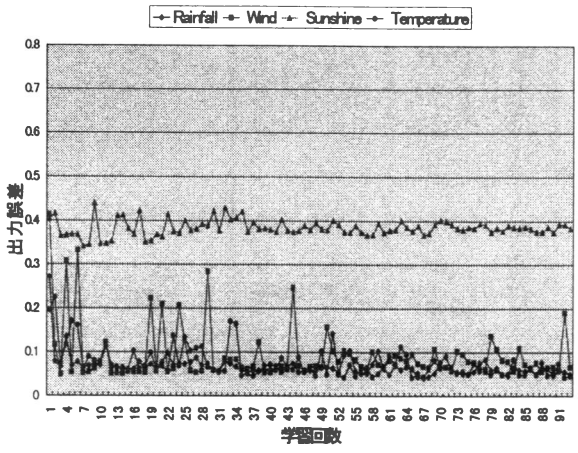


図4.4　BPのみで学習した場合の出力誤差

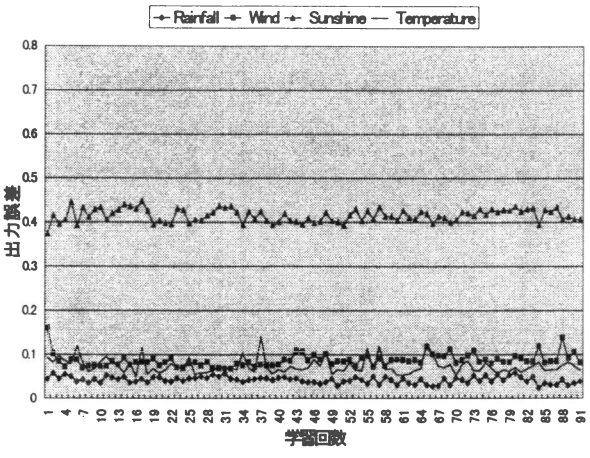


図4.5　BPにGAを取り込んで学習した場合の出力誤差

5　結果と考察

表1より、中間層の数（L）を中心に考えて見ると、L1、L2，L4ではL２が一番出力誤差も少なくなり、他のものに比べ、精度の向上がみられる。

次に中間ニューロンの数（N）を比較してみると、N8、N16、N32ではN16が一番精度が良い。これより、中間層の数と中間ニューロンの数は少なすぎると精度に向上が見られず、多くても学習時間がかかる割にそこまで精度が向上しない事を意味している。その違いをわかりやすく表示するために中間層の数（L）をL2に統一し、中間ニューロンの数をN8、N16、N32のグラフを図4.1、図4.2、図4.3とした。グラフは縦軸が出力誤差で0に近づけば近づくほど誤差が少ないことを意味し、横軸は学習回数で100回まで学習している。図4.1では、学習ニューロン数が少ない為ゆるやかな曲線を描いている。図4.2は図4.1の2倍のニューロンを持っているため学習が速い事がグラフから読み取れる。図4.3になるとニューロン数が多すぎて結果をだすのに時間がかかる。

表2、表3より学習データ件数（地点、年数）を増やした場合、出力誤差は少なくなった。これは、学習データが多くなった事により、ニューラルネットワークが柔軟でロバストになったことが予想される。

表4より、天気データは連続的な値より、離散的な値として扱うほうが精度は向上する事が明らかになった。これは、データにばらつきがある為、連続的な扱いがしにくい事を表している。

表5より、BPだけで学習するよりGAを組み込ませた方が、出力誤差が少なくなった。これは、GAを組み込むことにより、局所最適解にとどまることなく、学習が進んだと考えられる。その結果の過程を表したものが図4.4と図4.5である。図4.4でばらつきがあるグラフもGAを取り入れる事で図4.5の様に出力誤差の少ない精度の向上したグラフになる。

以上の実験により、中間層数2、中間ニューロン数16、学習データ5年×15地点分、離散的正規化、そしてGAとBPの組み合わせ学習でもっとも精度の高いニューラルネットワークが構築された。また実験結果により、小型ニューラルネットワークによる実用的な天気予報システムは十分構築可能であるといえる。

参考文献

[1]今井兼範：ニューラルネットワーク―コレクション―、共立出版、1990

[2]電気学会（編集）：遺伝的アルゴリズムとニューラルネット―スケジューリングと組み合わせ最適化―、コロナ社、1998

[3] D.E.Rumelhart, G.E.Hinton and R.J.Willams: Learning Internal Representations by Error Propagation, ICS Report 8506, Institute for Cognitive Science, University of California at San Diego, 1985

[4]アメダス観測年報：テキストファイル版、CD-ROM、(財)気象業務支援センタ、1994, 1995, 1996, 1997, 1998

[問い合わせ先]
〒225―8502
神奈川県横浜市鉄町1614
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
田崎 栄一郎
TEL: 045-974-5070
FAX: 045-978-1311
E-mail: tazaki@intlab.toin.ac.jp

WD1−1

自律移動ロボットによる教示情報の理解のための一考察

A Preliminary Study on Teaching Information Understanding by Mobile Robot

井谷　久博
Hisahiro Itani

古橋　武
Takeshi Furuhashi

名古屋市工業研究所
Nagoya Municipal Industrial Research Institute

名古屋大学
Nagoya University

Abstract This paper studies understanding of humans' teaching information by a mobile robot. Two steps of teaching information understanding is introduced in this paper. The first step is to ground the teaching information by reconstructing them through collection of data using the teaching information and acquisition of rules from the data. The second step is to extract the skill implicitly included in the teaching information for learning in a new environment.. A simulation using a mobile robot is done to demonstrate the understanding of the humans' teaching information.

1　はじめに

人間の知覚情報処理は処理過程により，大きく二種類に分けられる．一つは，知覚や触感などにより認知できる風景や事物のような，パターン的情報を扱うパターン処理である．もう一つは文字のような記号を認識し，その記号に符合するパターンと照合してその意味内容を認識する分析的処理の二つである．情報伝達手段としての記号は，受け手側において，その意味するものをパターンデータと照合し理解へと至る．本稿ではロボットによる人間の教示情報の理解について考察する．

筆者ら[1]はこれまでにロボットによる人間の教示情報の理解の第１段階として，教示情報の接地について考察を行った．記号接地問題[2][3]は形式的な記号システムの意味的解釈をシステムと環境内に内在する固有のものに接地する問題である．文献[1]の教示情報の接地は，トップダウン的に与えられた教示情報をロボットのセンサ情報に接地する過程において，人間から与えられた記号情報を，ロボットの物理的制約に基づいた記号情報へと再構成することをいう．

教示情報からの学習をロボットが必要とする理由として，(1) 教示者が情報を省略する，(2) 教示者自身に誤りがある，(3) 予測不可能な事態が発生する，(4) ロボットや環境のモデル誤差があることなどが考えられる[4]．すなわち，CCD カメラ・赤外線 (IR) センサなどを装備した移動ロボットに人間が教示情報を与える場合，環境の不確かさ・不完全さや人間とロボットのセンサ・アクチュエータ構造の差異のため，ロボットがただちに実行できる教示情報を与えることは困難なことが多い．

筆者らは，ロボットが人間の教示情報を基にタスク環境内で行動し，ロボット自身が自らのセンサ情報を利用してタスク実行のための行動ルールを獲得することを，ロボットによる教示情報の接地と捉え，人間の教示情報を接地する自律移動ロボットシステムを提案した[1]．このシステムでは，遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) とファジィニューラルネットワーク (Fuzzy Neural Network: FNN) を用いて，教示情報に基づく自律移動ロボットの行動結果からセンサ情報選択とメンバシップ関数の配置位置決定を行った．ステレオカメラと IR センサを装備する自律移動ロボットが，人間から与えられた（ロボットにとっては）間接的な視覚に基づいた教示情報を基に障害物を回避しながら目標地点に到達するタスクを実行し，この結果に GA と FNN による学習[5]を導入した．

大野・古橋[6]は移動ロボットの行動獲得において，注視点変化をもたらす行動変化が習熟において重要であるという仮定を設け，そのような行動ルールを抽出・利用することで新たな環境下での再学習の効率化を計っている．

本稿では，ロボットが未知の状況でも速やかに学習できる重要な情報（コツ）を教示情報から獲得することを，ロボットによる教示情報の理解の第２段階と捉える．文献[1]と同様の問題設定において，未知の状況でもすみやかな学習ができる重要な情報を，抽出できることを示し，ロボットによる教示情報の理解の可能性について考察する．

2　移動ロボットによる教示情報の理解

本研究において想定するロボットと人間のモデルを図１に示す．人間は未知の環境下で行動する場合，目や耳などの感覚器官から環境のパターン情報を得，過去の知識から得られた記号情報と照合し分析的処

理による行動戦略を立てる．そして，実際に手足などを用いて環境に働きかけ試行錯誤を通して記号情報とパターン情報を関連づけ，パターン処理による行動を獲得する．一方，ロボットは人間からの教示情報とセンサによって得られたパターン情報を基に行動戦略を立て，環境内でモータを用いて行動する．このとき環境から得たパターン情報を教師データとして学習を行い，人間から与えられた記号情報をロボットの物理的制約に基づいた記号情報へと再構成する．この過程を文献[1]ではロボットによる人間の教示情報の接地と捉えている．これはロボットによる教示情報の理解の第1段階と位置づけられる．

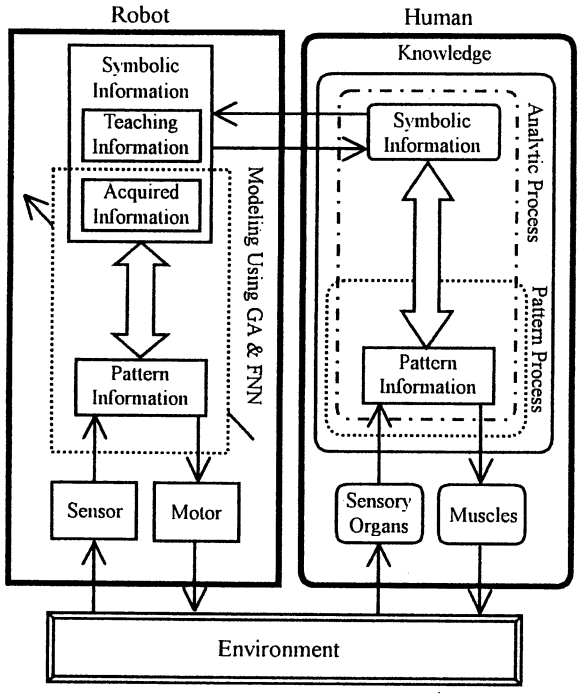


図1：人間とロボットのモデル

自律移動ロボットが人間の教示を接地することにより，ロボットが取り扱うデータの質は，教示情報とは異なったものになりうる．それは，人間が与える情報は人間が環境を観察して得たデータを利用して人間の知識を基に作成した行動ルールであり，ロボットが環境から直接得るデータとは異なる間接的なデータであることによる．また，ロボットの物理的制約をすべて考慮して行動ルールを作成することは非常に困難である．自律移動ロボットが教示情報を接地するためのデータは自分自身の物理的制約も含めた外部環境との相互作用の中で直接得られるデータ（パターン情報）である．

さて，人間がロボットに与えた教示情報には学習のコツが含まれている可能性がある．ロボットがこのコツを捉えることができれば，ロボットは未知環境における自律的再学習を効率良く行うことができると期待される．このコツの獲得はロボットによる教示情報の理解の第2段階として位置づけられる．

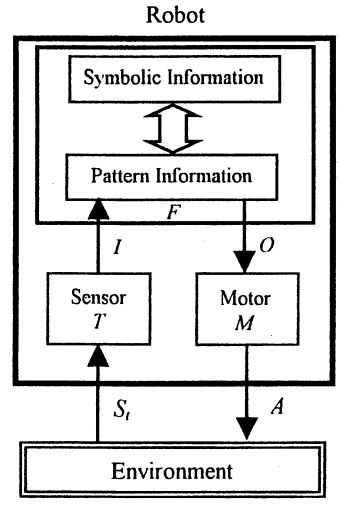


図2：ロボットモデル

3　ロボットモデル

本研究においてHorswill[7], Ohno・Furuhashi[8], 服部・古橋[9]のモデルをもとに図2のロボットのモデルについて考察する．自律移動ロボットの存在する環境Eはロボットの状態S_tとロボットの行動Aからなり，$E = (S_t, A)$と表される．ロボットは状態S_tをセンサTにより検知する．すなわちセンサにより環境情報がロボットの入力Iへと写像される．

$$T: S_t \rightarrow I \tag{1}$$

入力データは人間の脳に相当するロボットの処理系Fによって行動命令出力Oに写像される．

$$F: I \rightarrow O \tag{2}$$

行動命令はモータMによって環境に対する行動Aに写像される．

$$M: O \rightarrow A \tag{3}$$

センサTより得られる入力データIの空間をp次元，モータMへの出力Oの空間をq次元とすると，ロボットは環境との相互作用の過程で入力$X = \{ x_k \mid x_k \in I \subset \boldsymbol{R}^p, k = 1, 2, \cdots, n \}$，出力$Y = \{ y_k \mid y_k \in O \subset \boldsymbol{R}^q, k = 1, 2, \cdots, n \}$のデータを得る．$X$, Yはパターン情報であり，パターン間の関係を利用した認識・推論などのパターン処理がなされる．記号はこれらパターンに対するラベルとして与えられ，ラベリングは射影（projection）Πで表される．

$$\Pi: I \rightarrow S \cup \{\perp\} \tag{4}$$

$$\Pi : O \rightarrow S \cup \{\perp\} \quad (5)$$

射影Πは記号の集合Sとそれ以外$\{\perp\}$を与える．

教示情報の理解の第1段階（接地）では，人間がロボットに対して与えることを期待されるF, Π, Sは，これらが適切であればロボットは学習を必要としない．しかし，前節で述べたように，このことは困難である．人間がロボットの視点に立って教示を行ったとしても，ロボットに与えられるのはF, Π, SとはずれたF', Π', S'である．ロボット自身はこの教示情報を基に，与えられたタスクを実行するためのF, Π, Sを環境との相互作用を通して見つけ出す．

人間が与える教示情報 F', Π', S'は未知環境に対して速やかな学習を可能とする情報を含むことが期待される．このような情報は明示的には与えられていない．教示情報の理解の第2段階では，ロボット自身が自律的に作るF, Π, Sが人間の持つコツ情報F_M, Π_M, S_Mを含むことと捉える．

4 通路通過問題

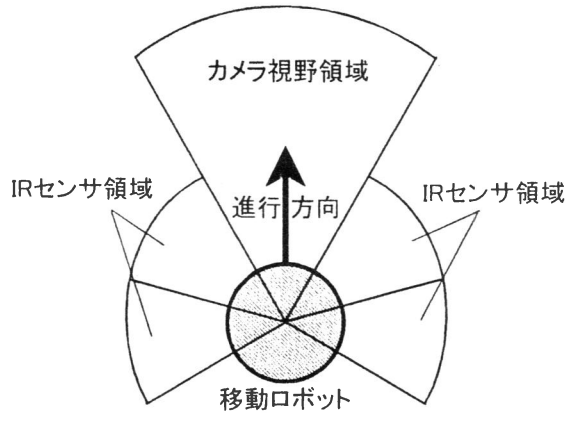


図3：移動ロボットセンシング領域

自律移動ロボットによる教示情報の理解を考察するために，等間隔の通路を壁に衝突することなく通り抜ける通路通過問題を考える．自律移動ロボットは直径20 cmの円形とし，壁面検出用のセンサとして，CCDカメラとIRセンサを装備し，0.1 secごとにセンシングを行う．図3は本ロボットのセンシング領域を示す．CCDカメラは自律移動ロボットの中心に搭載され，進行方向正面から左右30度，400 cm先までの物体を撮ることができる．IRセンサは自律移動ロボットの進行方向（時計回りを正とする）から55.5度（右前），101度（右），−55.5度（左前），−101度（左）の方向に固定され，一定の距離（50 cm）以内の壁面の有無を検出できる．図2に通路の一例を示す．通路は入口から出口まで一定幅250 cmで，左に直角に曲がっている．自律移動ロボットは1ステップに最大左右20度の方向転換が可能で，壁面との衝突回避行動は方向転換のみで行い，一定速度（10 cm/sec）で進行する．

5 シミュレーション

コンピュータシミュレーションを行った．移動ロボットは図4の左曲がりの通路で，視野内に壁がないときは直進するが，視野内に壁をとらえたとき表1のファジイルールに従い行動する．この表1の記号は人間が与えたS'である．各記号に対するメンバシップ関数がΠ'，ファジィ推論がF'に対応する．自律移動ロボットはこの教示情報に基づいて通路通過運動を行う．このときCCDカメラとIRセンサから得られる情報を記録する．ただし本実験では，14種類の入力情報（x_0：壁面との最短距離，x_1：最短距離の変化，x_2：最短距離方向の相対角度，x_3：最短距離方向の相対角度の変化，x_4：前方距離，x_5：前方距離の変化，x_6：視野の右端距離，x_7：右端距離の変化，x_8：左端距離，x_9：左端距離の変化，x_{10}：1ステップ前の出力，x_{11}：赤外線センサ右後，x_{12}：赤外線センサ右前x_{13}：赤外線センサ左前，x_{14}：赤外線センサ左後）と1種類の出力情報（y_0：回転角度）を記録する．壁面に衝突するか出口に到達するまでを1回の試行とし，入口におけるロボットの初期位置と向きをランダムに変えて50回の試行を行い，出口に到達したときの行動より得られたデータのみを蓄積する．次に，蓄積されたデータを教師信号として，GAによりFNNのモデルを構築する．

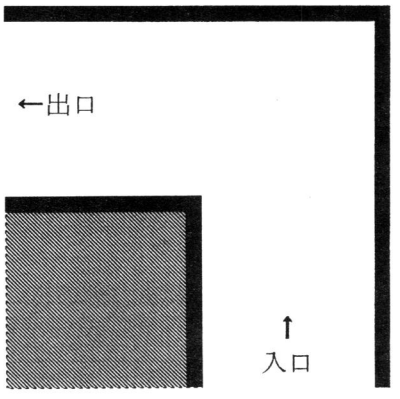


図4：左曲がり通路

ランダムシードを変えてGAとFNNによる学習を200回行い，得られた200通りのFNNを用いてそれぞれ100回の通路通過シミュレーションを行った．ここで，成功率が90%以上のFNNにおける入力情報の使用頻度を表2の左側のコラムに示す．

次に200通りのFNNを用いて未学習の右回りの通路を通過するシミュレーションをそれぞれ200回行い，成功率が75%のFNNにおける入力情報の使

用頻度を表2の右側のコラムに示す．右回りの通路は、図4の通路を左右反転して得た．

以上の結果からは，教示情報の接地の過程で重要な入力情報はx_0，x_2，x_3，x_6，x_8であること，その中でも未知の環境ではx_2，x_3，x_6，x_8の入力情報が重要であることが分かった．この結果が示唆することは、未知環境ではx_2，x_3，x_6，x_8の入力情報に着目することが学習の効率化に有効であると期待されることである．ロボットが自律的にこのような情報を獲得したことで、ロボットは教示情報を理解したと捉える．未知環境での学習の効率化の検証結果は発表時に示す．

表1：教示ファジイルール

角度 / 距離	右	やや右	真ん中	やや左	左
近い	やや左回	左回	左回	右回	やや右回
中	やや左回	左回	やや左回	右回	やや右回
遠い	直進	やや左回	直進	やや右回	直進

表2：各入力情報の使用頻度

入力情報	頻度（左）	頻度（右）
x_0	81	3
x_1	7	0
x_2	142	31
x_3	28	7
x_4	23	3
x_5	12	1
x_6	43	10
x_7	6	3
x_8	33	7
x_9	15	1
x_{10}	14	2
x_{11}	2	0
x_{12}	1	1
x_{13}	2	1
x_{14}	1	1

6 まとめ

本稿では，自律移動ロボットによる教示情報の理解について考察を行い，教示情報を接地することを理解の第1段階と捉え，ロボットが未知の状況でも速やかに学習できる情報（コツ）を教示情報から捉えることを教示情報の理解の第2段階と捉えた．通路通過のシミュレーションを行い，第2段階の理解の可能性を示した．

今後は本シミュレーションで得られた入力情報選択結果を用いて，新しい環境下での学習の効率化について検証を進める．また，実験を行い，実システムでの検証を行う．

参考文献

[1] 井谷，古橋：衝突回避運動における自律移動ロボットによる教示情報の接地に関する一考察，計測自動制御学会論文集，投稿中．

[2] S. Harnad: The Symbol Grounding Problem, Physica D, Vol.42, pp.335-346, 1990.

[3] 麻生：情報統合技術－実世界知能のためのキーテクノロジー－，RWC NEWS，Vol.5，http://www.rwcp.or.jp/rwc-news/05/intelligence.html，1996.

[4] 川村，深尾，櫟：ロボットの教示と学習，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.2，pp.162-165，1999.

[5] 橘，古橋：サブモデルの前件部メンバシップ関数の不均等配置を実現する階層化ファジィモデリングの提案，第7回インテリジェントシステムシンポジウム予稿集，pp.53-58，1997.

[6] 大野，古橋：注視点制御知識による仮想的な移動ロボットの行動獲得手法，電気学会論文誌C，119-C, 2, pp.157-163, 1999.

[7] I. Horswill: Analysis of adaptation and environment, Artificial Intelligence, Vol.73, pp.1-30, 1995.

[8] H. Ohno and T. Furuhashi: A Conceptual Framework for Construction of Autonomous System and its Application to Input Variable Selection for Cart Pole Control, Proc. of International Workshop on Soft Computing in Industry (IWSCI'99), pp.48-53, 1999.

[9] 服部，古橋：未知・不完全入力に対する状況マップによるファジィ推論システムの補完に関する研究，第15回ファジィシステムシンポジウム予稿集，pp.25-28，1999.

［問い合わせ先］

〒456-0058　愛知県名古屋市熱田区六番3-4-41
名古屋市工業研究所
電子情報部　制御技術研究室
井谷　久博
Tel: 052-654-9933　Fax: 052-652-6776
E-mail: itani@nmiri.city.nagoya.jp

WD1−2

多足ロボットにおけるファジィ推論を用いた起立動作およびバランス制御

Stand-up Motion and Barance Control for Multi-legged Robot Using Fuzzy Reasoning

○北山 功, 和久田 肇, 仲田 明紀
Isao KITAYAMA, Hajime WAKUDA, Akinori NAKATA

水本 雅晴, 前田 陽一郎
Masaharu MIZUMOTO, Yoichiro MAEDA

大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Adstract–Generally it isn't easy to describe the behavior of a complex control object like multi-legged robots. So, the method which can describe the behavior of the robot intuitively by using fuzzy control is proposed in this research. Complicated behaviors can be described with this method due to parallel processing of the rule. We producted a four-legged robot with 12 degrees of freedom, and described fuzzy rules for the stand-up motion and the balance control. We confirmed the efficiency of the proposal method by the experiment of a real robot.

1 緒 言

近年、ロボット工学の分野ではアクチュエータやセンサの数がますます増大化、複雑化しつつある。このように対象とするべきロボットが複雑である場合、力学モデルを使用して行動を記述する等の方法は非常に困難である。そのため最近ではソフトコンピューティングを使用したロボットの動作の記述や最適化の研究に注目が集まっている。

ソフトコンピューティングを複雑な機構を持つロボットに使用した例としては、A.Brooks の SSA を使用した 6 足ロボット (ginhis) の適用行動 [1]、牛尾らの 8 足ロボット ($Oct-Ib$) を使用した強化学習を用いた歩容パターンの獲得実験 [2]、野村らの 8 足ロボット ($Oct-Ib$) を使用した遺伝的アルゴリズムによる歩容パターンの生成実験 [3] などが知られている。しかしながら行動記述が難しい、試行回数がかかりすぎて実用的とはいえない、微妙なチューニングによる行動記述ができないなどという欠点があった。

そこで本研究では、複雑な機構、入出力系を持つロボットに対して動作を複数個記述し、その動作の並列発火、重み付け [4] を用いて行動を直感的に記述できるような多入力多出力ファジィ推論を提案する。さらにその提案した方法を用いて、今回製作した 4 足ロボット (図 1) において起立動作とバランス制御を行うための行動を記述することを試み、実機実験を行う。これにより提案した手法を複雑なロボットに使用した場合、提案した手法で複雑なロボットの行動が記述できるかどうかについて検証する。

2 多足ロボットの行動記述のためのファジィ推論の提案

一般に、ファジィ推論を使用して複雑なロボットの行動を記述する場合、センサ数、状態数、出力数が多い場合にファジィルールを記述すると、ルール数が非常に多くなり、ルールを記述することが困難になる。しかもロボットのセンサ数が 1 つ増えて入力が 1 つ増えた場合、再度ルールの構築を最初からしなければならないという問題があり、一般に複雑なロボットの行動を記述がすることは容易ではない。そこで本研究では、複雑なロボットに対しても簡単かつ直感的にファジィルールを構築することにより、容易にロボットの行動を記述できる方法を提案する。

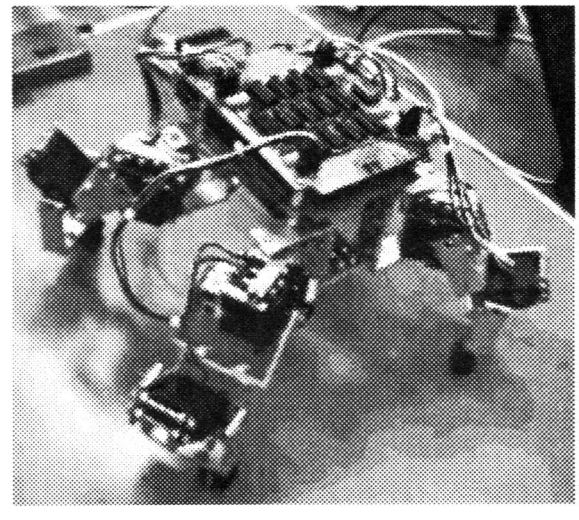
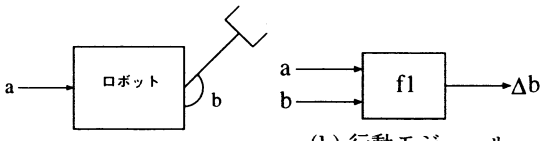


図 1: 今回製作した 4 足ロボットの外観

例えば、図 2(a) のようなセンサが 1 つ、関節が 1 つのロボットの場合、ファジィ推論における入出力関係は例えば図 2(b) のようになる。このときの a は入力、b は関節角度、Δb は b の操作量、$f1$ はファジィ推論モジュールとする。ここでは、この入出力関係を行動モジュールと呼ぶことにする。ここで図 3(a) のように関節数が 1 つ増えたと仮定すると、図 3(b) に示すように、a, b を入力とするファジィ推論モジュール $f1$ と、b, c を入力とする 2 つのファジィ推論モジュール $f2, f3$ を考える。図の点線で囲まれた部分を 1 つの動作モジュール $d1, d2$ と定義し、その動作モジュールに重み $k1, k2$

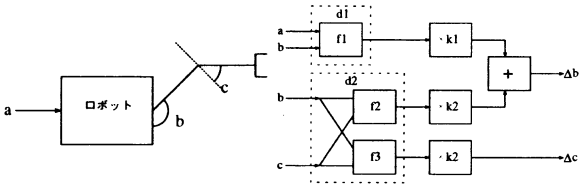
を掛けたものを出力Δb,Δcとする。

その結果、本研究で提案するファジイ推論法は、SSAのように動作を加算的に付け加えて行くようにロボットの行動を記述できる性質を持ち、knによる動作の重み付けをすることにより、直感的なチューニングを行えるような性質も持っている。



(a) モデル　(b) 行動モジュール

図 2: 単純なロボット



(a) モデル　(b) 行動モジュール

図 3: 複雑なロボット

3　今回製作した4足ロボット

ここでは今回製作した4足ロボットについて紹介する。この4足ロボットは稲葉 [5] の提案するようなリモートブレイン方式を用いるなど「脳を持ち歩かないロボット」のような設計思想に基づいて製作した。4足ロボットの外観を図1に示す。このロボットは4足12自由度のロボットで角度センサが2つ搭載されており、ロボット本体のロール角度, ピッチ角度の状態を計測できる。

3.1　ロボットのシステム構成

ロボットのシステム構成を図4に示し、スペックを表1に示す。この4足ロボットのシステムは頭に相当するパソコンと体に相当するロボット本体とに分かれる。パソコンとロボット本体は数本のケーブルでつながれており、双方向のシリアル通信により、センサ情報やモータへの角度情報などのデータのやり取りを行っている。また、ロボット本体側にあるインターフェイス回路にはPLD(CY7c372i66jc) を使用しており、拡張性に優れた設計を行った。モータ制御に関しては、パソコンから送られてきたモータへの命令に従い、ワンチップマイコン (PIC16F84) でモータの制御信号を生成し、モータを制御している。センサには関しては、アナログデータの角度情報をA／D変換し、ワンチップマイコンを使用し、ノイズを除去したあと、パソコンにデータを送信する。

3.2　ロボットの動作制御

前件部では主に各関節がどの程度曲がっているのか、ロボット本体がどの程度傾いているのか、を記述している。またこれにより、各関節、各センサの微妙な特性を考慮した制御ルールを人間の直感で調節することが出来る。4足ロボットのモデルを図5に示す。rはロボットのロール角、足の第1関節を$q1,q3,q5,q7$、第2関節を$q2,q4,q6,q8$とし、4足ロボットの状態を示す前件部を図6に示すように定義する。

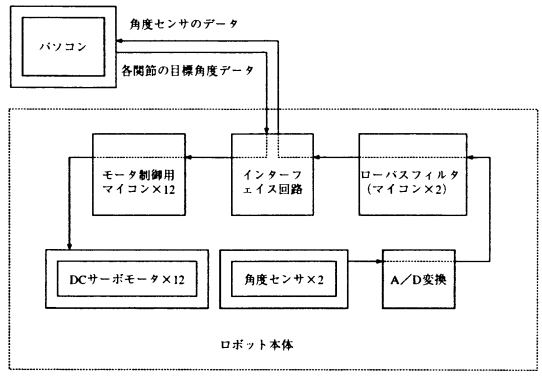


図 4: システム構成図

表 1: 4足ロボットのスペック

足の数	4本
自由度	合計12自由度
アクチュエータ	DCサーボモータ (FPS-3003) 稼動範囲：約130° 分解能：7bit
内界センサ	ロール, ピッチ角検出用 角度センサ (ADXL05) 認識角度：360° 分解能：8bit
外界センサ	なし
コンピュータ	パソコン
体重	1.8kg

4　起立動作

ここでは、比較的簡単に構築できる起立動作のルールの構築と実機実験を行い、後述のバランス制御に移るための初期行動として起立動作を行った。

4.1　起立動作のルール

まず足1本分の$q1,q2$を入力、$\Delta q1$,$\Delta q2$を出力として、起立動作のファジィルールを記述して、これを足4本ともに適用させ、4足ロボットを起立させる実験を行った。実験で用いたファジィルールを表2に示す。

表 2: 起立動作のファジィルール

(a) 出力$\Delta q1$用のルール

		$q2$		
		S	M	L
$q1$	S	-5	-15	0
	M	-8	-5	16
	L	-2	0	10

(b) 出力$\Delta q2$用のルール

		$q2$		
		S	M	L
$q1$	S	16	15	16
	M	3	0	-16
	L	2	1	-8

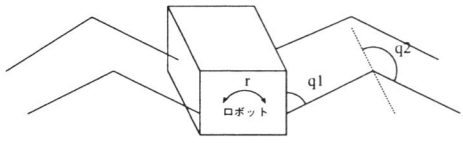
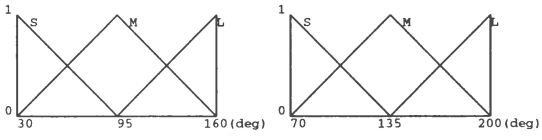
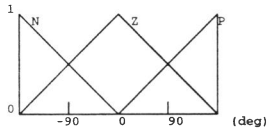


図 5: ロボットの関節と傾きセンサ



(a) 入力 $q1$ (b) 入力 $q2$



(c) 入力 r

図 6: ファジィルールの前件部

4.2 実験結果

$q1, q2$ のとった軌跡を図 7に示す。A は初期状態、B は起立状態を示す。[○] で表された印が $q1, q2$ のとった軌跡である。ただし [↓] を通って近道を使用とすると、関節への過負荷や足先と地面の摩擦のため起立することが出来ない。

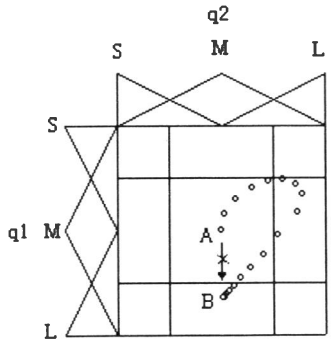
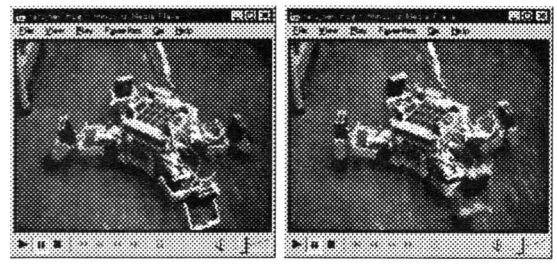


図 7: $q1, q2$ の軌跡

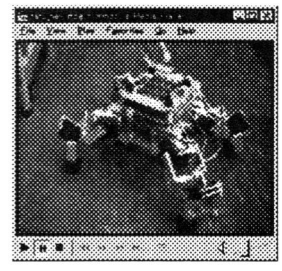
実機実験の様子を図 8に示す。(a) は初期状態で足を伸ばした状態である。(b) は足先を胴体に引き付けた状態で、起立のときに関節にあまり負荷をかけずに起立する為の行動である。(c) は起立状態である。この実験により、起立動作のような基本動作の記述は容易に表現出来ることが実証された。

5 バランス制御

ここでは、先ほど行った起立動作をふまえてバランス制御の構築を行い、実機実験により提案手法が有効であるかを検証した。



(a) 初期状態 (b) 足を引き付ける



(c) 起立状態

図 8: 起立動作の実験の様子

5.1 バランス制御のルール

図 3(b) において $d1$ は足の屈伸を行う為の動作モジュールで、$d2$ は傾きに従って足を上げ下げする動作モジュールである。$d1, d2$ の出力に重み $k1, k2$ をかけて、チューニングをはかる。バランス制御のモジュール構成を図 9に示す。実験で用いたファジィルールを表 3に示す。

実機実験では、この構築したルールを使用し、平面板の上にロボットを立て、板を左右に傾けた時、ロボットの胴体が常に水平を保つかどうか実験し、提案した方法が有効であるかを検証した。

表 3: バランス制御のファジィルール

(a) ルール $f1$

		$q2$		
		S	M	L
$q1$	N	0	16	16
	Z	0	0	0
	P	0	10	10

(b) ルール $f2$

		$q2$		
		S	M	L
$q1$	S	-5	-15	0
	M	-8	-5	16
	L	-2	0	10

(c) ルール $f3$

		$q2$		
		S	M	L
$q1$	S	16	15	16
	M	3	0	-16
	L	2	1	-8

5.2 実験結果

実機実験を行ったときのロボットと床の傾きを図 10に示す。これを見るとロボットは床が傾いた場合にも常に体を水平に保ち続け、適切なバランス制御が行われていることがわかる。

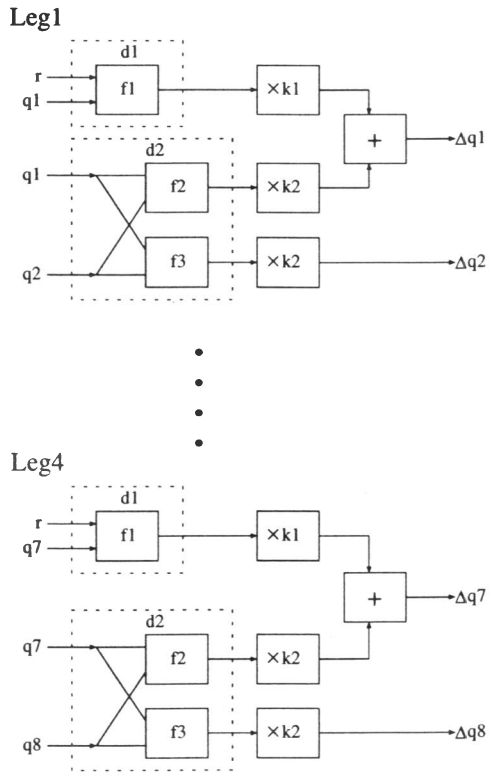


図 9: バランス制御の行動モジュールの構成

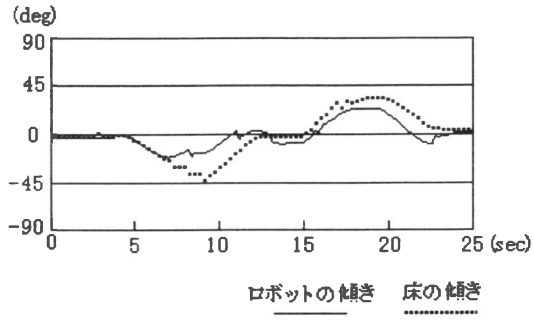
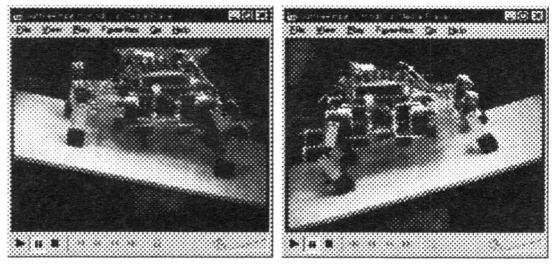


図 10: ロボットと床の傾き

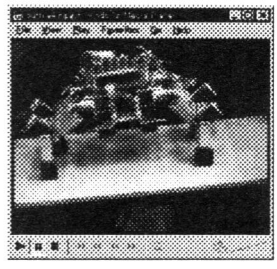
6 結 言

本稿では、比較的複雑な構造をもった多足ロボットのためのファジィ推論法を提案し、これを用いて自作した4足ロボットに起立動作とバランス制御を行い、提案手法が有効であることを検証した。その結果、本手法を用いると、比較的容易に4足ロボットの行動を記述できることが実機実験においても実証された。

今後の課題はより多数の動作の並列発火や選択発火を記述することが考えられる。これにより、起立動作やバランス制御だけでなく、不整地で歩行する為のファジィルールも等も記述できると期待される。また今回は自作の4足ロボットの実験を行ったが、他の脚式ロボット, ロボットアーム、センサ数の多い車輪型ロボットなど異なる種類のロボットにもこの提案手法が有効であるかどうかを検証する必要があると考えられる。



(a) 右に傾ける　　(b) 左に傾ける



(c) 水平にする

図 11: バランス制御の実験の様子

参考文献

[1] A.Brooks: "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot" , MIT AI Lab, Memo 864 (1985)

[2] 牛尾 将蔵, Mikhail Svinin, 上田 宗次: "強化学習による多足ロボットの自立的行動獲得" , ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集 (1999)

[3] 野村 行宏: "進化戦略を用いた多足ロボットの歩容学習" , バイオメディカル・ファジィシステム学会 第11回年次大会講演論文集, pp.71-74 (1998)

[4] 易 建強, 湯場崎 直養, 廣田 薫: "SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論による倒立振子システムの安定化制御器の構築" , 第15回ファジィシステムシンポジウム, pp.51-54 (1999)

[5] 稲葉 雅幸: "脳を持ち歩かないロボット" , 日本ロボット学会学会誌, Vol.14, No.1, pp.10-13 (1996)

＜連絡先＞

〒 572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学　総合情報学部　情報工学科
前田陽一郎
Tel & Fax : 072-825-4698(直通)
E-mail : maeda@mdlab.osakac.ac.jp

WD1−3

ファジィフィードフォワード制御による ジョイスティック教示システム

Joystick Controlled Teaching System Using Fuzzy Feedforward Controller

○永田寅臣*, 渡辺桂吾**
Fusaomi NAGATA and Keigo WATANABE

*福岡県工業技術センターインテリア研究所, **佐賀大学大学院
*Interior Design Research Institute, Fukuoka Industrial Technology Center
**Department of Advanced Systems Control Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Saga University

Abstract In this paper, a joystick based teaching system using a fuzzy feedforward controller is proposed for a polishing robot. The present method is characterized by two abilities. The one is that it is easily applied to the task in which the robot polishes an object with desired contact force and desired orientation. The other is that it doesn't need the conventional complicated teaching process. The effectiveness and promise of the proposed method are demonstrated through some experiments concerning a teaching task using an industrial robot JS-10.

1 はじめに

本研究では，産業用ロボットなどと比べて遥かに劣った位置精度しか持たない熟練者が，主に経験的に得られた勘を頼りに実行している研磨スキル（倣い動作）を具体的な制御目標としている．ここで取り組む倣い制御は，研磨工具の位置・姿勢制御および材料との接触力制御を同時に行うハイブリッド制御法のことを指す．倣い制御時には環境の動特性や形状が変化することが予想され，良好な仕上げ面を得るためには，これらに起因する力偏差を如何に抑制できるかが重要となってくる．これまでにもいくつかの論文の中で，熟練者の代替となる研磨ロボットを開発するためには力制御戦略が不可欠であると述べられているが，実用化のためには今後解決されなければならない二つの課題がまだ残っている．一つは，熟練者が研磨作業時に発揮している柔らかい力の調節機能をロボットに持たせることである．もう一つは，ロボットアーム先端に取り付けられた研磨工具の最適な軌道データを容易にかつ迅速に獲得するための教示システムの開発である．

研磨ロボットを用いて高精度な自動研磨を実現するために必要となる目標軌道とは，教示作業中において，研磨工具と材料との間に発生する接触力が望ましい値で一定に保たれ，かつ，作業者の意思に基づいて工具姿勢が制御された場合にのみ獲得できる．以後，これを最適な目標軌道と呼ぶことにする．重要なことは，同じ形状の材料であっても使用する研磨工具に応じて異なる目標軌道が必要になるという点である．さらに，ロボット本体，研磨工具，力覚センサなどには測定困難な機構上のガタ，歪みが多分に含まれているため，材料に関して事前に精度の高い形状情報があったとしても，最適な目標軌道を算出することは容易ではない．このため，最適な目標軌道を獲得するための教示は，実際に使用する研磨ロボットシステムそのものを用いることが望ましい．

通常，ロボットの位置・姿勢制御のために不可欠な目標軌道は，良く知られているように教示ペンダントによる教示作業を経て作成されている．これは，作業者が教示ペンダントを用いて多数の教示点（動作通過点）を入力していく方法であるが，入力作業が煩わしいだけでなく，望ましい接触力を維持させるための連続的な目標軌道を得ることができないという欠点がある．教示ペンダントの操作性の悪さを改善するために提案されているジョイスティック教示を用いても，接触力を一定に維持しながら教示を行うことは難しい．また，最近登場してきたダイレクト教示法は作業者がロボット先端の研磨工具を直接手で操作できるため，操作自由度は増すものの，最適な軌道データを獲得するためには，作業者自身が位置制御，姿勢制御，および力制御を全て同時にかつ繊細に行う必要があり，非常に困難な作業となってしまう．

本研究では，このような従来法が抱える問題点を解決し，研磨ロボットによる自動研磨を実現するために不可欠となる最適な目標軌道を簡易操作で安全に作成できる教示システムを提案する．提案手法の有用性については，オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットJS-10を用いた教示実験により検証する．

2 インピーダンスモデル追従型力制御法

本章では，研磨ロボットシステムで用いるインピーダン

スモデル追従型の力制御法について述べる．これは，オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットに容易に適用できる速度指令（サンプリング間隔毎に位置指令を与える）の力制御法である．まず，デカルト座標系における目標とするインピーダンス特性を次式で定義する．

$$\boldsymbol{M}_d\left(\ddot{\boldsymbol{x}}-\ddot{\boldsymbol{x}}_d\right)+\boldsymbol{B}_d\left(\dot{\boldsymbol{x}}-\dot{\boldsymbol{x}}_d\right)+\boldsymbol{S}\boldsymbol{K}_d\left(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_d\right) = \boldsymbol{S}\boldsymbol{F}+\left(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{S}\right)\boldsymbol{K}_f\left(\boldsymbol{F}-\boldsymbol{F}_d\right) \quad (1)$$

ここで$\boldsymbol{x}\in\Re^6$，$\dot{\boldsymbol{x}}\in\Re^6$，$\ddot{\boldsymbol{x}}\in\Re^6$はそれぞれロボットアーム先端に取付けた研磨工具の位置，速度，加速度ベクトルを表す．$\boldsymbol{M}_d\in\Re^{6\times6}$,$\boldsymbol{B}_d\in\Re^{6\times6}$,$\boldsymbol{K}_d\in\Re^{6\times6}$はそれぞれ目標慣性行列，目標粘性行列，目標剛性行列であり，これらをインピーダンスパラメータと呼ぶ．$\boldsymbol{F}\in\Re^6$は$\boldsymbol{F}^T=[\boldsymbol{f}^T\ \boldsymbol{n}^T]$で定義される工具と材料間に作用する接触力ベクトル$\boldsymbol{f}\in\Re^3$とモーメントベクトル$\boldsymbol{n}\in\Re^3$である．$\boldsymbol{K}_f\in\Re^{6\times6}$は力フィードバックゲイン行列である．$\boldsymbol{x}_d$, $\dot{\boldsymbol{x}}_d$, $\ddot{\boldsymbol{x}}_d$と$\boldsymbol{F}_d^T=[\boldsymbol{f}_d^T\ \boldsymbol{n}_d^T]$は，目標とする位置，速度，加速度ベクトル及び力／モーメントベクトルである．$\boldsymbol{S}$と$\boldsymbol{E}$はスイッチ行列および単位行列である．ただし，$\boldsymbol{M}_d$,$\boldsymbol{B}_d$,$\boldsymbol{K}_d$および$\boldsymbol{K}_f$は正定の対角行列とする．式(1)は，$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{E}$のとき全方向インピーダンス制御系，$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{0}$のとき全方向力制御系となる．全方向力制御系のとき，式(1)において$\boldsymbol{X}=\dot{\boldsymbol{x}}-\dot{\boldsymbol{x}}_d$とおくとつぎの状態方程式が得られる．

$$\dot{\boldsymbol{X}}=-\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{B}_d\boldsymbol{X}+\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{K}_f\left(\boldsymbol{F}-\boldsymbol{F}_d\right) \quad (2)$$

式(2)を解くと次式が得られる．

$$\boldsymbol{X}=\exp\left(-\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{B}_d t\right)\boldsymbol{X}(0) +\int_0^t \exp\left\{-\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{B}_d(t-\tau)\right\}\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{K}_f\left(\boldsymbol{F}-\boldsymbol{F}_d\right)d\tau \quad (3)$$

ここで，サンプリング幅Δtを用いた離散時間kを考える．まず，$\Delta t(k-1)\le t<\Delta tk$の時間において$\boldsymbol{M}_d$, $\boldsymbol{B}_d$, $\boldsymbol{K}_f$, $\boldsymbol{F}$および$\boldsymbol{F}_d$が全て一定であると仮定し，$\boldsymbol{X}(k)=\boldsymbol{X}(t)|_{t=\Delta tk}$とすると，次式のような離散時刻$k$での解が得られる．

$$\boldsymbol{X}(k)=\exp\left(-\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{B}_d\Delta t\right)\boldsymbol{X}(k-1) -\left\{\exp\left(-\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{B}_d\Delta t\right)-\boldsymbol{E}\right\}\boldsymbol{B}_d^{-1}\boldsymbol{K}_f\left\{\boldsymbol{F}(k)-\boldsymbol{F}_d\right\} \quad (4)$$

前定義により$\boldsymbol{X}(k)=\dot{\boldsymbol{x}}(k)-\dot{\boldsymbol{x}}_d(k)$であり，また力制御を行う方向における目標の速度を零($\dot{\boldsymbol{x}}_d(k)=0$)に設定すると次式に示すデカルト座標系における解が得られる．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(k)=\exp\left(-\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{B}_d\Delta t\right)\dot{\boldsymbol{x}}(k-1) -\left\{\exp\left(-\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{B}_d\Delta t\right)-\boldsymbol{E}\right\}\boldsymbol{B}_d^{-1}\boldsymbol{K}_f\left\{\boldsymbol{F}(k)-\boldsymbol{F}_d\right\} \quad (5)$$

ここで，$\boldsymbol{x}(k)$は位置ベクトル$[x(k)\ y(k)\ z(k)]^T$とZ-Y-Zオイラー角で表される姿勢ベクトル$[\phi(k)\ \theta(k)\ \psi(k)]^T$から構成される．さて，研磨作業のための基本的な制御戦略は倣い制御であが，未知の材料特性を有する，あるいは材料形状に関する情報がない場合，接触力を一定に制御することは非常に難しい．結果として，望ましくない力偏差が発生しやすくなる．そこで，このような力偏差を抑制するために式(5)に積分操作を加えた次式を考えることにする．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(k)=\exp\left(-\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{B}_d\Delta t\right)\dot{\boldsymbol{x}}(k-1) -\left\{\exp\left(-\boldsymbol{M}_d^{-1}\boldsymbol{B}_d\Delta t\right)-\boldsymbol{E}\right\}\boldsymbol{B}_d^{-1}\boldsymbol{K}_f\left\{\boldsymbol{F}(k)-\boldsymbol{F}_d\right\} +\boldsymbol{K}_i\sum_{n=1}^{k}\left\{\boldsymbol{F}(n)-\boldsymbol{F}_d\right\} \quad (6)$$

ここで，$\boldsymbol{K}_i=\mathrm{diag}\left(K_{i1},\ldots,K_{i6}\right)$は積分制御ゲインである．式(6)で得られる操作量$\dot{\boldsymbol{x}}(k)$をサンプリング時間ごとにサーボ系の目標値として与えることで，接触力$\boldsymbol{F}$を目標値$\boldsymbol{F}_d$に追従させることができる．

3 研磨ロボットのためのジョイスティック教示法

3.1 最適な目標軌道の獲得

本章では，ジョイスティック支援によるユーザフレンドリな新しい教示システムを提案する．この教示システムを用いることで，研磨ロボットシステムで任意形状の材料を高速・高精度に研磨するために不可欠となる最適な目標軌道を容易にかつ安全に生成できるようになる．教示中，接触力制御と工具経路制御は自動制御されるため，作業者はジョイスティックにより研磨工具の姿勢が各研磨作業に適した状態となるように手動制御すればよい．すなわち，ジョイスティックは，作業者の意思に従って研磨工具の姿勢を制御することのみに用いられる．これにより，ロボットシステムの機構上のガタなどを吸収した最適な目標軌道を容易に獲得することができる．教示モードにおける研磨ロボットシステムのブロック線図を **Fig. 1** に示す．教示プロセスは，つぎのとおりである．まず，経路生成器から生成された目標経路に沿って研磨工具を移動させる．工具と材料間の接触力は，式(6)によって望ましい値を維持するように制御される．この場合，作業者は研磨工具の姿勢が望ましい状態となるようにジョイスティックで制御するだけでよい．もちろん，インピーダンスモデル追従型の力制御器が接触力を一定に保つように働くため，作業者は不意に発生する過負荷および非接触状態に対して神経質になる必要はない．教示中は，サンプリング間隔毎の軌道データが **Fig. 1** に示す軌道蓄積器に連続的に保存されていく．このような教示プロセスを経て，研磨ロボットを高精度に自動制御するための最適軌道データを獲得することができる．

3.2 ジョイスティック出力のファジィ制御

実験で使用したジョイスティックは，サンワサプライ社製の JY-DV17 で，自由度は 3 である．このタイプの

ジョイスティックは，サウンドカードが組み込まれたパソコンであれば容易に接続できる．また，Visual C++ の環境下では，ジョイスティックサービスの関数をコールすることで，ジョイスティックからの操作量 $\boldsymbol{x}_o(k) \in \Re^3$ を容易に参照できる．しかしながら，$\boldsymbol{x}_o(k)$ の各成分 $x_{oi}(k)$ $(i = 1, 2, 3)$ は，**–32768** から **32768** の範囲のディジタル値として出力されるため，フィードフォワード制御の入力として直接用いると研磨工具の姿勢速度が大きく変化してしまうことがある．特に，作業者がジョイスティックに力を加え始めた場合（$x_{oi}(k)$ が **0** から急速に増大するとき）と力を抜いた場合（$x_{oi}(k)$ が **0** へと急速に減少するとき）などに顕著に現れる．曲面を有する家具部材の研磨作業では姿勢速度が不連続に変化すると材料表面を傷つけてしまうことになる．このため，研磨ロボットの教示作業においては，研磨工具の姿勢を緩やかに制御することが非常に重要となる．そこで本研究では，ファジィ推論を用いて，作業者がジョイスティックを操作するときに発生する操作量を緩やかな操作量 $\hat{\boldsymbol{x}}_o(k) \in \Re^3$ に変換し，$\hat{\boldsymbol{x}}_o(k)$ を研磨工具の姿勢のフィードフォワード制御に用いる方法を提案する．例えば，ロボットベース座標系における x 軸廻りの姿勢制御にジョイスティックからの操作量 $x_{o1}(k)$ を用いる場合，$x_{o1}(k)$ とその積分値 $\Sigma x_{o1}(k)$ をファジィ入力とすると，ファジィルールは以下のように構成できる．

Rule 1　IF $x_{o1}(k)$ is $\tilde{A}_1$ and $\Sigma x_{o1}(k)$ is $\tilde{B}_1$
THEN $\hat{x}_{o1}(k)$ is C_1

Rule 2　IF $x_{o1}(k)$ is $\tilde{A}_2$ and $\Sigma x_{o1}(k)$ is $\tilde{B}_2$
THEN $\hat{x}_{o1}(k)$ is C_2

⋮

Rule L　IF $x_{o1}(k)$ is $\tilde{A}_L$ and $\Sigma x_{o1}(k)$ is $\tilde{B}_L$
THEN $\hat{x}_{o1}(k)$ is C_L

ただし，$\tilde{A}_i$ と $\tilde{B}_i$ はそれぞれ $x_{o1}(k)$ と $\Sigma x_{o1}(k)$ に対応した i 番目 (i=1,...,L) の前件部ファジィ集合であり，L はファジィルールの総数である．また，C_i はルール i におけるジョイスティックからの出力値を表す後件部定数値である．つぎに，i 番目のファジィルールに基づく前件部適合度は次式から求める．

$$\omega_i = \mu_{Ai}\left\{x_{o1}(k)\right\} \wedge \mu_{Bi}\left\{\Sigma x_{o1}(k)\right\} \tag{7}$$

ただし，$\mu_X(\cdot)$ は

$$\mu_X(x) = \exp\left\{\log(0.5)(x-\alpha)^2\beta^2\right\} \tag{8}$$

で与えられるガウシアン型の前件部メンバシップ関数で構成し，α と β はそれぞれメンバーシップ関数の中心値と標準偏差の逆数を表す．このとき，x 軸廻りのジョイスティック出力値 $\hat{x}_{o1}(k)$ は，重み付き平均値法により次式から算出する．

$$\hat{x}_{o1}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{L} C_i\omega_i}{\sum_{j=1}^{L} \omega_j} \tag{9}$$

y および z 軸廻りのジョイスティック出力値 $\hat{x}_{o2}(k), \hat{x}_{o3}(k)$ についても同様に求めることができる．**Fig. 2, 3** には各ファジィ入力に応じて設計した前件部メンバシップ関数を示す．また，各ルールに対応した後件部定数値を **Table 1** に示す．

4　教示実験

Fig. 1 の提案手法をオープンアーキテクチャ型の産業用ロボット JS-10 に適用し，教示実験を行った．**Fig. 4** には，教示風景を示す．教示実行時の工具先端の移動速度は 3 [mm/s] で行った．また，材料と研磨工具との接触力は式(6) により 1 [kgf] に追従させた．**Fig. 5, 6** には，教示によって獲得された最適軌道データ（**Fig. 1**の軌道蓄積器に保存されている）のうち，ロボットベース座標系の z–x 平面における工具の傾斜角度と工具先端の z 座標値

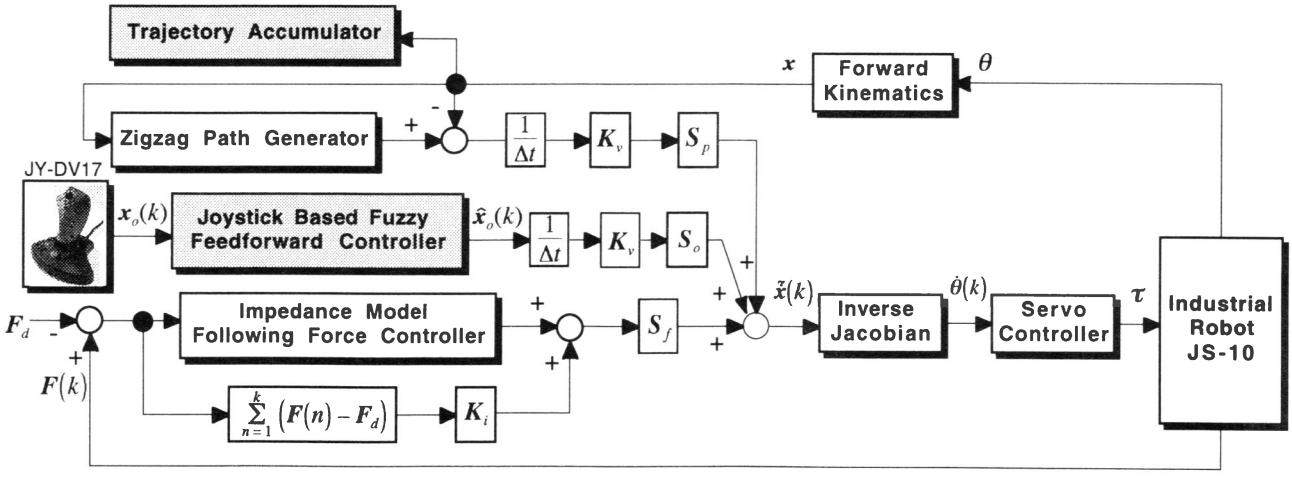


Fig. 1 Block diagram of the polishing robot system in teaching mode

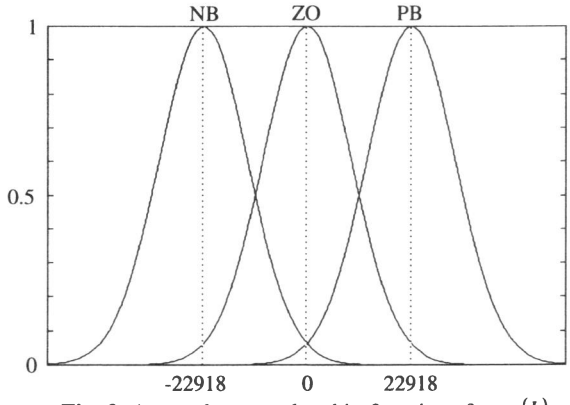


Fig. 2 Antecedent membership functions for $x_{oi}(k)$

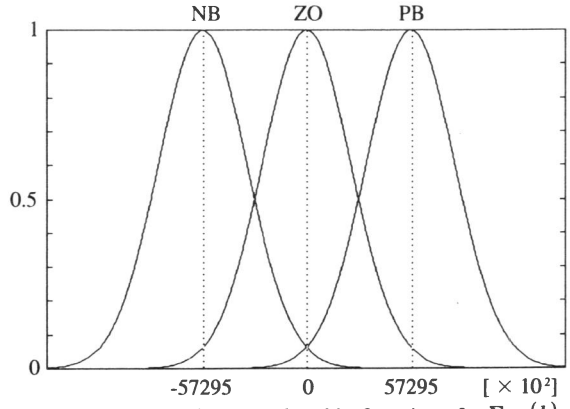


Fig. 3 Antecedent membership functions for $\Sigma x_{oi}(k)$

Table 1 Constant values in the consequent part

$x_{oi}(k)$	$\Sigma x_{oi}(k)$		
	NB	ZO	PB
NB	$1.5x_{oi}(k)$	$0.5x_{oi}(k)$	$0.3x_{oi}(k)$
ZO	$1.2x_{oi}(k)$	$x_{oi}(k)$	$1.2x_{oi}(k)$
PB	$0.3x_{oi}(k)$	$0.5x_{oi}(k)$	$1.5x_{oi}(k)$

の変化をそれぞれ示す.

5 おわりに

本研究では，任意形状を有する材料に対して研磨ロボットシステムを適用する際に不可欠な最適軌道データを獲得するための教示システムを提案した．その有効性は，オープンアーキテクチャア型の産業用ロボットJS-10を用いた教示実験で検証した．その結果，研磨ロボットを用いて任意形状を有する材料を高速・高精度研磨するために必要な最適軌道データが簡易操作で安全に作成できることを確認した.

参考文献

[1] 松元明弘，ロボットの作業教示とプログラミング，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 2, 158, 161, 1999

[2] 水川　真，小山俊彦，産業用ロボットの教示方法の現状と展望，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 2, 180, 185, 1999

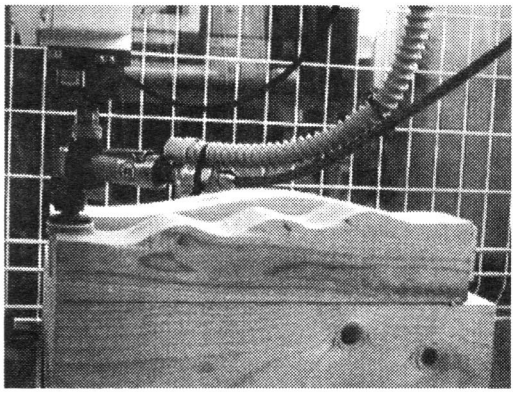


Fig. 4 Teaching scene using the proposed system

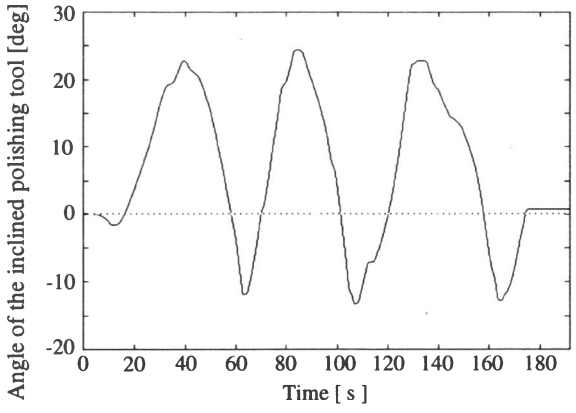


Fig. 5 Angle of the inclined polishing tool

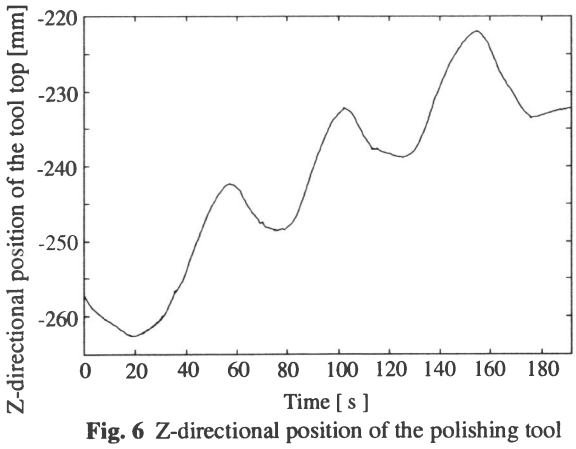


Fig. 6 Z-directional position of the polishing tool

[問い合わせ先]
〒831-0031
福岡県大川市上巻405-3
福岡県工業技術センター　インテリア研究所
技術開発課　システム研究室
永田 寅臣
Tel: 0944-86-3259 Fax: 0944-86-4744
E-mail: nagata@fitc.pref.fukuoka.jp

3-2-1

ファジィスライディングモード制御を用いた振動制御の研究

Study on Vibration Control Using Fuzzy Sliding Mode Control

入江 寿弘
Toshihiro IRIE
日本大学理工学部
Nihon University

高木 良浩
Yoshihiro TAKAGI
日本大学大学院
Nihon University

新宮 清志
Kiyoshi SHINGU
日本大学理工学部
Nihon University

Abstract: Vibration control in building engineering is very much in the limelight. This is because the durability of a structure is improved by performing the appropriate vibration control. Vibration control can give the structure the capability to bear complicated external forces, for example, seismic forces, wind forces and so on.

The authors are interested in a structure that is able to change its own characteristics, for example, natural frequencies, damping ratios, and so on. When the spring constants of a structure are changed, the resonance points of the structure are changed. For changing the rigidity, we used fuzzy sliding mode control. The simulation was carried out using sinusoidal waves. We examined the control effect and confirmed that it was good.

1 はじめに

構造物の剛性を可変して振動を抑制する方法が提案されている[1]。著者らは、これにファジィ理論を適用する「ファジィ可変剛性制御」の提案を行った[2]。これまで、比較的長いサンプリング時間で、構造物の最大変位振幅を用いて、剛性を決定する方法を採用し、研究して来た[2]～[4]。この方法では応答速度の遅いアクチュエータを用いても制御が可能であるが、必ずしも充分な振動低減とは言えなかった。そこで 高速に剛性を可変出来るアクチュエータを用いる事を前提として、制御方法の改良を行った[5]。この制御方法では、構造物の応答変位と応答速度の軌跡を位相平面上に表し、構造物（質点）が最短時間で位相平面の中心に向かうように制御を行う。

本研究では、この制御方法の有効性を確認するための第一歩として、正弦波形の周波数掃引の加速度入力により、数値シミュレーションを行った。

2 数学モデル

本研究では、Fig. 1に示すように 1 質点系のモデルを制御対象とする。運動方程式は良く知られているように式(1)で表される。剛性を操作量として制御を行うので、これは時間の関数となるので $K(t)$で表す。剛性変化により、後述の様に固有角振動数が変化し、これに伴い減衰係数は時間の関数となるので $C(t)$で表す。質量 Mは不変であるものとし、外力は時間の関数であるので $F(t)$で表す。

$$M\ddot{X}(t)+C(t)\dot{X}(t)+K(t)X(t)=F(t) \quad (1)$$

このモデルの中の剛性 $K(t)$を操作量として制御を行う。減衰率ςは $K(t)$が変化しても一定であるとし、粘性係数が式(2)で表されるものとする。

$$C(t)=2\varsigma\omega_0(t)M \quad (2)$$

固有角振動数$\omega_0(t)$は式(3)で表される。

$$\omega_0(t)=\sqrt{K(t)/M} \quad (3)$$

式(1)に式(2)および式(3)を代入して整理すると次式を得る。$a(t)$は入力加速度である

$$\ddot{X}(t)+2\varsigma\omega_0(t)\dot{X}(t)+\omega_0(t)^2X(t)=a(t) \quad (4)$$

この運動方程式(4)を逐次積分法を用いて、加速係数β＝0.25，微少時間間隔h＝0.005 秒としてシミュレーションを行った。用いた物理定数は M=8.88kg，ς=0.0619，$K(t)$=4107～6098N/mとした。

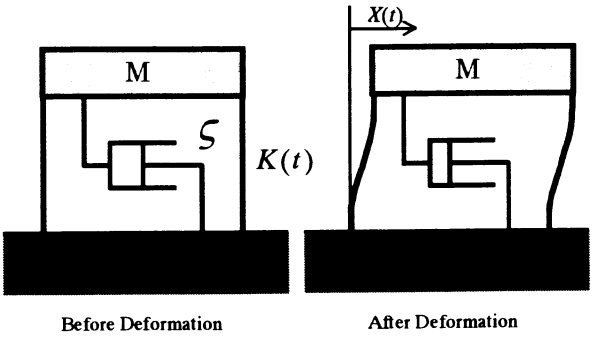


Fig.1 Model (One-degree-of-freedom System)

3　制御方法

求めた数学モデルに初期変位（0.01m）を与えて描いた位相平面を Fig.2 に示す。剛性に応じて違う経路を通って原点に向かって収束している。A 点を出発した軌跡が最初に変位 0 になるのは剛性:6098N/m の時(剛性:4107N/m の時)は B 点(B'点)である。ここで剛性を変化させない場合は、両者ともに C 点を通るが、後者を、B'点で剛性を 6098N/m に変化させると C'点を通る軌跡を描く。この様な剛性の切り換えを繰り返すことにより、剛性固定の場合よりも速やかに振動を収束させる事ができる。この場合の切り換え直線は、シミュレーションの計算時間遅れが無視できる場合、変位軸と速度軸に一致している。

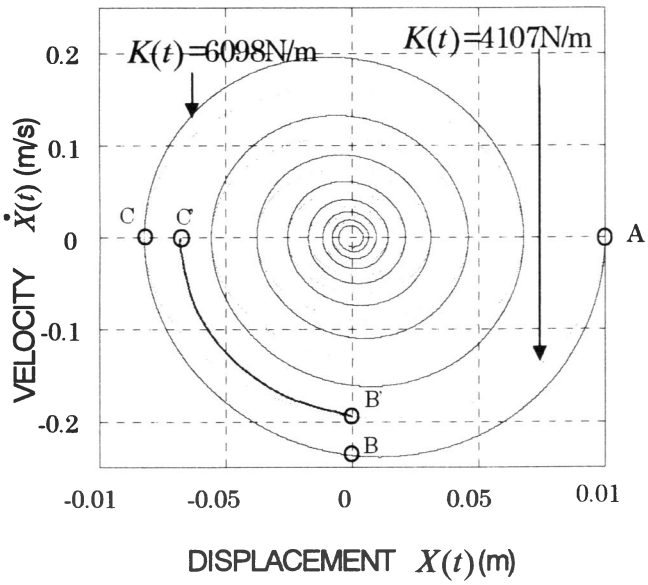


Fig.2 Phase Plane Trajectory

Table 1 Control Rule

VELOCITY $\dot{X}(t)$ \ DISPLACEMENT $X(t)$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	ZO	ZO	PB	PB	PB	PB
PM	ZO	ZO	ZO	PB	PB	PB	PB
PS	ZO	ZO	ZO	PB	PB	PB	PB
ZO	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
NS	PB	PB	PB	PB	ZO	ZO	ZO
NM	PB	PB	PB	PB	ZO	ZO	ZO
NB	PB	PB	PB	PB	ZO	ZO	ZO

ZO=4107N/m　　PB=6098N/m

この切り換え法則を制御規則で表すと Table 1 の様になる。ファジィ変数は三角型を用い、出力の ZO と PB はそれぞれ剛性の 4107N/m と 6098N/m に対応している。前件部メンバーシップ関数を Fig.3、後件部メンバーシップ関数を Fig.4 に示す。ファジィ変数の幅 Z は応答変位と速度の動作範囲に応じて決定される。

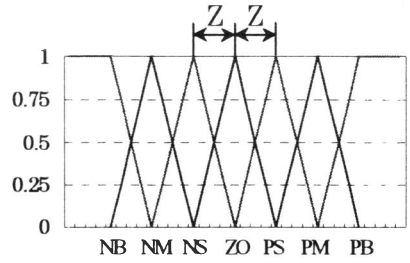


Fig.3 Antecedent Membership Function

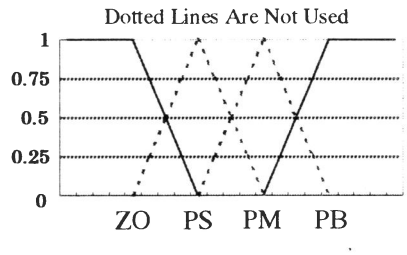


Fig.4 Consequent Membership Function

制御系の構成を Fig.5 に示す。1 質点系へ外力が入力されると、変位と速度が出力される。その変位と速度をファジィ制御器に入力し制御規則に従って、剛性 $K(t)$を変化させる。

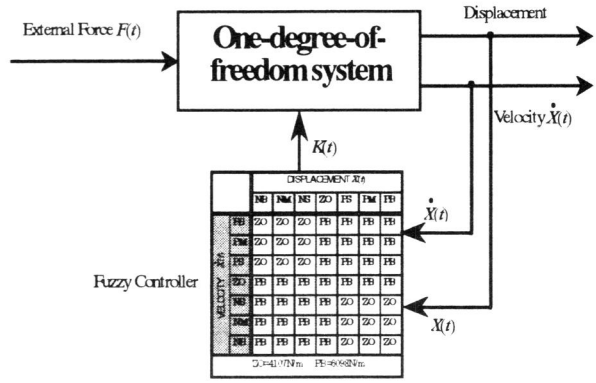


Fig.5 Block Diagram of Control System

4　制御結果

加速度波形は、周波数掃引とした。Fig.6 に示すような正弦波形を 2～6Hz まで周波数掃引し、シミュレーションを行った。なお Fig.3 のファジィ変数のスケールはシミュレーションの結果をもとに決定した値、速度:Z=0.004m/s、変位:Z=0.0046m を用いている。

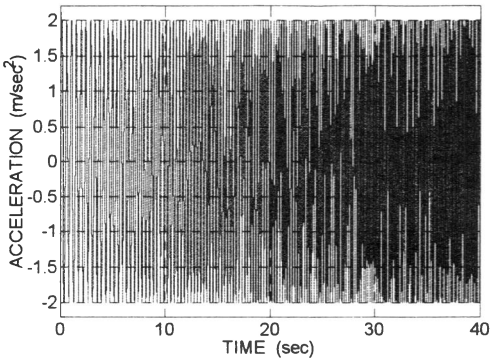


Fig.6 Input Acceleration (Sweep Waves)

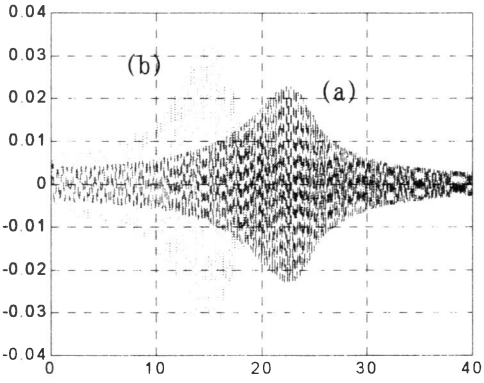


Fig.7 Displacements (Uncontrolled)

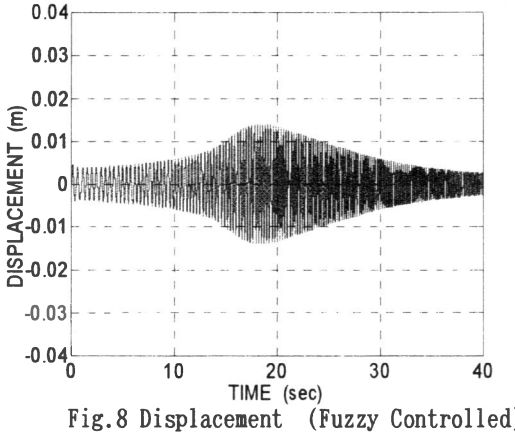


Fig.8 Displacement (Fuzzy Controlled)

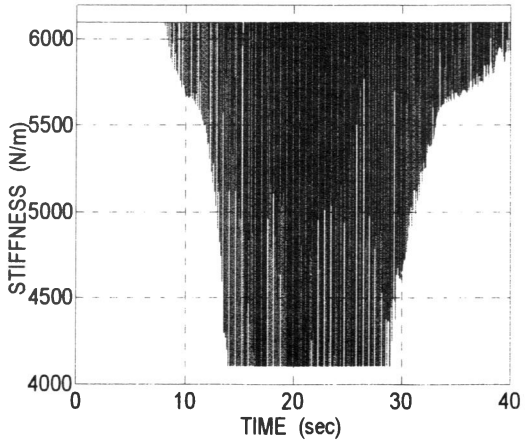


Fig.9 Stiffness (Fuzzy Controlled)

Fig.7 は非制御時の応答変位で(a)が $K(t)$=4107N/m、(b)が $K(t)$=4107N/m の時のシミュレーション結果である。Fig.8 は周波数推定を行わない場合の制御時の応答結果である。両者を比較して分かるように、制御を行った時は、非制御時($K(t)$=6098N/m)と比べ最大応答変位が 39%減少、平均応答変位(絶対値)が 16%減少している。

次に、応答速度と応答変位の絶対値の平均から $\hat{\omega} = \dot{X}(t) / X(t)$ の式を用いて入力周波数の推定値 $\hat{\omega}$ を求め(Fig.10)、$\hat{\omega}$ を基に剛性を変化させて制御を行った。

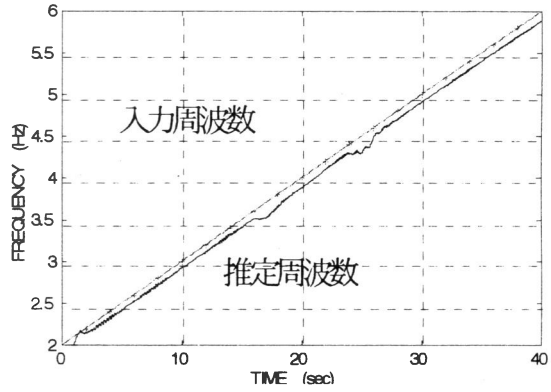


Fig..10 Frequency

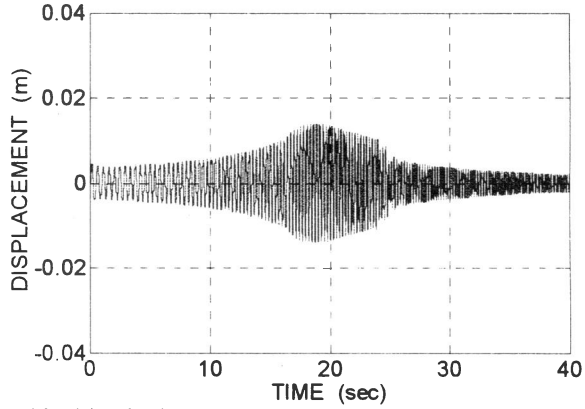


Fig.11 Displacement (Fuzzy-Frequency Controlled)

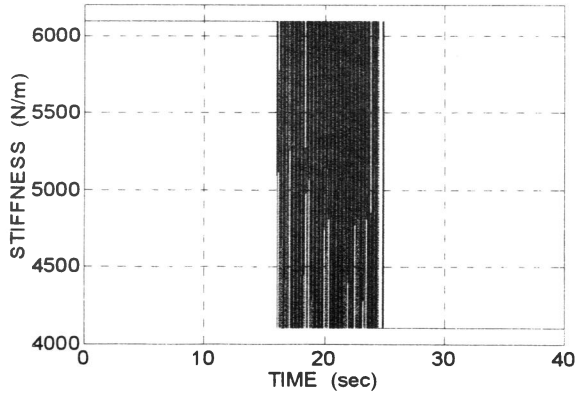


Fig.12 Stiffness (Fuzzy-Frequency Controlled)

非制御時と比べるとファジィ制御のみと同様に最大応答変位が 39%減少しているが、平均応答変位(絶対値)は26%減少し良好な結果が得られた。Fig.12 はその時の剛性 $K(t)$の変化の状態を示している。周波数推定を行わない場合に比べて剛性を変化させている時間が短縮されている様子がわかる。

5 考察

最大応答変位の低減率に比べて、平均応答変位の減少率が小さいが、これは地震波が必ずしもモデルの共振振動数付近で振動するわけではないためである。

本論では、剛性 $K(t)$ を 4107～6098N/m の範囲で制御を行ったが、剛性の範囲がもう少し広げることにより、Fig.2 の位相平面上で軌跡の傾きの差が大きくなる為、今回のデータ以上に優れた振動の低減効果が予想される。

6 おわりに

極めて限定された範囲の数値シミュレーションではあるが、次の事が明らかになった。従来の筆者等によるファジィ可変剛性制御は数%～10 数%程度の応答変位の低減であった[2]～[4]が、本方法を用いることで、これまで以上の振動抑制が可能である。

ファジィ理論を用いることで、挙動の解析結果に基づいた制御アルゴリズムを容易に構築できた。アクチュエータに大きな駆動力を必要としない本方法を用いた可変剛性制御は有効であると考えられる。

今後さらに現実の対象に近いモデルでの詳細な検討を加えて行く予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり日本大学学術研究助成金(共同研究 ,研究代表者：新宮清志) を使用した。

参考文献

[1] T. KOBORI, M. TAKAHASHI, T. NASU, et al.: Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness System, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.22,pp925-941, 1993

[2] 入江,新宮:質点系構造物のファジィ振動制御に関する研究—ファジィ可変剛性制御の提案—日本ファジィ学会誌,Vol.9,No.6, ,1997 年 12 月

[3] T. IRIE, K. SHINGU: A Study on Fuzzy Vibration Control of a Structure of Particle System –A Proposal of Fuzzy Variable Rigidity Control , Japanese Journal of Fuzzy Theory and Systems, Volume 9, Number 6,1977, Allerton Press,Inc.pp.617-630,1999

[4] T. IRIE, K. SHINGU: A Study on Fuzzy Variable Rigidity Control of a Structure, 1998 ASME/JSME Joint Pressure Vessels and Piping Conference , pp.163-170, PVP Conference-Vol.379,The American Society of Mechanical Engineers, July, 1998

[5] 入江,高木,池田,新宮:質点系構造物のファジィ振動制御に関する研究—ファジィスライディングモード制御を用いた可変剛性制御の検討—,第 7 回ファジィ建築土木応用シンポジウム論文集, pp21-28,2000 年 3 月

[6] 野波, 田:スライディングモード制御,コロナ社,1994

[問い合わせ先]
〒274-8501 船橋市習志野台7-24-1
日本大学理工学部精密機械工学科 入江 寿弘
TEL：0474-69-5411 FAX：0474-67-9504
E-mail: tirie@eme.cst.nihon-u.ac.jp

WD2−2

非線形プロセスを対象とした知的制御システムの構築

Design of Intellectual Control System for a Nonlinear Process

増田　貴裕　　安信　誠二
Takahiro Masuda　　Seiji Yasunobu
筑波大学 機能工学系
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

Abstract: It is difficult to control a nonlinear process by linear control method. However, those problems can be improved by an intellectual control method, for example, fuzzy control etc. In this research, the control system made by fuzzy control is designed to water plant with ozone as a nolinear process. Furthermore, it is possible to think about effective use for ozone. Because the system can build in human knowledge.The intellectual control system to do efficient water processing is constructed by using these method.

1　緒言

世の中にあるほぼすべてのシステムは非線形プロセスを有する。特に化学プロセスは、強い非線形プロセスを有し、従来適用されている線形制御では、期待した制御性能が得られないことがある。そこで、そのような非線形プロセスに対しては、ファジィ制御の適用が行われている場合もある。ファジィ制御は、非線形プロセスに対して、優れた制御性能が期待でき、さらには、人間の考えを知識化し、その知識をシステムに組み込むことができる柔軟な制御方法である。本論文では、非線形プロセスである化学プロセスを対象とした制御の一例として、オゾンを用いた水処理プラントに対して制御系を設計する。このプラントは、構造が複雑で非線形要素を含み、従来制御では、制御が困難である。さらに、水処理に用いられるオゾンの効率の良い利用を考える必要がある。本論文では、このプラントに対してファジィ制御を適用し、これらの問題に対処した制御システムを構築する。

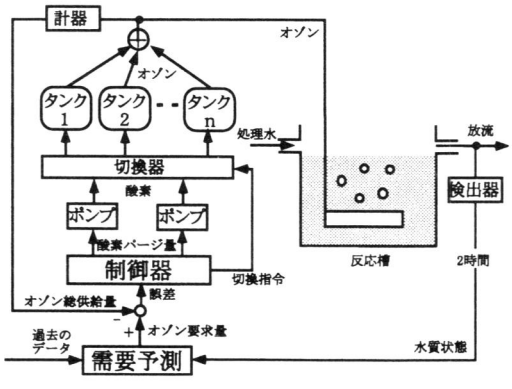


Fig.1 水処理プラントの構造

2　オゾンを用いた水処理

近年、オゾン消毒による水処理は、塩素消毒に代わる新しい水処理技術として注目されている。しかし、現状ではオゾンの効果は認められるものの、生成過程に必要な電力のコストやその反応効率等に課題がある [1]。その一方、比較的安価な深夜電力を用いたオゾンの生成法が提案されている。この方法を用いれば、夜間に生成されたオゾンを複数のタンクに貯蔵しておき、昼夜を通して、反応槽へオゾンを供給することができる。(Fig.1)

3　オゾン貯蔵タンク

オゾンの投入は、タンクに貯蔵したオゾンに対して、酸素パージし、タンク内部から流出させるという方法で行う。その数式モデルを式 (1) に示す。式からわかるように、オゾン流出量 y は、酸素のパージ量 x_1、オゾン残留量 x_2、物質特性 f に依存して決定されるため、オゾン流出のプロセスは強い非線形性を有する。また、酸素パージ量は、操作量 u によって決定される。一方、オゾン残留量が減少するに従って、その流出量も減少していくため、ある時点を過ぎると 1 つのタンクでは、オゾンの要求が満たせない状況がおこる。その場合は、複数のタンクの併用や、場合によっては使用するタンクを切り替ながら運用する必要がある。

$$\left.\begin{array}{l}\begin{pmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1/T\,(-x_1+K\,u)\\ -f\,x_1\,x_2\end{pmatrix}\\ y=f\,x_1\,x_2\end{array}\right\}\cdots \qquad (1)$$

4　オゾン運用戦略

オゾンの運用には、オゾンタンクの非線形性への対処と複数のタンクの効率良い運用が課題である。オゾンタンクの非線形性は、タンクの仕様、物質の特性に依存するため、その非線形性を十分に把握する必要がある。

タンクの運用に関しては、タンクの併用と切換を考慮しなければならない。その一方では、システムをあまり複雑にしない運用方法が望まれる。そこで、まず、オゾン供給に併用されるタンクは 2 つまでとする。そして、その 2 つのタンクに対して、一方を主に使う"Main"タンク、もう一方を Main が供給できない部分を補うかた

ちで、"Sub"タンクとして、役割分担をする。もし、現時点のMainタンクとSubタンクでは、オゾン供給量が満たせないと判断した場合は、Mainタンクを切り離し(off)、Subタンクを Mainに、新たに他のタンクを Subにするといった方式をとる。この方式により、システム構成をシンプルにするとともに、効率のよいオゾン供給が可能となる。

5 システム構成

以上を考慮し、本稿で提案するオゾン運用システムの構成を Fig. 2に示す。本システムで適用する制御器は状況監視部、運用タンク決定部、酸素パージ量設定部の3つにより構成する。

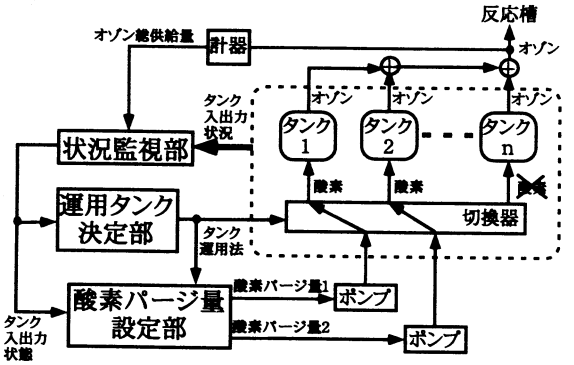


Fig.2 制御システム

5.1 状況監視部

状況監視部は、すべてのタンクの状況を監視し、運用タンク決定部と酸素パージ量設定部にすべてのタンクの状態を伝える役割をもつ。

5.2 運用タンク決定部

運用タンク決定部では、状況に応じてタンクの切換を行う。この運用タンク決定部では、必要なオゾン投入量を満たしつつ、切換時にMainタンク内部に残留してしまう無駄なオゾンを減らすことを考えなければならない。このような場合、供給システム全体の状況を把握する必要があり、状況に対して、常に評価を行わなければならない。ここではファジィ推論[3]を用い、タンク各々に対して、状況に応じた役割を割り当てる。

5.3 酸素パージ量設定部

酸素パージ量設定部においては、運用タンク決定部によって割り当てたMainとSubに連結されている各々のポンプに対して、どちらがどの位の酸素をパージすればよいのかを設定する。基本的に、Mainがオゾン要求量に追従したオゾンを供給し、Subがその誤差に追従といった戦略でオゾンを供給する。そして、各々のポンプに対して、オゾンタンクの非線形性を考慮した酸素パージ量を動的に割り当てる。

6 シミュレーション

ここでは、本システムの有効性をシミュレーションにて検討する。シミュレーション時間は350[s]、3つのオゾンタンクを用い、それぞれのオゾン初期残留量は100[g]、酸素パージ量は、0〜10[g/s]の範囲で行っている。その時の各タンクからのオゾン供給量を Fig.3に示す。この結果から、Mainタンクをなるべく先に使い、Mainタンクが補えない部分をSubタンクが補っていることがわかる。このような方式により、切換時に無駄となるオゾンを減らすことができる。

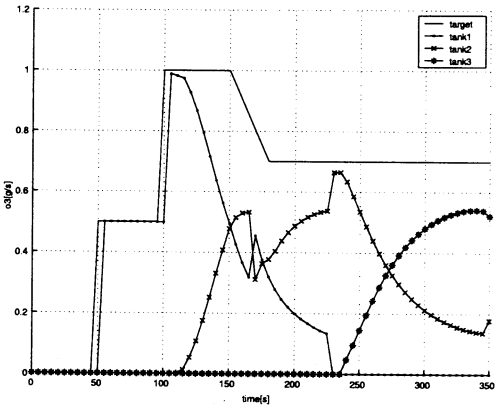


Fig.3 各タンクからのオゾン供給量

7 結言

本稿では、非線形プロセスの一例であるオゾンを用いた水処理プラントに対して、ファジィ推論を適用した知的制御システムを構築し、シミュレーションを行った。本システムにおいて、酸素パージ設定部では、オゾンタンクの非線形性への対処、運用タンク決定部では、オゾンタンクの運用法を考えることにより、効率のよいオゾン供給が可能であることを確認した。今後の課題は、本稿で構築したシステムを実機にて適用することである。

参考文献

[1] 長沢末男ら、**"オゾンを利用した高度処理技術に関する検討"**、造水技術,Vol.23(1997)

[2] 谷哲次ら、**"熟練運転員の経験とノウハウに基づくファジィスーパーバイザ制御システムの構築と石油生成装置間での水素純度制御への適用"**、計測自動制御学会論文集,Vol.35,91/96(1999)

[3] 安信誠二、**"ファジィ工学"**、昭晃堂(1991)

問い合わせ先

〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1
筑波大学機能工学系安信研究室
増田貴裕
TEL (0298)53-6186
E-mail: masuda@edu.esys.tsukuba.ac.jp

WD2−3

進化的制御による倒立振子の振り上げ制御

Swing up control of inverted pendulum based on evolutionary control

山崎 博昭　　安信 誠二
Hiroaki YAMASAKI　　Seiji YASUNOBU
筑波大学　機能工学系
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

Abstract: An inverted pendulum is a nonlinear system, it is difficult to make a accurate model. If controller can learn model on-line, we can control better. In this paper, we propose evolutionary control method that evolve a model on-line, and use this method to the swing up control of inverted pendulum.

1 はじめに

倒立振子は非線形システムであり、動特性の把握が困難である。この倒立振子の振り上げを人間が行う場合、実際に台車を動かしながら、何度も学習を繰り返し、少しずつ動特性を把握して、うまく振子を振り上げる。

本研究では、遺伝的アルゴリズムを用いて, 制御対象のモデルをオンラインで学習し制御に用いる進化的制御方式を提案する。そして、この方式を倒立振子の振り上げ制御に適応して、振子の振れ上がり角度を予見するモデルを進化学習し、有効性を確認する。

2 制御方針

ここで行う倒立振子の、振り上げ、倒立の制御方針を次に示す。

2.1 振り上げ制御

振り上げ制御では、振子が最下点に来た時に台車を動かし、振子の振れ上がりを大きくするよう制御を行う。台車を左右どちらに、どれくらいの時間動かしたら、振子がどれだけ振れ上がるかをモデルを用いて予見し、倒立点近傍にうまく進入する制御入力を決定する。

2.2 倒立制御

倒立制御では、振子が倒立状態に近づいている時に、振子が倒れる方向に台車を動かし倒立を維持するよう制御を行う。台車の現在位置と目標位置に誤差があれば、目標位置に台車が近づくように、目標位置の方向に振子を倒すようにする。

3 制御システムの構築

振り上げ状態と倒立状態で用いる二つの制御器と、振り上げ制御器で用いられるモデルを学習するモデル学習部から構成される制御システムの全体を図 1 に示す。

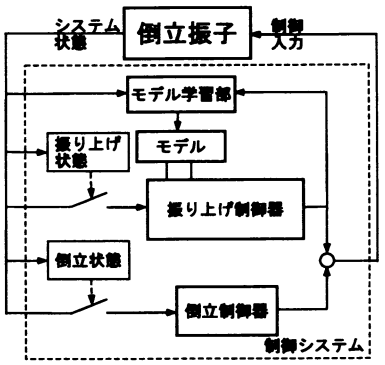


図1： 制御システムの概要

3.1 振り上げ制御器

振り上げ制御では、オンラインで学習し進化していくモデルを用いて、予見ファジィ制御によって、台車への制御入力時間を決定する。制御入力時間とは、台車をモータで制御する際、一定電圧をモータに与える時間の長さである。また、ここでは振子を If-then ルールに基づくファジィモデルで記述する。この If-then ルールは「もし [If]、制御入力時間 ($timeinput$) が NB で、振子の最下点での角速度 (ω) が ZO ならば、[then] 振子の振れ上がり角度 (θ_{max}) は 0.3 になる。」と表す。それらのルールをまとめて表 1 に示す。複数ある制御入力時間候補をモデルに入力し、予見される振子の振れ上がり角度と台車の位置をファジィ評価し、最も評価の高い制御入力時間候補を制御入力時間として選択する。

3.2 倒立制御器

倒立振子の持つ４つの状態変数、(1) 台車の位置 (x)、(2) 台車の速度 (v)、(3) 振子の角度 (θ)、(4) 振子の角速度 (ω) を用いた状態評価ファジィ制御により制御を行なう [3]。x と v の状態にファジィ推論を行ない、台

表1： 振子のモデル

$\theta_{max}(rad)$		$\omega(rad/sec)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
timeinput (s)	NB	0.1	2.8	3.0	0.3	2.3	-0.9	-2.0
	NM	0.0	-1.3	0.3	2.4	3.1	0.5	1.0
	NS	0.1	-0.7	-0.4	2.5	-0.9	-1.5	-0.6
	ZO	0.4	1.5	-0.1	1.1	-3.1	1.5	-2.8
	PS	0.4	-1.1	-0.9	-0.5	1.7	0.5	-1.8
	PM	1.4	-0.1	2.5	-2.4	-0.4	1.3	-0.7
	PB	0	1.1	-0.9	-0.2	0.1	0.0	-0.1

車を移動しようとする方向に、振子の目標角度 (θ_t) を設定する。次に角度差 ($\theta - \theta_t$) と角速度 (ω) についてファジィ推論を行ない、制御入力を決定する。

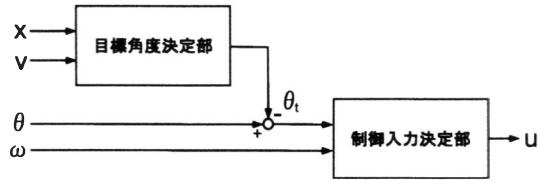


図2： 倒立制御器

3.3 モデル学習部

モデル学習部では、遺伝的アルゴリズムを用いて、予見ファジィ制御で使用するモデルをオンラインで学習し、進化させる。予見ファジィ制御で使用するモデル (If-then ルールで記述された 49 のルール) を一つの個体とし、この個体を 12 個発生させる。個体中の一つ一つのルールの後件部に、発生範囲 $-\pi$〜π で初期値をランダムに発生させ、ルールの後件部を遺伝子として学習を行っていく。

個体の評価は、実際に角速度 ω で振れている振子に制御入力時間 *timeinput* を与えたときの振子の振れ上がり角度と、各個体に同一の角速度 ω と制御入力時間 *timeinput* を与え、振子の振れ上がり角度を計算した値 (予見値) との誤差で評価する。誤差の少ない個体が、より実際の振子に近い動作をするモデルであるので評価値を高くする。そして選択、交叉、突然変異の操作を繰り返し、最も評価値の高かった個体が、次の制御入力時間を決定する際に、予見ファジィ制御で使われるモデルとなる。

この学習を実際の振子の振れ上がり角度を取り込むごとに行い、モデルを進化させていく (図 3)。

4 実機による実験結果

ミニ倒立振子 (アズテック社製) に、構築した制御システムを用いて実験をおこなった。図 4 が示すように、進化的学習を行うことで、倒立点 (角速度、角度が共に 0) の近傍までの振り上げを実現している。

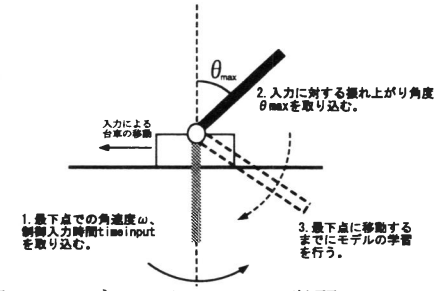


図3： モデルのオンライン学習

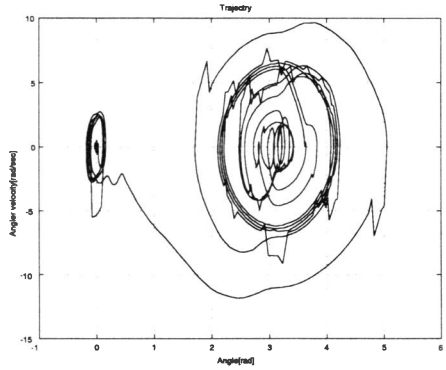


図4： 実機での振子の位相面

5 おわりに

本研究では、遺伝的アルゴリズムによりモデルをオンラインで学習し制御に用いる進化的制御方式を提案した。そして、この方式を用いて、倒立振子の振り上げ制御を行い、有効性を確認した。

動特性の把握が困難である他の非線形システムにおいても、提案した進化的制御を、適用可能である。

参考文献

[1] 安信 ”ファジィ工学”, 昭晃堂 (1991)

[2] 北嶋、安信 ”遺伝的アルゴリズムを用いた倒立振子の振り上げ制御”, 第 15 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 pp.55-56,(1999)

[3] 森、安信 ”予見ファジィ制御方式を用いた倒立振子の振り上げ安定化制御”, 第 25 回知能システムシンポジウム pp.197-202,(1998)

問い合わせ先

〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学機能工学系安信研究室
山崎 博昭
TEL (0298)53-6186
E-mail: yamasaki@esys.tsukuba.ac.jp

WD3－1

倒立振子システムの振り上げおよび安定化ファジィ制御

Upswing and Stabilization Fuzzy Control of Inverted Pendulum System

○易　建強
Jianqiang YI
マイコム株式会社
Mycom, Inc.

湯場崎　直養
Naoyoshi YUBAZAKI
マイコム株式会社
Mycom, Inc.

廣田　薫
Kaoru HIROTA
東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

Abstract: A fuzzy controller is presented based on the SIRMs (Single Input Rule Modules) dynamically connected fuzzy inference model for the upswing and stabilization control of inverted pendulum system. Simulation results show that the fuzzy controller can swing up the pendulum from the pending position to the upright position and then stabilize the whole pendulum system in about 2.5 seconds.

1. はじめに

振子と台車からなる倒立振子システムは構造が簡単であるが、振子が垂下するときの安定な平衡点と振子が倒立するときの不安定な平衡点を持つ典型的な非線形系である。振り上げおよび安定化制御[2,3]とは、台車を左右に動かすことによって垂下位置にある振子を振り上げて不安定な倒立位置に静止させ、しかも台車を指定位置に移動させることである。

SIRMs (Single Input Rule Modules、単一入力ルール群)動的重視度結合型ファジィ推論モデル[5]による倒立振子システムの安定化制御器[4]がすでに提案されたが、ここではそのモデルをさらに倒立振子システムの振り上げおよび安定化制御に適用する。振子が倒立領域にあるときに安定化制御器になり、垂下領域にあるときに振子角度のメンバーシップ関数の飽和特性により自動的に振り上げ制御器になる、振り上げおよび安定化ファジィ制御器を構築する。本制御器が振子の振り上げから系全体の安定化までをすべてスムーズにカバーし、しかも短時間で倒立振子システムを垂下状態から倒立安定化させることができることを示す。

2. 安定化制御器

以下では、まず倒立振子システムの安定化制御器を構築し、次にこの安定化制御器が自動的に振子の振り上げ制御器にもなることを示す。

鉛直線に対して時計回りする振子の角度を正、レール原点より右側にある台車の位置を正、台車を右方向に押す駆動力を正とする。また、振子の安定化角度範囲を-30.0°から+30.0°までとして、台車の移動範囲を-2.4m から+2.4m までとする。4つの状態変数（振子の角度と角速度、台車の位置と速度）のスケーリングファクタを、それぞれ30.0°、100.0°/s、2.4m、1.0m/sに固定する。操作量のスケーリングファクタを台車と振子の総質量の10倍に設定する。そこで、4つの状態変数がそれぞれのスケーリングファクタで正規化されたものを順に入力項目 x_i (i=1,2,3,4) として、駆動力が操作量のスケーリングファクタで正規化されたものを出力項目 f とするファジィ制御器を、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて構築する。

まず、各入力項目に対して SIRM を構築する。日常的経験より、振子の角度または角速度が正値の場合、駆動力を正にして台車をレールの右方向に移動させれば、振子が負の方向に回転し、角度または角速度が減少する方向に変化することがわかる。一方、台車の位置または速度が正値の場合、正の駆動力を台車に加えて台車をさらに右方向に移動させることによって、振子をあえて負の方向に少し倒す。そして、振子を倒立させることによって、台車の位置制御も間接的に実現する。したがって、各入力項目に対応する SIRM を表1のように設定することができる。ただし、メンバーシップ関数 NB と PB を図1に示すように台形で定義し、飽和領域を持たせている。

表1から分かるように、各 SIRM はすべて同じ設定になっており、ともに駆動力を推論する。しかし、倒立振子システムの安定化制御において、振子の角度制御を台車の位置制御よりも優先的に行わなければならない。この優先順位を表すため、動的重視度を用いる。動的重視度は、各入力項目が制御対象の挙動に果たす影響力がそれぞれ異なることから導入され、大きいほど制御対象の挙動へ強く影響する。各入力項目の動的重視度 w_i^D (i=1,2,3,4) は、式(1)で定義される。

$$w_i^D = w_i + B_i \cdot \Delta w_i \quad (1)$$

基本値w_iと変動幅B_iは非負の制御パラメータであり、変動量変数Δw_iは以下に示すファジィルールで記述される。

振子の角度の絶対値が大きい場合、振子を速やかに鉛直方向に回転させなければ振子が倒れてしまうので、振子の両重視度を大きくして角度と角速度の影響力を強化しなければならない。しかし、振子の角度の絶対値がゼロに近いすなわち振子がほぼ倒立している場合、倒立状態を維持するため、振子の両重視度を小さくして角度と角速度の影響力を弱める必要がある。したがって、振子の角度と角速度の変動量変数に関するファジィルールを、表2のように正規化後の角度の絶対値を前件部変数として構築することができる。ただし、メンバーシップ関数DS、DM、DBは図2のように定義している。

一方、倒立振子システムの安定化を図るには、台車の位置制御に比べて振子の角度制御を優先して行わなければならない。すなわち、振子が倒立していないとき、まず振子の角度制御を行い振子をほぼ倒立状態に持っていく。そして振子の倒立状態を維持しながら台車の位置制御を行い、台車をレールの原点に移動させるようにする必要がある。これは、台車の両重視度の変動量変数についても振子の角度を参考にして決めることを意味している。このように振子が倒立状態から大きく倒れたとき、振子の角度制御を直ちに行わなければいけないので、台車の位置と速度の重視度を小さくして振子の制御に重点を置く。振子がほぼ倒立になったら、その倒立状態を維持するだけでよいので、台車の位置と速度の重視度を少し大きくして、振子の安定化を図るとともに台車の位置制御を行う。そこで、台車の位置と速度の重視度の変動量変数について、表3のように正規化後の振子の角度の絶対値を前件部変数とするファジィルールテーブルが作成できる。

最後に、本ファジィ制御器の最終出力fは各SIRMの推論値の動的重視度付き総和として式(2)で求める。この出力値に操作量のスケーリングファクタを乗じたものは、実際に台車に施す駆動力になる。

$$f = \sum_{i=1}^{4} f_i \cdot w_i^D \quad (2)$$

台車に関する表3の後件部の実数値の順序がちょうど振子に関する表2の後件部の実数値の順序と反対になっている。これによって、振子の角度が大きいときに振子の角度制御を優先して、振子がほぼ倒立しているときには倒立状態を安定させながら台車の位置制御を行うことが可能になる。そして振子の角度制御と台車の位置制御の切り替えは、振子の角度の大きさに基づいて各動的重視度を自動的に調整することによって行われる。

3. 振り上げ制御器

振子が垂直倒立しているときに、振子の角度を0.0°と定義している。倒立位置から時計回りに回転して垂下位置になるとき、振子の角度が+180.0°になる。その位置から振子が回転し続けて、角度がさらに大きくなる場合は、その角度を倒立位置から逆時計周りに沿って負の値として計ることにする。同様に、倒立位置から逆時計回りに回転して垂下位置になるとき、振子の角度が-180.0°になる。そこから振子が回転を継続し、角度が負でもっと大きくなる場合は、今度はその角度を倒立位置から時計回りに沿って正の値として計ることにする。このように振子の倒立位置と垂下位置の右部分と左部分をそれぞれ角度の正値と負値に対応させ、振子の角度を[-180.0°, +180.0°]に制限する。

この条件で振子の初期角度が[-30.0°, +30.0°]以外の場合に、前節の安定化制御器の挙動を調べる。振子角度のスケーリングファクタと図1のメンバーシップ関数より、振子の角度が[-30.0°, +30.0°]以外になると、振子の角度に対応する入力項目の値が飽和領域に入る。また表1から、振子の角度が+30.0°より大きい場合は、角度のSIRMにおいてPB対応のルールのみが発火し、台車を右方向に移動させる駆動力が発生する。これによって、振子の角度が+90.0°以内であれば振子が倒立に向かっていくが、振子の角度が垂下領域にあればすなわち+90.0°を越えていれば振子が左方向に加振されることになる。振子の角度が-30.0°より小さい場合も同様である。

振子の角速度がゼロであれば、上記の加振は初期励振になる。しかし、振子が垂下位置に向かって回転する場合、振子の角速度は非零値となり、しかも角度と同じ符号である。この場合、振子の角速度のSIRMは角度のSIRMと同じ符号の推論値を出力し、台車を動かす駆動力を一層大きくする。その結果、振子は垂下位置を境にして駆動力の符号と反対の方向に一段と加振される。さらに、台車がレールの原点の右側に位置していれば、台車の位置に対応するSIRMの働きで台車を右方向に押す力は発生し、振子を時計回りに加振

する。台車の速度についても、同じことがいえる。

このように正規化後の振子角度のメンバーシップ関数の飽和特性および各SIRMの定義を利用することで、前節の安定化制御器は垂下領域にある振子に対して自動的に振り上げ制御器に変身し、振子を励振、加振する駆動力を生成することができる。振子は例えば左側に1回振られて倒立領域に到達できずに再び垂下領域に戻る場合、今度は左方向の駆動力が生じるので、右側に加振されるようになる。そして、各動的重視度の基本値と変動幅が適切に設定されていれば、振子は左右に次第に強く加振されるうちに振り上げられる。振子が振り上げられたら、今度は安定化制御器の機能を発揮し、倒立振子システムを安定化させる。

4. 制御シミュレーション

本ファジィ制御器の動作を検証するため、振子質量、振子全長、台車質量をそれぞれ 0.0245kg、1.000m、0.060kg とする[2]。摩擦をすべて無視し、サンプリング周期を 0.01s に設定する。振子が垂下位置に静止した状態に対して、10.0s にわたって各状態変数と操作量のそれぞれの絶対値の総和が小さくなる方向に、各動的重視度の基本値と変動幅のチューニングをランダム最適探索法[1]で 500,000 回行う。

チューニング後の各基本値と変動幅を表 4 に示す。この表からわかるように振子の両基本値が台車の両基本値より大きくなっており、振子角度と角速度のそれぞれの基本値と変動幅の総和は台車位置と速度のそれぞれの基本値と変動幅の総和より倍以上大きくなっている。これは、本ファジィ制御器が振り上げ制御も行うが、制御開始から基本的に振子の角度制御を優先的に行うことを意味する。また、台車の両変動幅が振り上げ制御に現れない上、台車の両基本値が両変動幅に比べて小さくなっていることから、台車の両動的重視度は振り上げ制御にあまり関与せず、主に安定化制御に貢献することになる。

台車がレール原点に停止し振子が垂下位置に静止する初期状態に対して、倒立振子システムの振り上げおよび安定化制御を行う。図3(a)、(b)、(c)はそれぞれ振子の時間応答、台車の時間応答、および操作量の時間応答を示している。なお、図(a)において、振子の角度の連続変化をわかりやすく表示するため、垂下位置から逆時計回りに倒立位置までを[180.0 °, 0.0 °]、垂下位置から時計回りに倒立位置までを[180.0 °, 360.0 °]のように表示している。

この図からわかるように、制御開始時台車が少し右方向に押されて、振子が時計回りに初期励振される。そして台車が左方向に移動することによって、振子は逆時計回りに振り上げられ倒立位置を少し越えるが、約 1.5s で倒立される。一方、台車が 2.5s ほどでレールの原点に戻り、システム全体は安定化される。この例では、操作量の最大値が約 10.0N である。

5. おわりに

SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルを倒立振子システムの振り上げおよび安定化制御に適用し、振子が垂下領域にある時に振り上げ制御器になり、振子が倒立領域にあるときに安定化制御器になる、振り上げおよび安定化ファジィ制御器を構築した。制御シミュレーションによって、本ファジィ制御器が短時間で振子を垂下位置から振り上げてシステムを倒立安定化させることができることを示した。

参考文献

[1] N. Baba: A New Approach for Finding the Global Minimum of Error Function of Neural Networks, Neural Networks, Vol.2, pp.367-373(1989).

[2] 松浦克昌：カート位置制御を含めた倒立ポールの振り上げ、安定化ファジィ制御、日本ファジィ学会誌、Vol.5、No.2、pp.397-408(1993).

[3] S. Yasunobu and M. Mori: Swing up Fuzzy Controller for Inverted Pendulum Based on a Human Control Strategy, Proceedings of FUZZ-IEEE'97, Vol.3, pp.1621-1625(1997).

[4] 易建強、湯場崎直養、廣田薫：SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる倒立振子システムの安定化制御、日本ファジィ学会誌、Vol.11、No.3、pp.492-502(1999).

[5] 湯場崎直養、易建強、廣田薫：動的重視度を用いたSIRMs ファジィ推論モデル、日本ファジィ学会誌、Vol.10、No.3、pp.522-531(1998).

[問い合わせ先]

〒616-8303 京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町 12
マイコム株式会社技術研究所
易 建強 (Yi Jianqiang)

TEL: 075-882-3601
FAX: 075-882-6531
E-mail: yi@mycom-japan.co.jp

表1: 各入力項目i (i=1,2,3,4) の単一入力ルール群

前件部変数 x_i	後件部変数 f_i
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

表2: 振子の両変動量変数に関するファジィルール

前件部変数 $\lvert x_1 \rvert$	後件部変数 Δw_i (i = 1,2)
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

表3: 台車の両変動量変数に関するファジィルール

前件部変数 $\lvert x_1 \rvert$	後件部変数 Δw_i (i = 3,4)
DS	1.0
DM	0.5
DB	0.0

表4: 制御パラメータ

入力項目	基本値	変動幅
振子角度	3.309	3.989
振子角速度	3.940	0.909
台車位置	0.495	1.987
台車速度	0.000	1.042

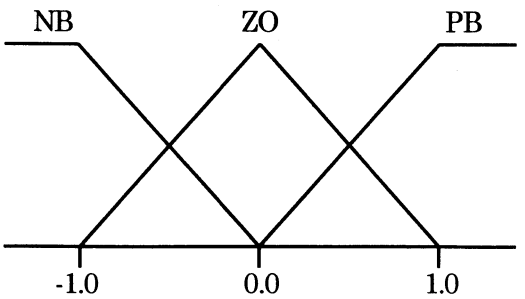


図1: 各前件部変数のメンバーシップ関数

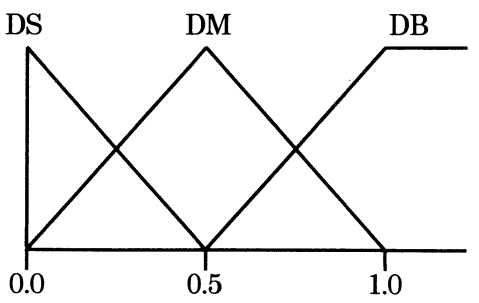
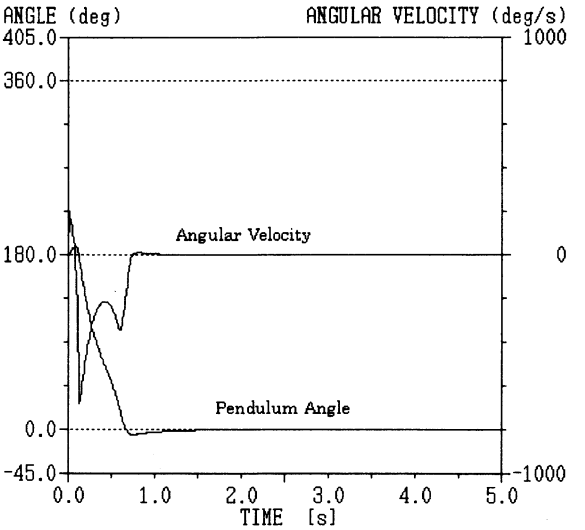
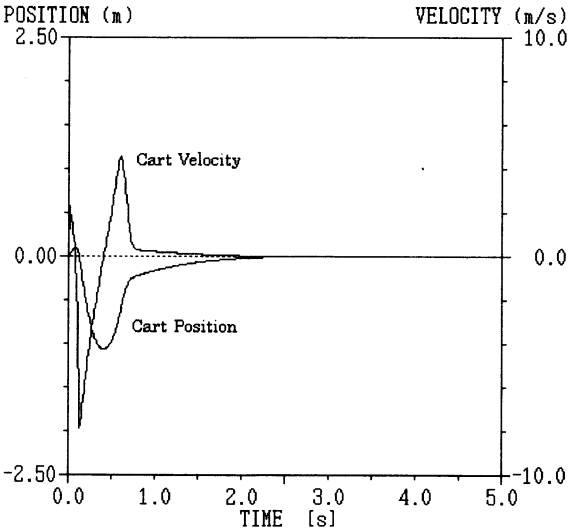


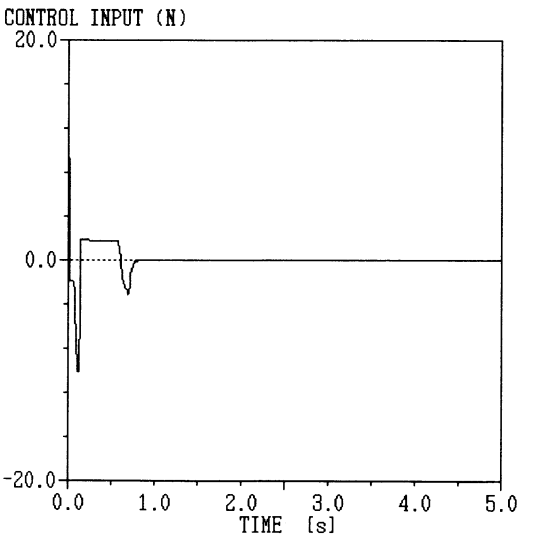
図2: 角度の絶対値のメンバーシップ関数



(a) 振子の時間応答



(b) 台車の時間応答



(c) 操作量の時間応答

図3: 振り上げおよび安定化制御結果

WD3−2

並列型二重倒立振子システムの安定化ファジィ制御

Stabilization Fuzzy Control of Parallel-Type Double Inverted Pendulum System

○易　建強
Jianqiang YI
マイコム株式会社
Mycom, Inc.

湯場崎　直養
Naoyoshi YUBAZAKI
マイコム株式会社
Mycom, Inc.

廣田　薫
Kaoru HIROTA
東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

Abstract: A stabilization fuzzy controller is proposed based on the SIRMs (Single Input Rule Modules) dynamically connected fuzzy inference model for parallel-type double inverted pendulum system. The simulation results show that the proposed controller can stabilize completely the parallel-type double inverted pendulum system within 10 seconds. This is the first result for a fuzzy controller to realize complete stabilization control of a parallel-type double inverted pendulum system.

1. はじめに

並列型二重倒立振子システムは、直線レール上を左右に動く台車、台車の上の右と左の支点を通じてレールと同じ平面に回転する長振子と短振子から構成される。その安定化制御は、単振子の倒立振子システムおよび直列型二重倒立振子システムに比べて、最も実現困難であるといわれている[3]。これまで極配置法[3]およびループ整形法[4]による安定化制御器が報告されている。また、ファジィシングルトン型推論法による安定化制御の試み[2]が行われているが、台車の位置制御は考慮されていない。

ここでは、SIRMs (Single Input Rule Modules、単一入力ルール群) 動的重視度結合型ファジィ推論モデル[5,6]に基づいて、並列型二重倒立振子システムの安定化ファジィ制御器を提案する。SIRM と動的重視度を用いることによって、両振子の角度制御と台車の位置制御が制御状況に応じて優先順位を自動的に切り替えながら並列的に行われることを明らかにする。制御シミュレーションを通じて、本提案の制御器がファジィ制御器として初めて、並列型二重倒立振子システムを10秒内に完全に安定化できることを示す。

2. 安定化ファジィ制御器

図1に示すように、レール原点からの台車位置（右方向が正）をx、長振子1の鉛直線からの角度（時計回りが正）をα、短振子2の鉛直線からの角度（時計回りが正）をβ、台車に加わる駆動力（右方向が正）をFとする。ここで、長振子1の角度αと角速度、短振子2の角度βと角速度、台車の位置xと速度を各々のスケーリングファクタで正規化したものをこの順に入力項目 x_i (i=1,2,…,6) として、駆動力Fを出力スケーリングファクタで正規化したものを出力項目fとする。以下では、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて、両振子を倒立させるとともに台車をレール原点に移動させる安定化ファジィ制御器を構築する。

まず、各入力項目に対応する SIRM を設定する。

長振子1の角度と角速度が正値の場合、台車を左方向に移動させなければならない。これによって、長振子1が時計回りにさらに倒れていくが、短振子2は時計回りに高速に回転して、長振子1よりも大きな正の角度と角速度を持つようになる。すなわち、短振子2は長振子1の回転に合わせて同期を取る。そして、台車を右方向に移動させることによって、短振子2を倒立させるとともに長振子1の倒立を実現する。以上により、長振子の角度と角速度に対応する両入力項目の SIRM をともに表1に設定する。

短振子2の角度と角速度が正値の場合、制御動作を加えなければ、短振子2がその勢いで次第に倒れていく。また、台車を左方向に移動させると、短振子2の角速度がさらに大きくなり、短振子2の倒立ができなくなる。つまり、この場合短振子2を倒立するには台車を右方向に移動させ、短振子2を逆時計回りに起こす必要がある。そこで、短振子2の角度と角速度に対応する両入力項目の SIRM をともに表2に設定する。

台車の位置と速度が正値の場合、まず負の駆動力を加える。そして、短振子2の角度と角速度が正値になってから、表2の働きによって正の駆動力が生じて短振子2の角度と角速度を負に制御し、さらに負の駆動力で両振子を倒立しながら台車をレール原点に復帰さ

せていく。したがって、台車の位置と速度に対応する両SIRMを表3に設定する。

ただし、各SIRMの後件部変数f_i (i=1,2,...,6) は、すべて本ファジィ制御器の出力項目fに対応する中間変数である。また、メンバーシップ関数NB、ZO、PBは、台集合上で等間隔に分布する台形、三角形、台形である。

一方、並列型二重倒立振子システムの安定化制御において、長振子1と短振子2および台車の制御の優先順位は制御状況に応じてそれぞれ異なる。長振子1は慣性が大きいのに対して、短振子2は固有周波数が高い。長振子1の角度と角速度が大きいとき、長振子1の制御を優先的に行わなければ、長振子1が倒れていくにつれて、その倒立が一層難しくなる。短振子2の角度と角速度が大きいとき、適切な制御動作を実行すれば、高応答性のため短振子2の姿勢が立て直しやすい。したがって、長振子1の角度と角速度が大きい場合、まず長振子1の制御を優先的に行うことによって短振子2を長振子1に同期させる。また、短振子2の角度と角速度が大きい場合、両振子の同期をまだ取っていなければ、短振子2の制御を優先して両振子の同期を取る。そして短振子2の制御を行うことによって両振子の倒立を実現する。両振子がほぼ倒立していれば、台車の制御を行うと良い。

このように、各制御の優先順位が異なるため、駆動力の決定にこの優先順位を反映しなければならない。入力項目の影響力を意味する動的重視度は、この優先順位を明確に表現できる。各入力項目の動的重視度w_i^D (i=1,2,⋯,6) は、基本値w_i、変動幅B_iおよび変動量変数Δw_iによって式(1)で定義される。

$$w_i^D = w_i + B_i \cdot \Delta w_i \tag{1}$$

そして、長振子1の角度と角速度に対応する動的重視度の変動量変数のファジィルールを、表4に長振子1の角度に対応する入力項目x_1の絶対値を前件部変数として設定できる。ただし、メンバーシップ関数DS、DM、DBは、三角形ないし台形で定義している。これによって、長振子1の角度の絶対値が大きいときには長振子の角度と角速度に対応する動的重視度が大きくなるので長振子1の制御の優先順位が上がり、長振子1の角度の絶対値がほぼゼロのときには長振子1の角度と角速度に対応する動的重視度が小さくなるので長振子1の制御の優先順位が下がる。

同様に短振子2の角度と角速度に対応する動的重視度の変動量変数のファジィルールを、表5に短振子2の角度に対応する入力項目x_3の絶対値を前件部変数として設定できる。すなわち、短振子2の角度が小さければ短振子2の動的重視度を減少して、その角度が大きければ短振子2の動的重視度を増大する。これによって、短振子2の制御の優先順位を制御状況に応じて調整する。

両振子がまだ倒立されていないときに台車の制御を行うと、両振子の状態を壊す危険性がある。したがって、台車の制御を行うには、両振子がほぼ倒立状態になっていなければならない。そこで、台車の位置と速度に対応する動的重視度の変動量変数のファジィルールを、表6に長振子1の角度に対応する入力項目x_1の絶対値と短振子2の角度に対応する入力項目x_3の絶対値を前件部変数として設定できる。これによって、両振子がほぼ倒立状態になっていれば台車の両動的重視度を強調し、両振子が倒立されていなければ台車の両動的重視度を抑制することができる。

次に、本安定化ファジィ制御器の最終出力fは、式(2)で各SIRMの推論値の動的重視度付き総和として求める。この出力に出力項目のスケーリングファクタを乗じれば、台車に加わる駆動力Fになる。

$$f = \sum_{i=1}^{6} f_i \cdot w_i^D \tag{2}$$

最後に、各優先順位を可能にするには、制御パラメータである各動的重視度の基本値と変動幅を適切に与えなければならない。そこで、質量0.3kgと全長1.2mの長振子1、質量0.1kgと全長0.4mの短振子2、質量1.0kgの台車からなる並列型二重倒立振子システムに対して、各基本値と変動幅をランダム最適探索法[11]でチューニングする。各入力項目のスケーリングファクタを、それぞれ順に15.0°、100.0°/s、15.0°、100.0°/s、2.4m、1.0m/sに設定する。出力項目のスケーリングファクタを両振子と台車の総質量の10倍に設定する。また、サンプリング周期を0.01sとして、1回探索の制御時間を最大25.0sまでとする。

長振子1の初期角度を5.0°に設定する以外、ほかの状態変数の初期値をすべてゼロに設定する。さらに、各基本値と変動幅の初期値をすべてゼロに設定する。制御開始から終了までの各サンプリング時刻における各状態変数および駆動力のそれぞれの絶対値の総和が小さくなる方向に、探索を40,000回行う。得られた各動的重視度の基本値と変動幅を表7に示す。

表7から分かるように、長振子1に対応する入力項目x_1またはx_2の基本値と変動幅の和は、短振子2に

対応する入力項目x_3またはx_4の基本値と変動幅の和より大きくなっている。さらに、入力項目x_3またはx_4の基本値と変動幅の和は、台車に対応する入力項目x_5またはx_6の基本値と変動幅の和より数倍以上大きくなっている。

以上の設定により、長振子1の角度と角速度が大きい場合には、入力項目x_1とx_2の重視度が大きく、対応する両SIRMの推論値も大きくなる。その結果、長振子1の制御が優先される。短振子2の角度と角速度が長振子1の角度と角速度よりある程度大きければ、入力項目x_3とx_4の重視度が入力項目x_1とx_2の重視度に匹敵でき、しかも入力項目x_3とx_4のSIRMの推論値が入力項目x_1とx_2のSIRMの推論値より大きくなるので、駆動力における短振子2の寄与が主になる。この場合、短振子2の制御が優先的に行われる。両振子の角度と角速度がともに小さい場合には、両振子の各SIRMの推論値がほぼゼロになる。この場合、台車の位置と速度が大きければ、駆動力における台車の寄与が相対的に大きくなるため、台車の制御が行われる。そして、各制御間の優先順位の切り替えは、制御状況に応じて自動的に行われる。

3. 安定化制御シミュレーション

本安定化制御器の動作を確認するため、長振子1と短振子2の初期角度をそれぞれ5.0°と5.0°、および5.0°と10.0°に設定し、ほかの状態変数の初期値をすべてゼロに設定した場合の安定化制御結果を図2と図3に示す。

図2では、両振子の初期角度が同じであるが、長振子1の動的重視度が大きいため、制御開始時にまず長振子1の制御が優先的に行われる。長振子1の正の初期角度に対して負の駆動力が生成されるので、（図から読みとれないが）台車が左方向にすこし移動する。これによって、長振子1の角度が約6.0°に拡大するが、短振子2の角度が約8.0°まで増大する。そして、短振子2の角速度も長振子1の角速度より大きくなるので、短振子2の制御は優先になる。その結果、短振子2が倒立されると同期に、長振子1も倒立される。この例では、制御開始から約6.12s後に各状態変数の値がそれぞれ0.1°、0.1°/s、0.1°、0.1°/s、0.01m、0.01m/s以内に収束し、最大駆動力がわずか3.0N弱である。

図3では、初期状態として、両振子が同じ方向に傾き、しかも短振子2の初期角度が長振子1の初期角度の倍になる。両振子の制御パラメータからわかるように、制御開始から短振子2の制御が強調され、台車が右方向に移動される。これによって、短振子2とともに長振子1も倒立されていく。この場合、倒立振子システムが約5.29sで完全に安定化され、最大駆動力が約20.0Nになる。

4. おわりに

並列型二重倒立振子システムの安定化制御にSIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルを適用し、安定化ファジィ制御器を構築した。制御シミュレーションによって、並列型二重倒立振子システムを10秒内に安定化できることを示した。この結果、ファジィ手法では初めて台車の位置制御を含めた並列型二重倒立振子システムの安定化制御を実現した。

参考文献

[1] N. Baba: A New Approach for Finding the Global Minimum of Error Function of Neural Networks, Neural Networks, Vol.2, pp.367-373(1989).

[2] 藤田和之、水本雅晴：遺伝的アルゴリズムによるファジィシングルトン型推論法の下での並列倒立振子のファジィ制御、第11回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.379-382(1995).

[3] 川谷亮治、山口尊志：並列型2重倒立振子系の解析とその安定化、計測自動制御学会論文集、Vol.29、No.5、pp.572-580(1993).

[4] 杉江俊治、岡田昌史：並列倒立振子システムのH∞制御、システム制御情報学会論文誌、Vol.6、No.12、pp.543-551(1993).

[5] 易建強、湯場崎直養、廣田薫：SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる倒立振子システムの安定化制御、日本ファジィ学会誌、Vol.11、No.3、pp. 492-502 (1999).

[6] 湯場崎直養、易建強、廣田薫：動的重視度を用いたSIRMsファジィ推論モデル、日本ファジィ学会誌、Vol.10、No.3、pp.522-531(1998).

[問い合わせ先]

〒616-8303 京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町12
マイコム株式会社技術研究所
易 建強 （い けんきょう）

TEL: 075-882-3601
FAX: 075-882-6531
E-mail: yi@mycom-japan.co.jp

表 1: 長振子 1 に対応する両入力項目の SIRM

前件部変数 x_i (i = 1,2)	後件部変数 f_i (i = 1,2)
NB	1.0
ZO	0.0
PB	-1.0

表 2: 短振子 2 に対応する両入力項目の SIRM

前件部変数 x_i (i = 3,4)	後件部変数 f_i (i = 3,4)
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

表 3: 台車に対応する両入力項目の SIRM

前件部変数 x_i (i = 5,6)	後件部変数 f_i (i = 5,6)
NB	1.0
ZO	0.0
PB	-1.0

表 4: 長振子 1 の変動量変数に関するファジィルール

前件部変数 $\lvert x_1 \rvert$	後件部変数 Δw_i (i = 1,2)
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

表 5: 短振子 2 の変動量変数に関するファジィルール

前件部変数 $\lvert x_3 \rvert$	後件部変数 Δw_i (i = 3,4)
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

表 6: 台車の変動量変数に関するファジィルール

Δw_i (i = 5,6)		$\lvert x_1 \rvert$		
		DS	DM	DB
$\lvert x_3 \rvert$	DS	1.0	0.5	0.0
	DM	0.5	0.0	0.0
	DB	0.0	0.0	0.0

表 7: 制御パラメータ

入力項目	基本値	変動幅
x_1	2.3694	0.5278
x_2	3.5874	0.0578
x_3	1.9398	0.5298
x_4	1.4012	1.2148
x_5	0.3281	0.0000
X_6	0.0328	0.2690

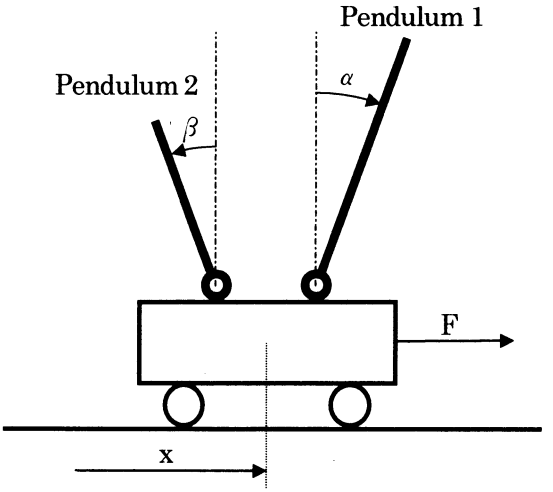


図 1: 並列型二重倒立振子システムの構成図

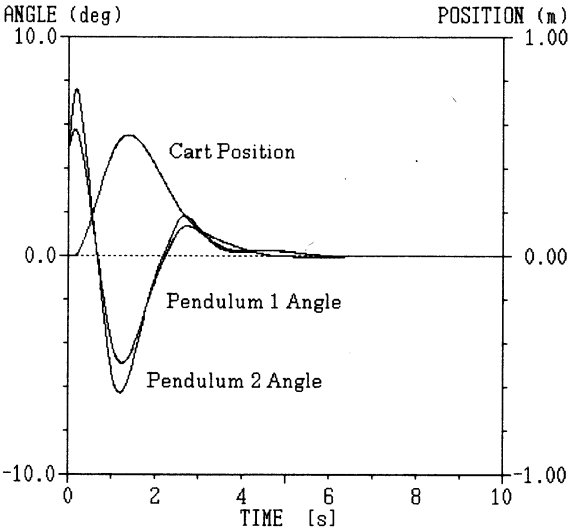


図 2: 初期角度 5.0 ° と 5.0 ° の場合の制御結果

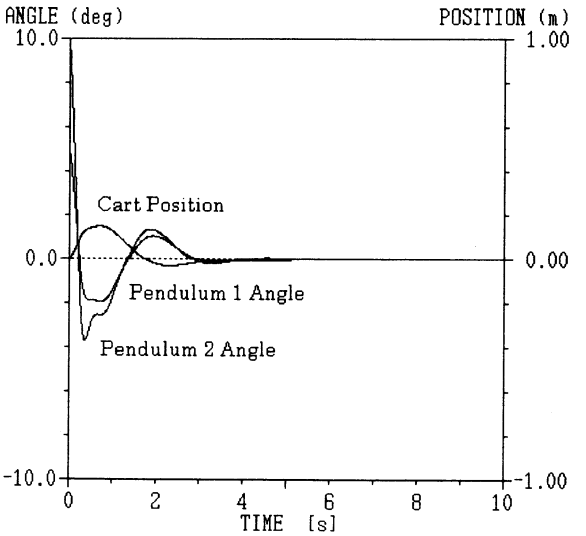


図 3: 初期角度 5.0 ° と 10.0 ° の場合の制御結果

WD3−3

直列型二重倒立振子システムの安定化ファジィ制御

Stabilization Fuzzy Control of Series-Type Double Inverted Pendulum System

○易　建強
Jianqiang YI
マイコム株式会社
Mycom, Inc.

湯場崎　直養
Naoyoshi YUBAZAKI
マイコム株式会社
Mycom, Inc.

廣田　薫
Kaoru HIROTA
東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

Abstract: A stabilization fuzzy controller for series-type double inverted pendulum system is presented based on the SIRMs (Single Input Rule Modules) dynamically connected fuzzy inference model. The controller handles six input items to cover the angular controls of the two pendulums and the position control of the cart. The method of determining each SIRM and each dynamic importance degree so that the angular control of the upper pendulum takes priority over the other two controls is discussed. The simulation results show that the fuzzy controller can stabilize the series-type double inverted pendulum system in 10 seconds.

1. はじめに

直列型二重倒立振子システムにおいては、二本の振子が軸受けなどによって連結され、その下の振子が台車の上に取り付けられている。安定化制御とは、台車を左右に移動させることによって、二本の振子を安定に倒立させるとともに台車をレールの原点に移動させることである。ムハマドら[2]は2段ファジィ推論方式で安定化制御を可能にしたが、安定化時間が40秒以上かかった。寺野ら[3,4]は、台車の位置制御を考慮せずに、両振子の角度制御のみを行った。

ここでは、SIRMs (Single Input Rule Modules、単一入力ルール群) 動的重視度結合型ファジィ推論モデル[5,6]を直列型二重倒立振子システムに適用し、6入力1出力の安定化ファジィ制御器を構築する。制御シミュレーションを通じて、本制御器が直列型二重倒立振子システムを10秒内に安定化できることを示す。

2. 安定化ファジィ制御器

図1に示すように直列型二重倒立振子システムにおいて、レール原点からの台車位置をxとして、原点の右側を正方向とする。下の振子1の鉛直線からの角度と上の振子2の鉛直線からの角度をそれぞれα、βとして、ともに時計回りを正方向とする。振子1に対する振子2の相対角度をγ (=β−α) とする。台車に加わる駆動力 (単位N) をFとして、台車をレールの右側へ押すときに正方向とする。

そこで、振子1に対する振子2の角度γとその角速度、振子1の角度αと角速度、台車の位置xと速度を正規化後にこの順に入力項目x_i (i=1,2,…,6) として、駆動力Fを正規化後に出力項目fとする。以下は、SIRMs 動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて安定化制御器を構築する。

まず、各入力項目のSIRMを設定する。

角度γまたはその角速度が正値の場合、例えば振子1が倒立していれば、正の駆動力を加えて台車を右方向に移動させると、振子1が逆時計回りに回転するので、その上の振子2は時計回りに回転し、角度γが大きくなってしまう。したがって、この場合、負の駆動力で台車を左方向に移動させることによって、振子1を時計回りに回転させ、振子2を逆時計回りに回転させる必要がある。

振子1の角度または角速度が正値の場合、例えば振子2が振子1と同じ直線上にあれば、正の駆動力を加えて台車を右方向に移動させると、振子1が倒立に向かって回転するが、振子2は時計回りに倒れていって、鉛直線からの角度がさらに増大してしまう。経験的に振子1と振子2が同じ方向に傾いて、しかも振子2の角度が大きければ、倒立が難しいことがわかる。したがって、この場合、負の駆動力で台車を左方向に動かして、振子1をさらに少し倒すが振子2を倒立方向に逆時計回りに回転させることが重要である。そして、角度γとその角速度の制御を行えば、角度γを小さくするとともに振子1の角度も小さくするので、両振子が倒立されていくことになる。

台車の位置または速度が正値の場合、例えば両振子がともに倒立していれば、負の駆動力で台車を左方向に移動することによって、振子1を時計回りに少し倒して、振子2をレールの原点側に向けて逆時計回りに

少し倒す。そして、振子1と振子2を倒立させることによって、台車の位置制御を果たす。

したがって、各入力項目のSIRMをすべて表1のように設定できる。ただし、各SIRMの後件部変数f_i (i=1,2,…,6) は、すべて本ファジィ制御器の出力項目fに対応する中間変数である。また、メンバーシップ関数NB、ZO、PBは、台集合上で等間隔に分布する台形、三角形、台形である。

表1に示すように、各SIRMはすべて同じ設定になっており、ともに駆動力を推論する。しかし、これらのSIRMの推論結果をそのまま加えるだけでは、安定化制御はできない。それは、直列型二重倒立振子システムの安定化制御において、台車と振子1および振子2の優先順位がそれぞれ異なるため、各入力項目の影響力を区別しなければならないことによる。直感的に分かるように、制御の優先順位として振子2が最も高く、台車が最も低い。この優先順位を明確に表すため、入力項目の影響力を意味する動的重視度を利用する。動的重視度の値が大きいほど、優先順位は高いことになる。各入力項目の動的重視度w_i^D (i=1,2,…,6) は、基本値w_i、変動幅B_iおよび変動量変数Δw_iによって式(1)で定義される。

$$w_i^D = w_i + B_i \cdot \Delta w_i \tag{1}$$

各変動量変数を次のようにファジィルールで推論する。角度γとその角速度に対応する動的重視度の変動量変数のファジィルールを、表2のように角度γに対応する入力項目x_1の絶対値を前件部変数として設定する。ただし、メンバーシップ関数DS、DM、DBは、三角形か台形で定義している。これにより、角度γの絶対値が大きいときには角度γとその角速度に対応する動的重視度を大きくして振子2の角度制御の影響力を強め、角度γの絶対値がほぼゼロのときには角度γとその角速度に対応する動的重視度を小さくして振子2の角度制御の影響力を弱めることができる。

角度γの絶対値が大きいときに振子2の角度制御を優先しなければならないので、振子1の角度と角速度に対応する動的重視度の変動量変数のファジィルールを、表3のように角度γに対応する入力項目x_1の絶対値と振子1の角度に対応する入力項目x_3の絶対値を前件部変数として設定できる。この設定によって、角度γの絶対値が大きくなければ、振子1の角度の絶対値が大きいときには振子1の両動的重視度を強め、振子1の角度の絶対値が小さいときには振子1の両動的重視度を弱めることが可能になる。

台車の位置制御を行うのに両振子がほぼ倒立になっていなければならないので、台車の位置と速度に対応する動的重視度の変動量変数について、表4のように角度γに対応する入力項目x_1の絶対値と振子1の角度に対応する入力項目x_3の絶対値を前件部変数とするファジィルールを与えることができる。これによって、両振子がほぼ倒立になっていれば台車の両動的重視度を強調し、両振子が倒立されていなければ台車の両動的重視度を抑制することができる。

次に、本安定化ファジィ制御器の最終出力fは、式(2)で各SIRMの推論値の動的重視度付き総和として求める。この出力に出力項目のスケーリングファクタを乗じれば、台車に加わる駆動力Fになる。

$$f = \sum_{i=1}^{6} f_i \cdot w_i^D \tag{2}$$

そして、制御パラメータである各動的重視度の基本値と変動幅を適切に決めるため、ここでは振子1の質量と全長が0.2kgと0.8m、振子2の質量と全長が0.1kgと0.4m、台車の質量が1.0kgである直列型二重倒立振子システムに対して、ランダム最適探索法[1]で各動的重視度の基本値と変動幅をチューニングする。各入力項目のスケーリングファクタを、それぞれ順に15.0°、100.0°/s、15.0°、100.0°/s、2.4m、1.0m/sに設定する。出力項目のスケーリングファクタを両振子と台車の総質量の10倍に設定する。また、サンプリング周期を0.01sとして、1回探索の制御時間を最大25.0sまでとする。振子2の初期角度を10.0°に設定する以外、ほかの状態変数の初期値をすべてゼロに設定する。さらに、各基本値と変動幅の初期値をすべてゼロに設定する。制御開始から終了までの各サンプリング時刻における各状態変数および駆動力のそれぞれの絶対値の総和が小さくなる方向に、ランダム最適探索を7,500回行う。表5に、ランダム最適探索で得られた各動的重視度の基本値と変動幅を示す。

表5から、角度γとその角速度に対応する入力項目x_1とx_2の基本値と変動幅は、それぞれほかの各入力項目の基本値と変動幅より大きくなっている。各入力項目x_1とx_2の基本値と変動幅の和は、ほかの各入力項目の基本値と変動幅の和よりかなり大きくなっている。また、振子1の角度と角速度に対応する入力項目x_3とx_4の基本値は、台車の位置と速度に対応する入力項目x_5とx_6の基本値より倍以上大きくなっている。各入力項目x_3とx_4の基本値と変動幅の和は、各入力項目x_5とx_6の基本値と変動幅の和より約倍以上大き

くなっている。

以上により、角度γの絶対値が大きい場合に、入力項目x_1とx_2の重視度が大きいため、振子2の角度制御が優先される。角度γの絶対値が小さいときに振子1の角度の絶対値が大きい場合には、式(2)における入力項目x_3とx_4の寄与が入力項目x_1とx_2の寄与を抑えるため、振子1の角度制御が主になる。また、角度γの絶対値と振子1の角度の絶対値がともに小さい場合には、式(2)における入力項目x_5とx_6の寄与が相対的に大きくなるため、台車の位置制御が行われる。そして、振子2の角度制御、振子1の角度制御、および台車の位置制御の切り替えは、角度γと振子1の角度の大きさに基づいて制御状況を判断して各動的重視度を自動調整することによってスムーズに行われる。

3. 安定化制御シミュレーション

本安定化ファジィ制御器の動作を検証するため、安定化制御シミュレーションを行う。図2に、振子1と振子2の初期角度をそれぞれ15.0°と10.0°、15.0°と15.0°、15.0°と20.0°に設定し、ほかの状態変数の初期値をすべてゼロに設定した場合の安定化制御結果を示している。

図2(a)では、制御開始時に振子1に対する振子2の角度γが振子1の角度と符号が異なるため、台車を右方向に移動し両振子の角度を合わせてから、両振子を倒立させながら台車をレール原点に戻している。図2(b)では、制御開始時に角度γがちょうど0.0°であるので、まず（図から読みとれないが）台車を左方向に0.01mほど移動することによって振子1をさらに少し倒して角度γの符号を振子1の角度の符号と反対にしてから、図2(a)と同様に安定化を行っている。図2(c)では、制御開始時に角度γの符号が振子1の角度の符号と同じであるので、まず台車を左方向に約0.05m動かすことによって振子1をさらに少し倒して角度γの符号を振子1の角度の符号と反対に変える。そして、角度γの絶対値が大きくなっているため、台車を右方向に大きく移動してしてから、同様に安定化を実現している。

なお、この三つの例において、制御開始からそれぞれ7.19s、8.46s、9.27s後に、各状態変数の値が0.1°、0.1°/s、0.1°、0.1°/s、0.01m、0.01m/s以内に収束している。また、最大駆動力はそれぞれ約8.0N、12.0N、25.0Nである。このように、三つの初期状態がランダム探索における初期状態と異なるにもかかわらず、この二重倒立振子システムはすべてスムーズに安定化されていることがわかる。

4. おわりに

SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルに基づいて二重倒立振子システムの安定化ファジィ制御器を提案したとともに、SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルが6入力項目を有する制御システムにも有効であることを明らかにした。SIRMと動的重視度によって、制御状況に応じて優先順位を自動的に切り替えながら、両振子の角度制御と台車の位置制御を並列的に行うことができることを述べた。制御シミュレーションを行い、直列型二重倒立振子システムを10秒内に安定化できることを示した。

参考文献

[1] N. Baba: A New Approach for Finding the Global Minimum of Error Function of Neural Networks, Neural Networks, Vol.2, pp.367-373(1989).

[2] ムハマド・ロムジ、高濱徹行、小高知宏、小倉久和：倒立二重振子系に対するファジィ制御知識の表現とスケーリングによる適応制御、日本ファジィ学会誌、Vol.8、No.3、pp.576-585(1996).

[3] 寺野寿郎、増井重弘、菅谷善昌：不安定制御系のファジィ制御、第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.139-144(1988).

[4] 寺野寿郎、村山雄二郎、増井重弘、田中一男：二重倒立振子のファジィ制御、第2回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.56-61(1986).

[5] 易建強、湯場崎直養、廣田薫：SIRMs動的重視度結合型ファジィ推論モデルによる倒立振子システムの安定化制御、日本ファジィ学会誌、Vol.11、No.3、pp.492-502(1999).

[6] 湯場崎直養、易建強、廣田薫：動的重視度を用いたSIRMsファジィ推論モデル、日本ファジィ学会誌、Vol.10、No.3、pp.522-531(1998).

[問い合わせ先]

〒616-8303 京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町12
マイコム株式会社技術研究所
易 建強 (Yi Jianqiang)

TEL: 075-882-3601
FAX: 075-882-6531
E-mail: yi@mycom-japan.co.jp

表1: 各入力項目の単一入力ルール群

前件部変数 x_i (i = 1,...,6)	後件部変数 f_i (i = 1,...,6)
NB	1.0
ZO	0.0
PB	-1.0

表2: 振子2の両変動量変数に関するファジィルール

前件部変数 $\lvert x_1 \rvert$	後件部変数 Δw_1 , Δw_2
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

表3: 振子1の両変動量変数に関するファジィルール

$\Delta w_3, \Delta w_4$		$\lvert x_1 \rvert$		
		DS	DM	DB
$\lvert x_3 \rvert$	DS	0.0	0.0	0.0
	DM	0.5	0.0	0.0
	DB	1.0	0.5	0.0

表4: 台車の両変動量変数に関するファジィルール

$\Delta w_5, \Delta w_6$		$\lvert x_1 \rvert$		
		DS	DM	DB
$\lvert x_3 \rvert$	DS	1.0	0.5	0.0
	DM	0.5	0.0	0.0
	DB	0.0	0.0	0.0

表5: 制御パラメータ

入力項目	基本値	変動幅
x_1	2.9277	1.9227
x_2	2.1918	1.0117
x_3	0.4186	0.2543
x_4	2.1629	0.0663
x_5	0.0590	0.2930
x_6	0.1711	0.1154

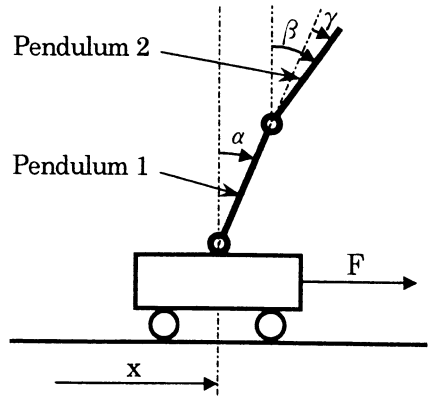
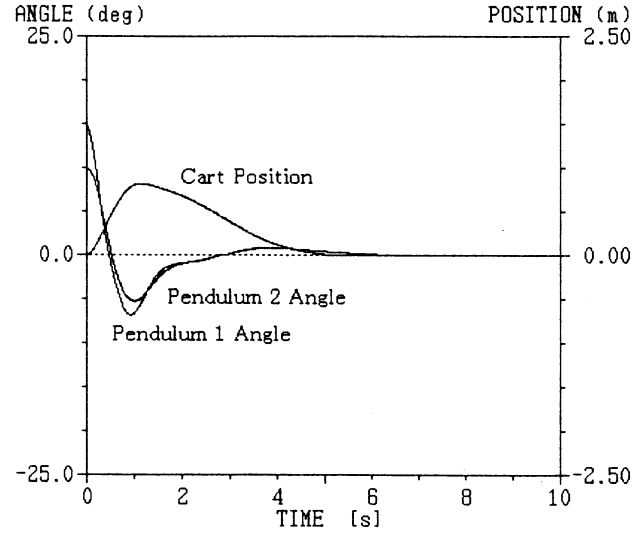
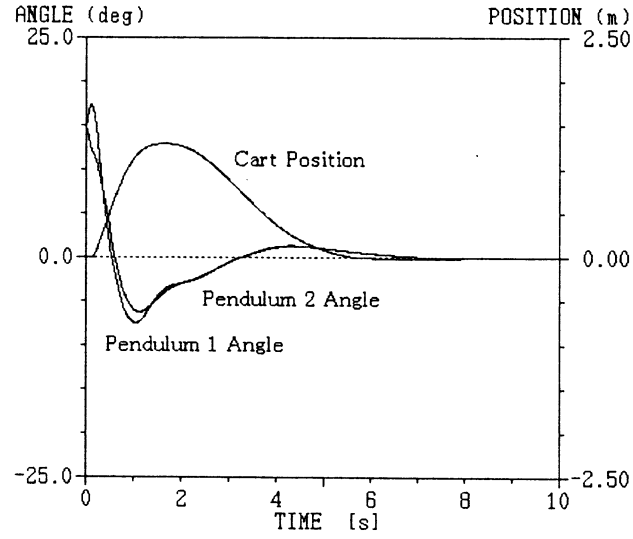


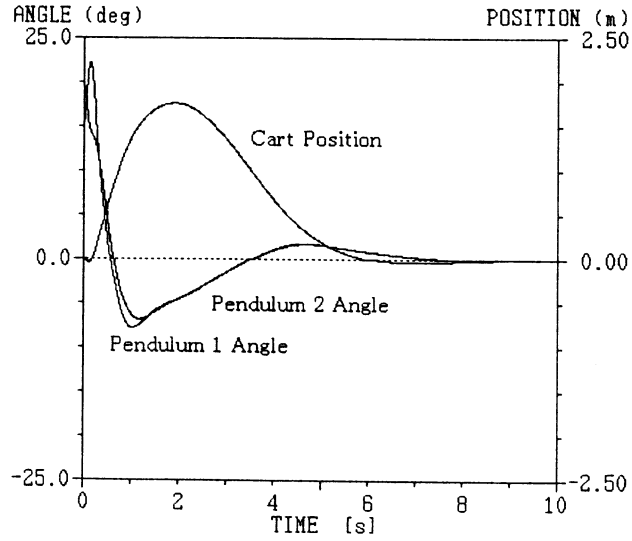
図1: 直列型二重倒立振子システムの構成図



(a) 初期角度 15.0°と 10.0°の場合



(b) 初期角度 15.0°と 15.0°の場合



(c) 初期角度 15.0°と 20.0°の場合

図2: 安定化制御例

WD4−1

リモート診断と制御におけるカオス通信

Chaotic Communication on Remote Diagnosis and Control

○樋口智尚，前田幹夫，村上周太
Tomohisa HIGUCHI, Mikio MAEDA, Shuta MURAKAMI
九州工業大学
Kyushu Institute of Technology

Abstract: It is necessary to secret code data set for the remote control when an object in the remote place is controlled. Encoding/Decoding is necessary to use a cryptogram. This paper explains the chaotic communication on remote diagnosis and control.

1. はじめに

物体の診断や制御を行う場合，ローカルで行うのに不都合が生じる場合がある．例えば工場施設の診断や制御（故障診断やバルブの開閉等）を行う場合，何らかの事故が発生するとローカル制御ができなくなってしまう．かといって，監視者がその施設につきっきりになるというのも，施設の数が少ないときにはまだしも数が多くなってくるとそれだけ監視者の数が必要になってしまい，人員や予算といったコストの問題が生じてしまう．また，移動物体を自律走行させようとする時，走行システムの電圧降下や搭載人員の容態の急変といった緊急事態が発生すると，自律走行では対処しきれない．そのような時，第三者による監視が可能であれば，緊急事態においてもローカル制御からリモート制御に切り替えることによって，その緊急事態に対処することができる．

すべての仕事をローカルで処理できれば理想的ではあるが，物体の故障といった例外的な事項に対してのローカル処理は（例えば，機械の自己修復など）難しい．また，ローカル処理のための装置が肥大すると，物理的にも限界に達してしまう可能性がある．

そのため，図1のように通常時にはローカルで自己的に処理を行い，緊急時にはリモートで監視者による直接処理可能なシステムを構築することによって全体を処理することができる．

また，遠隔施設の制御や物体をリモート操作（診断）する際，遠隔操作のためのルール作成や，制御信号などの通信を暗号化するといったことが必要になってくる．これらの点を構築することによって，遠隔の施設や物体をリモート制御することが可能となる．操作（診断）ルールにはファジィを用いるが，その際にローカルとリモートの間に統合を持たせる必要がある．また，ローカルとリモートとの間の通信を行う際，第三者による悪用を避けるためにも通信の暗号化が必要となってくる．この暗号化にはカオスを用いる．ここではカオス数列を乱数として用いることにより暗号化を行う．

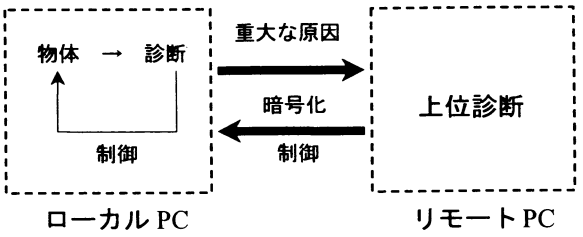


図1　リモート診断システム

本論文では，リモート診断システムにおいて必要となる暗号化について，画像等のデータを暗号化することを考える．

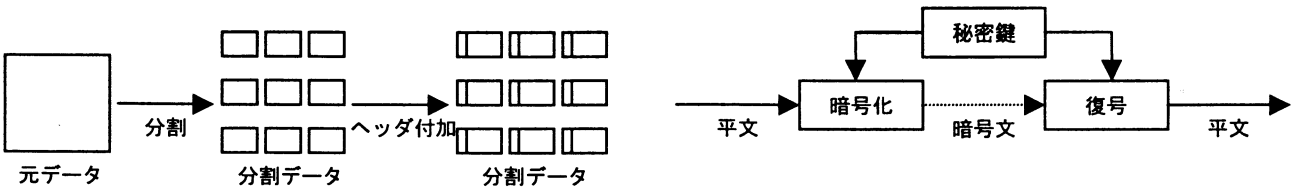
2. 暗号化の手法

暗号化の手法には大きく分けて，秘密鍵暗号方式と公開鍵暗号方式がある．また，データをブロックごとか数ビットごとか暗号化するブロック暗号とストリーム暗号とがある．本研究では秘密鍵暗号方式・ストリーム暗号とする．

暗号化・送信時の手順を次のように考える．

1．送信データ（ファイル）を分割
2．1の分割データごとにヘッダを付加
3．2をストリーム暗号として送信

受信時にはデータの受信後，ヘッダの除去・受信データ



(a) 送信データの作成　　(b) 暗号通信

図 2　暗号化の種類

の結合の順で処理を行う．これを図 2 に示す．

図 2 (a) のように元データを分割し，それぞれに情報ヘッダを付加する．情報ヘッダは識別子・各データの順序・エラー訂正コードで構成される．

データに順序番号を付加することにより，分割データの送信順番をランダムに送信することができる．受信時においては送信されてきたデータを参照し，欠落しているデータがあれば再送信の要求を行う．すべてのデータがそろったならばすべてのデータを結合して元データを復元する．

3. カオス通信

カオスを通信制御に応用するにあたり，本論文では次の 2 箇所にカオスを導入することを考える．

・ヘッダの順番
・暗号通信における暗号化・復号

まず，ヘッダの順番に付いて述べる．

ヘッダの順番とは，図 2 (a) で分割された元データを再結合する際に用いるものである．ここでは，データの順番を素数列で形成する．

表 1 は素数列をカオス数列に置き換えたものである．カオス数列を作成するにあたり，一般的なロジスティック関数を用いている．

$$X_{n+1} = aX_n(1-X_n) \quad (0 < a \leq 4)$$

表 1　カオス数列対応表

順番	カオス列
2	0.022171
3	0.086717
5	0.865733
7	0.995088
11	0.811982
:	:

各順番をカオス列に対応させ，逆に復号の際にはカオス列を取得することによって各順番を復元することができるようになる．

暗号通信における暗号化・復号においては，ストリーム暗号を用いる．その際乱数を生成する必要があるが，ここでは順列ヘッダ作成時と同様にカオス数列を用いる．このカオス数列を疑似乱数として暗号化・復号に際して用いる．

4. おわりに

本研究では，カオスを暗号通信の疑似乱数として用いる手法を提案した．ここで，暗号通信を作成するにあたり問題点として，暗号解読の容易性を考慮に入れなくてはならない．

カオスの特徴のひとつに初期値に強く依存するというものがある．ここでは，この初期値を決めるのに秘密鍵を用いている．初期値を第三者が発見するために，この秘密鍵を取得するという方法や受信データから類推するという方法が考えられる．そのため，本論文のようなロジスティック関数といった一般的なものではなく，類推され難い関数形を構築する必要がある．

参考文献

[1] 辻井　重男，笠原　正雄，暗号と情報セキュリティ，昭晃堂，1990.
[2] Pete Loshin，暗号化によるセキュリティ対策ガイド，翔泳社，1999.
[3] 合原　一幸，五百旗頭　正他，カオス応用システム，朝倉書店，1995.
[4] 合原　一幸編，カオス理論の基礎と応用，サイエンス社，1990.

[問い合わせ先]
〒804-8550
北九州市戸畑区仙水町 1 番 1 号
九州工業大学大学院工学研究科情報工学教室
前田幹夫
Tel: 093-884-3249
Fax: 093-871-5635
E-mail: mmaeda@sys1.comp.kyutech.ac.jp

WD4−2

インテリジェント車椅子ナビゲーションシステムの開発 ーファジィ制御ー

Development of Navigation System for an Intelligent Wheelchair - Fuzzy Navigation Control -

古金　裕美，前田　幹夫，村上　周太
Hiromi KOGANE，Mikio MAEDA，Shuta MURAKAMI

九州工業大学　工学部
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract : This paper deals with a fuzzy navigation system for an intelligent wheelchair. A navigation for an intelligent wheelchair is planing for a state of passage, and it can go to goal securely. That is, the navigation system leads a wheelchair to some goals. In this system, some paths from a present point to some sub-goals and a final goal are planed. The wheelchair passes through a best path by the navigation system using a fuzzy control.

1．はじめに

インテリジェント車椅子とは，各種センサーやカメラから得た情報をもとに周囲の環境を認識し，状況に応じた走行ができる自律型ナビゲーションシステムを搭載した車椅子である．

本稿では，インテリジェント車椅子ナビゲーションシステムの一機能としてファジィ走行制御を提案する．本稿におけるファジィ走行制御とは，センサやカメラによってリアルタイムで取り込まれた通路情報をもとに，操舵角を計算して制御するのではなく，あらかじめ与えられている通路情報や走行経路などをもとに目標軌道を生成して，軌道追従制御を行うものである．

2．ナビゲーションシステム

ナビゲーションシステムは，カメラによる画像入力部，ジャイロによる位置計測部，制御ルールからファジィ推論により操作量を求めて指令を出すファジィ制御部，制御対象の電動車椅子から構成される．

カメラによる画像入力部では，制御するための必要な情報（自己位置，障害物の有無）を取得し，ジャイロによる位置計測部では，車椅子の自己位置を計測する．そしてこれらの情報はもとに，ファジィ制御部では各状況に応じた操作量を，後述する制御アルゴリズムで求める．操舵角はA/Dコンバータを介して車椅子を制御する．カメラは，コンピュータ側へプリンタポートを通して直接画像データを送る．操作量の出力は，コンピュータ内の D/A コンバータを介して電圧として車椅子側のコントローラに送信される．今回は，これらの部分を計算機上でシミュレートする．

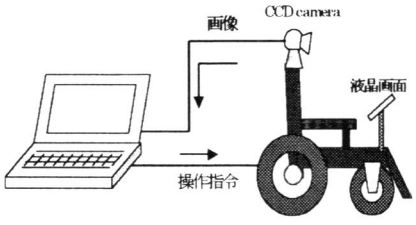


図1　ナビゲーションシステム構成

3．ファジィ走行制御

3．1　目標軌道生成

目標軌道追従制御をするためには，軌道生成が必要となる．目標軌道は3つの手順で生成される．軌道生成の前提として，通路情報（形状，幅）及び走行経路が与えられている．

軌道生成への第1段階として，目的地(グローバル目標)からのローカル目標設定を行う．ローカル目標とは，車椅子の行動単位（右折，左折，直進など）での目標である．例えば，車椅子が右折を行うのならばローカル目標は直進方向のコーナーの手前と右折方向のコーナーを通り越したところに設置される．ローカル目標の設定例を図 2 で示すと，車椅子はその直進方向のローカル目標lg1まで直進し，次に右折方向のローカル目標lg2を目指して右折を行う

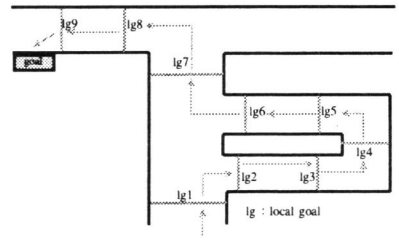


図2　ローカル目標

軌道生成の第2段階では，ローカル目標から複数のサブ目標を設定する．サブ目標は軌道生成するための制御点である．サブ目標位置決定には，行動や通路状況などを考慮したファジィルールを用いる．最後にサブ目標を制御点として，Spline曲線により軌道を生成する．

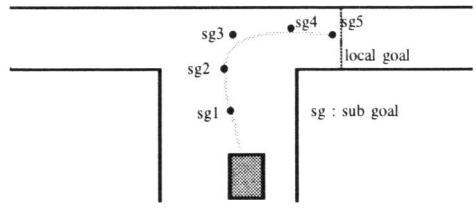


図3　サブ目標

3．2　障害物の回避

障害物がある場合，障害物の情報はカメラなどから与えられる．障害物の情報の内容は，障害物の幅，障害物の奥行き，障害物間までの距離，障害物の位置（左壁側，右壁側，中央，曲がり角）である．カメラが障害物を認識すると，障害物情報が与えられる．通行可能幅が 1.5m 以下であると安全に回避できないので，車椅子は停止するか，U ターンをしなければならない．障害物を回避するためのサブ目標の設置方法は直進，右左折のサブ目標設置方法を応用する．

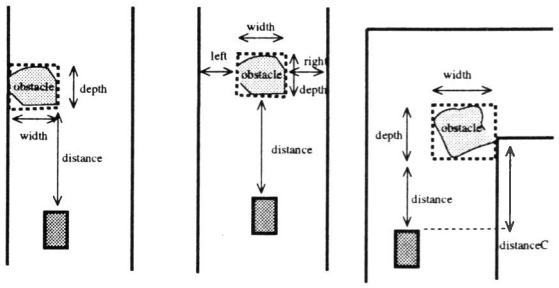


図４　障害物の回避

３．３　追従制御

車椅子は目標軌道を追従走行する．追従制御に必要な情報は，時刻 t における進行方向からの軌道の傾き $\theta tr(t)$，軌道と車椅子の進行方向の傾き $\theta(t)$ とその変化量 $\Delta\theta$，軌道と車椅子の距離 $d(t)$ である．これら３つの情報から，車椅子の操舵角 $\phi(t)$ を求める．角度 $\theta tr(t)$, $\theta(t)$, $\phi(t)$ は右回りを正，左回りを負とし，距離 $d(t)$ は軌道の右側を正，左側を負とする．

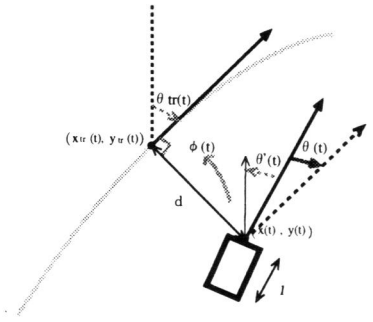


図５　目標軌道と車椅子

ある時刻 t における車椅子の位置 (x_t, y_t) 及び角度 θt は，時刻 t における操舵角を $\phi(t)$ として，

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \frac{v\times\Delta t}{l}tan[\Phi(t)] \quad (1)$$

$$x(t+1) = x(t) + v\times\Delta t\times sin[\theta(t)] \quad (2)$$

$$y(t+1) = y(t) + v\times\Delta t\times cos[\theta(t)] \quad (3)$$

となる．ただし，Δt はサンプリングタイム，l は車椅子の長さ，v は車椅子の速度である．時刻 t における制御器への入力情報（$\theta tr(t)$, $\theta(t)$, $d(t)$）を，図５の中の変数及び式(1),(2),(3)を使って表すと以下のようになる．

$$\theta(t) = \theta'(t) - \theta_{tr}(t) \quad (4)$$

$$d(t) = \sqrt{(x_{tr}(t)-x(t))^2+(y_{tr}(t)-y(t))^2} \quad (5)$$

追従制御では，この $\theta(t)$ 及び $d(t)$ を $\theta(t)\rightarrow 0$, $d(t)\rightarrow 0$ になるように，操舵角 $\phi(t)$ によって車椅子の軌道を追従制御する．

３．４　制御ルール

前節の車椅子の走行制御ルールを表 1 に示す．各メンバーシップ関数は図 6 ～図 9 に示す．表において，車椅子の軌道の傾きは θ，その変化量は $\Delta\theta$，軌道と車椅子の距離は d である．これら３つの入力から，制御ルールをファジィ推論（簡略法）することによって車椅子の操舵角 ϕ を求める．

表１　制御ルール表

θ \ $\Delta\theta$	d is P			d is M			d is N		
	P	M	N	P	M	N	P	M	N
P	PM	PS	ZE	NM	NB	NB	NB	NB	NB
M	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NM	NS
N	PB	PB	PB	PB	PB	PM	NM	NS	ZE

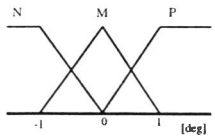


図６　前件部 θ

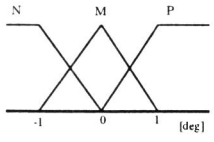


図７　前件部 $\Delta\theta$

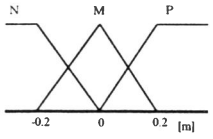


図８　前件部 d

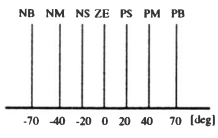


図９　後件部 ϕ

４．走行シミュレーション

図 10 のような施設内地図データが与えられたときの目標軌道設定結果を図 11 に示す．また，図 12 及び図 13 に通路幅が異なるときの右折走行のシミュレーション結果を示す．

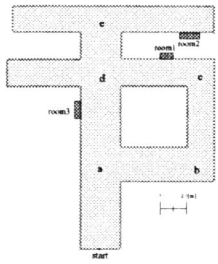


図 10　地図データ

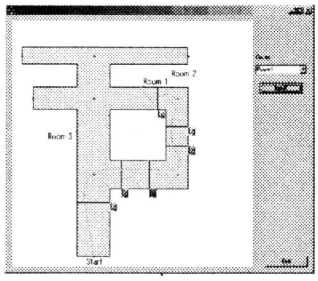


図 11　軌道設定結果

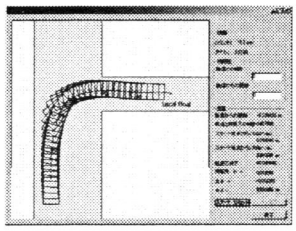


図 12　右折（１）

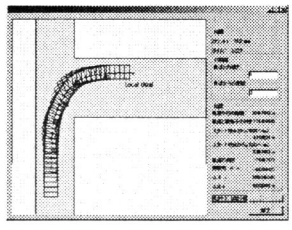


図 13　右折（２）

５．まとめ

本稿では，インテリジェント車椅子ナビゲーションシステムの一機能として目標軌道生成及び走行シミュレーションを行った．実際走行では車椅子の自己位置が既知であることが前提である．今後の課題として，動く物体（障害物）への対処，実際の走行を視野に入れた更なるルールの改良，例外処理，自己位置推定の精度の向上などが挙げられる．

６．参考文献

[1]　村上周太：ファジィシステム演習問題，工業調査会（1992）
[2]　菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，(1990)
[3]　前田幹夫，島川学，村上周太：自立移動ロボットの予見ファジィ制御，日本機械学会論文集（C編），No.91-1503，(1995)

［問い合わせ先］
〒 804-8550
福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1
九州工業大学工学部電気工学科情報工学教室
前田幹夫
Tel：093-884-3249，Fax:093-871-5635
E-mail:mmaeda@comp.kyutech.ac.jp

WD4−3

離散時間の適応ファジィ制御系の一設計法
A Design of Discrete-Time Adaptive Fuzzy Control System

韓 虎剛
Hugang Han

広島県立大学
Hiroshima Prefectural University

村上 周太
Shuta Murakami

九州工業大学
Kyushu Institute of Technology

Abstract

The goal of this paper is to design a discrete-time adaptive fuzzy control system. The adaptive laws to adjust parameters in the system will be developed based on Lyapunov synthesis approach. It is shown the proposed fuzzy adaptive controller guarantees tracking error, between outputs of considered system and desired values, to be asymptotically in decay.

1 Introduction

Recently, some researches have been focused on use of the Lyapunov synthesis approach to construct stable adaptive fuzzy control system [1, 2, 3, 4]. The basic idea is that, to deal with the lack of control system, the fuzzy model would be considered as approximation model to approximating the unknown linear or nonlinear functions in the plant, and the fuzzy model is expressed as a series of fuzzy basis function (FBF) expansion. Ultimately, instead of the unknown functions, the fuzzy models are utilized directly to construct the control inputs based on the Lyapunov synthesis approach.
However, as well-known, the designed fuzzy control systems are actually performed by discrete-time system because where the computers are the manipulators in practical applications, so there has existed a gap between the design and real control system. Moreover, with the increasing applications of advanced computer technologies, it is much more meaningful to implement control system for nonlinear discrete-time systems. So far, however, as the literatures listed in the ending of this paper, all of the adaptive fuzzy control systems have been designed only for a continue-time system except using the so-called T-S type fuzzy model[5].

In this paper, we introduce a stable control algorithm in an effort to deal with discrete-time adaptive fuzzy control system. Herein, the control scheme considered here is the integration of fuzzy control component, in which the FBF expansion can be consider as an universal approximator, and variable structure control component. It is shown the proposed fuzzy adaptive controller guarantees tracking error, between outputs of considered system and desired values, to be asymptotically in decay.

2 System Description

We are interested in the single-input/single-output nonlinear discrete-time system

$$x(k+1)+f\left(x(k-n+1),x(k-n+2),\cdots,x(k)\right)=bu(k) \tag{1}$$

where k is current time, x is the output, and u is the input in the system. $f(\cdot)$ is nonlinear function with n being system order. It is assumed that the order n is known but the nonlinear function $f(\cdot)$ is unknown. It should be noted that more general classes of nonlinear systems could be transformed into this structure[12]. The control objective is to force the state vector $X(k) = [x_1(k), x_2(k), \ldots, x_n(k)]^T = [x(k-n+1), x(k-n+2), \ldots, x(k)]^T$ to follow a specified desired trajectory, $X_d(k) = [x_d(k-n+1), x_d(k-n+2), \ldots, x_d(k)]^T$. Defining the traking error vector, $\tilde{X}(k) = X(k) - X_d(k)$, the problem is thus to design a control $u(k)$ which ensures that $\tilde{X}(k) \to 0$, as $k \to \infty$. For simplicity in this initial discussion, we take $b = 1$ in the subsequent development.

In the following section, it will be shown that using fuzzy IF-THEN rules, the unknown function $f(X)$ can be approximated by a parameterized fuzzy approximator. The parameters in this parameterized fuzzy approximator can then be stably tuned to provide effective tracking control architecture.

3 Fuzzy Approximator

Let input space $X \in R^n$ be a compact product space. Assume that there are N rules in the rule base and

each of which has the following form:

$$R_j : IF\ x_1(k)\ is\ A_j^1\ and\ x_2(k)\ is\ A_j^2\ and$$

$$\ldots\ and\ x_n(k)\ is\ A_j^n,\ THEN\ z(k)\ is\ B_j$$

where $j = 1, 2, \ldots, N, x_i(k)(i = 1, 2, \ldots, n)$ are the input variables to the fuzzy system at current time k, $z(k)$ is the output variable of the fuzzy system at current time k, and A_j^i and B_j are linguistic terms characterised by fuzzy membership functions $\mu_{A_j^i}(x)$ and $\mu_{B_j}(z)$, respectively.
As in [6], we consider a subset of the fuzzy systems with *singleton fuzzifier, product inference*, and *Gaussian membership function.* Hence, such a fuzzy system can be written as

$$h(X) = \frac{\sum_{j=1}^{N} \omega_j(k) \left(\prod_{i=1}^{n} \mu_{A_j^i}(x_i(k)) \right)}{\sum_{j=1}^{N} \prod_{i=1}^{n} \mu_{A_j^i}(x_i(k))} \quad (2)$$

where h: $U \subset R^n \rightarrow R$, $\omega_j(k)$ is the point in R at which $\mu_{B_j}(\omega_j(k)) = 1$, named as the connection weight; $\mu_{A_j^i}(x_i(k))$ is the *Gaussian membership function*, defined by

$$\mu_{A_j^i}(x_i(k)) = \exp\left[-\left(\frac{x(k) - \xi_j^i(k)}{\sigma_j^i(k)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

where $\sigma_j^i(k)$ and $\xi_j^i(k)$ are real-valued parameters, in which $\xi_j^i(k)$ indicates the position and $\sigma_j^i(k)$ indicates the variance of the membership function. Here, if we take $\frac{\prod_{i=1}^{n} \mu_{A_j^i}(x_i(k))}{\sum_{j=1}^{N} \prod_{i=1}^{n} \mu_{A_j^i}(x_i(k))}$ in (2) as basis functions and $\omega_j(k)$ as coefficients, $h(X)$, then, can be viewed as a linear combination of the basis functions. Therefore, we give a definition regarding the basis function as follows.

Definition 1 *Define fuzzy basis functions (FBF) as*

$$g_j(X) = \prod_{i=1}^{n} \mu_{A_j^i}(x_i(k)), \quad j = 1, 2, \ldots, N \quad (4)$$

where $\mu_{A_j^i}(x_i(k))$ is the Gaussian membership functions defined in (3).

Then, the fuzzy system (2) is equivalent to a FBF expansion

$$h(X) = \sum_{j=1}^{N} \omega_j(k) \cdot g_j(X) \triangleq W^T(k) \cdot G(X(k)) \quad (5)$$

where, $W(k) = [\omega_1(k), \omega_2(k), \cdots, \omega_N(k)]^T$, $G(X(k)) = [g_1(X(k)), g_2(X(k)), \cdots, g_N(X(k))]^T$, and notation $\triangleq$ means a definition. For convenience, throughout this paper, the notation $(\cdot)$ is sometimes omitted when no confusion is likely to arise. For example we will express $G(X(k))$ as $G(k)$ with k being current time.
We now show an important property of FBF expansion[2].

Theorem 1 *For any given real continuous function f on the compact set $U \in R^n$ and arbitrary ε, there exists optimal FBF expansion $h^*(X(k)) = W^*(k) \cdot G(X(k))$ such that*

$$\sup_{X \in U} |f(X(k)) - h^*(X(k))| < \varepsilon \quad (6)$$

This theorem states that the FBF expansion (5) is universal approximator on a compact set. Herein, we use terms *fuzzy universal approximator* or *fuzzy approximator* to refer to the FBF expansion. Since the fuzzy universal approximator is characterized by parameter vectors W, the optimal h^* does contains an optimal vector W^*.

We should note that though the Theorem 1 shown that the fuzzy approximator could approximate a real continuous function with an arbitrariness ε as in (6), however, since the practical fuzzy system consists of only a finite number of IF-THEN rules, the ability of fuzzy approximator (5) will be defined. Nevertheless, the fuzzy approximator does has a capability to approximate a real continuous function under a finite number of rules, even though the accuracy is not arbitrariness.

4 Adaptive Fuzzy Control System

As apparently, since functions $f(X(k))$ in (1)is not known, we heve to approximate it to achieve the control objective. Here the fuzzy approximator described in the previous section is used. Let us denote $f^*(X(k)) = W_f^{*T} G_f(k)$ to be the optimal fuzzy approximator of the unknown function $f(X(k))$. However, we have no idea to know the optimal parameter vector W_f^* in the optimal fuzzy approximator, generally the estimate, denoted $\hat{f}(X(k)) = \hat{W}_f^T G_f(k)$, is adopted instead of the optimal fuzzy approximator $f^*(X(k)) = W_f^{*T} G_f(k)$. Regarding the estimation of parameter vector $\hat{W}_f(k)$ and the optimal fuzzy approximator $f^*(X(k))$, we make following assumptions.

Assumption 1 *The optimal fuzzy approximator error, $d_f(k) = f^*(X(k)) - f(X(k))$, satisfies the following inequality, where ε_f^* is a known small positive value.*

$$\sup_{X \in U} |d_f(k)| < \varepsilon_f^* \quad (7)$$

Assumption 2 *In defined subspaces $\mathcal{C}_w \ni W_f^*$ and $\mathcal{C}_\varepsilon \ni \varepsilon_f^*$, there are some positive constants c_w and c_ε,*

that satisfy the following inequalities.

$$\|\hat{W}_f(k) - W_f^*\|_2 \leq c_w, \qquad \forall \hat{W}_f(k) \in \mathcal{C}_w \tag{8}$$

$$|\hat{\varepsilon}_f(k) - \varepsilon_f^*| \leq c_\varepsilon, \qquad \forall \hat{\varepsilon}_f(k) \in \mathcal{C}_\varepsilon \tag{9}$$

where $\hat{\varepsilon}_f(k)$ is the estimate of ε_f^* as well as $\hat{W}_f(k)$.

We are now ready to develop the control law to achieve the control objective. An error metric is firstly defined as

$$s(k) = (q^{-1} + \lambda)^{n-1}\tilde{x}(k) \quad \text{with } \lambda > 0 \tag{10}$$

where q^{-1} is the delay operator, and λ defines the bandwidth of the error dynamics of the system. The error metric above can be rewritten as $s(k) = \Lambda^T \tilde{X}(k)$ with $\Lambda^T = [\lambda^{n-1}, (n-1)\lambda^{n-2}, \cdots, 1]$. The equation $s(k) = 0$ defines a time-varying hyperplane in R^n on which the tracking error vector $\tilde{X}(k)$ decays exponentially to zero, so that perfect tracking can be asymptotically obtained by maintaining this condition [7]. In this case the control objective becomes the design of controller to force $s(k) = 0$. An increment $\Delta s(k+1)$ can be written as

$$\begin{aligned} \Delta s(k+1) &= s(k+1) - s(k) \\ &= \Lambda_1 \tilde{X}(k) + \lambda^{n-1}\tilde{x}(k+1) \end{aligned} \tag{11}$$

where $\Lambda_1^T = [(n-1)\lambda^{n-2} - \lambda^{n-1}, \cdots, 1-(n-1)\lambda, -1]$. Substituting $\tilde{x}(k+1) = x(k+1) - x_d(x+1)$ and (1) yields,

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\lambda^{n-1}}\Delta s(k+1) \\ &= u(k) - f - x_d(k+1) + \frac{1}{\lambda^{n-1}}\Lambda_1^T \tilde{X}(k) \end{aligned} \tag{12}$$

Now, our adaptive control laws are suggested as below.

$$u(k) = u_{fd}(k) + u_{fu}(k) + u_{vu}(k) \tag{13}$$

where $u_{fd}(k)$, expressed by,

$$u_{fd}(k) = x_d(k+1) - \frac{1}{\lambda^{n-1}}\Lambda_1^T \tilde{X}(k) \tag{14}$$

is a feedback component with linear combination of tacking error. And $u_{fu}(k)$, expressed by

$$\begin{aligned} u_{fu}(k) &= \hat{f}(X(k)) - \hat{\varepsilon}_f(k)sgn(s(k)) \\ &= \hat{W}_f^T(k) \cdot G(k) - \hat{\varepsilon}_f(k)sgn(s(k)) \end{aligned} \tag{15}$$

is adaptive component of control law which will attempt to recover or cancel the unknown functions $f(\cdot)$. The adaptive component is synthesized by

$$\hat{W}_f(k) = \wp\left\{\hat{W}_f(k-1) - \Gamma_f G_f(k) s(k)\right\} \tag{16}$$

$$\hat{\varepsilon}_f(k) = \wp\left\{\hat{\varepsilon}_f(k-1) + \gamma_f |s(k)|\right\} \tag{17}$$

where $\hat{W}_f$ and $\hat{\varepsilon}_f$ are the estimates of W_f^* and ε_f^*, respectively; $\Gamma_f \in R^{N\times N}$ and $\gamma_f > 0$ determine the rates of adaptation in which Γ_f is a symmetric positive define matrices; $\wp$ represents the projection operator necessary to ensure that $\hat{W}_f(k) \in \mathcal{C}_w$, and $\hat{\varepsilon}_f(k) \in \mathcal{C}_\varepsilon$ for $\forall k$ [8].

It should note that the term $\hat{\varepsilon}_f(k)sgn(s(k))$ in (15) actually reflects the component for compensation of the approximating error $(\hat{f}(X(k)) - f(X(k)))$. If the fuzzy approximator provide good description of the unknown function $f(X(k))$, then the term $\hat{\varepsilon}_f(k)$ should be small as well as the optimal fuzzy approximator error $d_f(k)$. Conversely, if the fuzzy approximator is poor, $\hat{\varepsilon}_f(k)$ will rise automatically to the necessary level, ensuring the stability of the overall system.

$u_{vu}(k)$ is the variable structure control component that is expressed by

$$u_{vu}(k) = \beta_{f1} c_w \|G_f(k)\| + \beta_{f2} c_\varepsilon \tag{18}$$

where $\beta_{f\cdot}$ are some so-called the switching type coefficients [9], which are determined as follows.

$$\beta_{f1} = \begin{cases} \ell, & \text{for } c_w\|G_f(k)\|s(k) < -\rho_{f1} \\ 0, & \text{for } c_w\|\|G_f(k)\|s(k)| \leq \rho_{f1} \\ -\ell, & \text{for } c_w\|G_f(k)\|s(k) > \rho_{f1} \end{cases} \tag{19}$$

$$\beta_{f2} = \begin{cases} \ell, & \text{for } c_\varepsilon s(k) < -\rho_{f2} \\ 0, & \text{for } c_\varepsilon|s(k)| \leq \rho_{f2} \\ -\ell, & \text{for } c_\varepsilon s(k) > \rho_{f2} \end{cases} \tag{20}$$

with

$$\rho_{f1} = \frac{\lambda^{n-1}(\ell+1)^2 c_w}{2\ell}\|G_f(k)\|A(k) \tag{21}$$

$$\rho_{f2} = \frac{\lambda^{n-1}(\ell+1)^2 c_\varepsilon}{2\ell}A(k) \tag{22}$$

$$A(k) = c_w\|G_f(k)\| + c_\varepsilon \tag{23}$$

where $\ell > 0$ is constant for all time.

Clearly, the variable structure control component only works outside of the sector $\Omega(k)$[10] defined by

$$\Omega(k) = \Omega_{f1}(k) \cup \Omega_{f2}(k) \tag{24}$$

with

$$\Omega_{f1}(k) = \{s(k)|\ \|\|G_f(k)\|s(k)|\, c_w \leq \rho_{f1}\} \tag{25}$$

$$\Omega_{f2}(k) = \{s(k)|\ |s(k)|c_\varepsilon \leq \rho_{f2}\} \tag{26}$$

Remarks:

1. As contrasted with the continuous-time adaptive fuzzy control system[4], the term of variable structure control component $u_{vu}(k)$ corresponds to the sliding component $u_{su}(t)$. In [4], via a modulate $m(t)$ the $u_{su}(t)$ only works on the specified region A_d^C where the fuzzy approximator could not effectively approximate the unknown function in a sense. Similarly, here $u_{vu}(k)$ only works outside of the sector $\Omega(k)$ which is defined on the tracking error metric $s(k)$ via the switching type coefficients (19~20).

2. Compared with the other adaptive schemes given in [10] [11], there is an important difference. In [10] [11], the convergence of tracking error metric deponds on a assumption like $\sup_j \tilde{\omega}_j(k) \leq d$, where d is a known constant, which may not be easy to check, because it could not ensure that $\hat{\omega}_j$ is bounded. On the other hand, in our scheme, by using a projection algorithm we can easily realize $\hat{W}(k) \in \mathcal{C}_w$ so that $||\tilde{W}(k)|| < c_\omega$. This will enhance the flexibility of the system.

3. To help with comprehending the projection algorithm in (16-17), Let us consider of a case of scale (17). A circle with radius r exists on the assumption that is the defined subspace $\mathcal{C}_\varepsilon$. Let $\hat{\varepsilon}_{np}(k)$ is parameter estimate before projection, i.e., $\hat{\varepsilon}_f(k) = \wp\{\hat{\varepsilon}_{np}(k)\}$. Thus,

$$\hat{\varepsilon}_{np}(k) - \hat{\varepsilon}_f(k-1) = \gamma_f |s(k)| \qquad (27)$$

It is evident that $\hat{\varepsilon}_{np}(k) > \hat{\varepsilon}_f(k)$ and $\hat{\varepsilon}_{np}(k) > \hat{\varepsilon}_f^*$ if $\hat{\varepsilon}_{np}(k)$ occurs outside of the circle, and $\hat{\varepsilon}_{np}(k) = \hat{\varepsilon}_f(k)$ if $\hat{\varepsilon}_{np}(k)$ occurs inside of the circle. Finally, it follows the following inequality.

$$\tilde{\varepsilon}_f(k)\tilde{\varepsilon}_{np}(k) \geq \tilde{\varepsilon}_f(k)^2 \qquad (28)$$

where $\tilde{\varepsilon}_{np}(k) = \varepsilon_f^* - \hat{\varepsilon}_{np}(k)$. The relation like above is important for us in the process of stability analysis of the system.

The stability of the closed-loop system described by (1) and (13-26) is established in the following theorem.

Theorem 2 *If the plant (1) is controlled by (13)-(15), (18-23), and the adaptive components are synthesized by (16-17), then the tracking error metric of the system will stably enter the sector defined by (24-26). When the system tracking error metric is driven inside the sector, $|s(k+1)|$ is usually in a small magnitude such that it can be assumed that $|s(k+1)| \leq (k_d - 1)^{1/2}|s(k)|$ with a small positive value k_d. Then, $\tilde{X}(k) \to 0$ as $k \to \infty$ and the all signals are bounded.*

5 Conclusion

In this paper, we proposed a design for a class of discrete-time adaptive fuzzy control system and the parameters in FBF expansion could be stably tuned. The developed controller guarantees the global stability of the resulting closed-loop system in the sense that all signals involved are uniformly bounded and tracking error would be asymptotically in decay.
Here in this paper because of the matter of space, we just provided an algorithm to show how to designed a discrete-time fuzzy control system, and the detailed stability analysis will be appeared another opportunity.

References

[1] L.-X. Wang, "Stable adaptive fuzzy control of nonlinear system," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 1, pp. 146-155, 1993.

[2] C.-Y. Su and Y. Stepanenko, "Adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems,* vol. 2, pp. 258-294, 1994.

[3] Y.-G. Piao, H.-G. Zhang and Z. Bien, "Design of fuzzy direct controller and stability analysis for a class of nonlinear system," *Proceedings of the ACC,* pp. 2274-2275, USA, 1998.

[4] H. Han, C.-Y. Su and S. Murakami, "Further results on adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic," *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and System,* vol. 11, no. 5, pp. 501-509, 1999.

[5] S.-J. Wu and C.-T. Lin, "Global stability analysis of discrete time-invariant optimal fuzzy control systems," *International Journal of Fuzzy Systems,* vol. 1, no. 1, pp. 60-68, 1999.

[6] L.-X. Wang and J. M. Mendel, "Back-propagation fuzzy system as nonlinear dynamic system identifiers," *Proc. of IEEE Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 1409-1418, San Diego, 1992.

[7] J.-J. Slotine and J. A. Coetsee, "Adaptive sliding controller synthesis for nonlinear systems," *Int. J Control,* vol. 43, pp. 1631-1651, 1986.

[8] Changyun Wen, "A robust adaptive controller with minimal modification for discrete time-varying systems," *IEEE Trans. on Auto. Control,* vol. 39, no.5, pp. 987-991, 1994.

[9] C. Y. Chen, "Servo-systems with discrete-variable structure control" *Systems & Control Letters,* no. 17, pp. 321-325 1991.

[10] Katsuhisa Furuta, "VSS type self-tuning control," *IEEE Trans. on Industrial Electronics,* vol. 40, no. 1, pp. 37-44, 1993.

[11] F. Sun, Z. Sun, and P.-Y. Woo, "Stable neural-network-based adaptive control for sampled-data nonlinear systems," *IEEE Trans. on Neural Networks,* vol. 9, no. 5, pp. 956-968, 1998.

[12] S. Sastry and M. Bodson, *Adaptive Control,* Prentice Hall, 1989.

[問合せ先]
〒 727-0023 広島県庄原市七塚町562号
広島県立大学 経営情報学科
韓 虎剛
Tel.: (08247)4-1706 Fax: (08247)4-0191
Email: kan@bus.hiroshima-pu.ac.jp

WD5−1

ファジィスイッチング制御の提案とラジコンホバークラフトへの応用

Switching Fuzzy Control and Its Application to a Hovercraft Type Vehicle

岩崎　正明，田中　一男

Masaaki Iwasaki and Kazuo Tanaka

電気通信大学

The University of Electro-Communications

Abstract This paper describes stable switching fuzzy control and its application to a hovercraft type vehicle (HTV). A switching fuzzy system is employed to represent the nonlinear dynamics of the HTV that is a typical second-order nonholonomic system. A switching fuzzy controller is constructed by mirroring the structure of the switching fuzzy system. LMI stability conditions to design the switching fuzzy controller are presented. The design technique is applied to trajectory control of the HTV. The simulation and experimental results for the trajectory control show the validity of the switching fuzzy model and controller design.

1　はじめに

最近，ファジィモデルに基づく非線形制御 [1] に関する理論および応用の研究が盛んに行われている．一方，非ホロノミックな拘束を持つシステムの制御は難しい制御問題であるが，最近いくつかの制御手法 [2]-[6] が提案されている．しかし，それらの多くは車両型移動体 [4],[6] に代表されるような1階の非ホロノミック系についての研究であり，浮遊移動体に代表されるような2階の非ホロノミック系については，ほとんど研究されていない [5]．2階の非ホロノミック系は1階の非ホロノミック系と比べ，より難しい制御問題であり，1階の非ホロノミック系に対して考案されてきた方法をそのまま適用することが困難である．本研究では2階の非ホロノミックな拘束を持つ浮遊移動体（R/C ホバークラフト）の制御手法を提案する．本手法ではスイッチングファジィモデルを提案し，これに基づくスイッチングファジィ制御 [8]-[10] を行う．特に，本制御対象では，高木・菅野のファジィモデルに基づく制御手法が適用できないことを示す．シミュレーションと実験を通して本制御手法の有効性を示す．

2　ホバークラフトの運動方程式

図1は実験に用いた R/C ホバークラフトである．図2にホバークラフトの座標系を示す．ここで，

θ：　モデルの姿勢を示す角度
l：　重心とファンとの距離
M：　モデル質量
ϕ：　重心とファンとのなす角度
I：　モデルの $X-Y$ 平面上の慣性モーメント
f_R, f_L：　左右のファンの発生推力

である．制御目的は x 軸に沿わせることであり，$y(t) \to 0$, $\theta(t) \to 0$ のレギュレータ問題である．本論文で用いるホバークラフトのモデルは図2に示すような2次元水平面座標で表わされ，運動方程式は次の3式で表現される．

$$\ddot{x} = \frac{\cos\theta}{M} f_1 \tag{1}$$

$$\ddot{y} = \frac{\sin\theta}{M} f_1 \tag{2}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{l\sin\phi}{I} f_2 \tag{3}$$

ここで，$f_1 = f_R + f_L$，$f_2 = f_R - f_L$ である．
(1)，(2) 式より，本対象は

$$\ddot{y} = \tan\theta\, \ddot{x} \tag{4}$$

という2階の非ホロノミックな拘束を持つことが分かる．(1)-(3) 式の平衡点（原点）で線形化したモデルは不可制御となり，線形化モデルによる制御器設計は困難である．

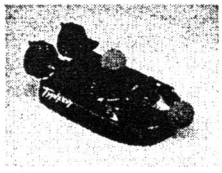


図 1: R/C ホバークラフト

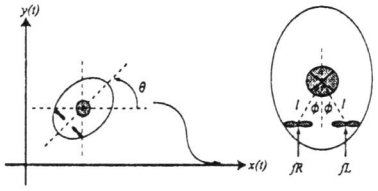


図 2: ホバークラフト座標系

3　スイッチングファジィ制御

この制御問題を解くためにスイッチングファジィモデルを提案し，このモデルに基づくスイッチングファジィ制御を実現する [8]-[10]．図3に提案する設計アルゴリズムを示す．

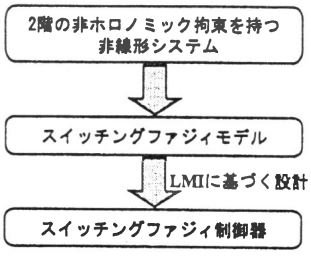


図 3: 設計アルゴリズム

3.1 ファジィモデル

従来の sector nonlinearity の考え方 [1] から (2), (3) 式は次のファジィモデルで表現できる.

Plant Rule 1 : If $\theta(t)$ *is* "$v_1(\theta(t))$"
then $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}(t)$
Plant Rule 2 : If $\theta(t)$ *is* "$v_2(\theta(t))$"
then $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u}(t)$

ここで,

$$\boldsymbol{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{y}(t) \\ y(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix}, \boldsymbol{u}(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{A}_1 = \boldsymbol{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{l\sin\phi}{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{l\sin\phi}{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$v_1(\theta(t)) = \dfrac{1-\sin\theta(t)}{2}$, $v_2(\theta(t)) = \dfrac{1+\sin\theta(t)}{2}$

である. このモデルは (5) 式のように表現できる.

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \sum_{i=1}^{2} v_i(\theta(t))\{\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{u}(t)\}. \qquad (5)$$

このファジィモデルにおける $(\boldsymbol{A}_i, \boldsymbol{B}_i)$ は可制御である. しかし, $\boldsymbol{B}_i$ 行列の (1, 1) 要素を b_{11i} としたとき, $b_{111} = \frac{1}{M}$, $b_{112} = -\frac{1}{M}$ となり, $\theta(t) = 0$ で $\sum_{i=1}^{2} v_i(\theta(t))b_{11i} = 0$ となるために LMI 安定条件の解が得られなかった. これは平衡点 (原点) で線形化したモデルが不可制御となることと基本的に同じ現象である. ホバークラフトのモデルでは, 従来のファジィモデルから安定なファジィ制御器を設計するのは困難であるといえる. そこで, 3.2 ではこの問題を解決するためにスイッチングファジィモデル [8]-[10] を提案する.

3.2 スイッチングファジィモデル

スイッチングファジィモデルは Region Rule の領域がクリスプに分けられ, 各 Region Rule (local なエリア) が高木・菅野ファジィモデルで表現されているものである.

ホバークラフトのスイッチングファジィモデルでは, $\theta(t)$ の領域で 3 つに分割した [9], [10]. (2), (3) 式のダイナミクスは厳密に次のスイッチングファジィモデルで置き換えることができる.

Region Rule 1 : If $\theta(t) \geq d$
then
Local Plant Rule 1 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{11}(\theta(t))$"
then $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}_{11}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_{11}\boldsymbol{u}(t)$
Local Plant Rule 2 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{12}(\theta(t))$"
then $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}_{12}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_{12}\boldsymbol{u}(t)$
Region Rule 2 : If $-d < \theta(t)$ *and* $\theta(t) < d$
then
Local Plant Rule 1 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{21}(\theta(t))$"
then $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}_{21}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_{21}u_2(t)$
Local Plant Rule 2 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{22}(\theta(t))$"
then $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}_{22}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_{22}u_2(t)$
Region Rule 3 : If $\theta(t) \leq -d$
then
Local Plant Rule 1 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{31}(\theta(t))$"
then $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}_{31}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_{31}\boldsymbol{u}(t)$
Local Plant Rule 2 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{32}(\theta(t))$"
then $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}_{32}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_{32}\boldsymbol{u}(t)$

ここで,

$$\boldsymbol{A}_{1i} = \boldsymbol{A}_{3i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2,$$

$$\boldsymbol{A}_{2i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{C}{M}a_{2i} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2$$

$$\boldsymbol{B}_{ki} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M}a_{ki} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{l\sin\phi}{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2\ ,\ k = 1, 3,$$

$$\boldsymbol{B}_{2i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{l\sin\phi}{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2\ ,\ k = 1, 3.$$

$u_2(t) = f_2(t)$.
$a_{11} = 1$, $a_{12} = \sin(179.427°) \simeq 0.01$,
$a_{21} = 1$, $a_{22} = \dfrac{\sin(d)}{d}$,
$a_{31} = -1$, $a_{32} = \sin(-179.427°) \simeq -0.01$
このモデルは (6) 式のように表現される.

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{2} v_k(\theta(t))h_{ki}(\theta(t))\{\boldsymbol{A}_{ki}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_{ki}\boldsymbol{u}(t)\}, \qquad (6)$$

ここで,

$$v_1(\theta(t)) = \begin{cases} 1 & \theta(t) \geq d \\ 0 & o.w. \end{cases}$$

$$v_2(\theta(t)) = \begin{cases} 1 & -d < \theta(t) < d \\ 0 & o.w. \end{cases}$$

$$v_3(\theta(t)) = \begin{cases} 1 & \theta(t) \leq -d \\ 0 & o.w. \end{cases}$$

である.

Region 2 において $f_1(t) = C$ (C=定数) の操作量を仮定しモデル化を行っている. これは, 原点近傍での線形化システムの不可制御を回避していることに相当する. 詳細については [8]-[10] に述べられている.

3.3 スイッチングファジィ制御器と安定条件

3.2 で示したスイッチングファジィモデルに対して次のようなスイッチングファジィ制御器を設計する. これは Parallel distributed compensation(PDC)[1] を拡張したスイッチング PDC と考えることができる. 制御器設計は $\boldsymbol{F}_{ij}$ を決定することである.

Regin Rule 1 :If $\theta(t) \geq d$

then

Local Control Rule 1 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{11}(\theta(t))$" then $\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{F}_{11}\boldsymbol{x}(t)$

Local Control Rule 2 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{12}(\theta(t))$" then $\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{F}_{12}\boldsymbol{x}(t)$

Regin Rule 2 : If $-d < \theta(t)$ *and* $\theta(t) < d$

then

Local Control Rule 1 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{21}(\theta(t))$" then $u_2(t) = -\boldsymbol{F}_{21}\boldsymbol{x}(t)$

Local Control Rule 2 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{22}(\theta(t))$" then $u_2(t) = -\boldsymbol{F}_{22}\boldsymbol{x}(t)$

Regin Rule 3 : If $\theta(t) \leq -d$

then

Local Control Rule 1 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{31}(\theta(t))$" then $\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{F}_{31}\boldsymbol{x}(t)$

Local Control Rule 2 : If $\theta(t)$ *is* "$h_{32}(\theta(t))$" then $\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{F}_{32}\boldsymbol{x}(t)$

このスイッチングファジィ制御器は (7) 式のように表現できる.

$$\boldsymbol{u}(t) = -\sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{2} v_k(\theta(t))h_{ki}(\theta(t))\boldsymbol{F}_{ki}\boldsymbol{x}(t), \qquad (7)$$

次に, スイッチングファジィモデルとスイッチングファジィ制御器からなる制御系の安定性を保証する条件を導く.

定理 1 (10),(11) 式を満たす正定対称行列 $\boldsymbol{X} > 0$ および行列 $\boldsymbol{M}_{ki}(i = 1, \ldots, r)$ が存在すれば制御系は大域的漸近安定である.

$$\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{ki}^T + \boldsymbol{A}_{ki}\boldsymbol{X} - \boldsymbol{M}_{ki}^T\boldsymbol{B}_{ki}^T - \boldsymbol{B}_{ki}\boldsymbol{M}_{ki} < 0, \quad \forall i,\ k \qquad (8)$$

$$\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{ki}^T + \boldsymbol{A}_{ki}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{kj}^T + \boldsymbol{A}_{kj}\boldsymbol{X} - \boldsymbol{M}_{kj}^T\boldsymbol{B}_{ki}^T - \boldsymbol{M}_{ki}^T\boldsymbol{B}_{kj}^T - \boldsymbol{B}_{ki}\boldsymbol{M}_{kj} - \boldsymbol{B}_{kj}\boldsymbol{M}_{ki} < 0 \quad \forall k,\ i < j\ \ s.t.\ \ h_i(\boldsymbol{z}(t))h_j(\boldsymbol{z}(t)) \neq 0 \qquad (9)$$

この LMI 条件の解 $\boldsymbol{X} > 0$ および $\boldsymbol{M}_{ki}$ よりフィードバックゲインを $\boldsymbol{F}_{ki} = \boldsymbol{M}_{ki}\boldsymbol{X}^{-1}$ で求められる.

[証明] リアプノフ関数の候補

$$V(\boldsymbol{x}(t)) = \boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}(t), \quad \boldsymbol{P} > 0$$

の微分を考える,

$$\begin{aligned}
\dot{V}(\boldsymbol{x}(t)) &= \dot{\boldsymbol{x}}^T(t)\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}\dot{\boldsymbol{x}}(t) \\
&= \sum_{k=1}^{s}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} v_k(\boldsymbol{z}(t))h_{ki}(\boldsymbol{z}(t))h_{kj}(\boldsymbol{z}(t))\boldsymbol{x}^T(t) \\
&\quad \times\{(\boldsymbol{A}_{ki} - \boldsymbol{B}_{ki}\boldsymbol{F}_{kj}) + (\boldsymbol{A}_{ki} - \boldsymbol{B}_{ki}\boldsymbol{F}_{kj})\}\boldsymbol{x}(t) \\
&= \sum_{k=1}^{s}\sum_{i=1}^{r} v_k(\boldsymbol{z}(t))h_{ki}^2(\boldsymbol{z}(t))\boldsymbol{x}^T(t) \\
&\qquad \times\left\{\boldsymbol{G}_{kii}^T\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{G}_{kii}\right\}\boldsymbol{x}(t) \\
&\quad + \sum_{k=1}^{s}\sum_{i=1}^{r}\sum_{i<j} 2v_k(\boldsymbol{z}(t))h_{ki}(\boldsymbol{z}(t))h_{kj}(\boldsymbol{z}(t)) \\
&\quad \times\boldsymbol{x}^T(t)\left\{\left(\frac{\boldsymbol{G}_{kij} + \boldsymbol{G}_{kji}}{2}\right)^T\boldsymbol{P} \right. \\
&\qquad \left. + \boldsymbol{P}\left(\frac{\boldsymbol{G}_{kij} + \boldsymbol{G}_{kji}}{2}\right)\right\}\boldsymbol{x}(t)
\end{aligned}$$

ここで, 前件部変数として一般的な $\boldsymbol{z}(t)$ を考えたが, ホバークラフトでは $\boldsymbol{z}(t) = \theta(t)$ である. 上式より, 次の安定条件が得られる.

$$\boldsymbol{G}_{kii}^T\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{G}_{kii} < 0\ , \quad \forall i, k$$

$$\left(\frac{\boldsymbol{G}_{kij} + \boldsymbol{G}_{kji}}{2}\right)^T\boldsymbol{P} + \left(\frac{\boldsymbol{G}_{kij} + \boldsymbol{G}_{kji}}{2}\right) \leq 0,\ i < j \leq r,\ \forall k$$

この 2 式の左右から $\boldsymbol{P}^{-1}$ を掛け, $\boldsymbol{X} = \boldsymbol{P}^{-1}$ とすると条件は次のようになる.

$$\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{ki}^T + \boldsymbol{A}_{ki}\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}\boldsymbol{F}_{ki}^T\boldsymbol{B}_{ki}^T - \boldsymbol{B}_{ki}\boldsymbol{F}_{ki}\boldsymbol{X} < 0, \quad \forall i,\ k$$

$$\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{ki}^T + \boldsymbol{A}_{ki}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{kj}^T + \boldsymbol{A}_{kj}\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}\boldsymbol{F}_{kj}^T\boldsymbol{B}_{ki}^T - \boldsymbol{X}\boldsymbol{F}_{ki}^T\boldsymbol{B}_{kj}^T - \boldsymbol{B}_{ki}\boldsymbol{F}_{kj}\boldsymbol{X} - \boldsymbol{B}_{kj}\boldsymbol{F}_{ki}\boldsymbol{X} < 0 \quad \forall k,\ i < j\ \ s.t.\ \ h_i(\boldsymbol{z}(t))h_j(\boldsymbol{z}(t)) \neq 0$$

さらに, ここで $\boldsymbol{M}_{ki} = \boldsymbol{F}_{ki}\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{X} > 0$ とすれば, $\boldsymbol{F}_{ki} = \boldsymbol{M}_{ki}\boldsymbol{X}^{-1}$ となり, 条件は次のように書き換えられる.

$$\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{ki}^T + \boldsymbol{A}_{ki}\boldsymbol{X} - \boldsymbol{M}_{ki}^T\boldsymbol{B}_{ki}^T - \boldsymbol{B}_{ki}\boldsymbol{M}_{ki} < 0, \quad \forall i,\ k \qquad (10)$$

$$\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{ki}^T + \boldsymbol{A}_{ki}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_{kj}^T + \boldsymbol{A}_{kj}\boldsymbol{X} - \boldsymbol{M}_{kj}^T\boldsymbol{B}_{ki}^T - \boldsymbol{M}_{ki}^T\boldsymbol{B}_{kj}^T - \boldsymbol{B}_{ki}\boldsymbol{M}_{kj} - \boldsymbol{B}_{kj}\boldsymbol{M}_{ki} < 0 \quad \forall k,\ i < j\ \ s.t.\ \ h_i(\boldsymbol{z}(t))h_j(\boldsymbol{z}(t)) \neq 0 \qquad (11)$$

(Q.E.D.)

3.4 入力値制限

通常の (高木・菅野) ファジィモデルに対して導出した入力値制限の LMI 条件 [7] をスイッチングファジィモデルに対する条件に拡張することを試みる.

(12) 式の入力 $\boldsymbol{u}(t) \in R^m$ を考える. ここで, $\boldsymbol{E}_k = [\,0 \cdots \overset{k}{1} \cdots 0\,]$ である.

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{u}_k(t) &= \boldsymbol{E}_k\boldsymbol{u}(t) \\
&= -\boldsymbol{E}_k\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{r} v_i(\theta(t))h_{ji}(\theta(t))\boldsymbol{F}_{ji}\boldsymbol{x}(t)
\end{aligned} \qquad (12)$$

(12) 式の入力に対する入力値制限の LMI 条件は定理 2 のように導出することができる.

定理 2 状態ベクトルの初期値 $\boldsymbol{x}(0)$ が既知であるとする. このとき, 以下の LMI の条件が成り立つならば, すべての時刻 $t \geq 0$ で $\|\boldsymbol{u}_k(t)\|_2 \leq \mu_k$ $(k = 1, 2, \cdots, m)$ を満足する.

$$\begin{bmatrix} 1 & \boldsymbol{x}^T(0) \\ \boldsymbol{x}(0) & \boldsymbol{X} \end{bmatrix} \geq 0$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{X} & \boldsymbol{M}_i^T\boldsymbol{E}_k \\ \boldsymbol{E}_k\boldsymbol{M}_i & \mu_k^2 I \end{bmatrix} \geq 0 \quad \forall i,\ k$$

ここで, $\boldsymbol{X} = \boldsymbol{P}^{-1}$, $\boldsymbol{M}_i = \boldsymbol{F}_i\boldsymbol{X}$ である.

[証明] 文献 [7], [1] の証明と同様の手法で証明可能.

4 シミュレーションおよび実験結果

図 4 に実験システムの概要を示す．2 台のカメラから得られる画像情報よりホバークラフトの位置・姿勢角を求める．定理 1 と定理 2 の LMI 条件を満たすフィードバックゲイン F_{ij} を求め，実験を行った．定理 1，2 が LMI 条件であることから F_{ij} の決定は可解問題となる．実験でのパラメータは $M = 1$，$l = 0.17$，$\phi = \frac{21\pi}{180}(= 21^\circ)$，$I = 0.02$ である．また，$C = 0.01$，$d = \frac{\pi}{20}$ である．

シミュレーションおよび実験結果を図 5，6 に示す．実験の連続写真を図 7 に示す．これらの図よりホバークラフトが直線軌道に追従し安定化されているのがわかる．今回は CCD カメラの視野の範囲が限られているため，多くの初期値からの実験を行うことができなかった．今後はこの点を改良する予定である．

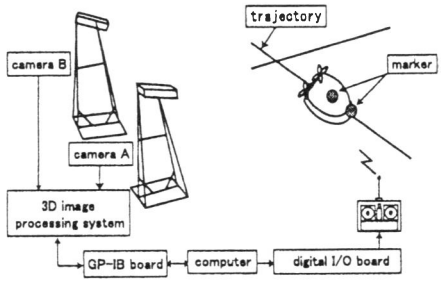


図 4: 実験システム

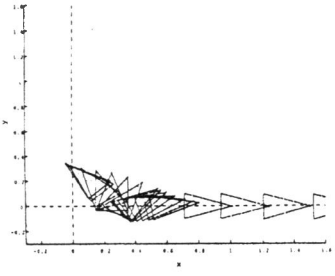


図 5: シミュレーション

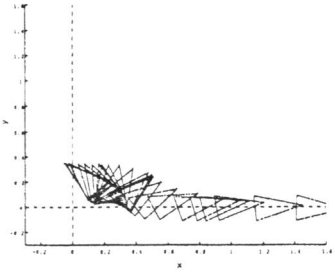


図 6: 実験結果

5 まとめ

本論文では，2 階の非ホロノミックな拘束を持つシステム（ホバークラフト）の制御問題を解くのに，スイッチングファジィモデルを提案し，このモデルに基づくスイッチングファジィ制御により，ホバークラフトの軌道追従制御を実現した．また，シミュレーションと実験により制御手法の有効性を示した．本研究の一部は高度自動化技術振興財団の助成により行われた．

参考文献

[1] K. Tanaka and H. O. Wang: "Fuzzy Control Systems Analysis and Design: A Linear Matrix Inequality Approach", John Wiley & Sons Publisher, New York (2000).

[2] 林・大須・小野；ACV の軌道制御について，日本航空宇宙学会誌,vol.43, No.494,pp.153-160(1995).

[3] 林・大須・小野；ACV の軌道制御実験，日本航空宇宙学会誌,vol.44, No.514,pp.629-636(1996).

[4] 三平；非ホロノミック系のフィードバック制御，計測と制御，Vol.36, No.6, pp.396-403, 1997.

[5] 荒井；2 階の非ホロノミック系の制御，計測と制御，Vol.36, No.6, pp.404-410, 1997.

[6] SICE 若手セミナー ー非線形制御系における制御系設計入門ー テキスト，計測制御学会. 5.10, 1999.

[7] K.Tanaka, T.Ikeda and H.O.Wang, "Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers: Relaxed Stability Conditions and LMI based Designs", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol.6, No.2, pp.250-265, May (1998).

[8] K. Tanaka , M. Iwasaki and H. O. Wang, "Stabilization of Switching Fuzzy Systems", Asian Fuzzy System Symposium (2000) (to appear).

[9] K. Tanaka , M. Iwasaki and H. O. Wang, "Stability and Smoothness Conditions for Switching Fuzzy Systems", 2000 American Control Conference (2000) (to appear).

[10] K. Tanaka , M. Iwasaki and H. O. Wang, Stable Switching Fuzzy Control and Its Application to a Hovercraft Type Vehicle, FUZZ-IEEE 2000 (2000) (to appear).

問い合わせ先

〒 182-8585　東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 知能機械工学科
田中研究室 岩崎正明
Tel: 0424-43-5431
E-mail: masaaki@yama.mce.uec.ac.jp

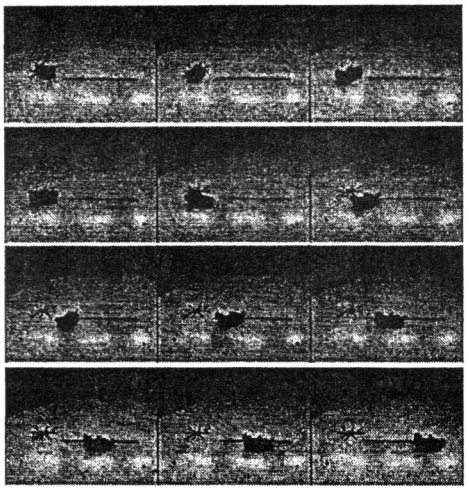


図 7: 連続写真

WD5−2

一般化ファジィシステムによるモデルリダクションとロバストコントローラ設計

Model Reduction and Robust Controller Design for Generalized T-S Fuzzy Systems via LMIs.

谷口 唯成　　田中 一男　　山藤 和男

Tadanari Taniguchi　Kazuo Tanaka　Kazuo Yamafuji

電気通信大学　知能機械工学科

Dept. of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications

Abstract This paper presents model reduction and robust control using a generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems. We first define a generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems. Conditions to reduce the number of rules are represented in terms of LMIs. The main idea is to find a structure of if-then rules of the reduced model that agrees well with dynamics of the original model. Furthermore, we estimate the lower bound of the norm of model uncertainty of the Takagi-Sugeno fuzzy system that can cover the reduction error. Finally, an example of model reduction and robust control for a nonlinear system is illustrated.

1　はじめに

最近，ファジィモデルに基づく非線形制御手法 [13] の適用が行われている．この手法では非線形制御対象を T-S ファジィモデルに置換え並列分散的補償 [6]-[8] の概念を用いてファジィ制御器を設計する．非線形制御対象をファジィモデルに置換える手法は入出力データを用いてファジィモデルの同定 [1]-[4] を行う手法と Sector Nonlinearity によって if-then ルールを構成する手法がある．後者は非アファイン型の T-S ファジィモデルに置換える作業を要するが，任意の非線形システムを任意の精度で近似できることが証明されている [9]，[10]．

本稿では"Sector Nonlinearity" 型の T-S ファジィモデルを一般化した一般化ファジィモデルを提案する．この一般化ファジィモデルの特徴はルール数減少に適した形式を有することである．T-S ファジィモデルに対するモデルリダクションとして 2 通りの方法が考えられる．一つは後件部の線形状態方程式の次数を減らす方法，もう一つはルール数を減らす方法である．ファジィ制御では後者の方法がより興味深くかつ難しい問題であるので，本稿で述べるモデルリダクションはルールリダクションを意味する．

モデルリダクションを行うことで真のシステムとのリダクション誤差が生じる．そこで本稿では，モデルリダクションによる誤差をモデルの不確かさに変換し，モデルの不確かさを最大限に補償するファジィ制御器を設計する．最後にモデルリダクションと設計例を示す．本手法の詳細については文献 [16]-[18] に示されている．

2　一般化ファジィモデル

次のような非線形システムを考える．

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^{n} f_{ij}(\boldsymbol{z}(t))x_j(t) + \sum_{k=1}^{m} g_{ik}(\boldsymbol{z}(t))u_k(t), \quad i = 1, \cdots, n \tag{1}$$

ここで n と m は状態数と入力数，$x_1(t)\cdots x_n(t)$ は状態変数，$u_1(t)\cdots u_m(t)$ は入力変数である．$f_{ij}(\boldsymbol{z}(t))$ と $g_{ik}(\boldsymbol{z}(t))$ は $\boldsymbol{z}(t)$ の関数で $\boldsymbol{z}(t) = [z_1(t)\cdots z_n(t)]$ は状態変数，外部変数，または時間などの既知変数である．まず，$f_{ij}(\boldsymbol{z}(t))$ と $g_{ik}(\boldsymbol{z}(t))$ の最大・最小値を算出する．

$$a_{ij1} = \max_{\boldsymbol{z}(t)} \{f_{ij}(\boldsymbol{z}(t))\}, \quad a_{ij2} = \min_{\boldsymbol{z}(t)} \{f_{ij}(\boldsymbol{z}(t))\},$$
$$b_{ik1} = \max_{\boldsymbol{z}(t)} \{g_{ik}(\boldsymbol{z}(t))\}, \quad b_{ik2} = \min_{\boldsymbol{z}(t)} \{g_{ik}(\boldsymbol{z}(t))\}.$$

次に非線形項 f_{ij} と g_{ik} を " Sector nonlinearity " [13] の考え方で次のように変換する．

$$f_{ij}(\boldsymbol{z}(t)) = \sum_{\ell=1}^{2} h_{ij\ell}(\boldsymbol{z}(t))a_{ij\ell}, \; g_{ik}(\boldsymbol{z}(t)) = \sum_{\ell=1}^{2} v_{ik\ell}(\boldsymbol{z}(t))b_{ik\ell},$$

ここで，$\sum_{\ell=1}^{2} h_{ij\ell}(\boldsymbol{z}(t)) = 1$，$\sum_{\ell=1}^{2} v_{ik\ell}(\boldsymbol{z}(t)) = 1$．このメンバーシップ関数の詳細は文献 [16]-[18] に示されている．この結果より，一般化 T-S ファジィモデルを次のように構成する．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{\ell=1}^{2} h_{ij\ell}(\boldsymbol{z}(t))\boldsymbol{A}_{ij\ell}\boldsymbol{x}(t) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\sum_{\ell=1}^{2} v_{ik\ell}(\boldsymbol{z}(t))\boldsymbol{B}_{ik\ell}\boldsymbol{u}(t), \tag{2}$$

ここで，$\boldsymbol{A}_{ij\ell} = a_{ij\ell}\boldsymbol{E}^A_{ij}$，$\boldsymbol{B}_{ik\ell} = b_{ik\ell}\boldsymbol{E}^B_{ik}$ である．

行列 $\boldsymbol{E}$ の詳細については付録 A に示す．$a_{ij\ell}$ と $b_{ik\ell}$ はモデルリダクションの LMI 変数になる．次章では (2) 式がルール数減少に適した構造であることを示す．

3　LMIによるモデルリダクション

この章では LMI 条件によるモデルリダクションを示す．モデルリダクションの目的は if-then ルールのルール数を減らすことである．if-then ルールに対するルールリダクションはオリジナルモデルとリダクション後のモデルの出力誤差を最小化するように行う．

まず，$\boldsymbol{x}(t)$, $\boldsymbol{u}(t)$,$\boldsymbol{z}(t)$ に対し，乱数を用いてデータセット ($\boldsymbol{x}[\delta]$,$\boldsymbol{u}[\delta]$, $\boldsymbol{z}[\delta]$) を発生させる．ここで $\delta = 1, 2, \cdots, T$ である．このデータセットをリダクション後のモデルとオリジナルモデルに代入して，リダクション誤差 $\boldsymbol{e}[\delta] = \boldsymbol{y}_d[\delta] - \boldsymbol{y}_a[\delta]$ を計算する．ここで，$\boldsymbol{y}_d[\delta]$ はオリジナルモデルの出力，$\boldsymbol{y}_a[\delta]$ はリダクション後のモデル出力に対して $\boldsymbol{A}_{ij\ell}$ の (i_0, j_0) の要素を除去したもの，または $\boldsymbol{B}_{ik\ell}$ の (i_0, k_0) の要素を除去した

ものである．本稿では紙面の都合上，$f_{ij}(\boldsymbol{z}(t))$ に関するリダクションのみ示すが，$g_{ik}(\boldsymbol{z}(t))$ に関して同様の考え方で行うことができる．

$$\boldsymbol{y}_d[\delta] = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{\ell=1}^{2} h_{ij\ell}(\boldsymbol{z}[\delta])\boldsymbol{A}_{ij\ell}\boldsymbol{x}[\delta] + \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\sum_{\ell=1}^{2} v_{ik\ell}(\boldsymbol{z}[\delta])\boldsymbol{B}_{ik\ell}\boldsymbol{u}[\delta]. \quad \delta = 1,\cdots,T \quad (3)$$

$$\boldsymbol{y}_a[\delta] = \boldsymbol{\xi}^A[\delta] + a_{i_0j_0}\boldsymbol{E}^A_{i_0j_0}\boldsymbol{x}[\delta], \qquad \delta = 1,\cdots,T \quad (4)$$

ここで，$\boldsymbol{\xi}^A[\delta] = \sum_{\substack{i=1\ j=1\ \ell=1\\(i,j)\neq(i_0,j_0)}}^{n\ n\ 2} h_{ij\ell}(\boldsymbol{z}[\delta])\boldsymbol{a}_{ij\ell}\boldsymbol{E}^A_{ij}\boldsymbol{x}[\delta] + \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{\ell=1}^{2} v_{ik\ell}(\boldsymbol{z}[\delta])\boldsymbol{b}_{ik\ell}\boldsymbol{E}^B_{ik}\boldsymbol{u}[\delta],$

である．第一項の $\sum$ の意味は付録 B に示す．(4) 式は $\boldsymbol{A}_{ij\ell}$ 行列から，(i_0, j_0) の要素を取り除いたものである．$a_{i_0j_0}$ はモデルリダクションにおける LMI 変数である．f_{ij} に対してモデルリダクションを行うことは非線形項 $f_{ij}(\boldsymbol{z}(t))$ を線形項 $a_{i_0j_0}$ に置換えることを意味し，$a_{i_0j_0}$ が LMI 変数になる．

リダクション誤差を最小化する条件として $\|e[\delta]\|_2 < \beta$ を考える．この条件は次式と等価である．

$$\boldsymbol{e}^T[\delta]\,\boldsymbol{e}[\delta] < \beta^2, \quad (5)$$

ここで，$\beta > 0$，$\boldsymbol{e}[\delta] = \boldsymbol{y}_d[\delta] - \boldsymbol{y}_a[\delta]$ から，(5) 式は次のように表現できる．

$$(\boldsymbol{y}_d[\delta] - \boldsymbol{y}_a[\delta])^T(\boldsymbol{y}_d[\delta] - \boldsymbol{y}_a[\delta]) < \beta^2. \quad \delta = 1,\cdots,T \quad (6)$$

さらに，(6) 式は次式と等価である．

$$\boldsymbol{L}[\delta] = \begin{bmatrix} \alpha & * \\ \boldsymbol{y}_d[\delta] - \boldsymbol{\xi}^A[\delta] - a_{i_0j_0}\boldsymbol{E}^A_{i_0j_0}\boldsymbol{x}[\delta] & 1 \end{bmatrix} > \boldsymbol{0}. \quad (7)$$

ここで，$\alpha = \beta^2$ である．(7) 式は対称行列であり，$*$ は対称の位置にある要素行列の転置行列を表している．(7) 式から，モデルリダクションの LMI 条件は次のように導出できる．

Theorem 1 以下の最小化問題を解くことにより，モデルリダクションによる誤差のノルムの上限値を得ることができる．

$$\underset{a_{i_0j_0}\ or\ b_{i_0k_0}}{minimize}\ \alpha \quad \text{subject to} \quad block\text{-}diag\left[\ \mathbf{L}[1]\ \ \mathbf{L}[2]\cdots\mathbf{L}[T]\ \right] > \boldsymbol{0}. \quad (8)$$

リダクション後のモデルは次のようになる．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \left(\sum_{\substack{i=1\ j=1\ \ell=1\\(i,j)\neq(i_0,j_0)}}^{n\ n\ 2} h_{ij\ell}(\boldsymbol{z}(t))\boldsymbol{A}_{ij\ell} + a_{i_0j_0}\boldsymbol{E}^A_{i_0j_0}\right)\boldsymbol{x}(t) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\sum_{\ell=1}^{2} v_{ik\ell}(\boldsymbol{z}(t))\boldsymbol{B}_{ik\ell}\boldsymbol{u}(t),$$

次に一般化ファジィモデル (2) 式と通常のファジィモデルとの関係について述べる．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \sum_{i_a=1}^{n}\sum_{j_a=1}^{n}\sum_{\ell_a=1}^{2} h_{i_aj_a\ell_a}(\boldsymbol{z}(t))\boldsymbol{A}_{i_aj_a\ell_a}\boldsymbol{x}(t) + \sum_{i_b=1}^{n}\sum_{j_b=1}^{m}\sum_{\ell_b=1}^{2} v_{i_bj_b\ell_b}(\boldsymbol{z}(t))\boldsymbol{B}_{i_bj_b\ell_b}\boldsymbol{u}(t) = \sum_{i=1}^{2^{n(n+m)}} \hat{h}_i(\boldsymbol{z}(t))\left(\hat{\boldsymbol{A}}_i\boldsymbol{x}(t) + \hat{\boldsymbol{B}}_i\boldsymbol{u}(t)\right), \quad (9)$$

ここで

$$\hat{h}_i(\boldsymbol{z}(t)) = h_{i_aj_a\ell_a}(\boldsymbol{z}(t))v_{i_bj_b\ell_b}(\boldsymbol{z}(t)), \quad (10)$$

$$\hat{\boldsymbol{A}}_i = \boldsymbol{A}_{i_aj_a\ell_a}, \hat{\boldsymbol{B}}_i = \boldsymbol{B}_{i_bj_b\ell_b}, \quad (11)$$

$$i = \ell_{a_{11}} + \sum_{k_a=2}^{n^2}(\ell_{k_a} - 1)2^{k_a-1} + \sum_{k_b=1}^{nm}(\ell_{k_b} - 1)2^{k_b+n^2-1}, \quad (12)$$

$$\ell_{k_a} = \ell_{a_{11}},\cdots,\ell_{a_{nn}}, \quad \ell_{k_b} = \ell_{b_{11}},\cdots,\ell_{b_{nm}}, \quad (13)$$

$$k_a = j_a + n(i_a - 1),\ k_b = j_b + m(i_b - 1). \quad (14)$$

である．(9) 式は通常のファジィモデルと同じ構造を持つ．以後，簡単のため $\hat{h}_i(\boldsymbol{z}(t))$, $\hat{\boldsymbol{A}}_i$, $\hat{\boldsymbol{B}}_i$ を $h_i(\boldsymbol{z}(t))$, $\boldsymbol{A}_i$, $\boldsymbol{B}_i$ として記述する．

以上のことより，一般化ファジィモデル (2) 式はモデルリダクションに適した構造と言える．しかし，ファジィ制御器設計には適していない．そのため (10)-(14) 式を用いて，モデルリダクション後に一般化ファジィモデル (2) 式を通常のファジィモデル (9) 式に変換する．4 章では (9) 式に対するロバストファジィ制御器を設計する．ルールリダクションの適用例は 6 章にて具体的に説明する．

4 LMIによるロバスト制御器設計

次のファジィシステム (15) を考える．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \sum_{i=1}^{r} h_i(\boldsymbol{z}(t))\{(\boldsymbol{A}_i + \boldsymbol{D}_{ai}\boldsymbol{\Delta}_{ai}(t)\boldsymbol{E}_{ai})\boldsymbol{x}(t) + (\boldsymbol{B}_i + \boldsymbol{D}_{bi}\boldsymbol{\Delta}_{bi}(t)\boldsymbol{E}_{bi})\boldsymbol{u}(t)\}, \quad (15)$$

ここで，$\|\boldsymbol{\Delta}_{ai}(t)\| \le \frac{1}{\gamma_{ai}}$, $\boldsymbol{\Delta}_{ai}(t) = \boldsymbol{\Delta}^T_{ai}(t)$, $\|\boldsymbol{\Delta}_{bi}(t)\| \le \frac{1}{\gamma_{bi}}$, $\boldsymbol{\Delta}_{bi}(t) = \boldsymbol{\Delta}^T_{bi}(t)$ である．

Theorem 2 ファジィモデル *(15)* を安定化し不確かさ *(, i.e., minimize γ_{ai} and γ_{bi})* のノルムを最大化するフィードバックゲインは次の *LMI* 条件を解くことによって得られる．ここで α_i, $\beta_i > 0$ は設計パラメータである．

$$\underset{\gamma^2_{ai}\gamma^2_{bi}\boldsymbol{X},\boldsymbol{M}_1,\cdots,\boldsymbol{M}_r}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^{r}\{\alpha_i\gamma^2_{ai} + \beta_i\gamma^2_{bi}\}$$

$$\text{subject to} \quad \boldsymbol{X} > \boldsymbol{0},\ \boldsymbol{Y}_1 \ge \boldsymbol{0},\ \boldsymbol{Y}_2 \ge \boldsymbol{0},$$

$$\hat{\boldsymbol{S}}_{ii} + (s-1)\boldsymbol{Y}_1 < \boldsymbol{0} \qquad \forall i \quad (16)$$

$$\hat{\boldsymbol{T}}_{ij} - 2\boldsymbol{Y}_2 < \boldsymbol{0} \qquad i < j \quad (17)$$

$\hat{\boldsymbol{S}}_{ii}$, $\hat{\boldsymbol{T}}_{ij}$, $\boldsymbol{Y}_1$, $\boldsymbol{Y}_2$ は *[11], [12]* 参照．

5 LMIによるモデルの不確かさ推定

3 章でモデルリダクションを実現する LMI 条件を導出した．しかし，リダクション誤差 $e[\delta]$ がいつも 0 とは限らない．このため，リダクション誤差を T-S ファジィモデルの不確かさに変換し，リダクションによる不確かさを補償するファジィ制御器を設計する．この章ではモデルの不確かさをリダクション誤差に変換する手法を説明する．

次のファジィシステムを考える．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(\boldsymbol{z}(t))h_j(\boldsymbol{z}(t))\{\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{F}_j + \boldsymbol{D}^*_i\boldsymbol{\Delta}^*_i(t)\boldsymbol{E}^*_{ij}\}\boldsymbol{x}(t), \quad (18)$$

ここで，$\boldsymbol{D}_i^* = [\boldsymbol{D}_{ai} \quad \boldsymbol{D}_{bi}]$, $\boldsymbol{\Delta}_i^*(t) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta}_{ai}(t) & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{\Delta}_{bi}(t) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{E}_{ij}^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_{ai} \\ -\boldsymbol{E}_{bi}\boldsymbol{F}_j \end{bmatrix}$, $\|\boldsymbol{\Delta}_i^*(t)\| \leq \frac{1}{\rho_i}$, $\boldsymbol{D}_i^{*T}\boldsymbol{D}_i^* \leq \boldsymbol{I}$ である．$\boldsymbol{D}_i^*\boldsymbol{\Delta}_i^*(t)\boldsymbol{E}_{ij}^*$ は不確かさを表す部分である．$\boldsymbol{\Delta}_i^*(t)$ は未知の不確かさを表す行列である．$\boldsymbol{D}_i^*$, $\boldsymbol{E}_{ij}^*$ は既知の定数行列である．ここでの目的はリダクション誤差 $\boldsymbol{e}(t)$ をモデルの不確かさでカバーすることである．まず，次の関係式を考える．

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{e}^T[\delta]\boldsymbol{e}[\delta] \\ &\leq \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(\boldsymbol{z}[\delta])h_j(\boldsymbol{z}[\delta])\frac{1}{\rho_i^2}\boldsymbol{x}[\delta]^T\boldsymbol{E}_{ij}^{*T}\boldsymbol{E}_{ij}^*\boldsymbol{x}[\delta]. \end{aligned} \tag{19}$$

不確かさの推定を (19) 式を満たす $1/\rho_i^2$ の最小値を導出する問題に置き換えている．(19) 式は次式と等価である．

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(\boldsymbol{z}[\delta])h_j(\boldsymbol{z}[\delta])\frac{1}{\rho_i^2}\boldsymbol{x}^T[\delta]\boldsymbol{E}_{ij}^{*T}\boldsymbol{E}_{ij}^*\boldsymbol{x}[\delta] \\ &\qquad - \boldsymbol{e}^T[\delta]\boldsymbol{e}[\delta] \geq 0 \quad \delta = 1, 2, \cdots, T \end{aligned}$$

ここで $(\boldsymbol{x}[\delta], \boldsymbol{u}[\delta], \boldsymbol{z}[\delta])$ はデータセットである．ρ_i を最大化することによって，リダクション誤差をカバーする不確かさのノルムの下限を導出できる．

$$\begin{aligned} &maximize \sum_{i=1}^{r} b_i \cdot \rho_i^2 \\ &\text{subject to} \quad \boldsymbol{K}[\delta] \geq \boldsymbol{0}, \qquad \delta = 1, 2, \cdots, T \end{aligned} \tag{20}$$

ここで $\boldsymbol{K}[\delta] = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(\boldsymbol{z}[\delta])h_j(\boldsymbol{z}[\delta])$
$\times \frac{1}{\rho_i^2}\boldsymbol{x}^T[\delta]\boldsymbol{E}_{ij}^{*T}\boldsymbol{E}_{ij}^*\boldsymbol{x}[\delta] - \boldsymbol{e}^T[\delta]\boldsymbol{e}[\delta].$

である．b_i は非負の定数で重みを表す定数である．多くの場合，すべての i に対して $b_i = 1$ としてよい．

リダクション誤差 $\boldsymbol{e}[\delta]$, メンバーシップ関数 $h_i(\boldsymbol{z}[\delta])$, $h_j(\boldsymbol{z}[\delta])$ はデータセット $(\boldsymbol{x}[\delta], \boldsymbol{u}[\delta], \boldsymbol{z}[\delta])$ より算出できる．(20) 式で変数は ρ_i^2 のみである．したがって，$1/\rho_i^2$ を最小化する最小値問題 (20) は一般的に可解である．

[Remark] もし，$\frac{1}{\gamma_{ai}} \leq \frac{1}{\rho_i}$ と $\frac{1}{\gamma_{bi}} \leq \frac{1}{\rho_i}$ である場合，ロバストファジィ制御器でモデルの不確かさを補償することが可能である．*[14],[15].*

6 適用例

本章ではモデルリダクション，不確かさの推定，ロバスト制御器の設計例 [16]-[18] を示す．

次のような非線形システムを考える．

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ x_1(t)\cos x_2(t) - x_3(t) \\ x_1(t)x_3(t) + (1 + \varepsilon \sin x_3(t))u(t) \end{bmatrix}. \tag{21}$$

ここで，状態変数の範囲は $\underline{d}_1 < x_1(t) < \overline{d}_1$, $\underline{d}_2 < x_2(t) < \overline{d}_2$, $\underline{d}_3 < x_3(t) < \overline{d}_3$ と考える．このとき，非線形システムは厳密に一般化ファジィモデルに置換えることができる．なお，メンバーシップ関数，構成したファジィモデルの詳細は文献 [16]-[18] にて示す．このファジィモデルは $\boldsymbol{A}(2,1)$, $\boldsymbol{A}(3,3)$, $\boldsymbol{B}(3,1)$ に非線形項を持つ．ここで，$\boldsymbol{A}(2,1)$ は $\boldsymbol{A}$ 行列の $(2,1)$ 要素を示している．一般化ファジィモデル (2) 式を通常のファジィモデルに変換した場合，通常のファジィモデルは 8 のルールから構成される．

[Model Reduction: four rules]

ルール数を 8 から 4 つに減らすモデルリダクションを行う．ここでは 3 つの非線形項を 2 つの非線形項に減らす．このリダクションはリダクション後のモデルの出力とオリジナルモデルの出力との誤差を最小化するように行う．表 1 はモデルリダクションによるリダクション誤差を示している．例えば，非線形項 $\boldsymbol{A}(2,1)$ を線形化した結果は $\alpha = 8.99 \times 10^{-12}$ である．$\boldsymbol{B}(3,1)$ を線形化した場合，リダクション誤差が最小値 8.44×10^{-2} になっている．したがって，非線形項 $\boldsymbol{B}(3,1)$ を線形項に置換える．定理 1 の EVP 問題を解くことでリダクション誤差を最小化する線形項 $b_{31} = 8.29 \times 10^{-1}$ を得る．

[Model Reduction: two rules]

ルール数を 4 から 2 つに減らすモデルリダクションを行う．残る非線形項は $\boldsymbol{A}(2,1)$, $\boldsymbol{A}(3,3)$ であり，表 1 から非線形項 $\boldsymbol{A}(2,1)$ は線形項に置換えられる．リダクション誤差を最小化する線形項は $a_{21} = 9.93 \times 10^{-1}$ と導出できる．

[Robust Fuzzy Controller Design]

ルール数 4 のファジィモデルに対してロバストファジィ制御器を設計する．図 1 はオリジナル非線形システムに対する制御結果である．設計したロバスト制御器は次の不確かさを持つファジィモデルを安定化できる．
$\|\boldsymbol{\Delta}_{a1}(t)\| \leq 0.362$, $\|\boldsymbol{\Delta}_{a2}(t)\| \leq 0.423$, $\|\boldsymbol{\Delta}_{a3}(t)\| \leq 0.529$,
$\|\boldsymbol{\Delta}_{a4}(t)\| \leq 0.416$, $\|\boldsymbol{\Delta}_{b1}(t)\| \leq 0.120$.

次に，ルール数 2 のファジィモデルに対してロバストファジィ制御器を設計する．図 2 はオリジナル非線形システムに対する制御結果である．設計したロバスト制御器は次の不確かさを持つファジィモデルを安定化できる．
$\|\boldsymbol{\Delta}_{a1}(t)\| \leq 1.28$, $\|\boldsymbol{\Delta}_{a2}(t)\| \leq 1.40$, $\|\boldsymbol{\Delta}_{b1}(t)\| \leq 0.908$.

なお，ルール数 1 のファジィモデル（線形モデル）に対して設計したロバスト線形制御器はオリジナルシステムを安定化することはできなかった．

[不確かさの推定]

ルール数 4 のファジィモデルのリダクション誤差をモデルの不確かさとして推定した結果，次のようになった．
$\|\boldsymbol{\Delta}_1^*(t)\| \leq 1.48 \times 10^{-5}$, $\|\boldsymbol{\Delta}_2^*(t)\| \leq 1.52 \times 10^{-5}$,
$\|\boldsymbol{\Delta}_3^*(t)\| \leq 1.48 \times 10^{-5}$, $\|\boldsymbol{\Delta}_4^*(t)\| \leq 1.52 \times 10^{-5}$.

同様にルール数 2 のファジィモデルのリダクション誤差をモデルの不確かさとして推定した結果，次のようになった．
$\|\boldsymbol{\Delta}_1^*(t)\| \leq 3.96 \times 10^{-3}$, $\|\boldsymbol{\Delta}_2^*(t)\| \leq 3.91 \times 10^{-3}$.

Remark に示した通り，ルール数 2 と 4 のファジィモデルから設計されたロバストファジィ制御器は推定された不確かさを有するファジィモデルに対して安定性を保証している．

7 おわりに

本稿では一般化ファジィモデルを用いたモデルリダクション，リダクション誤差の推定およびロバスト制御器の設計を示した．本稿で提案した一般化ファジィモデルはルール数の減少に適した構造を有している．最後に例題で本設計手法の有効性を示した．

付録 A

$\boldsymbol{E}_{ij}^A \in \boldsymbol{R}^{n\times n}$ と $\boldsymbol{E}_{ik}^B \in \boldsymbol{R}^{n\times m}$ は次のように定義する．

$$\boldsymbol{E}_{ij}^A =: \begin{array}{c} \\ i \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & j & \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & \vdots & 0 \\ \cdots & 1 & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \end{array}, \quad \boldsymbol{E}_{ik}^B =: \begin{array}{c} \\ i \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & k & \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & \vdots & 0 \\ \cdots & 1 & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \end{array}.$$

ここで，$E^A_{i,j}$ 行列は A 行列と同じサイズで，要素 (i, j) のみが 1 で残りは 0 の定数行列である． 同様に，$E^B_{i,k}$ 行列は B 行列と同じサイズで，要素 (i, k) のみが 1 で残りは 0 の定数行列である．

付録 B

$$\sum_{\substack{i=1}}^{n}\sum_{\substack{j=1\\(i,j)\neq(i_0,j_0)}}^{m} a_{ij} \triangleq \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} a_{ij} - a_{i_0 j_0}.$$

例：$$\sum_{\substack{i=1}}^{2}\sum_{\substack{j=1\\(i,j)\neq(1,2)}}^{3} a_{ij} = a_{11} + a_{13} + a_{21} + a_{22} + a_{23}.$$

参考文献

[1] T. Takagi and M.Sugeno,"Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE SMC*, vol.15, no.1, pp.116-132, (1985).

[2] K. Tanaka, M. Sano and H.Watanabe, "Modeling and Control of Carbon Monoxide Concentration using a Neuro-Fuzzy Technique", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol.3, No.3, pp.271-279 (1995).

[3] L. Wang and R. Langari, "Building Sugeno-Type Models Using Fuzzy Discretization and Orthogonal Parameter Estimation Techniques", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol.3, No.4, pp.454-458 (1995).

[4] Li-Xin Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control:Design and Stability Analysis", *Prentice Hall* (1994).

[5] Yu. Nesterov and A. Nemirovsky, "Interior-point polynomial methods in convex programming", SIAM, Philadelphia, PA (1994).

[6] K.Tanaka and M.Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems", *FUZZY SETS AND SYSTEMS 45*, no.2, 135-156, (1992)

[7] H. O. Wang, et al., "Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems by Takagi and Sugeno's Fuzzy Model", *Proceedings of FUZZ-IEEE'95*, pp.531-538 (1995).

[8] H. O. Wang, et al., "An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems : Stability and Design Issues", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol.4, No.1, pp.14-23 (1996).

[9] H. O. Wang, et al., "T-S fuzzy model with linear rule consequence and PDC controller: a universal framework for nonlinear control systems", *NAFIPS '99*, (1999)

[10] H. O. Wang, J. Li, D. Niemann, K. Tanaka, "T-S Fuzzy Model with Linear Rule Consequence and PDC Controller: A Universal Framework for Nonlinear Control Systems", *FUZZ-IEEE 2000*, San Antonio, Texas, (2000) (to appear)

[11] K. Tanaka, et al., "Robust and Optimal Fuzzy Control: A Liner Matrix Inequality Approach", *1999 IFAC World Congress*, Beijing, July, pp.213-218 (1999).

[12] K. Tanaka, et al., K. Tanaka , T.Hori and H. O. Wang, "New Robust and Optimal Designs for Takagi-Sugeno Fuzzy Control Systems", *1999 IEEE International Conference on Control Applications*, Vol.2, pp.415 - 420 (1999).

[13] K. Tanaka and H. O. Wang, "Fuzzy Control Systems and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach", John Wiley & Sons (2000).

[14] K. Tanaka, et al.: "An Integrated Algorithm of Fuzzy Modeling and Controller Design for Nonlinear Systems", *1999 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Seoul, August, Vol.2, pp.887-892 (1999).

[15] K. Tanaka, T. Hori, K. Yamafuji and H. O. Wang, "An Integrated Fuzzy Control System Design for Nonolinear Systems", *38th IEEE Conference on Decision and Control*, Phoenix, Dec., pp.4349-4354 (1999).

[16] K. Tanaka, T. Taniguchi and H. O. Wang, "Generalized Takagi-Sugeno Fuzzy Systems: Rule Reduction", *FUZZ-IEEE 2000*, San Antonio, Texas, (2000) (to appear)

[17] T. Taniguchi, K. Tanaka and H. O. Wang, "An Algorithm for Constructing Generalized T-S Fuzzy Model from Nonlinear Models", *AFSS2000*, (2000) (to appear)

[18] T. Taniguchi, "Modeling and Model Reduction Using Generalized Form of Takagi-Sugeno Fuzzy Systems", *ACC2000*, (2000) (to appear)

表 1: Model reduction results

Nonlinear term	Four rules	Two rules
$\boldsymbol{A}(2,1)$	$\alpha = 8.99 \times 10^{-2}$	$\alpha = 8.99 \times 10^{-2}$
$\boldsymbol{A}(3,3)$	$\alpha = 1.14 \times 10^{-1}$	$\alpha = 1.16 \times 10^{-1}$
$\boldsymbol{B}(3,1)$	$\alpha = 8.48 \times 10^{-2}$	

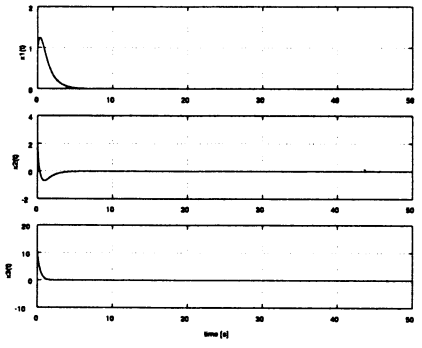


図 1: Control results (four rules)

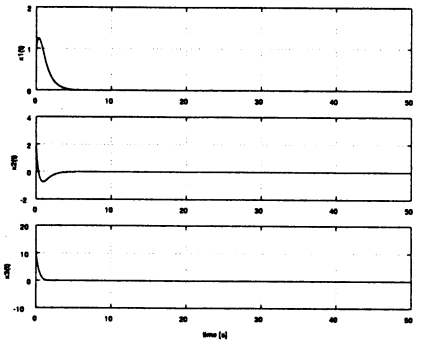


図 2: Control results (two rules)

問い合わせ先

〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学知能機械工学科
田中研究室 谷口 唯成
TEL (0424)43-5425
FAX (0424)43-5425
E-mail taniguti@yama.mce.uec.ac.jp

WD5−3

ファジィカオス制御手法によるローレンツアトラクタの制御

Control of Lorenz Attractor: Fuzzy-Chaos Hybrid Control Approach

○泉　清高，ランカ　ウダワッタ，渡辺桂吾，木口量夫
Kiyotaka Izumi, Lanka Udawatta, Keigo Watanabe, and Kazuo Kiguchi
佐賀大学
Saga University

Abstract This paper applies the concept of Fuzzy-Chaos Hybrid Control (FCHC) approach to control the Lorenz attractor which has chaotic attractive features in the system itself. Usage of such features to form an open-loop controller until the system states converge within a specified area of attractive domain is focused. Once the system states entered a specified area, the open-loop control is cut off and the second phase of control using a state-feedback control (SFBC) is adopted. In the proposed second phase, an fuzzy model-based control (FMC) is employed under the SFBC. The relaxed stability conditions and LMI (Linear Matrix Inequalities) based designs for a fuzzy regulator are used to construct a fuzzy attractive domain, in which a global solution is obtained so as to achieve the desired stability condition of the closed-loop system. Here, we apply this concept to control the Lorenz attractor and also to illustrate the design procedure.

1. はじめに

カオス現象を発生するような非線形動的システムに対する制御手法は，大きく二つに分けることができる．一つは，システムが取り扱いやすいレベルまでカオス現象を抑制する手法であり，従来の非線形制御手法が用いられていた．他方の手法は，カオス現象を積極的に利用し，引き込み領域を適切に発生させ，その領域内に状態を収束させる手法である．文献[1]では，適切な開ループ制御により非線形動的システムに引き込み領域を発生させる手法が述べられている．

また，非線形動的システムを複数の線形動的システムでモデル化するファジィモデル法[2]が提案されている．さらに，LMI条件を利用して，システムを安定化するフィードバックゲインを設計する手法[3]も報告されている．しかしながら，多次元システムにおいては設計が困難である．

本稿では，目標値まわりではファジィモデル法，それ以外の領域ではカオス制御を行うファジィカオス制御法を提案する．ファジィモデル法において，LMI問題の解法として進化戦略[4]を用いる．提案手法をローレンツアトラクタを有する動的システムに適用し，その有効性を確認する．

2. ファジィカオスハイブリッド制御

本稿で提案するファジィカオスハイブリッド制御法とは，**Fig. 1**に示すように，状態空間を目標値付近で引き込み領域を有するカオスを発生させるようなフィードフォワード制御をする領域と，ファジィモデル法を用いて制御をする領域に分けて，それぞれの制御法を切り換えて制御する手法である．Fig. 1では，状態をP_1からP_3へ収束させる問題を考えており，Cがファジィモデル法を適用する領域で，それ以外の領域がフィードフォワード制御法を適用する領域である．

ファジィモデル制御法では，あるシステムが

$$\text{IF}\quad z_1(t)\text{is}M_{i1}\text{and}\ \ldots\ \text{and}z_p(t)\text{is}M_{ip}$$
$$\text{THEN}\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}(t) &= A_i\boldsymbol{x}(t)+B_i\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{d}_i(1)\\ \boldsymbol{y}(t) &= C_i\boldsymbol{x}(t)\quad i=1,\ldots,r\end{cases}$$

と複数のサブシステムで表現される．ただし，$z_j(t)$は前件部のp次元入力ベクトルのj番目の要素，M_{ij}はルールiでの入力ベクトルのj番目の要素に対するファジィ集合，$\boldsymbol{x}(t)$は状態変数，$\boldsymbol{u}(t)$は制御入力，$\boldsymbol{y}(t)$は出力変数，$\boldsymbol{d}_i$はオフセット項，A_i，B_iおよびC_iはシステムの係数行列である．このシステムを安定化させるファジィ制御器は

Regulator Rule i :
IF　$z_1(t)$ is $M_{i1}$and ...and$z_p(t)$ is M_{ip}
THEN　$\boldsymbol{u}(t)=-K_i[\boldsymbol{x}(t)-\boldsymbol{x}_r]+\boldsymbol{u}_r$

とする．ただし，$\boldsymbol{x}_r$は目標値，$\boldsymbol{u}_r$は目標入力値，K_iはi番目のルールで表現されているシステムを安定化させる局所的なフィードバックゲインである．最終的なファジィモデル法による制御入力は

$$\boldsymbol{u}(t)=-\sum_{i=1}^{r}h_i(\boldsymbol{z}(t))K_i[\boldsymbol{x}(t)-\boldsymbol{x}_r]+\boldsymbol{u}_r \quad (2)$$

となる．ただし，$\boldsymbol{z}(t)=[z_1(t),\ldots,z_p(t)]$,

$$w_i(\boldsymbol{z}(t))=\prod_{j=1}^{p}M_{ij}(z_j(t))$$
$$h_i(\boldsymbol{z}(t))=\frac{w_i(\boldsymbol{z}(t))}{\sum_{j=1}^{r}w_j(\boldsymbol{z}(t))}$$

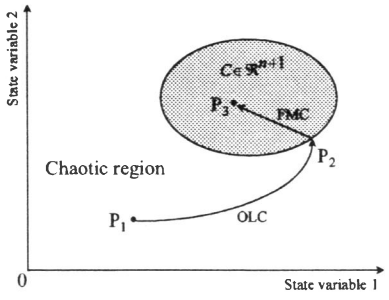


Fig. 1 Concept of fuzzy-chaos hybrid control scheme

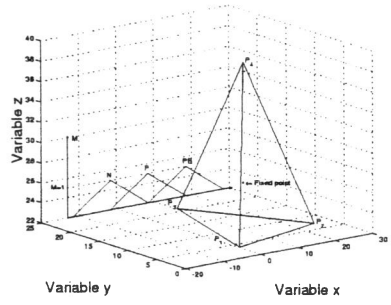


Fig. 2 A fuzzy behavior-based control system

である．

また，フィードバックゲインの設計にはLMIによる文献[3]の手法を用いており，以下の条件

$$\text{Maximize } \alpha\text{: subjected to } X > 0,\ Y \geq 0 \tag{3}$$

$$-XA_i^T - A_iX + M_i^T B_i^T + B_iM_i - (s-1)Y - 2\alpha X \geq 0 \tag{4}$$

$$2Y - XA_i^T - A_iX - XA_j^T - A_jX + M_j^T B_i^T + B_iM_j + M_i^T B_j^T + B_jM_i - 4\alpha X \geq 0 \quad (i < j) \tag{5}$$

を満足するように，進化計算法により正定行列P，準正定行列Qおよび正数αを求める．ただし，$X = P^{-1}$，$M_i = K_iX$，$Y = XQX$，$1 < s \leq r$ である．

カオスを発生させるフィードフォワード制御入力を$\boldsymbol{u}(t)$とすると，提案するファジィカオス制御器は

$$\begin{aligned}&\text{IF} \quad \sum_{i=1}^{r} w_i(\boldsymbol{z}(t)) \equiv 0 \quad \text{THEN}\\ &\quad \boldsymbol{u}(t) = \dot{\boldsymbol{u}}(t)\\ &\text{ELSE}\\ &\quad \boldsymbol{u}(t) = -\sum_{i=1}^{r} h_i(\boldsymbol{z}(t)) K_i \left[\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}_r\right] + \boldsymbol{u}_r\end{aligned} \tag{6}$$

となる．

3. ローレンツアトラクタ場の制御

ローレンツアトラクタを有する動的システムの一つとして

$$\dot{x}(t) = -\delta\left(x(t) - y(t)\right) + u(t)$$

$$\dot{y}(t) = -x(t)z(t) + rx(t) - y(t) \tag{7}$$

$$\dot{z}(t) = x(t)y(t) - bz(t) \tag{8}$$

を考える．ただし，$\delta = 10$，$r = 28$，$b = 8/3$ である．このシステムでは$u = 0$のときカオス状態となり，引き込み領域は(0, 0, 0)，(8.4853, 8.453, 27)，(−8.453, −8.453, 27)のまわりに発生する．

目標値$\boldsymbol{x}_r$を(8.4853, 8.453, 27)とすると，**Fig. 2**に示すように目標値を囲むような$P_1 \sim P_4$設定し，それらの点まわりで線形化した4つのサブシステムを用いファジィモデルを構成する．このとき，ファジィカオス制御器は

$$\begin{aligned}&\text{IF} \quad \sum_{i=1}^{4} w_i(\boldsymbol{z}(t)) \equiv 0 \quad \text{THEN}\\ &\quad \boldsymbol{u}(t) = 0\\ &\text{ELSE}\end{aligned} \tag{9}$$

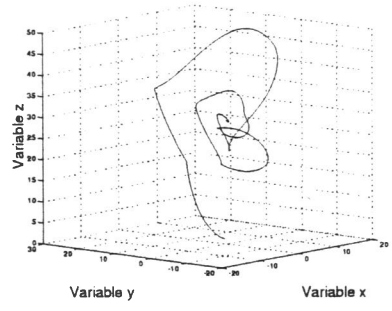


Fig. 3 3D-view of the controlled Lorenz attractor

$$u(t) = -\sum_{i=1}^{4} h_i(\boldsymbol{z}(t)) K_i \left[\boldsymbol{x}(t) - \bar{\boldsymbol{x}}\right]$$

となる．ただし，$\boldsymbol{x}(t) = [x(t)\ y(t)\ z(t)]^T$，$\boldsymbol{z}(t) = \boldsymbol{x}(t)$ である．

初期値を(1, 1, 1)として，提案手法を適用した結果を**Fig. 3**に示す．この結果から目標値に収束していることが分かる．

4. おわりに

本稿では，ファジィカオスハイブリット制御法を提案した．この提案手法は，状態空間内全てをファジィモデルにより分割表現する必要はなく，目標値まわりの空間だけにファジィモデルを適用し，それ以外の空間ではカオス現象を積極的に利用する手法である．提案手法をローレンツアトラクタ場におけるレギュレータ問題に適用し，有効であることを確認した．

参考文献

[1] T. L. Vincent, "Control Using Chaos," *IEEE Control Systems Society*, **17**(6), pp. 65–76, 1997.

[2] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, **15**(1), pp. 116-132, 1985.

[3] K. Tanaka, T. Ikeda, and H.O. Wang, "Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers: Relaxed Stability Condition and LMI-Based Designs," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, **6**(2), pp. 250–265, 1998.

[4] T. Nanayakkara, K. Watanabe, and K. Izumi, "Evolving in Dynamic Environment through Adaptive Chaotic Mutation," in *Procs. of 4th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, **2**, 1997, pp. 520–523.

[問い合わせ先]
〒840-8502 佐賀市本庄町1番地
佐賀大学 理工学部 機械システム工学科
泉 清高
FAX: (0952)28-8587
E-mail: izumi@me.saga-u.ac.jp

WE1−1

凸と凹のファジィ真理値の性質の違い

The difference between properties of convex and concave fuzzy truth values

江本 全志　　向殿 政男
Masashi Emoto　　Masao Mukaidono
明治大学
Meiji University

Abstract

Until now, numerical truth value, interval truth value, triangle truth value, trapezoid truth value, fuzzy truth value and etc were proposed as truth values in fuzzy logic. It is difficult to clarify the essential properties of fuzzy truth values which are sometimes not convex from traditional truth values such as interval, triangle, etc because they are all convex. In this paper, first we propose the concave interval truth value. And we compare the properties of traditional interval truth values and the concave interval truth values. Finally we clarify the feature of these truth values.

1 はじめに

これまでファジィ論理における真理値として，数値真理値・区間真理値・三角形真理値・台形真理値・ファジィ真理値等が提案されている．凸と凹という性質の違いから，上記の真理値の性質を元に，一般のファジィ真理値の本質を明らかにすることは一般に困難である．なぜならば，一般のファジィ真理値は凹な場合を含むからである．本論文では，ファジィ真理値の性質を明らかにするための手掛かりとして，まず凹の区間真理値を提案する．凸のファジィ真理値の代表として通常の区間真理値を，また凹のファジィ真理値の代表としてここで定義する凹の区間真理値をそれぞれ取り上げ，両者の性質を比較することで，これらの真理値の特徴を明らかにする．

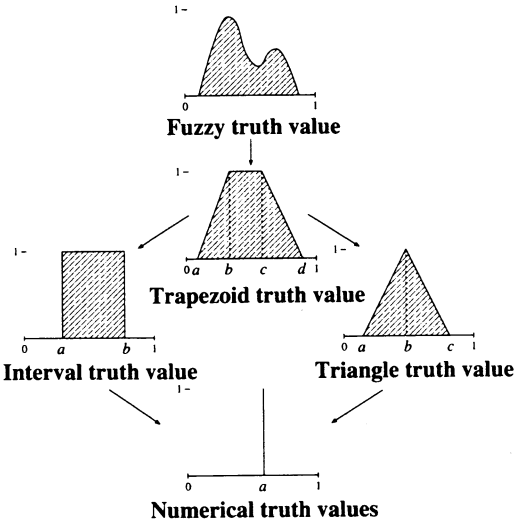


図 1: ファジィ論理における真理値

2 凸と凹

これまでファジィ論理における真理値として図1のように5つの真理値が提案されている．これらの真理値の関係として，区間真理値と三角形真理値は特殊な場合として数値真理値を含み，台形真理値は区間真理値と三角形真理値を，ファジィ真理値は台形真理値を図1で示すように含む．

A を $[0,1]$ 上のファジィ集合とする．

定義 1: x において凸

A は $x \in [0,1]$ において凸
$\Leftrightarrow \forall x_1, x_2 \ st.\ x_1 \leq x \leq x_2,\ \mu_A(x) \geq \mu_A(x_1) \wedge \mu_A(x_2)$

定義 2: 凸と凹

- A は凸 (convex) $\Leftrightarrow \forall x \in [0,1]$ A は x において凸.
- A は凹 (concave) $\Leftrightarrow$ A は凸でない.

例: 凸と凹のファジィ真理値の例

凸の真理値は図2の左のように1つのみ極大点を持ち，凹の真理値は図2の右のように2つ以上の極大点を持つ．

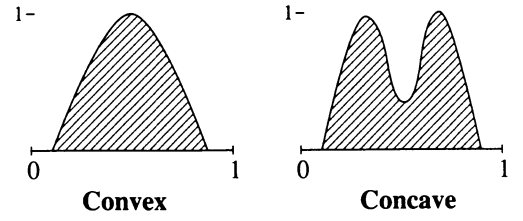


図 2: 凸と凹

これら5つの真理値は次のように分類することができる．

- いつも凸
  数値真理値，区間真理値，三角形真理値，
  台形真理値．
- 凹の可能性がある
  ファジィ真理値．

3 区間真理値

まず，凸のファジィ真理値の代表として区間真理値について述べる．

定義 3: 区間真理値
区間真理値は $n \leq p$ と $n,p \in [0,1]$ を満たす 2 つの数値真理値 n,p で構成され，$[n,p]$ と表記する．そして，区間真理値 $A=[n,p]$ のメンバーシップ値は，次のようになる．

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & (n \leq x \leq p) \\ 0 & (x < n,\ x > p) \end{cases} \tag{1}$$

すべての区間真理値の集合を I と表記する．

$$I = \{[n,p] \mid n \leq p,\ n,p \in [0,1]\}. \tag{2}$$

例: 区間真理値の例
$A=[0.2,0.7]$ は図 3 のようになる．

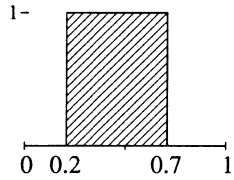


図 3: 区間真理値の例

定義 4: 区間真理値の論理演算
A, B をそれぞれ $[a_1,a_2]$,$[b_1,b_2] \in I$ とする．その時，論理演算 $\wedge, \vee, \sim$ を次のように定義する．

$$\begin{aligned} A \wedge B &= [a_1,a_2] \wedge [b_1,b_2] \\ &= [a_1 \wedge b_1, a_2 \wedge b_2] \\ &= [min(a_1,b_1), min(a_2,b_2)] \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} A \vee B &= [a_1,a_2] \vee [b_1,b_2] \\ &= [a_1 \vee b_1, a_2 \vee b_2] \\ &= [max(a_1,b_1), max(a_2,b_2)] \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \sim A &= \sim [a_1,a_2] \\ &= [\sim a_2, \sim a_1] \\ &= [1-a_2, 1-a_1] \end{aligned} \tag{5}$$

例: 区間真理値の論理演算
A,B を $[0.3,0.6]$, $[0.2,0.8]$ とする．その時，図 4，5，6 のように，$A \wedge B = [0.2,0.6]$, $A \vee B = [0.3,0.8]$, $\sim A = [0.4,0.7]$ となる．

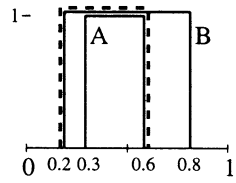


図 4: 論理演算 $\wedge$

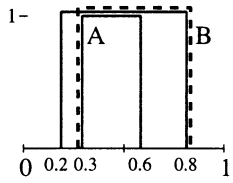


図 5: 論理演算 $\vee$

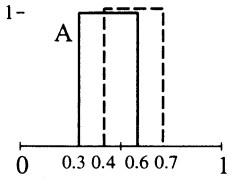


図 6: 論理演算 $\sim$

定義 5: 区間真理値における半順序関係
A, B をそれぞれ $[a_1,a_2]$,$[b_1,b_2] \in I$ とする．その時，半順序関係 $\leq, \preceq$ を次のように定義する．

$$A \leq B \ \Leftrightarrow \ a_1 \leq b_1,\ a_2 \leq b_2 \tag{6}$$

$$A \preceq B \ \Leftrightarrow \ b_1 \leq a_1,\ a_2 \leq b_2 \tag{7}$$

4 凹の区間真理値

次に，凹のファジィ真理値の代表として凹の区間真理値を提案する．ここでは，区間真理値における定義を用いて，凹の区間真理値及び論理演算の定義をする．

定義 6: 区間真理値の和演算
2 つの区間真理値を A,B として，区間真理値の和演算 $\cup$ を次のように定義する．

$$A \cup B = \int_V (\mu_A(x) \vee \mu_B(x))/x \tag{8}$$

定義 7: 凹の区間真理値
凹の区間真理値 A は n 個の区間真理値 A_i $(i = 1,2,\cdots,n)$ の集合で構成される．$(A_1 < A_2 < \cdots < A_n)$

$$\begin{aligned} A &= A_1 \cup A_2 \cup \cdots \cup A_n \\ &= \bigcup_{i=1}^{n} A_i \end{aligned} \tag{9}$$

$$(A_i \cap A_j = \phi \ \text{ if } \ i \neq j)$$

すべての凹の区間真理値の集合を J と記述する．

例: 凹の区間真理値

凹の区間真理値 $A = A_1 \cup A_2 \cup A_3$ ($A_1 = [0.2, 0.3], A_2 = [0.4, 0.6], A_3 = [0.8, 1]$) は，次のようになる．

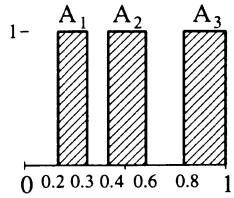


図 7: 凹の区間真理値

定義 8: 拡張原理を基づいた論理演算

拡張原理に基づいて論理演算 $\wedge, \vee, \sim$ を定義する．

$$A \wedge B = \int_V \bigvee_{x \wedge y = z} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y))/z \quad (10)$$

$$A \vee B = \int_V \bigvee_{x \vee y = z} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y))/z \quad (11)$$

$$\sim A = \int_V \mu_A(x)/ \sim x \quad (12)$$

これまで提案されている数値真理値，区間真理値，ファジィ真理値の論理演算はこの論理演算を満たす．

定理 1: 凹の区間真理値の論理演算

A, B をそれぞれ $A = \cup_{i=1}^{m} A_i$, $B = \cup_{j=1}^{n} B_n \in J$ とする．この時，定義 8 を適用すると，凹の区間真理値 A, B の論理演算 $\wedge, \vee, \sim$ は次のようになる．

$$A \wedge B = \bigcup_{i=1}^{m} \bigcup_{j=1}^{n} (A_i \wedge B_j) \quad (13)$$

$$A \vee B = \bigcup_{i=1}^{m} \bigcup_{j=1}^{n} (A_i \vee B_j) \quad (14)$$

$$\sim A = \bigcup_{i=1}^{m} \sim A_i \quad (15)$$

証明

$$\begin{aligned}
& A \wedge B \\
= & \int_V \bigvee_{x \wedge y = z} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y))/z \\
= & \int_V (\mu_A(x) \wedge \bigvee_{\alpha \in [x,1]} \mu_B(\alpha) \vee \\
& \quad \bigvee_{\alpha \in [x,1]} \mu_A(\alpha) \wedge \mu_B(x))/x \\
= & \int_V (\bigvee_{i=1}^{m} \mu_{A_i}(x)) \wedge (\bigvee_{j=1}^{n} \bigvee_{\alpha \in [x,1]} \mu_{B_j}(\alpha)) \vee \\
& \quad (\bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{\alpha \in [x,1]} \mu_{A_i}(\alpha)) \wedge (\bigvee_{j=1}^{n} \mu_{B_j}(x))/x \\
= & \int_V \bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} (\mu_{A_i}(x) \wedge \bigvee_{\alpha \in [x,1]} \mu_{B_j}(\alpha) \vee \\
& \quad \bigvee_{\alpha \in [x,1]} \mu_{A_i}(\alpha) \wedge \mu_{B_j}(x))/x \\
= & \int_V \bigvee_{i=1}^{m} \bigvee_{j=1}^{n} \mu_{A_i \wedge B_j}(x)/x \\
= & \bigcup_{i=1}^{m} \bigcup_{j=1}^{n} (A_i \wedge B_j) \quad (16)
\end{aligned}$$

同様に，論理演算 $\vee$,$\sim$ についても証明できる．□

定義 9: 凹の区間真理値における関係 $\subseteq$

関係 $\subseteq$ を次のように定義する．($x \in [0, 1]$)

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \forall x \; max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_B(x) \quad (17)$$

5 区間真理値と凹の区間真理値の基本的性質

古典論理及びファジィ論理における真理値が満たす典型的な公理を示す．

1. ベキ等律
   $A \wedge A = A, \quad A \vee A = A$
2. 交換律
   $A \wedge B = B \wedge A, \quad A \vee B = B \vee A$
3. 結合律
   $A \wedge (B \wedge C) = (A \wedge B) \wedge C,$
   $A \vee (B \vee C) = (A \vee B) \vee C$
4. 吸収律
   $A \wedge (A \vee B) = A, \quad A \vee (A \wedge B) = A$
5. 分配律
   $A \wedge (B \vee C) = (A \wedge B) \vee (A \wedge C),$
   $A \vee (B \wedge C) = (A \vee B) \wedge (A \vee C)$
6. 二重否定
   $\sim\sim A = A$
7. ドモルガン律
   $\sim (A \wedge B) = \sim A \vee \sim B,$
   $\sim (A \vee B) = \sim A \wedge \sim B$
8. 最大元
   $A \wedge 1 = A, \quad A \vee 1 = 1$
9. 最小元
   $A \wedge 0 = 0, \quad A \vee 0 = A$
10. クリーネ律
    $(A \wedge \sim A) \wedge (B \vee \sim B) = A \wedge \sim A,$
    $(A \wedge \sim A) \vee (B \vee \sim B) = B \vee \sim B$
11. 相補律
    $A \wedge \sim A = 0, \quad A \vee \sim A = 1$

公理 1-9 を満たす代数系をドモルガン代数と呼び，ドモルガン代数と公理 10 を満たす代数系をクリーネ代数，クリーネ代数と公理 11 を満たす代数系をブール代数と呼ぶ．

定理 2: [3][4]

区間真理値は公理 1-9 を満たす．

(証明略)

定理 3:

凹の区間真理値は公理 1-3, 6-9 を満たす．

(証明略)

凹の区間真理値は束さえ満たさないことが分かった．ファジィ真理値も同じ公理を満たさない [5] ことが知られている．

定理2,3より，凸と凹のファジィ真理値の性質の違いは吸収律・分配律を満たすか満たさないかの違いであるといえる．吸収律・分配律両公理が他の公理と違う点は，一方の辺で $\wedge, \vee$ の両方を使いかつ同じ変数 (ここでは A) を2回使い他方の辺でその変数が吸収されている（1つになっている）ことである．

6 ドモルガン代数を満たすための必要十分条件とクリーネ律を満たすための条件

ここでは，凹の区間真理値が吸収律，分配律，クリーネ律を満たすための条件を示す．

A, B を凹の区間真理値とし，それぞれ $A = \cup_{i=1}^{m} A_i$, $B = \cup_{j=1}^{n} B_j$ $(A_1 < A_2 < \cdots < A_m,\ B_1 < B_2 < \cdots < B_n)$ とする．

定理 4: 吸収律を満たすための必要十分条件

$$A \text{ と } B \text{ は 4. 吸収律 } (A \wedge (A \vee B) = A,\ A \vee (A \wedge B) = A) \text{ を満たす．}$$
$$\Updownarrow$$
$$\forall k\ B_k \leq A_1 \text{ or } B_k \geq A_m \text{ or } B_k \subseteq A \quad (1 \leq k \leq n)$$

（証明略）

系:

$$A, B, C \text{ は 4. 吸収律を満たす}$$
$$\Downarrow$$
$$A, B, C \text{ は 5. 分配律を満たす}$$

（証明略）

定理 5: ドモルガン代数を満たすための必要十分条件

$$A, B, C \text{ はドモルガン代数を満たす．}$$
$$\Updownarrow$$
$$A, B, C \text{ は 4. 吸収律を満たす．}$$

定理5は定理4と系から明らかである．

定理 6: クリーネ律を満たすための条件

$$A \text{ と } B \text{ は 10. クリーネ律を満たす．}$$
$$\Uparrow$$
$$A_m \leq B_1 \text{ or } \sim A_1 \leq B_1 \text{ or } A_m \leq \sim B_n \text{ or } \sim A_1 \leq \sim B_n$$

（証明略）

7 終わりに

今回，凸と凹のファジィ真理値を比較するため，まず凹のファジィ真理値の代表として凹の区間真理値を提案しその性質を明らかにした．そして，すでに提案されている凸のファジィ真理値の代表の区間真理値の性質と今回定義した凹の区間真理値の性質を比較した．今後比較結果を元に，自由な形を表現できるファジィ真理値の性質を明らかにしていきたい．

参考文献

[1] L.A.Zadeh: Fuzzy Sets, Information and Control, 8, (1965)

[2] Masao Mukaidono: A set of independent and complete axioms for a fuzzy algebra (Kleene algebra), Proceedings of the 11th International Symposium on Multiple-Valued Logic, IEEE, (1981)

[3] 向殿 政男・菊池 浩明: ファジィ・インターバル論理の提案, 日本ファジィ学会誌, Vol.2 No.2, pp.209-222, (1990-5)

[4] 向殿 政男・安井 浩之: 区間真理値の代数的構造, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-I No.8, pp.939-946, (1998-8)

[5] Masashi Emoto and Masao Mukaidono: Necessary and Sufficient Conditions for Fuzzy Truth Values to Form a de Morgan Algebra, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems (IFUFKS), Vol.7 No.4, pp.309-316, (1999-8)

[問い合わせ先]

〒 214-8571
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科システム科学研究室
江本 全志
Tel: 044-934-7442
Fax: 044-934-7912
E-mail: masashi@cs.meiji.ac.jp

WE1−2

ファジィ論理と二線式表現
Fuzzy logic and the double rail expression

西野 篤史 Atsushi Nishino
江本 全志 Masashi Emoto
向殿 政男 Masao Mukaidono
明治大学
Meiji University

Abstract

In general any statement in fuzzy logic takes a value in the unit interval of [0,1] as a truth value. We can extend this value into a double rail construction. A double rail construction is a set of 2 fuzzy truth values in which one expresses a degree of truth and the other expresses a degree of false. In this case, if the negation of a valued of double rail construction is obtained by swapping of 2 values in it and the 2 values in it are decided independently, then truth values in double rail are the same as expanded interval truth values. In this paper, we describe the property of truth values expressed as double rail construction fuzzy logic.

1 はじめに

ファジィ論理においては、通常、真理値は0と1との間の値として与えられる。これを肯定（真）の度合いを表す値と否定(偽)を表す値の二線式で表現するように拡張する。この場合、真理値の否定は二値論理における二線式と同様、線の入れ替えで行い、両真理値は独立に取れるものとすると、これまで提案されている拡張区間真理値[1]と一致する。本論文では、これらの二線式で表現されたファジィ論理における真理値の性質について論じる。

2 ノイマンの二線式定理

J.V.ノイマンにより最初に提案された2値論理における二線式定理は

$$A=(a_0,a_1), B=(b_0,b_1), a_0,a_1,b_0,b_1 \in \{0,1\}$$

において(1,0)を0に、(0,1)を1に対応させることで

$$\left.\begin{array}{rcl} A \vee B & = & (a_0 \cdot b_0, a_1 \vee b_1) \\ A \cdot B & = & (a_0 \vee b_0, a_1 \cdot b_1) \\ \sim A & = & (a_1, a_0) \end{array}\right\} \quad (1)$$

と定義でき、NOT回路を必要としない構成方法、および(0, 0)または(1, 1)を同期信号に対応させることで非同期回路の構成方法としても良く知られている。図1にその例を示す。なお、(1)式はブール代数の公理を満たしている。ここでは、この構成方法をファジィ論理に拡張する。

3 二線式ファジィ論理

二線式論理において、a_0, a_1 を閉区間[0,1]の値をとるように拡張する。すなわち、

$$A=(a_0,a_1), B=(b_0,b_1), a_0,a_1,b_0,b_1 \in [0,1]$$

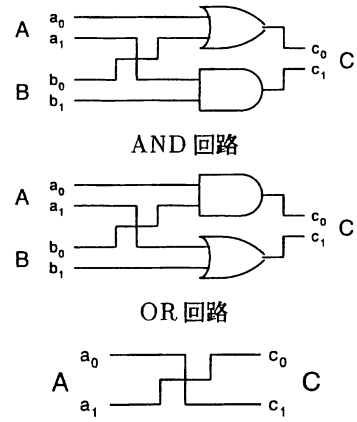


図 1: 二線式回路の論理演算

とする。このとき(1)式で論理演算 $\vee, \cdot, \sim$ を定義する。ただし、

$$a \vee b = max(a,b)$$
$$a \cdot b = min(a,b)$$

とする。このとき、a_0, a_1 や b_0, b_1 の間に条件を置くことにより、いくつかに分類できる。

3.1 数値真理値

2値論理のときに満たされていた条件

$$a_0 + a_1 = 1 \quad (2)$$

を満たす場合、$a_0 = 1 - a_1$ より $A=(1-a_1, a_1)$ となり、通常のファジィ論理における数値真理値と一致する。満たすべき代数系はクリーネ代数である。

3.2 区間真理値

$$a_0 + a_1 \geq 1 \quad (3)$$

を満たす場合、図2のように通常の区間真理値 $[1-a_0, a_1]$ $(1-a_0 \leq a_1)$ に対応させることができて、ドモルガン代数

となる。これがクリーネ代数を満たす条件はすでに知られている。[2]

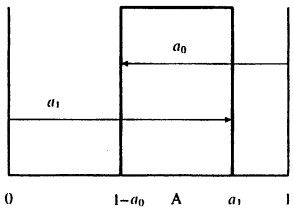


図 2: 区間真理値

3.3 拡張区間真理値 [1]

a_0, a_1 を区間 [0,1] の任意の値を取り得るとすると文献 [1] により提案された区間真理値 – ここではこれを拡張区間真理値と呼ぶ – となる。これはドモルガン代数を満たしている。

4 平面における表示

二線式ファジィ論理における真理値の場合は 2 次元の図における点としても扱うことができる。図 3で (0,1),(1,0) のみを対象とするとノイマンの二線式論理（ブール代数）となる。(0,1), (1,0) を結ぶ直線上の値のみに制限したものが数値真理値である。(0,1), (1,0), (1,1) の三角形内に制限したものが区間真理値、平面全体としたものが拡張区間真理値である。同図において NOT 演算は (0,0),(1,1) の直線に対しての対称な点をとることに相等し、AND 演算、OR 演算は (0,1) を最大元、(1,0) を最小元とする束上における下限、上限の演算に相等している。

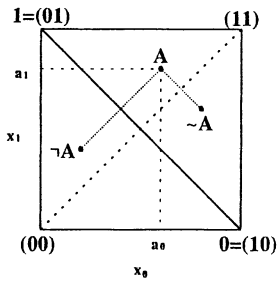


図 3: 平面表示

5 二線式ファジィ論理の特徴

文献 [1] と同様にあいまいさに関する演算 $\cup, \cap, \neg$ を拡張区間真理値 $A = (a_0, a_1), B = (b_0, b_1)$ が与えられたとき

$$A \cup B = (a_0 \vee b_0, a_1 \vee b_1)$$
$$A \cap B = (a_0 \cdot b_0, a_1 \cdot b_1)$$
$$\neg A = (1 - a_1, 1 - a_0) = (\sim a_1, \sim a_0)$$

と定義する。真偽に関する論理演算 $\vee, \cdot, \sim$ およびあいまいさに関する演算 $\cup, \cap, \neg$ の両方が導入された二線式ファジィ論理において次の定理が成り立つ。

（定理） $\{A = (a_0, a_1), B = (b_0, b_1)\}$ において演算 $\{\vee, \cdot, \sim, \cap, \cup, \neg\}$ に関して閉じている集合は $X = \{a_0, a_1, b_0, b_1, \sim a_0, \sim a_1, \sim b_0, \sim b_1\}$ としたとき $X^2 = \{(x_0, x_1) | x_0, x_1 \in X\}$ である

（証明） X のうち最も小さい数を x_{min} とする。

$$\begin{aligned}&(x_{min}x_{min})\\ &= A \cap B \cap \sim(\neg A) \cap \sim(\neg B) \cap \sim A \cap \sim B \cap \neg A \cap \neg B\\ &= (a_0 \cdot b_0 \cdot \sim a_0 \cdot \sim b_0 \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \sim a_1 \cdot \sim b_1,\\ &\ a_1 \cdot b_1 \cdot \sim a_1 \cdot \sim b_1 \cdot a_0 \cdot b_0 \cdot \sim a_0 \cdot \sim b_0)\end{aligned}$$

これより

$$\begin{aligned}(a_0, x_{min}) &= (x_{min}, x_{min}) \cdot A\\ (a_1, x_{min}) &= (x_{min}, x_{min}) \cdot \sim A\\ (b_0, x_{min}) &= (x_{min}, x_{min}) \cdot B\\ (b_1, x_{min}) &= (x_{min}, x_{min}) \cdot \sim B\\ (\sim a_0, x_{min}) &= (x_{min}, x_{min}) \cdot \neg(\sim A)\\ (\sim a_1, x_{min}) &= (x_{min}, x_{min}) \cdot \neg A\\ (\sim b_0, x_{min}) &= (x_{min}, x_{min}) \cdot \neg(\sim B)\\ (\sim b_1, x_{min}) &= (x_{min}, x_{min}) \cdot \neg B\end{aligned}$$

これより $x \in X$ とすると

$$\begin{aligned}(x, a_0) &= (x, x_{min}) \vee \sim A(x \leq a_1)\\ &= (x, x_{min}) \cup \sim A(x \geq a_1)\\ (x, a_1) &= (x, x_{min}) \vee A(x \leq a_0)\\ &= (x, x_{min}) \cup A(x \geq a_0)\\ (x, b_0) &= (x, x_{min}) \vee \sim B(x \leq b_1)\\ &= (x, x_{min}) \cup \sim B(x \geq b_1)\\ (x, b_1) &= (x, x_{min}) \vee B(x \leq b_0)\\ &= (x, x_{min}) \cup B(x \geq b_0)\\ (x, \sim a_0) &= (x, x_{min}) \vee \neg A(x \leq \sim a_1)\\ &= (x, x_{min}) \cup \neg A(x \geq \sim a_1)\\ (x, \sim a_1) &= (x, x_{min}) \vee \neg(\sim A)(x \leq \sim a_0)\\ &= (x, x_{min}) \cup \neg(\sim A)(x \geq \sim a_0)\\ (x, \sim b_0) &= (x, x_{min}) \vee \neg B(x \leq \sim b_1)\\ &= (x, x_{min}) \cup \neg B(x \geq \sim b_1)\\ (x, \sim b_1) &= (x, x_{min}) \vee \neg(\sim B)(x \leq \sim b_0)\\ &= (x, x_{min}) \cup \neg(\sim B)(x \geq \sim b_0)\end{aligned}$$

よって G の要素は X^2 の要素をすべてつくす。

また、

$* \in \{\vee, \cdot, \cup, \cap\}, A * B = (y_0, y_1)$ のとき $y_0, y_1 \in X$,

$\sharp \in \{\sim, \neg\}, \sharp A = (z_0, z_1)$ のとき $z_0, z_1 \in X$。

よって G の要素は X^2 に閉じている。（証明終り）

上記の定理により、二線式ファジィ論理において、二つの要素から演算で合成できる要素数は、最大 $(4 \times 2)^2 = 64$ 個である。これは一般化できて、n 個の要素から合成できる最大の要素数は $(2n \times 2)^2$ となることが予想できる。

6 終りに

本論文により二線式表現と拡張区間真理値の関係が示された。また本論文の定理が拡張区間真理値の性質をより明らかにする足掛かりになると考えている。

参考文献

[1] 向殿・菊池、ファジィインターバル論理の提案、日本ファジィ学会誌、1990

[2] 向殿・安井、区間真理値の代数的構造、電子情報通信学会論文誌、Vol.F18-D-I,No8,1998

WE1−3

A proposal of FFD based on Conditional Probability

Rolly Intan Masao Mukaidono

Departement of Computer Science,
Meiji University,
Kanagawa, Japan.

Abstract

This paper introduces a proposal of fuzzy functional dependency (FFD) based on conditional probability. Some properties of conditional probability and its relation with fuzzy sets have been studied. Conditional probability of two fuzzy sets was proposed as a basis of getting similarity relation of two fuzzy sets. By using this property, a proposal of FFD is introduced and proved by example that it satisfies classical/crisp relational database.

1 Introduction

In this paper, we have studied some properties of conditional probability and its relation with fuzzy sets. Even when we realize that interpretation of numerical value between fuzzy sets and probability measures are philosophically distinct, basic operations such as intersection and union of two fuzzy values can be interpreted as maximum intersection and minimum union of two probabilities. Considering this reason, we define three approximate conditional probabilities of two fuzzy sets which are based on minimum, independent and maximum probability intersection between two events. Moreover, conditional probability of two fuzzy sets can be interpreted as probabilistic matching of two fuzzy sets (Baldwin J.F. and Martin T.P., 1996) [2] and as a basis of getting similarity of two fuzzy sets and constructing equivalence classes inside their domain attribute.

By using this property, we construct fuzzy functional dependency (FFD) and prove that it satisfies classical/crisp relational database by example. Considering the concept of FFD, various definitions and the notation have been devised since 1988. Among them are, Raju and Majumdar(1988) [12], defined FFD base on the membership function of the fuzzy relation. Tripathy (1990) [13] proposed definition of the FFD in terms of fuzzy Hamming weight. A. Kiss (1991) [8], constructed FFD by using weighted tuple. G.Chen(1995) [5], Cubero (1994) [6] and W.Liu (1992,1993) [11], introduced definition of the FFD based on the equality of two possibility distributions, nevertheless they used a different type of implication and different expression of cut off. S.Liao(1997) [10], gave design of the FFD by introducing semantic proximity. However, from the technical point of view, we realized that our constructed FFD is different from most FFD, which generally start with the definition of classical functional dependency and weaken the equality relation into a (gradual) resemblance relation (and then choose an appropriate implication) (Bosc, P., Dubois, D., and Prade, H., 1998) [4].

2 Preliminary

2.1 Conditional Probability

Conditional Probability of an event is the probability of the event occurring given that another event has already occurred.

Definition 2.1 Given H and D are two events over a sample space U. $\mathrm{P}(H|D)$ is defined as conditional probability for H given D. Relation between conditional and unconditional probability satisfy the following equation:

$$\mathrm{P}(H|D) = \frac{\mathrm{P}(H \cap D)}{\mathrm{P}(D)}, \tag{1}$$

where suppose D is an event such that $\mathrm{P}(D) \neq 0$.

In particular, conditional probability satisfies some axioms as follows:

1. $\mathrm{P}(A|B) = 0$ if A and B are disjoint,
2. $\mathrm{P}(\bar{A}|B) + \mathrm{P}(A|B) = 1$,
3. $\mathrm{P}(B|B) = 1$.

2.2 Functional Dependency (FD)

Functional dependency(FD) as one type of integrity constraints has been known and used widely in the design of database system.

Definition 2.2 Given U is the set of attributes and R is a relation over U. The functional dependencies $X \rightarrow Y$ holds over $R(U)$ iff:

$$\forall t_i, t_j \in R, (t_i[X] = t_j[X] \Rightarrow t_i[Y] = t_j[Y]), \tag{2}$$

where $X, Y \subseteq U$ and $t_i[X]$ denotes the restriction of the tuple t_i to the attributes belonging to X.

FDs satisfy some properties, such as (Armstrong's Axioms) [1]:

1. Reflexivity: $Y \subseteq X \Rightarrow X \rightarrow Y$,
2. Augmentation: ($X \rightarrow Y$ and $Z \subseteq U$, where U: set of attributes) $\Rightarrow X \cup Z \rightarrow Y$,
3. Transitivity: ($X \rightarrow Y$ and $Y \rightarrow Z$) $\Rightarrow X \rightarrow Z$.

2.3 Imprecise Data and Fuzzy Sets

In the real-world application, data are often imprecise. The level of precise data is assigned from *total ignorance*(TI) to *crisp* data, where total ignorance and crisp express the most imprecise and the most precise representation of data respectively.

Fuzzy set can be used as a connector to represent imprecise data from *total ignorance* to *crisp* data. The following definition shows how fuzzy set can be used to represent total ignorance and crisp data.

Definition 2.3 Let U be universal set, where $U = \{u_1, u_2, ..., u_n\}$. *Total ignorance*(TI) over U and *crisp* of $u_i \in U$ are defined as

$$\begin{aligned} \text{TI over } U &= \{1/u_1, ..., 1/u_n\}, & (3)\\ \text{Crisp}(u_i) &= \{0/u_1, ..., 0/u_{i-1}, 1/u_i, & (4)\\ &\quad 0/u_{i+1}, ..., 0/u_n\}, \end{aligned}$$

respectively.

3 Conditional Probability of Two Fuzzy Sets

Due to Definition 2.1, conditional probability can be represented by the following formula:

$$\mathrm{P}(H|D) = \frac{\mathrm{P}(H \cap D)}{\mathrm{P}(D)}.$$

The problem is how can we interpret $\mathrm{P}(H \cap D)$, if H and D are two events. We realize that numerical values of both fuzzy and probability philosophically have different meaning. In the fuzzy, numerical value can be interpreted as the level of preference or similarity. Therefore, intersection of two membership functions is overlapping between them and it can be treated by using minimum function.

On the other hand, numerical value of an event in probability proportionally express the number of ways that the event might occur. Every way is assumed having the same value and provided by a function called *basic probability assignment* as follows:

$$\mathrm{P}(u) = \frac{1}{|U|}, \quad \forall u \in U,$$

where U is set of all ways. Intersection of two events can be interpreted as the number of the same ways belong to both of them that the two events might occur. In the situation of lack of information, intersection of two events can be interpreted into three interpretations as follows:

1. *minimum probability of intersection*,
$$\mathrm{P}(H \cap D)_{\min} = \max(0, \mathrm{P}(H) + \mathrm{P}(D) - 1),$$
2. *independent probability of intersection*,
$$\mathrm{P}(H \cap D)_{\mathrm{ind}} = \mathrm{P}(H) \cdot \mathrm{P}(D),$$
3. *maximum probability of intersection*,
$$\mathrm{P}(H \cap D)_{\max} = \min(\mathrm{P}(H), \mathrm{P}(D)).$$

Relation among them is shown as follows:

$$\mathrm{P}(H \cap D)_{\min} \leq \mathrm{P}(H \cap D)_{\mathrm{ind}} \leq \mathrm{P}(H \cap D)_{\max}.$$

Now, we define *conditional probability* between two fuzzy sets based on the three interpretations above as follows.

Definition 3.1 Let $f = \{\chi_1^f/u_1, ..., \chi_n^f/u_n\}$ and $g = \{\chi_1^g/u_1, ..., \chi_n^g/u_n\}$ are two fuzzy sets over $U = \{u_1, u_2, ..., u_n\}$. $\mathrm{P}(f|g)$ is defined as conditional probability for f given g.

1. Based on minimum probability of intersection :
$$\mathrm{P}(f|g) = \frac{\sum_{i=1}^n \max(0, \chi_i^f + \chi_i^g - 1)}{\sum_{i=1}^n \chi_i^g}. \quad (5)$$
It can be proved that,
$$\begin{aligned} \mathrm{P}(f, f) &\leq 1,\\ \mathrm{P}(\bar{f}|g) + \mathrm{P}(f|g) &\leq 1. \end{aligned}$$
2. Based on independent probability intersection :
$$\mathrm{P}(f|g) = \frac{\sum_{i=1}^n \chi_i^f \cdot \chi_i^g}{\sum_{i=1}^n \chi_i^g}. \quad (6)$$
It can be proved that,
$$\begin{aligned} \mathrm{P}(f, f) &\leq 1,\\ \mathrm{P}(\bar{f}|g) + \mathrm{P}(f|g) &= 1. \end{aligned}$$
3. Based on maximum probability intersection :
$$\mathrm{P}(f|g) = \frac{\sum_{i=1}^n \min\{\chi_i^f, \chi_i^g\}}{\sum_{i=1}^n \chi_i^g}. \quad (7)$$
It can be proved that,
$$\begin{aligned} \mathrm{P}(f, f) &= 1,\\ \mathrm{P}(\bar{f}|g) + \mathrm{P}(f|g) &\geq 1. \end{aligned}$$

Conditional probability in (7), principally is the same as *fuzzy relative cardinality*(Dubois and Prade, 1982 [7]) as shown in the following equation:

$$I(F, G) = \frac{|F \cap G|}{|F|}, \quad (8)$$

where $|F| = \sum_u \mu_F(u)$ and intersection is defined as minimum. Kosko [9] has pointed out the analogy between $I(F, G)$ and a conditional probability $\mathrm{P}(A|B)$, where B and F play the same role.

4 Fuzzy Functional Dependency

This section is the main concern in our paper. In this section, we introduce the construction of fuzzy functional dependency (FFD) by applying the concepts of conditional probability of two fuzzy sets as discussed in Section 3. From the technical point of view, we realize that our FFD is different from most FFDs as mentioned in Section 1. Generally, most of FFD start with the definition of classical functional dependency (see Definition 2.2) and weaken the equality relation into a (gradual) resemblance relation (and then choose an appropriate implication) [4].

Definition 4.1 Given U is the set of attributes and R is a relation over U. The fuzzy functional dependencies $X \rightsquigarrow Y$ holds over $R(U)$ iff:

$$\forall x \subseteq X,\ \forall y \subseteq Y,$$

$$\text{if } t(x,y) \in R \text{ then } \mathrm{PR}(x|y) \leq \mathrm{PR}(y|x). \quad (9)$$

Here $X, Y \subseteq U$, t denotes the tuple in relation R and $\mathrm{PR}(x|y)$ is called the *conditional probability relation* for x given y . If there are n tuples in R, then

$$\mathrm{PR}(x|y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \min(\mathrm{P}(x|t_i(X)), \mathrm{P}(y|t_i(Y)))}{\sum_{i=1}^{n} \mathrm{P}(y|t_i(Y))}, \quad (10)$$

where $t_i(X)$ and $t_i(Y)$ denote the restriction of the tuple t_i to the attributes belonging to X and Y, respectively.

Let $X = \{a_1, a_2, ..., a_m\}$, $x_i = \{\chi_1^i/a_1, ..., \chi_m^i/a_m\}$, and $x_k = \{\chi_1^k/a_1, ..., \chi_m^k/a_m\}$, then

$$\mathrm{P}(x_i|x_k) = \frac{\sum_{l=1}^{m} \min\{\chi_l^i, \chi_l^k\}}{\sum_{l=1}^{m} \chi_l^k}, \quad (11)$$

where x_i and x_k are two fuzzy sets over X.

Our consideration to apply minimum function for calculation of conditional probability of two fuzzy sets as shown in (11) such as $\mathrm{P}(x|t_i(X))$ and $\mathrm{P}(y|t_i(Y))$ in (10), with the objective of getting similarity of two fuzzy sets and developing their equivalence classes inside attribute X and Y, respectively.

It can be proved that the FFD satisfies some basic inference rules such as *reflexivity*, *augmentation*, and *transitivity* which are similar to Armstrong's Axioms as follows.

1. Reflexivity:$Y \subseteq X \Rightarrow X \rightsquigarrow Y$,
2. Augmentation:$(X \rightsquigarrow Y \text{ and } Z \subseteq U) \Rightarrow X \cup Z \rightsquigarrow Y$,
3. Transitivity:$(X \rightsquigarrow Y \text{ and } Y \rightsquigarrow Z) \Rightarrow (X \rightsquigarrow Z)$.

Proof. :

1. $Y \subseteq X$, in the sense of number of conditions or constraints of X is greater or equal to number of conditions or constraints of Y, implies that $\mathrm{P}(Y) \geq \mathrm{P}(X)$. Related to Definition 4.1, we have $\mathrm{PR}(x|y) \leq \mathrm{PR}(y|x)$ that means $X \rightsquigarrow Y$.
2. Since from Definition 4.1, if $X \rightsquigarrow Y \Rightarrow \mathrm{PR}(x|y) \leq \mathrm{PR}(y|x)$ is true, then it must be also true for $\mathrm{PR}(x \text{ and } z|y) \leq \mathrm{PR}(y|x \textit{ and } z) \Rightarrow X \cup Z \rightsquigarrow Y$. The reason is $\mathrm{P}(X) \geq \mathrm{P}(X \cup Z)$, where $X \cup Z$ is union of conditions or constraints of X and Z.
3. Since relation R satisfies $X \rightsquigarrow Y$ and $Y \rightsquigarrow Z$, $\mathrm{PR}(x|y) \leq \mathrm{PR}(y|x)$ and $\mathrm{PR}(y|z) \leq \mathrm{PR}(z|y)$, we have $\mathrm{PR}(x|z) \leq \mathrm{PR}(z|x)$. Thus, R satisfies $X \rightsquigarrow Z$.

Example 4.1 Given a relation $R(X,Y)$, is shown in Table 4.1.

Table 4.1 Relation $R(X,Y)$

Rec	X	Y
1	x_1	y_1
2	x_2	y_2
3	x_3	y_1
4	x_1	y_1
5	x_2	y_2
6	x_4	y_2

From Table 4.1, we try to find comparison between $\mathrm{PR}(x_1|y_1)$ and $\mathrm{PR}(y_1|x_1)$ as follows.

Table 4.2 Relation $R(X = x_1, Y = y_1)$

Rec	$X = x_1$	$Y = y_1$	$X = x_1$ and $Y = y_1$
1	$\mathrm{P}(x_1\|x_1) = 1$	$\mathrm{P}(y_1\|y_1) = 1$	min(1,1)=1
2	$\mathrm{P}(x_1\|x_2) = 0$	$\mathrm{P}(y_1\|y_2) = 0$	min(0,0)=0
3	$\mathrm{P}(x_1\|x_3) = 0$	$\mathrm{P}(y_1\|y_1) = 1$	min(0,1)=0
4	$\mathrm{P}(x_1\|x_1) = 1$	$\mathrm{P}(y_1\|y_1) = 1$	min(1,1)=1
5	$\mathrm{P}(x_1\|x_2) = 0$	$\mathrm{P}(y_1\|y_2) = 0$	min(1,0)=0
6	$\mathrm{P}(x_1\|x_4) = 0$	$\mathrm{P}(y_1\|y_2) = 0$	min(0,0)=0
$\sum$	2	3	2

From Table 4.2,

$\mathrm{PR}(x_1|y_1) = 2/3 < \mathrm{PR}(y_1|x_1) = 1$.

The result leads to conclusion that by knowing $X = x_1$, it certainly give $Y = y_1$, otherwise by knowing $Y = y_1$, the probability to give $X = x_1$ is equal to 2/3. By using the same way, we find that,

$\mathrm{PR}(x_2|y_2) = 2/3 < \mathrm{PR}(y_2|x_2) = 1$,

$\mathrm{PR}(x_3|y_1) = 1/3 < \mathrm{PR}(y_1|x_3) = 1$,

$\mathrm{PR}(x_4|y_2) = 1/3 < \mathrm{PR}(y_2|x_4) = 1$.

Finally, related to (9), we conclude that $X \rightsquigarrow Y$.

Example 4.2 Given Table 4.1, relation between two attributes, X and Y and suppose that we want to know relation between a given partial area of X and a given partial area of Y which are represented by two fuzzy sets f and g, respectively. Let suppose that the membership function of f is,

$$\mu(f) = \{1/x_1, 0.5/x_2, 0.1/x_3\},$$

and membership function of g is,

$$\mu(g) = \{1/y_1, 0.2/y_2\}.$$

By using both membership functions above, Table 4.1 is transformed into Table 4.3 as follows.

Table 4.3 Relation $R(X = f, Y = g)$

Rec	$X = f$	$Y = g$	$X = f$ and $Y = g$
1	$P(f\|x_1) = 1$	$P(g\|y_1) = 1$	1
2	$P(f\|x_2) = 0.5$	$P(g\|y_2) = 0.2$	0.2
3	$P(f\|x_3) = 0.1$	$P(g\|y_1) = 1$	0.1
4	$P(f\|x_1) = 1$	$P(g\|y_1) = 1$	1
5	$P(f\|x_2) = 0.5$	$P(g\|y_2) = 0.2$	0.2
6	$P(f\|x_4) = 0$	$P(g\|y_2) = 0.2$	0
$\sum$	3.1	3.6	2.5

From Table 4.3, it is shown that

$$PR(f|g) = 0.694 < PR(g|f) = 0.806.$$

We conclude that it is more realistic to say that $f \sim\!\!\rightarrow g$ than $g \sim\!\!\rightarrow f$.

5 Conclusion

In this paper, we introduced a proposal of fuzzy functional dependency(FFD), where relation between two attribute domains is based on the concept of conditional probability. From the technical point of view, the FFD is different from most FFD, which generally start with the definition of classical functional dependency and weaken the equality relation into a (gradual) resemblance relation (and then choose an appropriate implication) [4]. We also proved that inference rules, which are similar to Armstrong's Axioms [1] for the FFD, are both sound and complete.

References

[1] Armstrong, W.W.,'Dependency Structures of Database Relationship',*Information Processing*, (1974), pp. 580-583.

[2] Baldwin J.F., Martin T.P., 'A Fuzzy Data Browser in Fril', *Fuzzy Logic*, John Wiley & Sons Ltd (1996), pp. 101-123.

[3] Bernstein, P.A., Swenson, J.R., & Tsichritzis. D.C., 'A Unified Approach to Functional Dependencies and Relation', *Proceedings of the ACM SIGMOD Conference*, San Jose, May 14-16, (1975), pp. 237-245.

[4] Bosc, P., Dubois, D., & Prade, H., 'Fuzzy Functional Dependencies and Redundancy Elimination', *Journal of The American Society for Information Science 49(3)*, (1998), pp. 217-235.

[5] Chen, G.Q., 'Fuzzy Functional Dependencies and a Series of Design Issues of Fuzzy Relational Database'. *Fuzziness in Database Management Systems*, Heidelberg: Physical Verlag (1995), pp. 166-185.

[6] Cubero, J.C., Medina, J.M., & Vila, M.A.,'Influence of Granularity Level in Fuzzy Functional Dependencies', *Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty (Proceedings of ECSQARU'93)*, Berlin: Springer-Verlag Vol. 747 (1993), pp. 73-78.

[7] Dubois, D., Prade, H., 'A Unifying View of Comparison Indices in a Fuzzy Set-Theoretic Framework', *Fuzzy Sets and Possibility Theory-Recent Developments*, Pergamon Press, (1982), pp. 1-13.

[8] Kiss, A. 'λ-Decomposition of Fuzzy Relational Database', *Annales Univ. Sci. Budapest., Sect. Comp. 12*,(1991), pp. 133-142.

[9] Kosko, B., 'Fuzziness vs. Probability', *Int. J. of General Systems*, Vol. 17, (1990), pp. 211-240.

[10] Liao, S.Y., Wang, H.Q., Liu, W.Y., 'Functional Dependencies with Null Values, and Crisp Values', *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 1, (February 1999), pp. 97-103

[11] Liu, W., 'The Fuzzy Functional Dependency in The Basis of the Semantic Distance', *Fuzzy Sets and Systems, 59*, (1993), pp. 173-179.

[12] Raju, K.V.S.V.N., & Majumdar, A.K., 'Fuzzy Functional Dependencies and Lossless Join Decomposition of Fuzzy Relational Database Systems', *ACM Transactions on Database Systems, 13(2)*, (1988), pp. 129-166.

[13] Tripathy, R.C., Saxena, P.C., 'Multi-valued Dependencies in Fuzzy Relational Database', *Fuzzy Sets Systems*, Vol 38, no. 3, (1990), pp. 267-280.

WE2−1

拡張原理について閉じているファジィ真理値の部分集合について
Closures of fuzzy linguistic truth value with regards to the extension principle

菊池 浩明　　中西祥八郎
Hiroaki Kikuchi　　Shohachiro Nakanishi

東海大学工学部電気工学科
Dept. of Electrical Engineering, Tokai University

Abstract: According to the extension principle, fundamental logical operations are defined over fuzzy linguistic truth value. Mizumoto proved that a subset of *normal* and *convex* truth value satisfies DeMorgan algebra. This paper studies some meaningful subsets of subnormal or non-convex truth value in which all extension-principle-based logical operations are closed.

1 はじめに

言語真理値は，命題の真偽の度合いを表す $[0,1]$ 上のファジィ集合である．ファジィ理論で一般的に用いられる数値真理値よりも，我々の未知や矛盾に満ちた真偽を表現力豊かに定量化する概念として，Zadeh により提唱されている [1]．通常は，“very true” や “almost true” などのように言語として意味のあるいくつかのラベルを用意し，それらに対応する言語真理値だけを取り扱うことが多い．無限個 ($[0,1]$ から $[0,1]$ の写像なのでその濃度は $\aleph_1$) の元があることに加え，その代数的な性質もよくわかっていないためである．

水本らは，正規で凸な言語真理値の集合は，論理積，論理和，否定の論理演算に対してドモルガン代数をなすことを示した [2]．向殿は，凸な言語真理値を α カットすると $[0,1]$ 上の閉区間，すなわち，区間真理値になることを用いて代数的な性質を導いている [4]．河口は，正規性，凸性に加えて上半連続性を仮定して，その代数的な性質を明らかにしている [5]．江本らは，正規凸な言語真理値の中でも三角真理値に着目し，従来の拡張原理に基づいた論理演算では三角真理値の集合に閉じないことを指摘した．そこで彼らは，拡張原理をあきらめ，三角真理値の間でも意味のある論理演算を提案している [6]．

正規で凸な言語真理値全体から成る集合は閉じているのに，その部分集合である三角真理値は閉じていない．では，閉じている言語真理値の集合にはどのような条件があるのか？拡張原理は本質的なのだろうか？

そこで，本稿では，これらの疑問を出発点として，正規や凸という条件を緩めたより一般的な言語真理値を考える．意味のある言語真理値の部分集合にはどのようなものがあるか，それらの間にはどんな性質があるか，いくつかの閉じた集合の上で検討する．

2 言語真理値とそのクラス

2.1 基本定義

$V = [0,1]$ 上のファジィ集合を言語真理値（ファジィ真理値）といい，全ての言語真理値から成る集合を $V_L = \{A \mid \mu_A : V \to V\}$ で表す．

言語真理値 $A, B \in V_L$ の論理演算 $A \wedge B, A \vee B, \sim A$ は，拡張原理に基づいて数値真理値 V 上の論理演算から，次のメンバーシップ関数で定義される．すべての $x \in V$ について，

$$\begin{aligned} \mu_{A\vee B}(x) &= \sup_{x=a\vee b} \mu_A(a) \wedge \mu_B(b), \\ \mu_{A\wedge B}(x) &= \sup_{x=a\wedge b} \mu_A(a) \wedge \mu_B(b), \\ \mu_{\sim A}(x) &= \mu_A(1-x). \end{aligned}$$

なお，数値真理値に対する $\vee, \wedge$ は max, min を求める演算を表し，以後も言語真理値の論理演算記号と混乱がない限り同様とする．

V_L のある部分集合 V_A の任意の元 A, B について，拡張原理による論理演算 $A \vee B, A \wedge B, \sim A$ が V_A の元であるとき，V_A は拡張原理について閉じているという．

言語真理値 $A, B \in V_L$ について，和集合と積集合をそれぞれ，$x \in V$ について $\mu_{A\cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$, $\mu_{A\cap B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$ と定める．積は $A \cap B = \phi$ になる場合があることに注意しよう．ただし，ϕ は全て

の $x \in V$ について $\mu_\phi(x) = 0$ であるような，特殊な言語真理値とする．

正規な言語真理値の全てからなる集合を

$$V_N = \{A \in V_L \mid \max_{x \in V}(\mu_A(x)) = 1\}$$

とおく．同様に，全ての凸な言語真理値を

$$V_C = \{A \in V_L \mid \forall x \leq y \leq z \in V\ \mu_A(y) \geq \mu_A(x) \wedge \mu_A(z)\}$$

で表す．言語真理値 A が，ある $n \leq p \in V$ について，

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } n \leq x \leq p, \\ 0 & \text{otherwise}, \end{cases}$$

を満たすとき，区間真理値といい，$A = [n, p]$ と書く．全ての区間真理値から成る集合を V_I と表す．

言語真理値 A について，ある $a \leq b \leq c \in V$ が存在し，

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & \text{if } a \leq x < b, \\ 1-(x-b)/(c-b) & \text{if } b \leq x \leq c, \\ 0 & \text{otherwise}, \end{cases}$$

を満たすとき，三角真理値であるといい，$A = (a, b, c)$ と書く．全ての三角真理値の集合を V_T とおく．

V 上の全ての単調増加関数と単調減少関数で定義される言語真理値を，それぞれ，V_{M+}，V_{M-} とおく．すなわち，

$$\begin{aligned} V_{M+} &= \{A \in V_L \mid \forall x \leq y \in V\ \mu_A(x) \leq \mu_B(y)\}, \\ V_{M-} &= \{A \in V_L \mid \forall x \leq y \in V\ \mu_A(x) \geq \mu_B(y)\}. \end{aligned}$$

あいまいさの単調性を満たす関数で定義される言語真理値を正則であるといい，全ての正則な言語真理値から成る集合を V_R とおく．ここで，$a, b \in V$ があいまいさの半順序関係 $a \succeq b$ にあるのは，$b \leq a \leq 1/2$ または $1/2 \leq a \leq b$ である時，およびその時に限る．正則な言語真理値 A は，V のいかなる元 x, y についても，$x \succeq y$ ならば，$\mu_A(x) \succeq \mu_B(y)$ である．1 変数の数値真理値をとるファジィ論理関数は正則であり，その全ての関数からなる集合は V_R の部分集合である．

2.2 拡張原理による論理演算の基本性質

補題 2.1 言語真理値 $A, B \in V_L$ の論理演算 $A \vee B, A \wedge B$ は，

$$\begin{aligned} \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \leq \mu_{A \vee B}(x) \leq \mu_A(x) \vee \mu_B(x), \\ \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \leq \mu_{A \wedge B}(x) \leq \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \end{aligned}$$

を満たす．

(証明) $\mu_{A \vee B}(x) = \sup_{x = a \vee b} \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = (\mu_A(x) \wedge \sup_{b \leq x} \mu_B(b)) \vee (\mu_B(x) \wedge \sup_{a \leq x} \mu_A(a)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \vee \alpha$ なので，前半は明らか．一方，$\mu_{A \vee B}(x) = \mu_A(x) \wedge \alpha \vee \mu_B(x) \wedge \beta \leq \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$ より後半を得る．$A \wedge B$ も同様． (証明終)

補題 2.2 A の高さを $h_A = \max_{x \in V} \mu_A(x)$ で表すとき，

$$h_{A \vee B} = h_{A \wedge B} = (h_A) \wedge (h_B).$$

(証明) $h_A = \mu_A(x)$ となる x と $h_B = \mu_B(y)$ となる y について，必ず，$z = x \vee y$ となる $z \in V$ が存在するので，$h_{A \vee B} \geq \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = h_A \wedge h_B$．一方，$\mu_{A \vee B}(z) = \sup_{z = a \vee b} \mu_A(a) \wedge \mu_B(b) \leq sup_{a,b \in V} \mu_A(a) \wedge \mu_B(b) = h_A \wedge h_B$．よって，$h_{A \vee B} = h_A \wedge h_B$．(証明終)

区間真理値 $A = [n_A, p_A], B = [n_B, p_B] \in V_I$ の拡張原理による論理演算は，次を満たす．

$$\begin{aligned} A \vee B &= [n_A \vee n_B, p_A \vee p_B], \\ A \wedge B &= [n_A \wedge n_B, p_A \wedge p_B], \\ \sim A &= [1 - p_A, 1 - n_A]. \end{aligned}$$

従って，V_I は拡張原理について閉じていることがわかる．その代数系はドモルガン代数となることもわかっている [3]．

凸な言語真理値ならば，そのαカットは必ず区間真理値かφになる．それゆえ，区間真理値を用いて凸な言語真理値の全てから成る V_C が拡張原理について閉じていることが示される [4]．

高さに関する補題より，正規な言語真理値のクラスも拡張原理について閉じていることが示される．これを一般化して，高さが h で一様な言語真理値の集合 V_h も拡張原理について閉じているといえる．もっと一般化して，高さが h 以下の言語真理値の集合 V_{h*} としても同様である．h は V の任意の元なのでこうして定義される閉じた部分集合の数は無限個存在することがわかる．

3 論理演算について閉じたクラス

3.1 一変数ファジィ論理関数

ファジィ論理関数は，定数 0,1 と n 個の変数，およびそれらの和，積，否定で定義される写像 $f : V^n \to V$ である．更に，定数として，V の任意の元を許す関数を，多値クリーネ関数という．

変数を一つに限れば，これらの関数は $f : V \to V$ となり，一つの言語真理値とみなすことが出来る．一変数のファジィ論理関数は 6 つしかなく，これらを

$$V_F = \{0, 1, A_x, A_{\sim x}, A_{x \vee \sim x}, A_{x \wedge \sim x}\} \subset V_L$$

とおく．ただし，$A_{x\vee\sim A}$は式$x\vee\sim A$で表現されるファジィ論理関数をメンバーシップ関数とする言語真理値である．

V_Fには定数A_0があるので正規でもなく，$A_{x\vee\sim x}$があるので，凸でもない．それゆえ，その代数的な性質は自明ではない．

まず，定数A_0で表現される言語真理値は，ϕに他ならない．$h_0=0$なので，補題より，$h_{A\vee\phi}=h_{A\wedge\phi}=0$となり，$A\vee A\wedge\phi=\phi\neq A$で吸収律を満たさない．それゆえ，その代数は束にもならない．さらに，次の例に示すように，論理演算がV_Fに閉じていない．

$$\begin{aligned} A_{x\wedge\sim x}\vee A_1 &= A_{0.5\wedge x},\\ A_{x\wedge\sim x}\wedge A_1 &= A_{0.5}. \end{aligned}$$

そこで，こうして生じる新しい元 $A_{0,5}$，$A_{0.5\wedge x}$，$A_{0.5\wedge\sim x}$ などを順次を V_F に加えていけば，やがては閉じた集合になる．しかし，そのような逐次的なアプローチでは，ファジィ論理関数を無限の元を持つ多値クリーネ関数まで一般化して議論することは困難である．そこで，次節では，更に一般化した正則性について考察する．

3.2 正則な言語真理値

単調な言語真理値が拡張原理について閉じていることを示す．

補題 3.1 A,Bを単調増加な言語真理値V_{M+}の元とする．

$$\sim A, A\vee B, A\wedge B\in V_{M+}.$$

補題 3.2 A,Bを単調減少言語真理値V_{M-}の元とする．

$$\sim A, A\vee B, A\wedge B\in V_{M-}.$$

こうして，単調増加な言語真理値全体の集合と単調減少言語真理値全体の集合が，それぞれ閉じていることが示された（後述するように，それらの積の言語真理値の集合も閉じている）．

補題 3.3 Aを正則な言語真理値とする．

$$\sim A\in V_R$$

(証明) $x\succeq y\in V$ならば$1-x\succeq 1-y$．Aは正則なので，$\mu_A(1-x)\succeq\mu_A(1-y)$．すなわち，$\mu_{\sim A}(x)\succeq\mu_{\sim A}(y)$．(証明終)

補題 3.4 A, Bを正則な言語真理値とする．

$$A\vee B, A\wedge B\in V_R$$

(証明) $y\leq x\leq 0.5$とする．$x\succeq y$なので，$\mu_A(x)\succeq\mu_A(y)$である．従って，Aは(1) $\mu_A(y)\leq\mu_A(x)\leq 0.5$，または，(2) $0.5\leq\mu_A(x)\leq\mu_A(y)$のどちらか．同様に$B$も，(3) $\mu_B(y)\leq\mu_B(x)\leq 0.5$，または，(4) $0.5\leq\mu_B(x)\leq\mu_B(y)$．

(1) と (3) の場合，V_{M+}の補題より，$\mu_{A\vee B}(y)\leq\mu_{A\vee B}(x)\leq 0.5$であり，$\mu_{A\vee B}(x)\succeq\mu_{A\vee B}(y)$．

(2) と (4) の場合，V_{M-}の補題から同様．

(1) と (4) の場合，$\mu_{A\vee B}(x)=(\mu_A(x)\wedge\sup_{z\leq x}\mu_B(z))\vee(\mu_B(x)\wedge\sup_{z\leq x}\mu_A(z))=\mu_A(x)\vee\mu_B(x)\wedge\mu_A(x)=\mu_A(x)$．同様に，$\mu_{A\vee B}(y)=\mu_A(y)$．$A$は正則なので，$\mu_{A\vee B}(x)\succeq\mu_{A\vee B}(y)$．(2) と (3) の場合も同様に示せる．

次に，$0.5\leq x\leq y$を仮定する．同様にして，Aは(1) または (2)，Bは (3) または (4) のどちらかである．(1) と (3) および (2) と (4) は単調関数から同様に導く．(1) と (4) の場合，単調なので$\sup_{z\leq x}\mu_A(z)=\sup_{z\leq y}\mu_A(z)$が成立し，これを$\alpha$とおく．$\mu_{A\vee B}(x)=\mu_A(x)\wedge\sup_{z\leq x}\mu_B(z)\vee\mu_B(x)\wedge\sup_{z\leq x}\mu_A(z)=\mu_A(x)\vee\mu_B(x)\wedge\alpha$．同様に，$\mu_{A\vee B}(y)=\mu_A(y)\vee\mu_B(y)\wedge\alpha$．ここで，$\mu_{A\vee B}(x)>0.5$のとき，$0.5<\mu_{A\vee B}(x)=\mu_B(x)\wedge\alpha\leq\mu_B(y)\wedge\alpha=\mu_{A\vee B}(y)$により，正則である．$\mu_{A\vee B}(x)\leq 0.5$のとき，$0.5\geq\mu_{A\vee B}(x)=\mu_A(x)\vee\alpha>\mu_A(y)\vee\alpha$なので，正則である．

$A\wedge B$も同様に示される．(証明終)

以上により，次の定理を得る．

定理 3.1 正則な言語真理値の集合V_Rは拡張原理について閉じている．

3.3 極大元とその性質

正規で凸な言語真理値の集合$V_N\cap V_C$は拡張原理について閉じている．$V_N\cap V_C$の部分集合である区間真理値V_Iも閉じている．しかし，同じく$V_N\cap V_C$の部分集合である三角真理値V_Tは閉じていない．たとえば，$A=(0,0.5,1.0)$と$B=(0.4,0.7,0.9)$の論理和は特徴つけるのに$0.4,0.75,0.8,1.0$の4点が必要な四角形の言語真理値になってしまう．このように，閉じている集合の部分集合は必ずしも閉じるとは限らない．ただし，次のような性質は保証される．

定理 3.2 AとBを拡張原理について閉じているV_Lの任意の部分集合とする．この時，$A\cap B$は拡張原理について閉じる．

(証明) 任意の$a,b\in A\cap B$について，$a,b\in A$なので$a\vee b\in A$．同時に，$a\vee b\in B$なので，$a\vee b\in A\cap B$．

よって，$\vee$は$A \cap B$に閉じている．$\wedge, \sim$についても同様．(証明終)

たとえば，$V_N \cap V_R$も拡張原理について閉じる．しかし，$V_C \cap V_{M+}$は意味をなさない．$V_{M+} \subset V_C$だからである．これまでに扱った閉じた集合の間で，集合の包含関係の極大元は，V_N, V_C, V_Rである．

4 多重区間真理値

4.1 2階凸集合

凸な言語真理値をαカットすると$[0,1]$上の単一な閉区間，もしくは空集合となる．逆に，凸でない言語真理値には，αカットが必ず単一の区間では表現できないようなαが存在する．そこで，このαカットした時の連続した閉区間の最大数をその言語真理値のランクと呼ぶこととする．例えば，$A_{x \vee \sim x}$は，$\overline{A_{x \vee \sim x}}^{0}.6 = \{[0, 0.4], [0.6, 1.0]\}$であり，ランクは2．このランクで，凸でない言語真理値の集合を次のように分類する．

ランク1の言語真理値は凸であり，その全体はV_Cである．ランク2の言語真理値全体をV_{C^2}，そのαカットで定義される(クリスプ)集合をV_{I^2}と書く．同様に，ランクrの言語真理値をV_{C^r}とおく．

V_{C^r}が拡張原理について閉じているかどうかは，V_{I^r}の代数的性質によって決まる．

4.2 2重区間真理値の性質

$a_1 \cap a_2 = \phi$, $a_1 > a_2$となるV_Iの元について，$A = a_1 \cup a_2$で定義される言語真理値を2重区間真理値といい，$A = (a_1, a_2)$で表す．全ての2重区間真理値の集合をV_{I^2}と書く．

2重区間真理値の論理演算はやはり拡張原理を用いて定義することができる．次に示すように，区間真理値同士の演算に帰着して考えることができる．

補題 4.1 $A, B \in V_I$とする．

$$A \cap B = \phi \Rightarrow A \geq B \text{ or } B \geq A$$

$$A \cap B \neq \phi \Rightarrow A \cup B = [n_A \wedge n_B, p_A \vee p_B]$$

次の和集合に対する分配律が成立する．

補題 4.2 $A, B, C \in V_I$とする．

$$\begin{aligned} (A \cup B) \vee C &= (A \vee C) \cup (B \vee C) \\ (A \cup B) \wedge C &= (A \wedge C) \cup (B \wedge C) \\ \sim (A \cup B) &= (\sim A) \cup (\sim B) \end{aligned}$$

ただし，逆に論理演算についての分配律は次のように成立しないので注意が必要である．

補題 4.3 $A, B, C \in V_I$とする．

$$(A \vee B) \cup C \leq (A \cup C) \vee (B \cup C)$$

分配律より，2重区間真理値の演算は区間真理値の演算で表される．

$$(A \cup B) \vee (C \cup D) = A \vee C \cup A \vee D \cup B \vee C \cup B \vee D$$

従って，その結果は必ずしも二つの閉区間にはならない．

定理 4.1 V_{I^2}は拡張原理について閉じていない．

それゆえ，対応するランク2の言語真理値の論理演算も，ランク2を越えてしまうものがある．

5 おわりに

正規で凸以外の言語真理値の性質を検討した．拡張原理に基づく論理演算は，V_N, V_C, V_Rという極大元について閉じており，それらの積集合もまた閉じていることを示した．また，凸でない言語真理値の集合に，ランクの概念を導入し，同値類に分割することを提案した．しかし，これらの集合は拡張原理について閉じていないことがわかった．

参考文献

[1] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning (I), (II), (III)," *Information Sciences*, Vol.8, pp.199-249, pp.301-357, Vol. 9, pp.43-80, 1975.

[2] M.Mizumoto and K.Tanaka, "Some propeties of fuzzy sets of type 2," *Information and Control*, Vol.31, pp.312-340, 1976.

[3] 向殿，菊池，ファジィインターバル論理の提案，日本ファジィ学会誌，Vol.2, No.2, 1990.

[4] 向殿，講座ファジィ4 ファジィ論理，日刊工業新聞社，1992.

[5] 河口，"ファジィ真理値の論理演算として拡張t-ノルムについて，" 多値技報 MVL00-13, pp.95-101, 2000.

[6] 江本，向殿，"ファジィ論理における三角形真理値の代数的構造，" 第15回ファジィシステムシンポジウム，pp.535-538, 1999.

連絡先

菊池浩明 kikn@ep.u-tokai.ac.jp
東海大学工学部電気工学科 259-1292 神奈川県平塚市北金目1117 TEL: 0463-58-1211 FAX: 0463-59-4014

WE2−2

単調ファジィ論理関数とその同定問題について
Identifying Incompletely Specified Unite Fuzzy Switching Function

菊池 浩明　　中西祥八郎
Hiroaki Kikuchi　　Shohachiro Nakanishi

東海大学工学部電気工学科
Dept. of Electrical Engineering, Tokai University

Abstract: Fuzzy switching function f is *unite* if and only if f is either monotone increasing or monotone decreasing for each variable. This paper studies some fundamental properties of unite fuzzy switching function. Based on the properties, this paper clarifies a necessary and sufficient condition of any given incompletely specified function to be unite fuzzy switching function.

1 はじめに

関数が各変数について単調増加，または，単調減少であるとき，ユネイトであるという．各変数を置換しても同値であるような対称関数や，多数決関数などはユネイトになっており，論理関数の最も基本的なクラスの一つであるといえる．

本稿では，ユネイトなファジィ論理関数を研究する．ファジィ論理関数は，[0,1] 上の値を取る変数と，定数 0,1, 及び，否定，積，和の論理演算によって表現される写像 $f : V^n \to V$である．ユネイトなファジィ論理関数は，ファジィ積分と深く関係している．室伏は，ある条件を満たす Choquet 積分が単調増加なファジィ論理関数で表現できることを示した [1]. 高萩は，菅野積分で表現される写像がファジィ論理関数の一般化である多値クリーネ関数で表現できることを指摘し，その近似アルゴリズムを提案している [2]. 従って，単調関数の一般化であるユネイトなクラスの性質を明らかにすることは，それらの研究にも有益と考える．

一方，機械学習の観点では，関数は完全に定義されているわけではなく，限られた入出力例から普遍的な論理関係を同定することが一般的である．従って，部分的に定義された写像を与えたとき，それをファジィ論理関数で表現できるための条件が重要になってくる．これまでに，ファジィ論理関数の条件とその部分クラスである P 型の為の条件が明らかにされている [4, 3]. そこで，本稿では，任意に与えられた部分指定関数がユネイトファジィ論理関数で表現できるための必要十分条件を考察する．

2 ユネイトファジィ論理関数

2.1 基本定義

定義 2.1 真理値の集合を $V = [0,1]$, $V_2 = \{0,1\}$, $V_3 = \{0, 0.5, 1\}$ で表す．変数 x_iとその否定 $\sim x$ を，それぞれ正リテラルと負リテラルと呼ぶ．

定義 2.2 V^nの任意の元 $\boldsymbol{a} = (a_1, \ldots, a_n)$, $\boldsymbol{b} = (a_1, \ldots, a_n)$ について，$a_j = b_j (j = 1, \ldots, i-1, i+1, \ldots, n)$ かつ $a_i \leq b_i$ならば $f(\boldsymbol{a}) \leq f(\boldsymbol{b})$ であるとき，fを変数 x_iについて単調増加であるという．同様に，$a_i \leq b_i$ならば $f(\boldsymbol{b}) \leq f(\boldsymbol{a})$ であるとき，x_iについて単調減少であるという．

全ての変数について，単調増加または単調減少のどちらかであるような関数 $f : V^n \to V$をユネイトという．ユネイトであるファジィ論理関数をユネイトファジィ論理関数という．

ファジィ論理関数は，V_3^nの元だけで一意的に決まることが知られている．それゆえ，ユネイトなファジィ論理関数も V_3^nの元についてだけ議論すれば十分である．例えば，ファジィ論理関数 fが，変数 x_iについて単調増加であるのは，$\boldsymbol{a}_0 = (a_1, \ldots, a_{i-1}, 0, a_{i+1}, \ldots, a_n)$, $\boldsymbol{a}_{0.5} = (a_1, \ldots, a_{i-1}, 0.5, a_{i+1}, \ldots, a_n)$, $\boldsymbol{a}_1 = (a_1, \ldots, a_{i-1}, 1, a_{i+1}, \ldots, a_n)$ について，

$$f(\boldsymbol{a}_0) \leq f(\boldsymbol{a}_{0.5}) \leq f(\boldsymbol{a}_1)$$

であることを示せばよい．

2 値論理で成立する次の性質は，ファジィ論理（多値クリーネ）でも成立する．

定理 2.1 ファジィ論理関数 fが各変数について正リテラル (x) または負リテラル $(\sim x)$ のどちらか一方からなる加法形式で表現できる時，かつその時に限り，fはユネイトである．

定理を証明するために，ファジィ論理関数を部分集合として含む多値クリーネ関数について次の補題を示す．

補題 2.1 fを多値クリーネ関数とする．fが変数 x_iについて単調増加である時，かつその時に限り，x_iの負リテラルを含まない加法形式で表現できる．

(証明) 簡単化のため，2 変数について示す．

$(\Rightarrow)$ 多値クリーネ関数の表現定理により，任意の関数 $f(x,y)$ は $f(x,y) = xf(1,y) \vee \sim xf(0,y) \vee x \sim xf(0.5,y) \vee f(0,y)f(0.5,y)f(1,y)$ と表現できる．前提より，単調増加なので，$f(0,y) \leq f(0.5,y) \leq f(1,y)$. 従って，$f(x,y) = xf(1,y) \vee x \sim xf(0.5,y) \vee f(0,y) = x(f(1,y) \vee \sim xf(0.5,y)) \vee f(0,y) = xf(1,y) \vee f(0,y)$.

$(\Leftarrow)$ fの加法形式が x の負リテラルを含まないとき，任意の積項は正リテラルを含むかまったく含まないかのどちらか．それぞれ，F_1, F_0とおくと，$f(x,y) = xF_1 \vee F_0$ と表せる．$a \leq b$ となる Vの任意の元 a,b について，$f(a,y) = aF_1 \vee F_0 \leq bF_1 \vee F_0 = f(b,y)$ が成立するので，定義より x について単調増加である． (証明終)

まったく対称的にして，次の補題も証明できる．

補題 2.2 fが変数 x_iについて単調減少である時，かつその時に限り，x_iの正リテラルを含まない加法形式で表現できる．

以上により，定理 2.1を得る．

2.2 ユネイトの必要十分条件

定義 2.3 $a \in V$ と $s \in V_2$ について，

$$a^s = \begin{cases} x & \text{if } s = 1, \\ \sim x & \text{otherwise.} \end{cases}$$

と定める．更に，$\boldsymbol{a} = (a_1, \ldots, a_n) \in V_3^n$と$\boldsymbol{s} = (s_1, \ldots, s_n) \in V_2^n$について，

$$\boldsymbol{a}^{\boldsymbol{s}} = (a_1^{s_1}, \ldots, a_n^{s_n})$$

と拡張定義する．

定理 2.2 fをファジィ論理関数とする．fがユネイトであるのは，V_3^nの任意の元 $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}$について，

$$\boldsymbol{a}^{\boldsymbol{s}} \leq \boldsymbol{b}^{\boldsymbol{s}} \Rightarrow f(\boldsymbol{a}) \leq f(\boldsymbol{b}) \qquad (1)$$

を満たす $\boldsymbol{s} \in V_2^n$が存在するとき，かつその時に限る．

(証明) $(\Rightarrow)$ ユネイトであるとき，変数 x_iについて単調増加か単調減少である．単調増加ならば，$a \leq b$なる任意の $a,b \in V_3$について，$f(x_1, \ldots, x_{i-1}a, x_{i+1}, \ldots, x_n) \leq f(x_1, \ldots, x_{i-1}, b, x_{i+1}, \ldots, x_n)$. よって，$s_i = 1$ が式 (1) を満たす．一方，単調減少のとき，$a \leq b$ について，$f(x_1, \ldots, b, \ldots, x_n) \leq f(x_1, \ldots, a, \ldots, x_n)$. ここで，$s_i = 0$ とすると，$b^{s_i} \leq a^{s_i}$となり，式 (1) を成立させる．$\boldsymbol{s}$は各変数に独立に設定できるので，常に成立できる．

$(\Leftarrow)$ 式 (1) が成立しているとき，$s_i = 1$ ならば，変数 x_iについて単調増加である．なぜならば，i番目だけが異なる 3 つの元$\boldsymbol{a}_0 = (a_1, \ldots, a_{i-1}, 0, a_{i+1}, \ldots, a_n), \boldsymbol{a}_{0.5} = (a_1, \ldots, a_{i-1}, 0.5, a_{i+1}, \ldots, a_n), \boldsymbol{a}_1 = (a_1, \ldots, a_{i-1}, 1, a_{i+1}, \ldots, a_n)$ を考えると，$\boldsymbol{a}_0^{\boldsymbol{s}} \leq \boldsymbol{a}_{0.5}^{\boldsymbol{s}} \leq \boldsymbol{a}_1^{\boldsymbol{s}}$となり，前提より，$f(\boldsymbol{a}_0) \leq f(\boldsymbol{a}_{0.5}) \leq f(\boldsymbol{a}_1)$ が成立しなくてはならない．演算$\boldsymbol{a}^{\boldsymbol{s}}$は定義域と値域を V_3^nとする全単写なので，全ての V_3^nについて，単調増加であることが示される．$s_i = 0$ の時も，同様にして，$\boldsymbol{a}_1^{\boldsymbol{s}} \leq \boldsymbol{a}_{0.5}^{\boldsymbol{s}} \leq \boldsymbol{a}_0^{\boldsymbol{s}}$ なので，$f(\boldsymbol{a}_1) \leq f(\boldsymbol{a}_{0.5}) \leq f(\boldsymbol{a}_0)$ が成立し，x_iについて，単調減少であることが示される．(証明終)

この定理は，いかなるユネイトなファジィ論理関数も単調増加関数に帰着できることを導く．

系 2.1 ファジィ論理関数 f_uがユネイトであるとき，かつその時に限り，ある $\boldsymbol{s} = (s_1, \ldots, s_n) \in V_2^n$について，$F(x_1, \ldots, x_n) = f_u(x_1^{s_1}, \ldots, x_n^{s_n})$ を満たす単調増加ファジィ論理関数 Fが存在する．

ファジィ論理関数には，主項の和で表現されるP型と呼ばれるクラスがあり，その性質などが研究されている [3]. ここでは，ユネイトなファジィ論理関数がP型であることを証明する．ただし，この逆は成り立たない．

定義 2.4 積項 ρがファジィ論理関数 fと，任意の$\boldsymbol{a} \in V_2^n$について，$\alpha(\boldsymbol{a}) \leq f(\boldsymbol{a})$ であり，かつ，$\rho(\boldsymbol{a}) \leq \alpha(\boldsymbol{a})$ となる他の積項αが存在しない時，ρを fの（2 値）主項という．ファジィ論理関数 fが，fの全ての主項の和で表現されるとき，P 型であるという．

P 型ファジィ論理関数の必要十分条件は，次の一様性を満たすことである．

定義 2.5 ファジィ論理関数 fが，任意の$\boldsymbol{a} \in V_3^n$について

$$f(B_a) = \{1\} \quad \Rightarrow \quad f(\boldsymbol{a}) = 1,$$
$$f(B_a) = \{0\} \quad \Rightarrow \quad f(\boldsymbol{a}) = 0$$

であるとき，かつその時に限り，一様であるという．ただし，ここで，$B_a = \{\boldsymbol{b} \in V_2^n \mid \boldsymbol{a} \succeq \boldsymbol{b}\}$ とする．

定理 2.3 ユネイトなファジィ論理関数はP型である.

(証明) ユネイトなファジィ論理関数 f_uが, $\boldsymbol{a} \in V_3^n$について, $f_u(B_a) = \{0\}$ であると仮定する. $\boldsymbol{a} \in V_2^n$ならば, $B_a = \{\boldsymbol{a}\}$ なので自明. $\boldsymbol{a} \in V_3^n/V_2^n$のとき, $\boldsymbol{a}$には必ず 0.5 の値があるので, B_aにはそれらを 0, 1 と置き換えた$\boldsymbol{a}_0, \boldsymbol{a}_1$が必ず存在する. これらについて, $\boldsymbol{a}_0 \leq \boldsymbol{a} \leq \boldsymbol{a}_1$ が成り立つ. f_uはユネイトなので, $f_u(\boldsymbol{a}_0) = 0 \leq f_u(\boldsymbol{a}) \leq f_u(\boldsymbol{a}_1) = 0$ が成立しなくてはならず, これを満たす $f_u(\boldsymbol{a})$ は 0 しかない. $f_u(B_a) = \{1\}$ の時も, 同様にして, $f_u(\boldsymbol{a}) = 1$. よって, f_uは一様, すなわち, P型であることが示された. (証明終)

従って, 次も明らかである.

補題 2.3 ユネイト関数には相補項は生じない.

しかし, 次の反例があるため, 定理の逆は成り立たない.

P型であるがユネイトでないファジィ論理関数 f_p:

$$f_p(x, y) = x \sim y \vee \sim xy.$$

3 同定問題

V_3^nの部分集合 Aについてのみ定義された写像 $f : A \to V_3$が与えられたとき, fがユネイトファジィ論理関数である, すなわち, Aの任意の元 $\boldsymbol{a}$について, $F_u(\boldsymbol{a}) = f(\boldsymbol{a})$ であるようなユネイトなファジィ論理関数が存在するための条件を考える.

まず, f_0がファジィ論理関数で表現できるための必要十分条件が次のように知られている.

定義 3.1 量子化集合は, V^n の部分集合 $A = \{\boldsymbol{a}_1, \ldots, \boldsymbol{a}_m\}$ と $f : A \to V$について, 次式で定まる V_3^n の部分集合である.

$$\begin{aligned} C_1(f) &= \{\overline{\boldsymbol{a}}^\lambda \mid \boldsymbol{a} \in A, \lambda \in V, \overline{f(\boldsymbol{a})}^\lambda = 1\}, \\ C_0(f) &= \{\overline{\boldsymbol{a}}^\lambda \mid \boldsymbol{a} \in A, \lambda \in V, \overline{f(\boldsymbol{a})}^\lambda = 0\}, \\ C_U(f) &= \{\overline{\boldsymbol{a}}^\lambda \mid \boldsymbol{a} \in A, \lambda \in V, \overline{f(\boldsymbol{a})}^\lambda = 0.5\}. \end{aligned}$$

ただし, $\overline{x}^\lambda = 0$ if $0 \leq x \leq \min(\lambda, 1-\lambda) \leq 0.5, x \neq 0.5$; 1 if $0.5 \leq \max(\lambda, 1-\lambda) \leq x \leq 1, x \neq 0.5$; 0.5 otherwise.

定義 3.2 量子化集合の拡大は, $C_1^*(f) = C_1(f) \cup \{\boldsymbol{a} \in V_3^n \mid \boldsymbol{b} \in C_1(f), \boldsymbol{b} \succeq \boldsymbol{a}\}$, $C_0^*(f) = C_0(f) \cup \{\boldsymbol{a} \in V_3^n \mid \boldsymbol{b} \in C_0(f), \boldsymbol{b} \succeq \boldsymbol{a}\}$, $C_U^*(f) = C_U(f) \cup \{\boldsymbol{a} \in V_3^n \mid \boldsymbol{b} \in C_1^*(f), \boldsymbol{c} \in C_0^*(f), \boldsymbol{a} \succeq \boldsymbol{b}, \boldsymbol{a} \succeq \boldsymbol{c}\}$, とする.

定理 3.1 (ファジィ論理関数の必要十分条件) [4] $f : A \to V$ を表現するファジィ論理関数が存在するのは,

$$\forall i \neq j \in \{0, 1, U\}\ C_i^*(f) \cap C_j^*(f) = \phi, \tag{2}$$

$$C_U(f) \cap V_2^n = \phi \tag{3}$$

であるとき, かつその時に限る.

次はP型の必要十分条件である.

定義 3.3 i 番目の P-導出形は, 量子化集合の拡張 $C_0^*(f), C_1^*(f)$ について次のように定められる V_2^nの部分集合である.

$$\begin{aligned} P_1^0(f) &= C_1^*(f) \cap V_2^n,\ P_0^0(f) = C_0^*(f) \cap V_2^n, \\ P_1^{i+1}(f) &= P_1^i(f) \cup \left\{ \boldsymbol{a} \in V_2^n \;\middle|\; \begin{array}{l} \boldsymbol{b} \in C_U(f), \boldsymbol{b} \succeq \boldsymbol{a}, \\ B_b - \{\boldsymbol{a}\} \subset P_0^i(f) \end{array} \right\}, \\ P_0^{i+1}(f) &= P_0^i(f) \cup \left\{ \boldsymbol{a} \in V_2^n \;\middle|\; \begin{array}{l} \boldsymbol{b} \in C_U(f), \boldsymbol{b} \succeq \boldsymbol{a}, \\ B_b - \{\boldsymbol{a}\} \subset P_1^i(f) \end{array} \right\}. \end{aligned}$$

P-導出形が収束したとき, それらの和を, 単にP-導出形と呼び, $P_0(f), P_1(f)$ と書く.

定理 3.2 (P型の必要十分条件) [3] $f : A \to V$ を部分指定ファジィ論理関数とするとき, fを表すP型ファジィ論理関数が存在するのは,

$$P_0(f) \cap P_1(f) = \phi$$

であるとき, かつ, その時に限る.

さて, これらにより, 任意の部分指定関数 $f : A \to V$ がユネイトなファジィ論理関数で表現出来るための必要条件を考える.

補題 3.1 $f : A \to V$をあるP型ファジィ論理関数の制限とする. Aの任意の元$\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}$について,

$$\boldsymbol{a} \leq \boldsymbol{b} \Rightarrow f(\boldsymbol{a}) \leq f(\boldsymbol{b}) \tag{4}$$

であるとき, かつその時に限り, Aの任意の元$\boldsymbol{a}$について $F_+(\boldsymbol{a}) = f(\boldsymbol{a})$ を満たす単調増加ファジィ論理関数 F_+が存在する.

(証明) ($\Leftarrow$) A は V_3^nの部分集合なので, fを表現する単調増加関数 Fがあるとき, fが単調性を満たすのは明らか.

($\Rightarrow$) Aについて単調増加である時, $V_2 - P_1(f) \cup P_0(f)$ のある元 $\boldsymbol{a}$ について, 単調性が成立しない, すなわち, $\boldsymbol{a} \leq \boldsymbol{b}$となる $\boldsymbol{b} \in P_0(f)$ と, $\boldsymbol{c} \leq \boldsymbol{a}$となる $\boldsymbol{a} \in P_1(f)$ の両方が存在すると仮定する (もしも後者がなければ, $F_+(\boldsymbol{a}) = 0$ とすれば単調になるので, 両方なくてはなら

ない)．ところが，今，$\boldsymbol{c} \leq \boldsymbol{a} \leq \boldsymbol{b}$ であるのに，$f(\boldsymbol{c}) = 1 \not\leq f(\boldsymbol{b}) = 0$ であり，これは A について単調であるという前提に矛盾する．よって，必ず単調増加ファジィ論理関数 F_+ は存在する．　(証明終)

補題 3.2 $f : A \to V$ をある P 型ファジィ論理関数の制限とする．ある $\boldsymbol{s} \in V_2^n$ が存在し，A の任意の元 $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}$ について，

$$\boldsymbol{a}^{\boldsymbol{s}} \leq \boldsymbol{b}^{\boldsymbol{s}} \Rightarrow f(\boldsymbol{a}) \leq f(\boldsymbol{b}) \qquad (5)$$

であるとき，かつその時に限り，A の任意の元 $\boldsymbol{a}$ について $F_u(\boldsymbol{a}) = f(\boldsymbol{a})$ を満たすユネイトなファジィ論理関数 F_u が存在する．

(証明) 式 (5) が必要条件であるのは，定理 2.2から明らか．十分条件であることを示す．式 (5) が成立するとき，$f^{\boldsymbol{s}}(\boldsymbol{x}) = f(\boldsymbol{x}^{\boldsymbol{s}})$ で写像 $f^{\boldsymbol{s}} : A^{\boldsymbol{s}} \to V$ を定める．ただし，$A^{\boldsymbol{s}} = \{\boldsymbol{a}_1^{\boldsymbol{s}}, \ldots, \boldsymbol{a}_m^{\boldsymbol{s}}\}$ とする．ここで，$(\boldsymbol{a}^{\boldsymbol{s}})^{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{a}$ であることに注意すると，式 (5) は，$A^{\boldsymbol{s}}$ について単調増加に同値．従って，補題 3.1により，$f^{\boldsymbol{s}}$ を表現する単調増加関数 F_+ が存在する．従って，系 2.1により，F_+ に対応し，f を表現するユネイトなファジィ論理関数 F_u が存在する．　(証明終)

以上より，次の定理を得る．

定理 3.3 f を V^n の部分集合 A を定義域とする写像 $f : A \to V$ とする．f を表現するユネイトなファジィ論理関数が存在するための必要十分条件は，f が次を全て満たすことである．

$$\forall i \neq j \in \{0, 1, U\}\ C_i^*(f) \cap C_j^*(f) = \phi, \qquad (6)$$

$$C_U(f) \cap V_2^n = \phi, \qquad (7)$$

$$P_0(f) \cap P_1(f) = \phi, \qquad (8)$$

$$\forall \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b} \in A\, \exists \boldsymbol{s} \in V_2^n\ \boldsymbol{a}^{\boldsymbol{s}} \leq \boldsymbol{b}^{\boldsymbol{s}} \Rightarrow f(\boldsymbol{a}) \leq f(\boldsymbol{b}). \qquad (9)$$

3.1 例題

$A = \{(0.3, 0.2), (0.8, 0.5)\}$ について，$f(0.3, 0.2) = 0.3$, $f(0.8, 0.5) = 0.5$ とする写像 f を表現する 2 変数ユネイトファジィ論理関数を求める．

これに対する，量子化集合と P 導出形を表 1と 2で表す．定理 3.1と定理 3.2により，P導出形は互いに素であるので，f を表す P 型ファジィ論理関数が存在する．$\boldsymbol{s} = (1, 0)$ と置くと，全ての $P_1(f) \cup P_0(f)$ の元について，表 3で示されるような単調増加関数に帰着できる．これより，定理 3.3より，ユネイトなファジィ論理関数 (表 4) が存在することが示された．

表 1: 量子化集合 $C_0(f) \cup C_U(f) \cup C_1(f)$

$y\backslash x$	0	.5	1
0	.0	.5	
.5		.5	.5
1			

表 2: P-導出形 $P_1(f) \cup P_0(f)$

$y\backslash x$	0	.5	1
0	0	.5	1
.5		.5	.5
1			0

表 3: $s = (1, 0)$ による単調関数への帰着

$y\backslash x$	0	.5	1
$(1)^0$			0
$(.5)^0$		.5	.5
$(0)^0$	0	.5	1

表 4: 同定されたユネイト関数 $F(x, y) = x \sim y$

$y\backslash x$	0	.5	1
1	0	0	0
.5	0	.5	.5
0	0	.5	1

4 おわりに

部分指定された写像をユネイトファジィ論理関数で表現するための必要十分条件を明らかにした．誤差最小問題や任意の定数を許した多値クリーネ関数への拡張を今後の課題とする．

参考文献

[1] 室伏,「半原子元について」, Uncertainty 研究会資料, pp. 1-17, 1993

[2] E. Takahagi, "An Identification Method of Fuzzy Rules using Fuzzy Measures," Proc. of 4th Asian Fuzzy Systems Symposium, pp.717-721, June 2000.

[3] H. Kikuchi and M. Mukaidono, "Identification of P-Fuzzy Switching Functions," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E78-A, No.7, July 1994

[4] 菊池, 向殿, ファジィ論理関数の同定問題– 部分関数がファジィ論理関数で表されるための必要十分条件, 信学論, D-I, Vol. J77-D-I, No.7, pp.465-476, 1994

[5] 向殿, 講座ファジィ4 ファジィ論理, 日刊工業新聞社, 1992.

連絡先

菊池浩明 kikn@ep.u-tokai.ac.jp
東海大学工学部電気工学科 259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117 TEL: 0463-58-1211 FAX: 0463-59-4014

WE2−3

ファジィ検定法の提案

A Proposal of Fuzzy Test for Statistical Hypothesis

加藤 裕一	高橋 将人	大月 隆一	山口 静馬
Yuichi Kato	Masato Takahashi	Ryuichi Ohtsuki	Shizuma Yamaguchi
島根大学	島根大学	島根大学	山口大学
Shimane Univ.	Shimane Univ.	Shimane Univ.	Yamaguchi Univ.

Abstract One of the typical test problem for statistical hypotheses is to test the mean μ based on the data randomly obtained from the population. In such a case, we specify the null hypothesis $H_0(\mu \neq \mu_0)$ or the alternative hypothesis $H_1(\mu = \mu_1 \neq \mu_0)$ and lead to a decision to accept or reject the hypotheses by use of the data and the significant level α of the test. As is well-known, the value of the power of the test heavily decreases at the point μ_1 close to μ_0. One of this cause is the crisp hypothesis mentioned above. In this paper, we propose a fuzzy hypothesis and study the test processes from the viewpoint of possibility and necessity.

1 はじめに

典型的な検定問題として, 母集団の平均値 μ を測定データに基づいて, 帰無仮説 $H_0 : \mu = \mu_0$ と対立仮説 $H_1 : \mu \neq \mu_0$ を立て, 有意水準 α で検定する問題がある。既に考察されているように, この問題では,2種類の異なった過誤が存在する。第一の過誤と呼ばれるものは,H_0 が正しいところを, たまたま得られたデータに基づき H_1 と判定するものてある。この過誤が生起する確率は α で, 通常 $\alpha = 0.01, 0.05$ がよく利用される。これは H_0 の棄却域をデータから算定される検定統計量 $\bar{X}$ の実現値 $\bar{x}$ が棄却域に落ちる確率を α と定めるものである。他の一つは, 第二種の過誤と呼ばれるもので,H_1 が正しいところを H_0 と判断するものである。この確率は β で生起する。問題により, データ数 n が自由に取れる場合や出来ない場合等様々な状況で検定が行われるが, 重要なことは検定の背後にどのような危険が潜んでいるかを明瞭にしておくことである。

本研究は, まず上記従来の検定法を復習して,$\mu \neq \mu_0$ ではあるが真の μ が μ_0 に近いとき,$\beta \approx 1 - \alpha$ となり, 第二種の過誤を非常に大きくする危険を指摘する。この危険は, 上記したクリスプな仮説を立てたことに起因する。これを暖和する方策としてあいまいな帰無仮説 $\tilde{H}_0 : \mu = \tilde{\mu_0}$ を立て可能性と必然性の観点から検定する。本試みは,μ_0 の近傍を含めて柔軟に主観的に判断することを提案するものである。

2 従来の検定法

分散 σ^2 の分かっている正規母集団 $N(\mu, \sigma^2)$ から無作為に抽出した標本 $\{x_i | i = 1, \cdots, n\}$ が与えられているとき,$H_0 : \mu = \mu_0$ ($H_1 : \mu \neq \mu_0$) を立てて検定する問題を考察する。従来の検定法は,$x_i (i = 1, \cdots, n)$ は確率変数 X_i の実現値であるとして,$\bar{X} = (X_1 + \cdots + X_n)/n$ が,H_0 の基では $N(\mu_0, \sigma^2/n)$ に従うことを ($\bar{X} \sim N(\mu_0, \sigma^2/n)$) を利用する。更に,$Z = (\bar{X} - \mu)/(\sigma/\sqrt{n})$ が $N(0, 1^2)$ に従うことを利用して,$P(|Z| \geq k_\alpha) = \alpha$ となる基準で H_0 の棄却域 R を定め (図1参照),Z の実現値 z が R に落ちか否かによって検定する。従って, 棄却域近傍で z のわずかな値の違いで判定が異なる。次に第二種の過誤 β は $\mu \neq \mu_0$ である μ_1 に対して次式で算定される。

$$
\begin{aligned}
\beta &= P_r(\mu_0 - k_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \bar{X} < \mu_0 + k_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \mid H_1) \\
&= P(\frac{\mu_0 - \mu_1}{\sigma/\sqrt{n}} - k_\alpha < Z < \frac{\mu_0 - \mu_1}{\sigma/\sqrt{n}} + k_\alpha) \\
&= P(Z < \frac{\mu_0 - \mu_1}{\sigma/\sqrt{n}} + k_\alpha) - P(Z < \frac{\mu_0 - \mu_1}{\sigma/\sqrt{n}} - k_\alpha)
\end{aligned}
$$

図2は, α=0.05 の場合の β を $d = \frac{\mu_0 - \mu_1}{\sigma/\sqrt{n}}$ に対して示したものである。$\mu_1 \neq \mu_0$ であるが, μ_0 に近い μ_1 即ち, $d = 0$ の近傍では $\beta = 1 - \alpha$ となり, かなり高い第二種の過誤がある。この原因は, 論理としてクリスプな仮説を立てたことに起因する。

3 ファジィ仮説による検定

2. で示した従来の仮説検定法に存在する論理的な不備を緩和する一つの方策として, 次の様にファジィな言明拡張する。

$\tilde{H}_0$: μ はだいたい μ_0 である。($\mu = \tilde{\mu_0}$)

$\tilde{H}_1$: μ はだいたい μ_0 ではない。($\mu \neq \tilde{\mu_0}$)

この言明は μ がだいたいこの程度であればよい, という判断者の主張を表明したもので,H_0,H_1 に示すように μ を峻別する必要がないという立場である。具体的には判断者の主張をメンバーシップ関数で設定して, ファジィ

な言明を明瞭化しておけばよい。以下この言明の検定を従来法に習って考察する。

H_0 に対応する $\tilde{H}_0$ の検定統計量として,$\bar{X}_H = \bar{X}_0 + \tilde{\mu}_0$, ここで $\bar{X}_0 = X - \mu_0, X_0 \sim N(0, \sigma^2/n)$, を考える。$\bar{X}_H$ は Kaufmann に定義された Hybrid Number である。考察を具体的に進めるために $\tilde{\mu}_0$ を三角型ファジィ数で与え, 大数の法則を満足させる必要 (η : 定数, $n \to \infty$ で $\tilde{\mu}_0 \to \mu_0$) から　$\tilde{\mu}_0 = (\mu_0 - \eta\frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \mu_0, \mu_0 + \eta\frac{\sigma}{\sqrt{n}})_T$
と設定する。従って, 従来法に対応して

$$\begin{aligned} Z_H &= (\bar{X}_H - \mu_0)/(\sigma/\sqrt{n}) \\ &= Z + (-\eta, 0, \eta)_T \\ &= Z + 0_\eta \end{aligned}$$

が $\bar{X}$ の実現値を利用して棄却域に落ちるか否かを議論すればよい。

Z の実現値 z に従って,Z_H と棄却域との関係は図 3 に示す 7 つのケースが考えられる。$\tilde{H}_0$ を容認する必然性 $Nes\bar{R}(Z)$, 可能性 $Pos\bar{R}(Z)$ から整理するとそれぞれ

$$Nes\bar{R}(Z) = (-k_\alpha, -k_\alpha + \eta, k_\alpha - \eta, k_\alpha)_{Tr}$$
$$Pos\bar{R}(Z) = (-k_\alpha - \eta, -k_\alpha, k_\alpha, k_\alpha + \eta)_{Tr}$$

となる (図 4 参照)。
第二種の過誤については当日報告する。

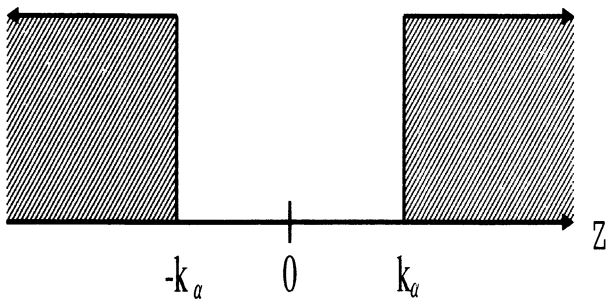


図 1 H_0 の棄却域

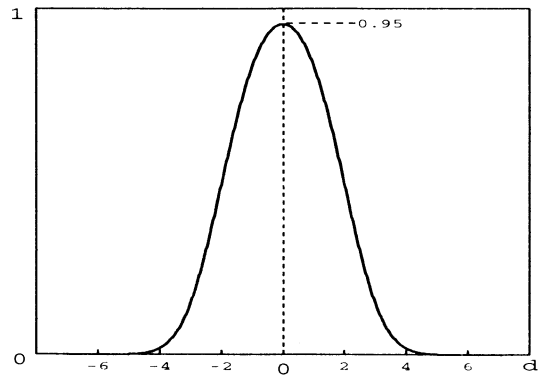


図 2 $\alpha = 0.05$ の場合の β

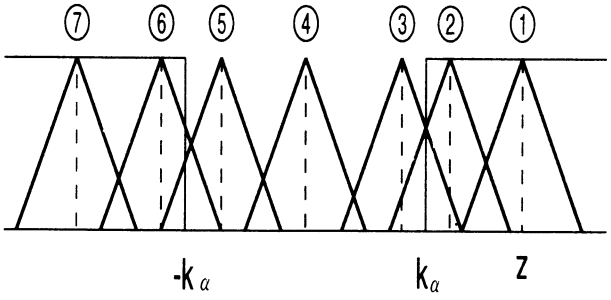


図 3 実現値 z による z_H の位置

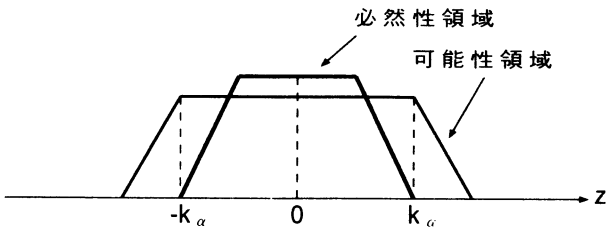


図 4 $\tilde{H}_0$ を容認する必然性・可能性領域

問い合わせ先

〒 690-8504　松江市西川津町 1060
島根大学総合理工学部
加藤 裕一
TEL (0852)32-6470
FAX (0852)32-6489
E-mail ykato@.cis.shimane-u.ac.jp

WE3−1

ファジィ積分型ファジィ制御

Fuzzy Integral Type Fuzzy Control

高萩栄一郎
Eiichiro TAKAHAGI
専修大学
Senshu University

Abstract As fuzzy switching functions with constants is displayed as fuzzy measure Sugeno integral models, we proposed Choquet integral type calculations and defined Chqout integral gravity type fuzzy control. We compare the model with min-max gravity method and product-sum gravity method, and show that this models have property close to min-max gravity methods. Lastly, we show the example of liner control using Choquet integral gravity model and discuss the relations with singleton type fuzzy control.

1 はじめに

従来、ファジィ積分とファジィ論理やファジィ制御などとは、関係が少ないとされてきた。[2] で、ファジィ積分とファジィ論理関数の関係を明らかにし、ファジィ制御での利用の可能性を示した。本稿では、従来の Min-Max 重心法は、菅野積分で表現できることを示し、あらたに、菅野積分の部分を Choquet 積分にした Choquet 積分型のファジィ制御を定義し、その理論的な優位性を示した。また、数値例を作成し、従来の Min-Max 重心法、代数積加算重心法などと比較し、Min-Max 重心法とほぼ同じ結果を選られた。また、補正ルールを追加することにより、線型な制御を行うことも可能である。

2 ファジィ論理関数とファジィ積分

単調な（否定を含まない）ファジィ論理関数は、ファジィ測度菅野積分モデルで表現できることを示した [2]。

2.1 記号等

入力変数の数を n とし，ファジィ論理関数の変数は，$x_1,\ldots,x_n$ とする．入力変数の添字集合を $X = \{1,2,\ldots,n\}$ とし，ファジィ積分の入力値を，$h(1),\ldots,h(n)$ とあらわす $(h(i)=x_i,\forall i)$。

- $\mu : 2^X \to [0,1]$
- $\mu(\emptyset) = 0$
- $A \subset B$ ならば $\mu(A) \leq \mu(B)$ (単調性)

菅野積分を用いるとき，正規性 $\mu(X)=1$ を仮定することが多いが，ここでは，正規性を仮定しない．$\mu(X) \in [0,1]$ であり，菅野積分を行う上で，問題はない．ファジィ積分には，菅野積分 (式 (1)) または，Choquet 積分 (式 (2)) を用い、$\vee$ と $\wedge$ は，それぞれ max と min を表す。

$$(\mathrm{S})\int h d\mu \equiv \bigvee_{r\in[0,1]} [r \wedge \mu(\{x; h(x) > r\})] \quad (1)$$

$$(\mathrm{C})\int h d\mu \equiv \int_0^1 \mu(\{x; h(x) > r\}) dr \quad (2)$$

2.2 ファジィ論理関数の菅野積分表示

n 変数の任意の単調な定数係数を持ったファジィ論理関数 [1]$f(x_1,\ldots,x_n)$ は、

$$\mu(A) = f(x_1,\ldots,x_n), \forall A \in 2^X \setminus \emptyset \quad (3)$$

$$x_i = 1 \quad \text{if} \quad i \in A$$
$$x_i = 0 \quad \text{if} \quad i \notin A$$
$$\mu(\emptyset) = 0 \qquad C = f(0,\ldots,0)$$

とすると、

$$f(x_1,\ldots,x_n) = (\mathrm{S})\int h d\mu \vee C \quad (4)$$

である（ただし、$h(i) = x_i, \forall i$）[1]

否定を含まない加法形式のファジィ論理関数を

$$F = (c_{A_1} \wedge \alpha_{A_1}) \vee \ldots \vee (c_{A_m} \wedge \alpha_{A_m}) \vee C \quad (5)$$

で表す。ただし，α_{A_j} は単積項、c_{A_j} は，α_{A_j} にかかる定数係数とする．この場合，簡単に、

$$\mu'(A_j) = c_{A_j} \quad j = 1,\ldots,m \quad (6)$$

$$\mu'(B) = 0 \quad \text{if } B \notin \{A_1,\ldots,A_m\} \quad (7)$$

として、

$$\mu(B) = \max_{D\subseteq B} \mu'(D) \quad (8)$$

でファジィ測度を割り当てることもできる。

[1] ファジィ測度の定義から、$\mu(\emptyset)=0$ を外し、$\mu(\emptyset) = f(0,\ldots,0)(= C)$ として、菅野積分を行えば、$f(x_1,\ldots,x_n) = (\mathrm{S})\int h d\mu$ となる。

3 菅野積分型ファジィ制御

よく知られたファジィ制御、Min-max 重心法は、ファジィ論理関数を使っているので、菅野積分で表現できる。

3.1 Min-max-重心法

$u_1, \ldots, u_p$ クリスプな入力値 (p:入力値の数,m:入力値のファジィ集合の数 (ファジィ分割の数))

$B_{11}, \ldots, B_{mp}$ 前件部のファジィ集合のメンバーシップ関数。B_{ij} の j は、入力値の番号、i はファジィ集合の番号、例えば、NB は 1、NM は 2、NS は 3、... とすることができる。例：入力 2 の NS→B_{32}

Y 後件部のファジィ集合の output の universe

G 出力値のファジィ集合のメンバーシップ関数

$D_1, \ldots, D_q$ 後件部のメンバーシップ関数 (q:後件部のファジィ集合の数（Y のファジィ分割数）)

$R_i, i = 1, \ldots, r$ i 番目のルールの前件部の条件の集合 (r:ファジィルールの数)。前件部の条件 $u_j = B_{ij}$ は、(i,j) のように前件部のファジィ集合の番号と入力値の番号の組で表現する。

$T_i, i = 1, \ldots, r$ i 番目のルールの後件部のファジィ集合

例えば、ルール 5 が、if $u_1 = B_{31}$ and $u_2 = B_{22}$ then $G = D_4$ であれば、$R_5 = \{(3,1),(2,2)\}, T_5 = 4$ となる。あるクリスプな出力値 $y \in Y$ のメンバーシップ値は、

$$G(y) = \bigvee_{k=1}^{q} [D_k(y) \wedge (\bigwedge_{(i,j)\in R_k} B_{ij}(u_j))], \qquad (9)$$

で、非ファジィ化 (y^*) は、重心演算とする。

$$y^* = \frac{\int_Y yG(y)dy}{\int_Y G(y)dy} \qquad (10)$$

3.2 Min-max 重心法の菅野積分表示

式 (9) は、定数係数を持ったファジィ論理関数である。すなわち、各 $y \in Y$ に対して、

$$x_{ij} = B_{ij}(u_j) \qquad (11)$$

$$c^y_{R_k} = D_{T_k}(y) \qquad (12)$$

とおけば、

$$G(y) = \bigvee_{k=1}^{r} [c^y_{R_k} \wedge (\bigwedge_{(i,j)\in R_k} x_{ij})]. \qquad (13)$$

となる。このとき、$c^y_{R_k}$ は、定数係数 (後件部のファジィ集合のメンバーシップ関数は与件)、x_{ij} は、定数係数つきのファジィ論理関数の入力変数となるので、式 (13) は、定数係数を持ったファジィ論理関数である。定数係数を持ったファジィ論理関数は、菅野積分で表現できるので、Min-max 重心法は次のような菅野積分を使って表現できる。

- $X = \{(1,1), \ldots, (i,j), \ldots, (m,p)\}$.
- $\mu'_y : 2^X \to [0,1]$
- $\mu_y : 2^X \to [0,1]$ (ファジィ測度)
- $h(i,j) = B_{ij}(u_j)$.
- μ' の割り当て。

$$\begin{aligned} \mu'_y(R_k) &= D_{T_k}(y) \quad , k = 1, \ldots, r \\ \mu'_y(D) &= 0 \qquad \text{if } D \notin \{R_1, \ldots, R_r\} \end{aligned} \qquad (14)$$

- ファジィ測度 μ の割り当て

$$\mu_y(D) = \max_{E\subseteq D} \mu'_y(E) \qquad (15)$$

- 菅野積分

$$G(y) = (\mathrm{S}) \int h d\mu_y \qquad (16)$$

- 重心演算 (非ファジィ化、y^*:操作量) は、式 (10)

以上の方法を「菅野積分重心法」とよぶ。ただし、この方法は、Min-max 重心法とまったく同じである.

4 Choquet 積分型ファジィ制御

4.1 Choquet 積分型ファジィ制御

式 (16) でのルールの統合を菅野積分から Choquet 積分

$$G(y) = (\mathrm{C}) \int h d\mu_y \qquad (17)$$

に変更すれば、Choquet 積分重心法によるファジィ制御となる。

4.2 計算量の削減

ここで、任意の $D \in 2^X$ を固定して、$y \in Y$ に関して、$\mu_y(D)$ は、連続かつ積分可能ととする。すなわち、$D_i(y)$ は、$\forall i$ に関して、y は、連続かつ積分可能という仮定である。$D_i(y)$ は、後件部のファジィ集合のメンバーシップ関数であり、三角型、台形型、2 次関数型などである

ので、この仮定は、強い制約とはならないだろう。この仮定のもとでは、Choaquet 積分の場合、非ファジィ化の計算は、簡単なものになる。

$$y^* = \frac{\int_Y yG(y)dy}{\int_Y G(y)dy} = \frac{(\mathrm{C})\int hd\mu^*}{(\mathrm{C})\int hd\mu^+} \tag{18}$$

ただし、

$$(\mathrm{C})\int hd\mu^+ = 0 \text{ ならば } y^* = 0 \tag{19}$$

$$\mu^*(D) = \int_Y [y\mu_y(D)]dy \tag{20}$$

$$\mu^+(D) = \int_Y \mu_y(D)dy \tag{21}$$

となる。ただし、μ^* は、ファジィ測度の単調性を満たすとは限らない. 図 1 に示すように、この計算 (18) は、制御時には、簡単に行うことができる。

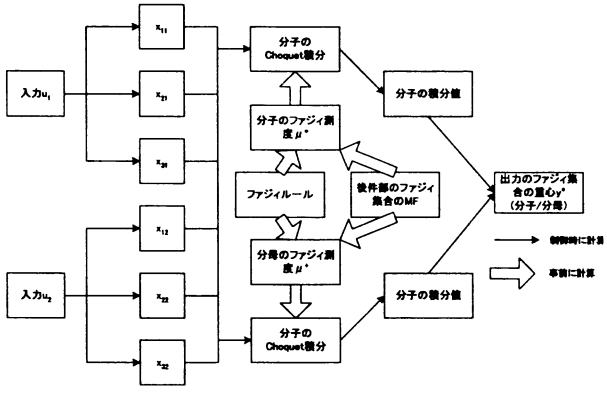


図 1: Choquet 積分型ファジィ制御

4.3 ファジィ積分型の利点

- 計算は、大小比較（ソーティング）と四則演算からのみ構成されている。
- 式 (20) と (21) の計算は、制御時ではなく、事前に計算できる（制御時に重心計算を行う必要はない）。
- ルールの数を増やしても、制御時の計算量はほとんど変わらないので、ルール数の増大が可能である。

4.4 比較

比較のため、図 2 のようなファジィ集合と、表 1 のようなルールを使用した場合で比較する。

図 3 は、入力 2 を-15($u_2 = -15$) で固定し、入力 1(u_1) を変化させたとき、Min-max 重心法、代数積加算重心法、Choquet 積分重心法で計算した操作量 (y^*) がどのように変化するのかをグラフ化したものである。このグラフによれば、Choquet 積分重心法は、Min-max 重心法に近い性質を持っていることがわかる。

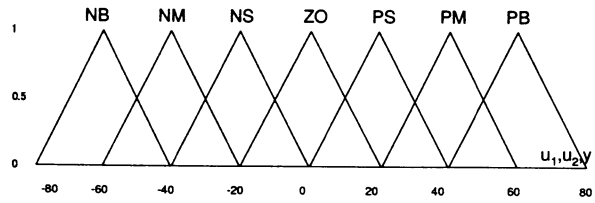


図 2: 7 分割のファジィ集合

$u_2 \setminus u_1$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PB			PM	PB			
PM				PM			
PS	NM		ZE	PS			
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NS				NS	ZE		PM
NM				NM			
NB				NB	NM		

表 1: ファジィルール

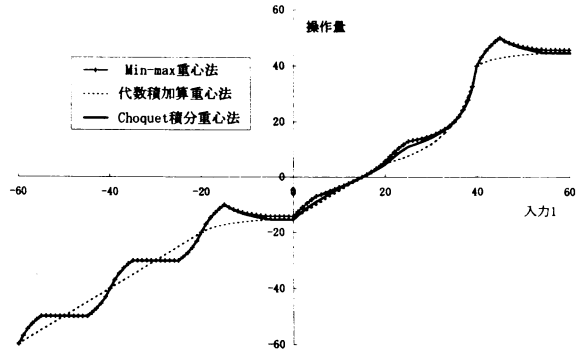


図 3: 入力 2 を-15 に固定したときの操作量の変化

また、図 3 から、各制御法で直線や滑らかなではないことや Min-max 重心法と Choquet 積分重心法では、u_1 に対しての出力が、単調増加ではないことがわかる。

5 線型の制御

ルールの設定の仕方によって、線型な出力が可能な場合がある。例として、表 2 のルールで、

$$y^* = \alpha u_1 + \beta u_2 \tag{22}$$
$$(\alpha + \beta = 1, \alpha, \beta \geq 0, u_1, u_2 \in [0,1])$$

となるルールを提示する (表 3)。

$h(1,1) = u_1, h(2,1) = 1 - u_1, h(1,2) = u_2, h(2,2) = 1 - u_2$ として、表 3 のように設定する。表 3 で、形状

表 3: 線型となる $\mu_y(D)$

ルール	D	$\mu^+(D)$	$\mu^*(D)$	$\mu_y(D)$ の中心	形状
S	$\{(1,1),(1,2)\}$	0.5	0	0	三角形
B	$\{(2,1),(2,2)\}$	0.5	0.5	1	三角形
M_1	$\{(2,1),(1,2)\}$	0.5	0.5α	α	三角形
M_2	$\{(1,1),(2,2)\}$	0.5	0.5β	β	三角形
S と M_1 から導出	$\{(1,1),(2,1),(1,2)\}$	1	0.5α	0.5α	台形
B と M_2 から導出	$\{(1,1),(2,1),(2,2)\}$	1	$0.5+0.5\beta$	$0.5+0.5\beta$	台形
S と M_2 から導出	$\{(1,1),(1,2),(2,2)\}$	1	0.5β	0.5β	台形
B と M_1 から導出	$\{(2,1),(1,2),(2,2)\}$	1	$0.5+0.5\alpha$	$0.5+0.5\alpha$	台形
S,B,M_1,M_2 から導出	X	1	0.5	0.5	台形
	他	0	0	-	なし

表 2: 2 変数の例のルール

$u_2 \setminus u_1$	S	B
S	S	$M_1(\alpha)$
B	$M_2(\beta)$	B

が三角形とあるのは、(中心 -0.5, 中心, 中心 $+0.5$) で構成される面積 0.5 の左右対称な三角形のメンバーシップ関数で、台形とあるのは、(中心 -0.75, 中心 -0.25, 中心 $+0.25$, 中心 $+0.75$) で構成される面積 1 の左右対称な台形のメンバーシップ関数である。

§4 とは異なり、補正するためのルールを追加している。形状が三角形のものは、基本ルールであり、$\mu_y(\{(1,1),(2,1),(1,2)\})$ などの形状が台形のものは、基本ルールから導出されたものである。導出方法は、[3] を参照されたい。

線型な制御を行うために、式 (18) に注目して、分母が定数 T

$$T = (\mathrm{C})\int h d\mu^+ \tag{23}$$

になるように、μ^+ を定めた。実際、表 3 での μ^+ では、どのような $h(1,1), h(1,2)$ と $h(2,1) = 1-h(1,1), h(2,2) = 1-h(1,2)$ に対しても、$T = 0.5$ となる。

分子が式 (22) を定数倍したもの

$$(\mathrm{C})\int h d\mu^* = T[\alpha u_1 + \beta u_2] \tag{24}$$

になるように μ^* を求めた。

この μ^+, μ^* から、式 (20) と式 (21) を満たした上に、妥当な形状のメンバーシップ関数 $\mu_y(D)$ を定めたものが表 3 である。

参考文献

[1] 荒木智行, 向殿政男: 定数係数をもったファジー論理関数について, 電子情報通信学会論文誌,D-I Vol.J81-D-I NO.9, pp1037-1047,1998.

[2] Eiichiro TAKAHAGI: On Fuzzy integral representation in fuzzy switching functions,fuzzy rules and fuzzy control rules, IFSA'99, Vol.1, pp.289-293, 1999.

[3] 高萩栄一郎: Choquet 積分型ファジィ制御 – ファジィ測度の補正と線型な制御 – 第 5 回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論文集, 日本ファジィ学会, 2000.

問い合わせ先

〒 214-8580 川崎市多摩区東三田 2-1-1
専修大学商学部
高萩 栄一郎
TEL (044)900-7988
FAX (044)900-7849
E-mail takahagi@isc.senshu-u.ac.jp

WE3−2

純粋ファジィ批判：導入編
Lーノルムについて（3）
ファジィモデル　対　その他のモデル

Criticism to Fuzzy Theory : Introduction
About L-norm (3)
Fuzzy Model vs Other Models

山口人生
Jinsei Yamaguchi

神奈川大学理学部情報科学科
Dept. of Information Science, Kanagawa University

Abstract: The goal of this series is to criticize fuzzy theory from a viewpoint of logical foundation. This third article is to argue the essential difference between fuzzy models and the other models.

1．序論

我々は、ファジィ理論の基本思想に批判を加える議論をしている最中である。今回は、そのシリーズの第３回目。

前回の発表後に、座長から質問があった。（九州のドンです。ついでに言うと、ホンダの研究所に勤めている白人からも変な質問があったけど、これは無視。どこにもいるのです、力が無いのに、目立ちたがるのが。）質問の内容を簡単に要約すれば、

「どのシステムも完璧ではない」

という一句に尽きる。常識的な意見ではあるが、この一句の背後に、真理が潜んでいることを、発言した当人は知る由もなかろう。今回は、まず、この点の確認から始めたい。

凡そ、（研究室であろうが、工場であろうが）物作りをして、“完璧”ということは有り得ない。しかし、結果としての作品・製品・システムを眺めた時、そこには、様々なレベルの“完璧さ”の違いがあることに注意せねばならない。

第一レベルは、製品の“歩留り”のレベルである。例えば、ＤＲＡＭが５％の不良品を出すというレベル。このレベルの話は、（９５％は正常品ができるのだから）以下の話とは直接関係しないことは明らかであろう。（工場の製造システム全体を問題にしているのではない点に注意。）

第二レベルは、“バグ”のレベルである。完成品（と思っていた製品、システム）の中に“修正可能ではあるが、そのまま放置して置けない欠陥”があるケース。この場合は、自動車のように製品を回収する（リコール）ケースから、ソフトウェアのように修正ソフトを配るケースやシステムのチューンアップまで、様々な方法で対処する。

しかし、このケースも以下の議論の本質とは、直接、関係しないことを、この時点で確認しておかなければならない。つまり、この点が判っていなければ、以下の議論は理解できないことになる。（ここで、皮肉を言わせてもらえば、ファジィをチップ化してハードウェアで実現すると、さぞかし大変でしょう、チューンアップが。全部作り直すか。もっとも、それ以前に、次の第三レベルで採用不可になるかな？）

第三レベルは、システムに採用したモデルそのものの“欠点”のレベル。より柔らかく言えば、モデルの“優劣”のレベル。このレベルの欠陥は本質的であり、小手先のバグ修正やチューンアップで対処できる話ではない。そして、このレベルこそ、以下、我々が議論の対象にするレベルである。

2．モデルの優劣

今、何らかの問題が与えられたとしよう。これを解くために、あるグループはファジィ推論モデルでシステム構築をし、また別のグループは何らかの数学モデルでシステム構築をしたとする。結果の両モデルを比較した時、一体何が本質的に違うのだろうか？従来のモデルと対置させた時、ファジィ推論モデルの胡散臭さはいったいどこからくるのであろうか？まず、

（1）モデルの精度の問題

これに関しては、両モデルとも、それぞれのやり方で、精度の向上が可能である点を鑑みれば、本質的な違和感の原因にはならないことが理解できよう。つまり、ファジィモデルでも、精度を上げようと思えば、ルールを追加するなりして、原理上はいくらでも精度の向上が可能なのである。

（2）モデルと現実との構造的なギャップの問題

精度に関連した話題として、両システムモデルと現実とのギャップの問題がある。実用的な応用問題では、それを解くためのモデルはあくまでも現実の近似にすぎない。だからこそ、現実に近づけるための精度の問題が生じてくるのである。ここで、

「現実のタスクがどのような構造をしているか、果たして、それがファジィモデルで近似しても良い構造なのか」

という基本的な課題がある。“問題がある程度、解けさえすれば良いのか？”それとも、“モデルを選ぶのに、別の何らかの基準があるのか”という根源的な疑問である。誰しも、出来るだけ良いモデルを選びたいのは人情であろう。

但し、この点に関しても、ファジィ陣営は上手く論陣を張ることが可能であろう。つまり、

「始めから、はっきりと問題構造の見えているようなタスクに、わざと違和感のあるファジィモデルを採用するような馬鹿な真似はしない」

という常識的な研究・開発態度である。構造が複雑ではっきりしないからこそ、ファジィモデルの出番があるという言い訳である。

「そもそも、競争相手の数学モデルが、タスク本来の構造にフィットしているかどうかは、ファジィモデル同様、判らない」

という主張をするであろう。至極、もっともな論点である。つまり、モデルと現実の構造上のギャップについても、ファジィの違和感の原因にはなり得ない。

但し、この世には、現実の構造がある程度判っているにもかかわらず、無理やり、ファジィモデルを当てはめようとする馬鹿がいる。こういうのを、…の専門馬鹿というのだ。(…のところに、最近流行の専門用語を入れよ。例えば、ファジィ、カオス、ＧＡ、ウェーブレット、１/ｆゆらぎ、等々。)

（3）曖昧という語感からくる、厳密性の問題

当然のことであるが、従来の数学モデルは厳密である。たとえ、現実との間にギャップがあったとしても、また、数値計算で近似をしたとしても、とにかく、システム自体は数学的に厳密に閉じている。それに対して、ファジィはどうであろうか？

「どうせ曖昧推論では、厳密性にどこかで疑問があるのではないの？」

というのがファジィの素人の発想であろう。しかしながら、事はそれほど単純ではないのだよ、諸君。

なるほど、メンバーシップ関数の定義や、選ぶ推論の種類などにおいて、主観の入る余地はある。しかし、これはファジィ陣営がファジィの多様性を吹聴するために大袈裟に宣伝した“主観”という用語が、素人の日常感覚から誤解されたにすぎない。ファジィ陣営の言うところの主観を数学モデル陣営の用語で言い換えれば、何のことはない、

「選ぶ数式の種類、及び、採用するパラメータの数を、研究者の“勘（直感、感性）”で決定する」

と言っているのと同値なのだ。

そして、いったん、それらが決定された後は、ファジィ推論モデルでも、まさに数式モデルの場合とまったく同等の意味で、数学的に厳密な結果が出力される。入力から出力の間に、何らの非厳密性も介入の余地はない。つまり、ファジィ推論も、形式化された後は、数学の一部なのである。

よって、数学的な厳密性の観点もファジィの違和感の原因にはなり得ないことが納得できよう。

じゃ、一体、何が本質的に違うのか？どちらのモデルも、いずれにせよチューニングにより、徐々に現実に近づいていくように、パラメータの調整や式の変形を施される運命である。問題は性能の善し悪しだけではないのか？ある意味では、その通りである。つまり、性能の良いほうに軍杯は上がる。

しかしながら、私がここで展開している議論は、正に、この性能の問題に本質的に関わってくるのだ。つまり、ファジィモデルは原理上、ある種の制約があり、これを意識してクリヤしなければ、ある一定以上の性能向上は望めないと主張しているのである。

もう少し詳しく述べると次のようになる。上の（１）で、“原理上いくらでも精度の向上が図れる”とはいったが、“究極的には、現実の解に収束する”とは言っていない点に注意してほしい。簡単な例をあげれば、本来の解が１００点のタスクに対し、構築したシステムが最初５０点程度の解を出力した。これをチューニングすることにより、

「５０点から１００点満点にむけて果てしなく向上してはいくが、最後は極限として８０点あたりに収束する」

などというモデルはいくらでもある。

では、どこが従来のファジィモデルの限界なのか？それが、ファジィに対する素人の直感的な胡散臭さと関係していることを、神ならぬ身のファジィ研究者の誰が知ろうか？私には、そのところが良く見えているのだ。

というわけで、そろそろ核心に近づいて来た。いったい、ファジィの胡散臭さは何処から生じるのか？上に述べた以外の論点があるのか？それがあるのだよ、諸君！覚えているであろうか？これをズバリ言うことが本発表の主目的の一つであった。その内の一つを、以下に指摘しておく。

３．ファジィモデルと従来の数学モデル：本質的相違（ｉ）

私のブランドイメージは、“筑波山麓、四六の蝦蟇の油売り”とは違い、

「ヤルと言ったことは、必ずヤル」

という信用度に特徴がある。というわけで、ここで、ファジィモデルと従来の数学モデルとの本質的相違の一つをあげておく。

システムの完璧さ、完成度に対する、ファジィの専門家の平均的な意見は、現時点では、次のようなものになろう。

「数学とは異なり、計算機の世界には、近似という概念が付き物である。（誤差じゃないですよ、誤差じゃ。）つまり、厳密解や最適解を求めるよりも、計算機で求解可能な範囲での、近似解や準最適解やヒューリスティックな解を求めるのが、情報科学の領域では、正しい態度である。このような一般的な態度、基本姿勢を鑑みれば、ファジィの“すこしぐらいズレた解”もご愛嬌である。だからドシドシ使用しても問題はない。」

このような意見は、ファジィモデルと数学モデルを同じ土俵で勝負させた時にのみ出てくる。（一般法則をファジィモデルという特殊ケースにも適用している。）つまり、私の論点が、まるっきり理解出来てないのだ、ファジィ陣営は。

この観点に関連し、ファジィ陣営が判っていない、基本・根本を一つ抉り出しておこう。（指摘された後で、“岡目八目”などという言い訳をしないように。みっともないよ。）

本質的相違：その１

例えば、確率論は数学の一分野である。しかし、ファジィ理論では、原理上、数学の全分野をファジィ化できる。やろうと思えば、確率論ですらファジィ化できる。┤

（だからこそ、ファジィの論文洪水が起きているのです、中国なんかでは。勿論、“それをやって何が有り難いか”という議論は、全く別物です。）

ここポイント！（二重盤方式とか・・・。）両者の、この違いが理解できますか？

この指摘により、従来議論されてきた、“ファジィと確率の本質的差”が決定的に明らかになったことと思う。（今まで、誰も指摘できなかったじゃないですか。）これで目から鱗が落ちた人。何が判った*つもり*になりました？まだまだ、奥が深いですよ、私の批判は。しかし、今回は、ここまで。簡単に答えをバラすと有り難味が減る。

というわけで、諸君らも、少し、自分の頭で考えてみてほしい。いや、本気で考えた方が良いと思いますよ、研究者として生き残るために。ファジィの本質を。これは、私の（親切な）忠告です。自分が、ファジィについて、いかに無知であるか悟ることから始めなければ・・・。

これに関連して、人生ブランドとして、これだけは言っておきたい。私の批判シリーズを見て、仕事の参考にした（する）研究者諸君。私の発表文献の引用はちゃんとするように。君達の仕事の、一番深い部分（基本思想）に、本質的影響を与えているのですよ、私の発表は。裏で下働きをする身分じゃないの、私は。引用がイヤなら、以後、この発表シリーズは見るな！見なくても、雑魚の仕事は出来ます、今まで通り。私の批判はファジィ関連領域の幹部、及び、幹部候補生だけが気になるはずです。

私の出した結論を、引用しなくても、その時点での常識にできると錯覚しないように。そんなに甘いものじゃないのですよ、幹部諸君。これについては、多分、今年のＡＩ学会での、私の発表が参考になるでしょう。つまり、自分達の力不足が納得できます。

永世名人の発見した定跡や意見を、初段が耳そば立てて、こっそりと聴く気持ちは判ります。しかし、将棋ルール程度の簡単な話じゃないのですよ、ファジィは。ルールを理解できずに、パターンだけ真似して、どうするの？（ウーン、捻りが効くなー。）多分、御本尊のザデーですら、判ってないと思いますよ、ファジィの本質を。

４．まとめ

ファジィモデルとその他の数学モデルとの本質的相違を浮き彫りにする作業に入った。両者の差は一体何なのか？そもそも、本質的相違はあるのか？その答えを出すのが、この批判シリーズの目的の一つである。ここでは、相違の内の一つを挙げておいた。

ところで、一般的に言って、第二レベルのリコールが、ブランドイメージに与えるマイナスの影響力を肌で感じる経営者なら、第三レベルの欠点なんか、“とんでもない”と思うに違いない。（ＰＬ法とか・・・。）

果たして、通常の数学モデルと比較した時、ファジィモデル*特有*の第三レベル欠点は存在するのであろうか？この問いに対する答えは、両者の本質的相違が判らなければ、出せるはずがない。私が、この批判シリーズで果たす役割の大きさが、この点一つとっても理解できよう。（もはや、ファジィ・・の名称はブランドになりません。今や、私がブランドです。）

参考文献

私の発表を他の研究者が公の文書でキチンと参照するまで、誰の文献もあげず。（この発表シリーズを見てないはずがないじゃないの、君らが。）

問い合わせ先
２５９－１２９３
神奈川県平塚市土屋２９４６
神奈川大学理学部情報科学科　山口研究室
山口人生
Tel: 0463-59-4111(2700)
Fax: 0463-58-9684
E-mail: jinsei@info.kanagawa-u.ac.jp

WE3−3

t-ノルムの拡張としての弱結合的連言演算
Weakly Associative Conjunctions as an Extension of t-Norms

河口万由香　　宮腰政明
Mayuka F. Kawaguchi　　Masaaki Miyakoshi

北海道大学大学院工学研究科　システム情報工学専攻
Division of Systems and Information Engineering, Hokkaido University

Abstract ——— This report focuses on a property of conjunctive operators named "weak associativity," which is one of sufficient conditions for the syllogism in the framework of approximate reasoning. We introduce a class of binary operators on $[0,1]$ which satisfy the weak associativity and some boundary conditions. Our newly introduced class is broader than the class of t-norms, and is included in that of Galois-connections on $[0,1]$. In addition, we show some methods to construct weakly associative operators by using the generators of t-norms.

1. はじめに

ファジィ推論において三段論法が成立するために連言演算に求められる条件の一つである弱結合性[3], [5]に着目し，$[0,1]$ 上の弱結合的関数を定義する。この関数のクラスは t-ノルムのクラスを含む。さらに，アルキメデス的 t-ノルムの生成関数を組み合わせることによって弱結合的関数を生成する方法を示す。

2. t-ノルム，[0, 1]上の Galois-Connections

［定義 1］　t-ノルム　$T:[0,1]^2 \to [0,1]$ は任意の $a,b,c \in [0,1]$ に対して次の条件を満足する関数として定義される。

(T1) 境界条件　$T(a,1) = a$;
(T2) 単調性　$a \le b \to T(a,c) \le T(b,c)$;
(T3) 結合性　$T(a,T(b,c)) = T(T(a,b),c)$;
(T4) 可換性　$T(a,b) = T(b,a)$

t-ノルム T が左連続，即ち任意の $a \in [0,1]$ および $\{b_\lambda\}_{\lambda\in\Lambda}$ $(b_\lambda \in [0,1])$ に対して無限分配律

$$\sup_{\lambda\in\Lambda} T(a,b_\lambda) = T\left(a, \sup_{\lambda\in\Lambda} b_\lambda\right)$$

を満足するとき，かつそのときに限り次の residuation が成立する。

$$T(a,b) \le c \Leftrightarrow b \le I_T(a,c) \quad (\forall a,b,c \in [0,1]) \tag{1}$$

ここで　$I_T(a,c) \equiv \sup\{x | T(a,x) \le c\}$ である。

さらに t-ノルム T が連続で任意の $x \in (0,1)$ に対して $T(x,x) < x$ であるとき T はアルキメデス的であるといい，次式を満足する関数 f と g が存在する。

$$T(x,y) = f^{[-1]}(f(x)+f(y)) \tag{2}$$
$$T(x,y) = h^{[-1]}(h(x)\cdot h(y)) \tag{3}$$

ここで $f:[0,1]\to[0,\infty]$，$h:[0,1]\to[1,\infty]$ は $f(1)=0$，$h(1)=1$ を満足する連続な狭義単調減少関数で，それぞれ T の加法的生成関数，乗法的生成関数と呼ばれる。また，$f^{[-1]}$，$g^{[-1]}$ は擬逆関数である。t-ノルムとその生成関数についての詳細は文献[6]-[9]などを参照されたい。

一方，Demirli et al. [1] は，$[0,1]$ 上の二変数関数のうち式(1)の residuation を満足する最大のクラスとして次の関数を示した。

［定義 2］　関数 $G:[0,1]^2 \to [0,1]$ は任意の $a,b \in [0,1]$ に対して次の条件を満足する関数である。

(G1) 境界条件　$G(a,0) = 0$;
(G2) 無限分配性　$\sup_{\lambda\in\Lambda} G(a,b_\lambda) = G\left(a, \sup_{\lambda\in\Lambda} b_\lambda\right)$

このとき，関数の対 (G, I_G) は完備束（この場合は $[0,1]$）上の Galois-connection あるいは adjunction と呼ばれる[2]。

3. 弱結合的関数

本節では，左連続な t-ノルム T と関数 G の中間に

位置する弱結合的関数 W を導入する。

［定義３］　弱結合的関数 $W:[0,1]^2 \to [0,1]$ は任意の $a,b,c \in [0,1]$ に対して次の条件を満足する関数である。

(W1) 境界条件　$W(a,0)=0,\ W(a,1)=a$;

(W2) 無限分配性　$\sup_{\lambda\in\Lambda} W(a,b_\lambda) = W\left(a, \sup_{\lambda\in\Lambda} b_\lambda\right)$;

(W3) 弱結合性　$W(a,W(b,c)) \le W(W(a,b),c)$;

定義３を定義２と比較すると，弱結合性の他に境界条件 $W(a,1)=a$ が加わっていることがわかる。この条件は三段論法が成立するための十分条件の一つである[3], [5]。

4. 弱結合的関数の生成法

本節では弱結合的関数の生成法として，アルキメデス的 t-ノルムの加法的生成関数による表現(2)を変形した次の２パターンを考察する。

$$\rho_1(x,y) = f^{[-1]}\big(f(x)h(y)+f(y)\big) \qquad (4)$$

$$\rho_2(x,y) = f^{[-1]}\big(f(x)+g(x)f(y)\big) \qquad (5)$$

式(5)における $g:[0,1]\to[0,1]$ は $g(0)=0$，$g(1)=1$ を満足する連続な狭義単調増加関数である。なお，この g はt-コノルムの正規加法的生成関数[6]とみなせる。

［定理１］　式(4)において $h(y)=\{f(y)\}^n+1$ $(n=1,2,\ldots)$ とおいたとき ρ_1 は弱結合的関数である。

［系１］　式(4)において $h(y)=f(y)+1$ とおいたとき ρ_1 は乗法的生成関数 h によって式(3)で表わされるt-ノルムである。

［定理２］　f は $f(0)=1$ を満足するt-ノルムの加法的生成関数であるとする。式(5)において $g(y)=1-\{f(y)\}^n$ $(n=1,2,\ldots)$ とおいたとき ρ_2 は弱結合的関数である。

［系２］　f は $f(0)=1$ を満足するt-ノルムの加法的生成関数であるとする。式(5)において $g(y)=1-f(y)$ とおいたとき ρ_2 は乗法的生成関数 $h(y)=1/g(y)=1/\{1-f(y)\}$ によって式(3)で表わされるt-ノルムである。

5. むすび

著者ら[3]-[5]は先に T と G の間に位置する連言演算 C のクラスを定義している。本稿で導入した弱結合的関数 W と連言演算 C の両方の性質を併せ持つ関数を弱結合的連言演算と呼ぶことにする。定理１で示した関数 ρ_1 は弱結合的連言演算の一例である。

これに対して，定理２に示した関数 ρ_2 は第２変数に関しては単調増加であるが，第１変数に関しては $n\ge 2$ の場合に単調性が保証されず，連言演算としての性質を満足していない。

参考文献

[1] K. Demirli & B. De Baets : Basic properties of implicators in a residual framework, *Tatra Mt. Math. Publ.*, **16** (1999) 31-46.

[2] G. Gierz, K.H. Hofmann, K. Keimel, J.D. Lawson, M. Mislove & D.S. Scott : *A Compendium of Continuous Lattices*, Springer-Verlag, (1980).

[3] M.F. Kawaguchi & M. Miyakoshi : Approximate reasoning with non-commutative and non-associative conjunctions, *Proc. of 6th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'97)*, Barcelona (1997) 163-169.

[4] M.F. Kawaguchi & M. Miyakoshi : Composite fuzzy relational equations with non-commutative conjunctions, *Information Sciences*, **110** (1998) 113-125.

[5] M.F. Kawaguchi & M. Miyakoshi : L-Fuzzy logic with non-associative conjunctions, *Multiple-Valued Logic*, **4** (1999) 281-306.

[6] M. Mizumoto : Pictorial representations of fuzzy connectives, part I : Cases of t-norms, t-conorms and averaging operators, *Fuzzy Sets and Systems*, **31** (1989) 217-242.

[7] 大野，河口，伊達 : t-ノルムに基づく種々のファジー論理関数の性質，電子情報通信学会論文誌，**J81-D-I** (1998) 1-10.

[8] B. Schweiser & A. Sklar : Associative functions and statistical triangle inequalities, *Publicationes Mathematicae*, Debrecen, **8** (1961) 169-186.

[9] B. Schweiser & A. Sklar : Associative functions and abstract semigroups, *Publicationes Mathematicae*, Debrecen, **10** (1963) 69-81.

［問い合わせ先］
〒060-8628　札幌市北区北13条西８丁目
北海道大学大学院工学研究科
システム情報工学専攻
河口　万由香
TEL.: 011-706-6805　FAX.: 011-706-7830
E-mail: mayuka@main.eng.hokudai.ac.jp

WE4−1

和・差・積の演算に関して閉じているファジイ数の族と区分的多項式タイプのファジイ数について

On some families of fuzzy numbers closed with respect to the operations of addition, subtraction and multiplication, and fuzzy numbers of piecewise-polynomial type.

古川　長太
Nagata Furukawa
創価大学工学部
Faculty of Engineering, Soka University

Abstract : Two families of fuzzy numbers closed under the operations of addition, subtraction and multiplication are presented. The first familiy is very general, and includes almost all of usual fuzzy numbers such as Triangular type fuzzy numbers and Bell type fuzzy numbers with bounded supports. The seccond one is a proper subfamily of the first family. For the purpose of the description of the second one, the notion of a fuzzy number of piecewise-polynomial type is introduced. Formulae for the operations among fuzzy numbers of the second family are given.

1　はじめに

メンバシップ関数が狭義単調性と連続性をみたすサポート有界な数直線上のファジイ数の全体からなる族が、通常の拡張原理から導かれる和・差・積の演算に関して閉じていることの厳密な証明を与える。さらにその部分族として区分的多項式タイプのファジイ数の族が同じ性質を保存することを示し、それらの間の演算式について説明する。

2　ファジイ数の上限関数，下限関数

ファジイ数の定義の仕方は，人によりまたそのときのテーマにより何通りかのものがあるが，ここではそのうち最も強い条件をもつものとして次のように定義する．ここでsupp(A) はファジイ集合 A のサポートを表すものとする．

定義 2.1　数直線上のファジイ集合 A のメンバシップ関数 $\mu_A(x)$ が次の (i) ～ (iv) をみたすとき，A をファジイ数という．

(i)　$\mu_A(m)=1$ をみたす実数 m (これを A のセンターという) がただ一つ存在する．

(ii)　supp(A) は $\mathbf{R}$ における有界集合である．

(iii)　$\mu_A(x)$ は supp(A)$\cap(-\infty, m]$ 上で狭義単調増加であり，supp(A)$\cap[m, \infty)$ 上で狭義単調減少である．

(iv)　$\mu_A(x)$ は $\mathbf{R}$ 上で至る所連続である．

上述の意味のファジイ数の全体からなる集合を $\mathcal{H}$ で表す．

応用上よく使われる三角型ファジイ数やサポート有界なベル型ファジイ数は、いずれも上の条件をみたしていることが分かる。

A を任意のファジイ数，μ_A をそのメンバシップ関数とすると，定義 2.1 の (iii) により任意の $\alpha\in[0,1]$ に対して $\alpha=\mu_A(x)$ をみたす x が supp(A)$\cap(-\infty, m]$ 上に一意に存在する．各 $\alpha\in[0,1]$ に対してこのような x を対応させる関数を $i_A(\cdot)$ とおく．すなわち $i_A(\cdot)$ は μ_A を supp(A)$\cap(-\infty, m]$ 上に制限した関数の逆関数である．$i_A(\cdot)$ を A の**下限関数**とよぶ．同様にして，μ_A を supp(A)$\cap[m, \infty)$ 上に制限した関数の逆関数を $s_A(\cdot)$で表し，これを A の**上限関数**とよぶ．

明らかに

$$i_A(1)=s_A(1)=m \qquad (2.1)$$

が成立する．下限関数，上限関数の記号を使うと，定義 2.1 の (ii), (iv) はまとめて次のように書きかえられる．

(a)　$i_A(\alpha), s_A(\alpha)$ は [0, 1] 上で定義されて，かつ [0, 1] 上で連続である．

同様に (iii) は次のように書きかえられる．

(b)　$i_A(\alpha)$ は [0, 1] 上で狭義単調増加であり，$s_A(\alpha)$ は [0, 1] 上で狭義単調減少である．

(2.1) 式の左側の等号条件をあらためて (c) とおく．

(c)　$i_A(1)=s_A(1)$,

とする．ファジイ数の定義においてセンターの値を明記することを省略すれば，以上の書きかえにより定義 2.1 は上記 (a), (b), (c) の 3 つの条件が成り立つことと同値であるといえる．

3　ファジイ数間の和・差・積の演算

以下では，Zadeh の拡張原理によるファジイ数間の和，差，積の演算をそれぞれ $\oplus, \ominus, \otimes$で表す．次の

定理によって，ファジイ数の族 $\mathcal{H}$ がこれらの演算に関して閉じていることが示される．

定理 3.1 任意の2つのファジイ数 $A, B \in \mathcal{H}$ に対して次のことが成立する．

(i) $A \oplus B \in \mathcal{H}$,

(ii) $A \ominus B \in \mathcal{H}$,

(iii) $A \otimes B \in \mathcal{H}$.

証明 (i), (ii) の証明は (iii) の証明に比べると容易なので，(i), (ii) の証明は省略して，(iii) の証明だけを与える．そこで実数間の積の演算を表す関数を f とおく．すなわち2つの実数 x, y に対して f は

$$f(x,y) = x \times y,$$

で与えられる．$\mathbf{R}$ 上の2つの有限区間 I, J に対して直積集合 $I \times J$ の f による像を $f(I,J)$ で表す．すなわち

$$f(I,J) = \{z = x \times y \mid x \in I, y \in J\}. \qquad (3.1)$$

拡張原理による f のファジイ化を $\tilde{f}$ で表すことにする．f は x, y について連続であり，また本論文で扱うファジイ数はメンバシップ関数が至る所連続でサポートが有界であることから，Nguyen の定理 ([2] の Proposition 5.1) の仮定がすべてみたされる．よって同定理により

$$[\tilde{f}(A,B)]_\alpha = f(A_\alpha, B_\alpha), \qquad \forall \alpha \in [0,1], \qquad (3.2)$$

が成り立つ．A_α, B_α はそれぞれ A, B の α-カットであり，上式左辺は $\tilde{f}(A,B)$ の α-カットである．

A, B の下限関数，上限関数をそれぞれ $i_A(\alpha), s_A(\alpha), i_B(\alpha), s_B(\alpha)$ とおく．

(3.1), (3.2) から

$$[A \otimes B]_\alpha = \{xy \mid x \in A_\alpha, y \in B_\alpha\}, \ \alpha \in [0,1] \qquad (3.3)$$

が導かれる．A, B の α-カットの単調性と (3.3) により，任意の $0 \leqq \alpha < \alpha' \leqq 1$ に対し

$$[A \otimes B]_{\alpha'} \subset [A \otimes B]_\alpha \qquad (3.4)$$

が成り立つことが分かる．各 α に対して $[A \otimes B]_\alpha$ が単一の有限閉区間になることは，参考文献 [1] の p.164 に f が一般の連続関数の場合に証明されているので，ここでは省略する．

次に $A \otimes B$ の上限関数，下限関数を求める必要があるが，$[A \otimes B]_\alpha$ が単一の有限閉区間になることを以て直ちに上限，下限関数が定義されるとはいえない．

それは $[A \otimes B]_\alpha$ が単に $A \otimes B$ の α-カットを表すだけであって，$A \otimes B$ のメンバシップ関数の連続性と狭義単調性がまだ示されていないからである．

そこで各 α に対する区間 $[A \otimes B]_\alpha$ の左端点の値を $l_{A\otimes B}(\alpha)$，右端点の値を $r_{A\otimes B}(\alpha)$ で表す．A_0, B_0 が共に $\mathbf{R}$ の正部分に含まれるときは，(3.3) によりどの $\alpha \in [0,1]$ に対しても

$$\begin{cases} r_{A\otimes B}(\alpha) = s_A(\alpha) s_B(\alpha), \\ l_{A\otimes B}(\alpha) = i_A(\alpha) i_B(\alpha), \end{cases} \qquad (3.5)$$

が成立する．しかしこれ以外の場合，例えば A_0, B_0 のうちのどちらか一方が $\mathbf{R}$ の正部分と負部分にまたがるときは (3.5) のように表されるとは限らない．一般には各 $\alpha \in [0,1]$ に対して

$$r_{A\otimes B}(\alpha) = \mathrm{Max}\{s_A(\alpha)s_B(\alpha), s_A(\alpha)i_B(\alpha), i_A(\alpha)s_B(\alpha), i_A(\alpha)i_B(\alpha)\}, \qquad (3.6)$$

$$l_{A\otimes B}(\alpha) = \mathrm{Min}\{s_A(\alpha)s_B(\alpha), s_A(\alpha)i_B(\alpha), i_A(\alpha)s_B(\alpha), i_A(\alpha)i_B(\alpha)\}, \qquad (3.7)$$

と表される．

A, B の上限関数，下限関数はすべて連続なので，上の2つの式により $r_{A\otimes B}(\alpha), l_{A\otimes B}(\alpha)$ は $[0,1]$ 上で連続である．一方 α-カットの集合としての単調性により $r_{A\otimes B}(\alpha)$ は $[0,1]$ 上で広義単調減少，$l_{A\otimes B}(\alpha)$ は $[0,1]$ 上で広義単調増加であることが分かる．そこである $0 \leqq \bar{\alpha} < 1$ と十分小さい $\varepsilon > 0$ があって，$[\bar{\alpha}, \bar{\alpha}+\varepsilon]$ 上で $r_{A\otimes B}(\alpha)$ が一定であると仮定しよう．これが起こるためには微少区間 $J \subset [\bar{\alpha}, \bar{\alpha}+\varepsilon]$ が存在して，J 上で $r_{A\otimes B}(\alpha)$ は (3.6) の右辺の { } の中の4つの項のうちの特定の一つの等しくなければならない．A, B の上限関数，下限関数はすべて狭義単調なので，このようなことは起こらないことが示される．すなわち $r_{A\otimes B}(\alpha)$ は $[0,1]$ 上で狭義単調減少であるといえる．同様にして $l_{A\otimes B}(\alpha)$ は $[0,1]$ 上で狭義単調増加であることが分かる．

以上により $r_{A\otimes B}(\alpha), l_{A\otimes B}(\alpha)$ はそれぞれ $A \otimes B$ の上限関数，下限関数であって (a), (b), (c) をみたすことが示された．【証明終わり】

4 区分的多項式タイプのファジイ数

定義 4.1 $\mathcal{H}$ に属するファジイ数でその上限関数，下限関数がともに $[0,1]$ 上の区分的多項式であるものを，**区分的多項式タイプのファジイ数**という．

区分的多項式タイプのファジイ数の全体からなる集合を $\mathcal{P}$ で表す．

定理 4.1 $\mathcal{P}$ は，和，差，積の演算に関して閉じている．

参考文献

[1] 古川長太，ファジイ最適化の数理，森北出版 (1999)

[2] H.T.Nguyen, A note on the extension principle for fuzzy sets, J.Math.Anal.Appl.,**6 4**,369-380 (1978)

問い合わせ先　〒192-8577 八王子市丹木町 1-236

創価大学工学部　情報システム学科　古川長太

WE4−2

ファジィ数の表現とファジィ微分

Representations of Fuzzy Numbers and Fuzzy Differentials

陳　明浩 †　齋藤誠慈　石井 博昭
Minghao CHEN　Seiji SAITO　Hiroaki ISHII
ハルビン工業大学　大阪大学　大阪大学
Harbin Institute of Technology　Osaka University　Osaka University

Abstract Sets of Fuzzy numbers are not necessary linear spaces with the addition introduced by the extension principle due to Zadeh et. al. In order to analyze Fuzzy optimization problems and Fuzzy differential equations without difficulty we introduce some representation which is given by the both end-points of ω-cut of the membership function of each Fuzzy number, so that sets of Fuzzy numbers seem to be linear spaces. Moreover we consider some kind of Fuzzy differential of Fuzzy functions from a subset of real numbers to a subset of Fuzzy numbers with bounded supports and we get some theorems on the Fuzzy differential.

1　はじめに

Zadeh の拡張原理によるファジィ数の演算は線形性を満たさない. 例えば, k_1, k_2 を実数とし,x をファジィ数とする. このとき, 式 $(k_1+k_2)x = k_1x + k_2x$ は成り立つとは限らない.[1] のようにファジィ微分を入れても, ファジィ最適化, ファジィ微分方程式などの問題を論じるには大変不便である. 本文では, サポート (support) が有界なファジィ数の全体からなる集合 $\mathcal{F}_b$ ([1]) をある Banach 空間の閉凸部分集合と見なして, 微積分などを論議する. 明らかに, サポートが有界なファジィ数はその ω-cut による閉区間族と 1 対 1 に対応し, 閉区間族はその両端点族とも 1 対 1 に対応する. 従って, 任意のサポートが有界なファジィ数はその ω-cut の両端点からなる二次元点族で 1 対 1 に表される. すなわち, $\forall x \in \mathcal{F}_b$,

$$x = (a(\omega), b(\omega)), 0 \le \omega \le 1$$

と唯一に表される. 但し, $a(\omega)$,$b(\omega)$ はそれぞれ x の ω-cut の左, 右端点である.

2　ファジィ数の表現

定義 1 $X = \{x | x = (a(\omega), b(\omega)), 0 \le \omega \le 1. a(\omega), b(\omega)$ は有界実関数 $\}$ とおく.$\forall x, y \in X$, $x = (a(\omega))$, $b(\omega))$, $0 \le \omega \le 1; y = (c(\omega), d(\omega)), 0 \le \omega \le 1$ に対して,

$x = y \Leftrightarrow (a(\omega) = c(\omega)) \& (b(\omega) = d(\omega)), \quad \forall \omega \in [0, 1]$.

$0 = (0, 0), 0 \le \omega \le 1$.

$x + y = (a(\omega) + c(\omega), b(\omega) + d(\omega)), \quad 0 \le \omega \le 1$.

$\alpha x = (\alpha a(\omega), \alpha b(\omega)), \quad 0 \le \omega \le 1$ (α は実数).

$\| x \| = \sup_{0 \le \omega \le 1} \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}$ とする.

明らかに, 上の定義の両演算とノルムによって,X は *Banach* 空間を成す.

幾何的に,X の要素は $\mathbf{R}^2$ 中の曲線

$$a = a(\omega); b = b(\omega), 0 \le \omega \le 1$$

である.

定理 1 $\mathcal{F}_b$ は *Banach* 空間 X の閉凸部分集合であり, 閉凸錐でもある.

幾何的に,$\forall x \in \mathcal{F}_b \subset X$ は図 *1* のように表示される. つまり, ファジィ数 x は一定の条件を満たす $\mathbf{R}^2$ 上の曲線と見なされる.

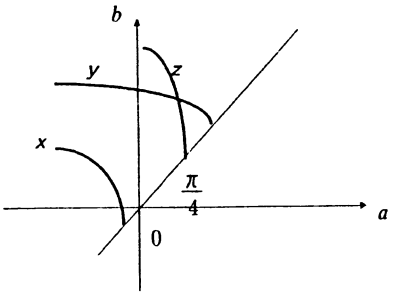


図 1: ファジィ数 x,y,z

定理 2 M_1, M_2 をある固定した正数とし, $x'_\omega = (a'_\omega, b'_\omega), 0 \le \omega \le 1$ とする. ただし、a, b は微分可能. もし

$$T = \{x \in X | \| x \| \le M_1, \| \frac{\partial x}{\partial \omega} \| \le M_2\}$$

と置けば,$cl(\mathrm{T})$ は X のコンパクト部分集合である.

3 ファジィ微分と積分

定義 2 f を $\mathbf{R}$ の区間 I から X (或は $\mathcal{F}_b$) への写像とし, t_0 を I の点とする.$\forall\epsilon>0$, 正数 δ が定まり, $|t-t_0|<\delta$ ならば $\| f(t)-f(t_0)\|<\epsilon$ が成立するとき, f は点 t_0 において連続であると言う.f が I のすべての点 t において連続であるとき,f は I 上で連続であると言う.

明らかに, 定義 2 は [1] の連続の定義と一致する.

定義 3 f を $\mathbf{R}$ の区間 I から X(或は $\mathcal{F}_b$) への写像とし, $t_0\in I,\eta\in X$ (或は $\mathcal{F}_b$) とする.$\forall\epsilon>0$ に対して正数 δ が定まり, $|t-t_0|<\delta$ に関して,$\| \frac{f(t)-f(t_0)}{t-t_0}-\eta\|<\epsilon$ が成り立つとき,f が点 t_0 において微分可能であると言い, $f'(t_0)=\eta, \frac{df}{dt}(t_0)=\eta$ などと表す.f が I のすべての点 t において微分可能であるとき,f は I 上で微分可能であると言う.特に,$f(t)\in\mathcal{F}_b(\forall t\in I)$ かつ $f'(t)\in\mathcal{F}_b(\forall t\in I)$ のとき, ファジィ写像 $f(t)$ を t_0 において狭義微分可能であると言う.

命題 1 f は t_0 で可微分ならば,f は t_0 で連続である.

定理 3 $f(t)=(a(\omega,t),b(\omega,t)),\quad 0\le\omega\le 1,\quad t\in I$ とする. このとき,$f(t)$ が t_0 で微分可能であれば,

$f'(t_0)=(\frac{\partial}{\partial t}a(\omega,t_0),\frac{\partial}{\partial t}b(\omega,t_0)),\quad 0\le\omega\le 1$

が成り立つ. 逆に, もし,$\frac{\partial}{\partial t}a(\omega,t),\frac{\partial}{\partial t}b(\omega,t)$ がともに $[0,1]\times I$ 上で連続であれば,$f'(t)$ が存在する.

定理 4 $f'(t)\equiv 0\Leftrightarrow f(t)\equiv Const\in X$ (或は $\mathcal{F}_b$).

定義 4 f を閉区間 $[\alpha,\beta]$ から X(或は $\mathcal{F}_b$) への写像とし, $J\in X$(或は $\mathcal{F}_b$) とする.$[\alpha,\beta]$ の任意の分割: $\alpha=t_0<t_1<...<t_n=\beta$ と $\tau_j\in[t_{j-1},t_j]\quad(j=1,2,...,n)$ に対して,$h_j=t_j-t_{j-1}$ とする. $\lambda=\max|h_j|\to 0$ のとき, 和 $\sum_{j=1}^n f(\tau_j)h_j\to J$ が成立すれば,$f(t)$ は $[\alpha,\beta]$ 上で可積分と言い, $\int_\alpha^\beta f(t)dt=J$ と表す.

命題 2 f が $[\alpha,\beta]$ 上で可積分のとき,
$(i)f$ は $[\alpha,\beta]$ 上で有界である;
$(ii)\int_\alpha^\beta f(t)dt=\int_\alpha^\gamma f(t)dt+\int_\gamma^\beta f(t)dt\quad(\gamma\in[\alpha,\beta])$.

命題 3 f が $[\alpha,\beta]$ 上で連続であれば,$\int_\alpha^\beta f(t)dt$ が存在する.

定理 5 $f(t)=(a(\omega,t),b(\omega,t)),\quad 0\le\omega\le 1$ が $[\alpha,\beta]$ 上で可積分ならば,

$\int_\alpha^\beta f(t)dt=(\int_\alpha^\beta a(t)dt,\int_\alpha^\beta b(t)dt),\quad 0\le\omega\le 1$

が成り立つ. 逆に $a(\omega,t),b(\omega,t)$ がともに $[0,1]\times[\alpha,\beta]$ 上で連続であれば,$\int_\alpha^\beta f(t)dt$ が存在する.

定理 6 $f(t)$ が $[\alpha,\beta]$ 上で連続であるとし, $F(t)=\int_\alpha^t f(t)dt\quad(t\in[\alpha,\beta])$ とおく. この時,
$(i)F'(t)=f(t)\quad(t\in(\alpha,\beta))$;
$(ii)\int_\alpha^\beta f(t)dt=F(\beta)-F(\alpha)$.

命題 4 $f(t)$ が $[\alpha,\beta]$ 上で連続であれば,
$\| \int_\alpha^\beta f(t)dt\|\le|\int_\alpha^\beta\| f(t)\| dt|$
が成り立つ.

命題 5 $(i)f(t)\in\mathcal{F}_b\Rightarrow\int_\alpha^\beta f(t)dt\in\mathcal{F}_b\quad(\alpha\le\beta)$;
$(ii)f'(t)\in\mathcal{F}_b, f(\alpha)\in\mathcal{F}_b, f'(t)$ が連続である $\Rightarrow f(t)\in\mathcal{F}_b\quad(t\ge\alpha)$.

定理 7 f を $[\alpha,\beta]$ から $\mathcal{F}_b$ への連続写像であって, (α,β) 内では微分可能とする. この時,

$\| f(\beta)-f(\alpha)\|\le(\beta-\alpha)\| f'(\gamma)\|$

を満たす $\gamma\in(\alpha,\beta)$ が存在する.

4 ファジィ微分方程式

一階線形ファジィ微分方程式の初期値問題:

$$\frac{dx}{dt}+p(t)x=q(t)\quad ;x(t_0)=x_0 \tag{1}$$

を考える. 但し,$x_0\in\mathcal{F}_b, q(t)\in\mathcal{F}_b, p(t)\in\mathbf{R}, t\ge t_0$ とし,$q(t)$ と $p(t)$ をそれぞれ連続であるとする.

定理 8 ファジィ微分方程式の初期値問題 (1) の唯一の解は

$$x(t)=e^{-\int_{t_0}^t p(\tau)d\tau}\left\{\int_{t_0}^t q(\tau)e^{\int_{t_0}^\tau p(s)ds}d\tau+x_0\right\} \tag{2}$$

である (明らかに,$x(t)\in\mathcal{F}_b$).

定理 8 はファジィ在庫問題などへの応用も期待される.

5 おわりに

今後は非線型ファジィ微分方程式の初期値問題:

$$\frac{dx}{dt}=f(t,x)\quad ;x(t_0)=x_0 \tag{3}$$

が考えられる. 但し,$x_0\in{\mathcal{F}_b}^n, f$ は $I\times{\mathcal{F}_b}^n$ から ${\mathcal{F}_b}^n$ への写像であり,${\mathcal{F}_b}^n=\mathcal{F}_b\times\mathcal{F}_b\times...\times\mathcal{F}_b$ である.

参考文献

[1] 古川長太, ファジィ最適化の数理, 森北, *1999.*

[問い合わせ先]

〒 *565-0871*
吹田市山田丘 *2* − 1
大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻客員研究員
陳 明浩 *(Chen Minghao)*
Tel: 06-6879-7868
Fax: 06-6879-7871
E-mail: chenm@ap.eng.osaka-u.ac.jp

WE4−3

不明、矛盾を含む複数観測の結合結果の真理度計算の一方法

A method to evaluate credibility of a combined result of observations with uncertainty and contradiction

間淵重昭
Shigeaki Mabuchi
大阪学院大学
Osaka Gakuin University

Abstract

A method is proposed and discussed to evaluate credibility of a combined result of plural observations with contradiction and uncertainty. Here credibility of the observation is described by a set of grades of truth, contradiction, uncertainty and false in the observation. These grades are represented by membership functions charaterizing truth, contradiction, uncertainty and false of the observation. Then the credibility of plural observations is evaluated by the combination of set products employing the membership functions and general probabilistic operation. The case of positive dependence among plural observations is discussed.

1 はじめに

必ずしもすべてが明かではないある事実に対する複数の観測、あるいはその事実についての証拠を統合した結果の真理度、または信用度を個々の観測の真理度から求める問題を取りあげる。

ここでは観測結果をある命題で表すとし、その命題が真の命題のファジィ集合に属す程度を示すメンバシップ関数を考え、これを命題が真である確信度を表すとする。また同時に、命題が偽である確信度、真か偽かが不明である度合いを示す不明度、さらに真であり、かつ偽であるという矛盾が生ずる度合いを示す矛盾度も考慮する。そしてこれら（真、矛盾、不明、偽）の度合いの組でその命題の真理度あるいは信用度が表されるとする。メンバシップ関数は既報で提案した根拠集合 [1] にもとづいて定めるという考え方が、ここでの問題にうまく適合する。個々の真理度が上述の形で表されている２つの命題の結合命題の真理度は、一般確率演算則 [1] にもとづくファジィ集合の積演算の組み合わせによって、対象において成立する命題間の従属関係に対し求められる。ここでは正の従属関係の場合を取りあげ、結合命題の真理度のもつ性質、その数値例などについて考察する。なお同様のテーマに関しては簡単な報告があるが [2] 、ここではこの前報の内容の修正、拡充を含め、その再構成をする。

2 個別命題の真理度の定め方

ある事実の観測結果を表す命題 x を考え、その全体集合を X とする。この x が真である度合い、すなわち真の命題のファジィ集合 A^a に属する度合いは次のようにして定まるものとする。x が真であるかどうかを判断するために根拠となる材料の集まり $G_A(x)$ をとりあげ、このうちから $x \in A^a$ を支持する要素の集まりを $G_{A^a}(x)$ とする。同様にして x が真でないことを支持する要素の集まりを $G_{A^n}(x)$ 、また x の真か真でないかの支持が判然としない要素の集まりを $G_{A^u}(x)$ とする。ここで $G_A(x)$ を根拠集合と呼ぶ。G_{A^a}、G_{A^u}、G_{A^n} はそれぞれ肯定集合、不明集合、否定集合と呼び、これらはクリスプ集合で、任意の $x \in X$ に対し

$$G_{A^a}(x) \cup G_{A^u}(x) \cup G_{A^n}(x) = G_A(x),$$

$$(G_{A^a}(x) \cup G_{A^n}(x)) \cap G_{A^u} = \emptyset$$

とする。さらに

$$G_{A^c}(x) = G_{A^a}(x) \cap G_{A^n}(x)$$

は必ずしも空ではないとし、これをを矛盾集合と呼ぶ。

上のように定めたG_A、あるいはその部分集合の上で各部分集合G_{A^*}の大きさに対応した量を示す何らかの測度、たとえば重みの分布を考える。これを$m(G_{A^*})$と表して、

$$\mu_{A^*}(x) := P(A^*|x) = m(G_{A^*}(x))/m(G_A(x)) \quad (1)$$

でメンバシップグレードが定められるとする。例えばG_{A^a}の場合でいえば、このように定めたメンバシップグレードは命題xの真である度合いが、この決定にかかわる根拠全体に対する真である根拠の相対的大きさ（比率）として与えられる。これは一般にメンバシップ関数の一つの解釈にもなり、以下ではこれを条件付確率と解釈し、$P(A^a|x)$の形で表すこととする。

ここで$\ominus$で集合差を表すとして、

$$G_{A^{aL}} = G_{A^a} \ominus G_{A^c}, \quad G_{A^{nL}} = G_{A^n} \ominus G_{A^c},$$

とおくと、根拠集合$G_A(x)$は互いに素な4つの部分集合$G_{A^{aL}}$、G_{A^c}、G_{A^u}、$G_{A^{nL}}$に分割され、(1)によりこれらに対応して、真である確信度、矛盾度、不明度、偽である確信度の組$(P(A^a), P(A^c), P(A^u), P(A^n))$が決まる。この組のことを真理度と呼ぶこととする。

このとき次式が成立する。

$$P(A^{aL}) + P(G_{A^c}) + P(G_{A^u}) + P(A^{nL}) = 1. \quad (2)$$

3　2つの観測の結合命題の真理度

2つの観測結果を表す命題A、Bの結合命題において、その真、矛盾、不明、偽は観測A，Bの結果のいわば多数決方式で決まるものとする。不明は真でも偽でもない中立とみなす。それらの度合いをそれぞれT、C、U、Fで表すと、上記の仮定の下でこれらは以下のような積演算の組み合わせにより与えられる。

$$\begin{aligned}
T &= P(A^{aL} \cap B^{aL}) + P(A^{aL} \cap B^c) + P(A^{aL} \cap B^u) \\
&\quad + P(A^c \cap B^{aL}) + P(A^u \cap B^{aL}) \\
C &= P(A^c \cap B^c) + P(A^{aL} \cap B^{nL}) + P(A^{nL} \cap B^{aL}) \\
U &= P(A^u \cap B^u) + P(A^c \cap B^u) + P(A^u \cap B^c) \\
F &= P(A^{nL} \cap B^{nL}) + P(A^{nL} \cap B^c) + P(A^{nL} \cap B^u) \\
&\quad + P(A^c \cap B^{nL}) + P(A^u \cap B^{nL})
\end{aligned} \quad (3)$$

一般確率演算においては、これら積演算は一般に

$$P(A \cap B) = \gamma_{AB} P(A) P(B)$$

で与えられる。ここでγ_{AB}は集合AとB(本来はG_AとG_B）の従属関係によってきまる従属度指数である。$\gamma_{AB} > 1$のとき正従属、$\gamma = 1$のとき独立、$0 \le \gamma < 1$のとき負従属という。

今回は従属関係として、正従属の場合を取りあげる。このとき各積演算の結果は次の通りである [1]。以下では簡単のため、$(P(A^{aL}), P(A^c), P(A^u), P(A^{nL}))$を$(a, a^c, a^u, a^n)$のように略記する（$B$についても同様)。

i)$G_{A^{aL}}$が$G_{B^{aL}}$に正従属

この場合$P(A^{aL}|B^{aL}) = 1$、$\gamma_{A^{aL}B^{aL}} = 1/a;\ a \ge b$で、したがって

$$\gamma_{A^cB^{aL}} = \gamma_{A^uB^{aL}} = \gamma_{A^{nL}B^{aL}} = 0.$$

不明集合と矛盾集合については独立性が成り立っていると考えて

$$\gamma_{A^cB^c} = \gamma_{A^uB^c} = \gamma_{A^cB^u} = \gamma_{A^uB^u} = 1 \quad (4)$$

とする。この結果各積演算は表1に示す通りとなる。

ii)$G_{B^{aL}}$が$G_{A^{aL}}$に正従属

この場合に対しては、i)においたAとB、aとbを交換すればi)に対応する結果が得られる。

4　正従属の場合の複数観測の真理度

4.1　一般事項

i)で

$$a(\gamma_{A^{aL}B^c} b^c + \gamma_{A^{aL}B^u} b^u) = \delta_{ab} (\ge 0) \quad (5)$$

とおく。ここで次が成り立っていなければならない。

$$a - b - \delta_{ab} \ge 0. \quad (6)$$

このとき2つの観測A，Bの結合結果の真理度は(3)と表1より次のように表される。

$$\begin{aligned}
T &= b + \delta_{ab} = \min(a, b) + \delta_{ab} \\
C &= a^c b^c + a - b - \delta_{ab} \\
U &= (a^c + a^u)(b^c + b^u) - a^c b^c \\
F &= 1 - a - (a^c + a^u)(b^c + b^u)
\end{aligned} \quad (7)$$

観測A，BをそれぞれO_1、O_2と表し、

$$\begin{aligned}
O_1 &: (a, a^c, a^u, a^n) = (T_1, C_1, U_1, F_1) \\
O_2 &: (b, b^c, b^u, b^n) = (T_2, C_2, U_2, F_2)
\end{aligned} \quad (8)$$

とおく。δ_{ab}をδ_{12}と書きかえると、条件(6)は

$$T_1 \ge T_2 + \delta_{12} \quad (9)$$

表1　正従属 $G_{B^{aL}} \Rightarrow G_{A^{aL}}$ の場合の積演算

	b	b^c	b^u	b^n
a	b	$\gamma_{A^{aL}B^c}ab^c$	$\gamma_{A^{aL}B^u}ab^u$	$a(1-\gamma_{A^{aL}B^c}b^c-\gamma_{A^{aL}B^u}b^u)-b$
a^c	0	a^cb^c	a^cb^u	$a^c(b+b^n)$
a^u	0	a^ub^c	a^ub^u	$a^u(b+b^n)$
a^n	0	$(a^n+a-\gamma_{A^{aL}B^c}a)b^c$	$(a^n+a-\gamma_{A^{aL}B^u}a)b^u$	$(a+a^n)(b+b^n)$ $-a(1-\gamma_{A^{aL}B^c}b^c-\gamma_{A^{aL}B^u}b^u)$

と書ける。このようにおいたとき (7) は

$$\begin{aligned} &T=T_2+\delta_{12},\quad C=C_1C_2+T_1-T_2-\delta_{12},\\ &U=(C_1+U_1)(C_2+U_2)-C_1C_2,\\ &F=1-T_1-(C_1+U_1)(C_2+U_2) \end{aligned} \tag{10}$$

と書ける。

繰り返し観測を n 回続け、各観測段階で正従属の条件が成り立つとして、$(T(n),C(n),U(n),F(n))$ でそのときの結合結果を表す。いま条件 (6) を参照して

$$\begin{aligned} &T_i+\delta_{i-1,i}\geq T_{i+1}+\delta_{i,i+1},\\ &\text{where } i=1,\ldots,n-1;\ \delta_{01}=0 \end{aligned}$$

が成り立つように観測結果を並べ変える。このとき n 回繰り返しの場合の一般表現は煩雑になるので、5回繰り返しの場合について書けば次のように表される。

$$\begin{aligned} T(5) &= T_5+\delta_{45}=\min_{i=1,\ldots,5}(T_i+\delta_{i-1,i}),\\ C(5) &= C_1C_2C_3C_4C_5+\Delta_{12}C_3C_4C_5\\ &\quad +\Delta_{23}C_4C_5+\Delta_{34}C_5+\Delta_{45},\\ U(5) &= D_1D_2D_3D_4D_5-C_1C_2C_3C_4C_5\\ &\quad +\Delta_{12}(D_3D_4D_5-C_3C_4C_5)\\ &\quad +\Delta_{23}(D_4D_5-C_4C_5)+\Delta_{34}(D_5-C_5),\\ F(5) &= 1-T_1-D_1D_2D_3D_4D_5\\ &\quad +\Delta_{12}(1-D_3D_4D_5)\\ &\quad +\Delta_{23}(1-D_4D_5)+\Delta_{34}E_5. \end{aligned} \tag{11}$$

ただしここで、$D_i\equiv C_i+U_i$、$E_i\equiv T_i+F_i$、$\Delta_{i,i+1}\equiv T_i+\delta_{i-1,i}-T_{i+1}-\delta_{i,i+1}$ とおいてある。

（2回の観測の結果で真の度合いが偽の度合いより優るための条件） これは (7) より

$$a+b+(a^c+a^u)(b^c+b^u)+\delta_{ab}-1>0$$

で与えられる。これからその十分条件として2つの観測の真の度合いの合計が1より大きくなっていれば、その結合結果の真が偽の度合いをうわまわるといえる。

4.2　$G_{A^{aL}} \Leftrightarrow G_{B^{aL}}$ の場合

この場合 $\gamma_{A^{aL}B^{aL}}=1/a=1/b;\ a=b$ であるので

$$\gamma_{A^cB^{aL}}=\gamma_{A^uB^{aL}}=\gamma_{A^nB^{aL}}=0,$$

$$\gamma_{A^{aL}B^c}=\gamma_{A^{aL}B^u}=\gamma_{A^{aL}B^{nL}}=0.$$

さらに不明と矛盾の独立性 (4) が成り立つとすれば、n 回繰り返し観測に対し、次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} T(n) &= T_1=\cdots=T_i=\cdots=T_n\\ C(n) &= \textstyle\prod_{i=1}^n C_i\\ U(n) &= \textstyle\prod_{i=1}^n D_i-C(n)\\ F(n) &= 1-T_i-\textstyle\prod_{i=1}^n D_i \end{aligned} \tag{12}$$

これは上の一般的な場合で、$\delta_{n-1,n}$ とすべての $\Delta_{i,i+1}$ を0とおいた場合に一致する。特に各観測の真理度がほぼ同じ（これを (T_0,C_0,U_0,F_0) とおく）である場合

$$\begin{aligned} &T(n)\simeq T_0, && C(n)\simeq C_0^n,\\ &U(n)\simeq D_0^n-C_0^n, && F(n)\simeq 1-T_0-D_0^n \end{aligned} \tag{13}$$

となる。

4.3　数値例

ある事実について一つの証拠Aとそれを補強する別の証拠Bが与えられたとき、これら2つの証拠の結合したものを想定し、その真理度を試算する。ただし2つの証拠ともにそれ自体のなかでは矛盾はないとする。すなわち (2) により

$$a^c=b^c=0,\quad a+a^u+a^n=1,\quad b+b^u+b^n=1 \tag{14}$$

である。また簡単のために $\delta_{ab}=0$ とおく。これはここでは $\gamma_{A^{aL}B^u}=0$ とおいたことに等しい。

（数値例1） $b=0.2,\ a^u=0.2,\ b^u=0.2$ とし、証拠Aの真の確信度 a を変化させた場合の結合証拠の真理度を求める。これは証拠Bが真であることにあまり確信がもてない場合である。

$0\leq a\leq b=0.2$　のとき

$$T=a,\ C=0.2-a,\ U=0.04,\ F=0.76,$$

$0.2<a\leq 0.8$　のとき

$$T=0.2,\ C=a-0.2,\ U=0.04,\ F=0.96-a.$$

（数値例2） $b=0.2,\ a^u=0.01,\ b^u=0.2$。この場合は証拠Bについては上と同じだが、証拠Aの不明度が

極めて小さい場合である。
$0 \leq a \leq b = 0.2$　のとき

$$T = a,\ C = 0.2 - a,\ U = 0.002,\ F = 0.798,$$

$0.2 < a \leq 0.99$　のとき

$$T = 0.2,\ C = a - 0.2,\ U = 0.002,\ F = 0.998 - a.$$

（数値例３） $b = 0.4,\ a^u = 0.01,\ b^u = 0.2$。これは上の数値例２での証拠Ｂにおける偽の確信度を 0.5 以下とした場合である。
$0 \leq a \leq b = 0.4$　のとき

$$T = a,\ C = 0.4 - a,\ U = 0.002,\ F = 0.598,$$

$0.4 < a \leq 0.99$　のとき

$$T = 0.4,\ C = a - 0.4,\ U = 0.002,\ F = 0.998 - a.$$

（数値例の考察） ２つの証拠の真の度合いがともに高くないと、結合結果の真の確信度は高くならない。それに対し、偽の度合いは一方の証拠の真の度合いが高ければ、低く抑えられる。矛盾度は、両証拠の真の度合いの差に正比例する。

（Dempster,Shafer の結合規則の場合）

比較のために上記の例と同じ数値に対して、Dempster,Shafer（以下 DS ）の結合規則を適用してみる。DS の確率の計算では、不明や矛盾は陽には取りあげられていないので、次のように解釈する。

$$T = a(1 - b^n),\quad C = ab^n,$$

$$U = (1 - a)(1 - b^n),\quad F = b^n(1 - a).$$

このとき、数値例１、２に対しては、$b^n = 0.6$ で、

$$T = 0.4a,\quad C = 0.6a,\quad U = 0.4(1-a),\quad F = 0.6(1-a).$$

数値例３に対しては、$b^n = 0.4$ で

$$T = 0.6a,\quad C = 0.4a,\quad U = 0.6(1-a),\quad F = 0.4(1-a).$$

この結果から、DS の結合規則は前掲の例と異なる傾向を示すことがわかる。これは DS の結合則は、もともと独立性を想定していると考えられるので当然ともいえる。

5　まとめ

ある事実の観測、またはその事実に関する証拠の信用度合いが、複数回観測することによりどう変わるかを調べた。ある観測や証拠が矛盾や不明を含む場合の信用度を、その観測の（真、矛盾、不明、偽）の度合いの組で表し、これを真理度と呼んだ。個々の観測の真理度から２つの観測結果を結合した結論の真理度を、各観測の間に正従属の関係がある場合について求めた。

類似の観測を多数回繰り返した場合、それらの総合結果として得られる真の度合いは、各観測のうちで最低の真の度合いよりいくらか大きな値となる。結合結果の偽の度合いは、各観測のうちで最大の真の度合いの補数値から矛盾度、不明度を減じた値にに近い。矛盾度、不明度は観測回数が増えるにつれ、減少していく傾向にある。

これについて次のような解釈ができる。同じソースからの複数の観測や証言では、通常その真の部分に正の従属があると考えられ、そのような観測、証言が繰り返されてもその信用度が増すことはない。また繰り返される観測、証言に含まれる矛盾や不確かさが互いに無関係なら、繰り返された結果の矛盾や不確かさは減少する。

このように真の度合いが低い観測が混じると、全体の真の度合いがそれだけ低下する。ただし偽の度合いの低い観測があると、全体の偽の程度は下がる。これは大数の法則やベイズ推定などにおける結論とは明らかに異なる結果である。それは後者においては、ここで想定したような形での正の従属関係が考慮されていないためと考えられる。

なお独立の場合、負従属の場合の検討は別の機会にゆずる。

参考文献

[1] S.Mabuchi,An interpretation of membership functions and the properties of general probabilistic operators as fuzzy set operators. (II).Extension to three-valued and interval-valued fuzzy sets, *Fuzzy Sets and Systems* **92** 31-50 (1997)

[2] 間渕重昭、一般確率演算による「矛盾」を含むファジィ集合演算則と統合証拠の真理度評価への応用、第 9 回ファジィシステムシンポジウム、701-704 (1993)

問い合わせ先:　〒 564-8511 吹田市岸部南 2-36-1
大阪学院大学　間渕重昭
（電）06-6381-8434（ Fax ）06-6382-4363
E-mail: mabuchi@utc.osaka-gu.ac.jp

WE4−4

局所定常性にもとづく経済指標の時系列解析と予測への応用

A analysis of Time series in the Economic Index based the locally stationary model and The application to prediction

松田　充夫
Nobuo MATSUDA

樟蔭女子短大
Shoin Junior College

Abstract: The stationary of time series is assumed in many methods of time series analysis of the economic indexes. Thus, it is important to analyze the stationary before analyzing to observed time series. In this paper. The stationary of time series of the Diffusion indexes is analyzed using MEM(Maximum Entropy Method) ,Higuchi method based on fractal theory and The locally stationary AR model .

Key Words: The locally stationary AR model, Maximum Entropy Method, Fractal dimension ,Diffusion Index

1．はじめに

景気動向指数[1]は、経済指標の内でも景気状況の判断に果たす役割も大きい。この指数の変動は、生産活動や国内外の経済環境等によってかなり不規則になる。これまでに、周波数解析やフラクタル解析・カオス同定の解析手法を景気動向指数の時系列に適用し、その力学的構造について検討してきた[2]。

これまで時系列解析では、もっぱら定常性を前提として解析してきた。しかしながら実際の時系列データにおいては、定常性が成立するか否かは明らかでないため、定常性を仮定している従来の線形解析やカオス時系列解析から得られた結果が信頼できる保証はない。したがって時系列を解析する場合はあらかじめ時系列の定常性の確認が必要となる。

本論文では、定性的ではあるが比較的に馴染みがあり、直感的にも受け入れやすい局所定常ARモデルを用いて、景気動向指数の時系列を解析し、時系列の定常性について調べる。またこの局所定常ARモデルの解析結果と周波数解析およびフラクタル次元解析の結果との比較から時系列予測手法が具備すべき要件などについても考察する。

2．景気動向指数の時系列データと解析手法

（1）　時系列データ

時系列データには経企庁のホームページ[5]で公表されている景気動向指数の１９７３年４月から１９９９年１１月まで（３２０個）を採用した。

（2）　スペクトル解析とフラクタル次元解析

スペクトル解析には、MEM（最大エントロピー法）[4]を、フラクタル次元の推定には、Higuchi の方法[5]を採用した。

MEMパワースペクトルの計算には、式（1）を用いた。

$$p(f)=\frac{P_m\Delta t}{\left|1+\sum_{k=1}^{m}\gamma_{mk}e^{i2\pi fk\Delta t}\right|^2} \qquad (1)$$

Higuchiの方法は、一定時間間隔に採られた時系列 $X(n)$ に対して、時刻 m から時間間隔 k にあるデータの折れ線の長さ $L_m(k)$ は次式から計算した。

$$L_m(k)=\left\{\left(\sum_{i=1}^{\left[\frac{N-m}{k}\right]}\left|X(m+ik)-X(m+(i-1)k)\right|\right)\frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{k}\right]\times k}\right\}\Big/k \qquad (2)$$

ここに[ ]はガウス記号で、N はデータ数を表す。$\langle L(k)\rangle$ は $L_m(k)$ の k についての平均である。$\langle L(k)\rangle \propto k^{-D}$ なる関係からフラクタル次元Dを計算した。

（3）局所定常ARモデル[6]

時系列の全区間では定常ではないが、適当な小区間に分割すると各区間では定常とみなせると仮定する。分割区間の個数や、各区間データ数は、未知数である。いま時系列を $y_1,y_2,\cdots,y_n$ とし、分割する区間の個数はk、

各区間のデータ数を N_j とする。局所定常ＡＲモデルは、ｊ番目の小区間の時系列 y_n が次式に従うものとする。

$$y_n = \sum_{i=1}^{mj} a_{ji} y_{n-1} + v_{nj} \qquad (3)$$

ただし

v_{nj} は $E(v_{nj}) = 0, E(v_{nj}^2) = \sigma_j^2, E(v_{nj} y_{n-m}) = 0$ を満たす白色雑音とする。この局所定常ＡＲモデルのパラメータ $a_{j1}, a_{j2}, \cdots, a_{jmj}$ の最適値は、最尤度法により推定し、その判断基準にＡＩＣに用いた。

局所定常ＡＲモデルにおけるＡＩＣは

$$AIC = (N - m_1)(\log 2\pi + 1) + \sum_{j=1}^{k} N_j \log \hat{\sigma}_j^2 + 2\sum_{j=1}^{k} (m_j + 1) \qquad (4)$$

によって与えられる。

小区間の数ｋ、小区間の長さ N_j、ＡＲモデルの次数 m_j は、いろんな可能性があるので、この中からＡＩＣを最小にする組み合わせを選ぶ。実際にすべての可能な組み合わせに対してＡＩＣを最小にするものを探すことは膨大な計算量を要するので、分割の最小単位と各区間で当てはめるＡＲモデルの最高次数ｍをあらかじめ定め、該当する区間を決定した。

３．解析結果

３．１　MEMによるスペクトル解析

図１はデータ数１５４個、次数＝２５のMEM法で求めた２つの区間での一致指数のパワースペクトルである。このパワースペクトルから、２つの区間では周期が若干異なり、最近になるにしたがい長周期になる傾向があるのがわかる。しかしMEMのスペクトルから局所的な変動や非定常性を知ることは困難である。

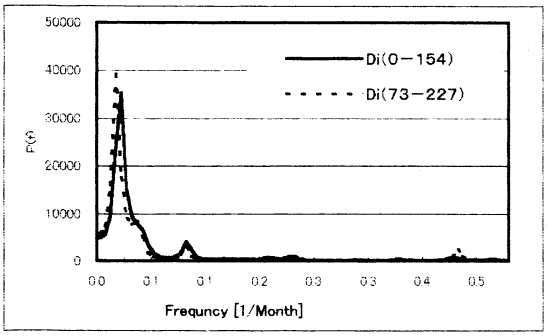


Fig.1 Power spectrum of coincident index by MEM from different time section.

３．２　フラクタル次元解析

図２は１５４個の２つの区間での一致指数の時系列データから得られた時間間隔ｋと折れ線の長さの平均<L(k)>の両対数のグラフである。図からほぼｋ＝１２～１３を境に２種類の直線的な傾きが見られることから、そのｋの値を境にフラクタル次元が変わることを示している。このグラフの傾きからフラクタル次元を求めると、ｋが２０以下では D≈1.55、それ以上では、D≈2.14になっている。

時系列の全区間が定常的あるならば、全区間でフラクタル次元は一様であることが期待される。期間幅を154箇月にして、３つの時点（73/04～85/01、79/08～92/05、85/02～98/11）で調べた結果が、表１である。73年4から154箇月、79年8月から154箇月、85年2月からの154箇月と次第にkが２０以下のフラクタル次元が増加して、時系列の変動が複雑化してことが分かる。

このことから、時系列を暗黙のうちに定常性を仮定して解析するのが妥当でない解釈できる。この現象がどのような原因によるものなのかはよく分からないが、時期的に高度成長の期間とそれ以後のバブル崩壊後の時期と重なることから経済構造が構造的に違うことに起因するためではないかと考える。このような現象は予測を行う上で予測精度にかなり影響を及ぼすものと考えられる。しかし、MEMのスペクトルの場合と同様に変化の時期を特定することは難しい。

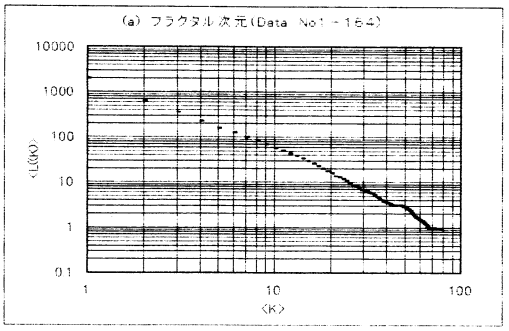


Fig.2 The logarithm of the curve length log<*L*(*k*)> for the time series of coincident index is given as function log *k*..

時間間隔	73/04−85/01	79/08−92/05	85/02−98/11
1≦(k)≦10.0	1.550	1.574	1.690
10.0≦(k)≦100.0	2.143	2.114	2.263

Table 1 Fractal dimension of the coincident index for 154 months

３．３　局所定常ARモデルによるスペクトル

図３の（A）から（F）は、一致指数の時系列について、次数＝１０、最小区間を４８月で、局所定常ARモデルから得たグラフである。左が小区間の時系列、右がその区間のスペクトルである。

グラフから、（D）の1986年２月～1990年１月に

当たる個所で急激な変化が生じていることが分かる。なお、次数＝１０、最小区間単位を１２で同様に求めた場合は、1984年９月～ 1987年３月に急激な変動を生じた可能性がある結果が得られた。図４はこの時期についてAIC 値の変化を詳しく求めたものである。図からAIC値の最小値は８６年１月である。また、94年１０月を境に新しい波動が生じているようにも見られる。図５は基底関数にMorletウェーブレットを用いた一致指数のTorrenceらによるプログラム[7]による連続系ウェーブレット変換の解析結果である。この両者を比較すると、局所定常ARモデルの推定とかなり一致した傾向を示すことがわかる。したがって、この期間に何らかの周期の変動や非定常な変動が生じたといえる。これらの結果から、1986 年～1987 年にかけて大きな経済構造の変化が起こった可能性がきわめて高いと考えられる。

４．予測への活用

経済指標の時系列は、必ずしも定常性の仮定が成立せずまた急激な変化が生じる可能性がある。そのためその予測手法には、定常性を有する区間の検出を有するとともに局所的な定常性や非定常性の下で予測可能な手法が必要である。手法として局所定常 AR、時変係数 AR モデルや時変非線形系のファジィ推論則の学習を入れたファジィ推論、遺伝的操作による構造時変モデルによる応用などが考えられる。

５．おわりに

以上の結果から、（１）経済指標の時系列解析から経済構造の質的変化がバブル期に高い確率で生じた、（２）局所定常ARモデルは構造変化の時期が推定に有効である、（３）経済（指標）予測手法には局所的な力学構造の変化に強い手法が必要である、ことが言える。これまで経済指標の時系列解析は定常性を暗に仮定して行うこと行われてきたが、経済指標の時系列は定常性の仮定が成立しないことも多いので、その点を考慮にする必要がある。

参考文献

[1] 経済企画庁調査局景気統計調査課：“景気動向指数の利用の手引き”

[2]松田　充夫：“経済指標の時系列データのフラクタル次元と予測可能性について”：日本ファジィ学会ソフトサイエンス第９回ソフトサイエンス・ワークショップ講演論文集，pp.93-96(1999)

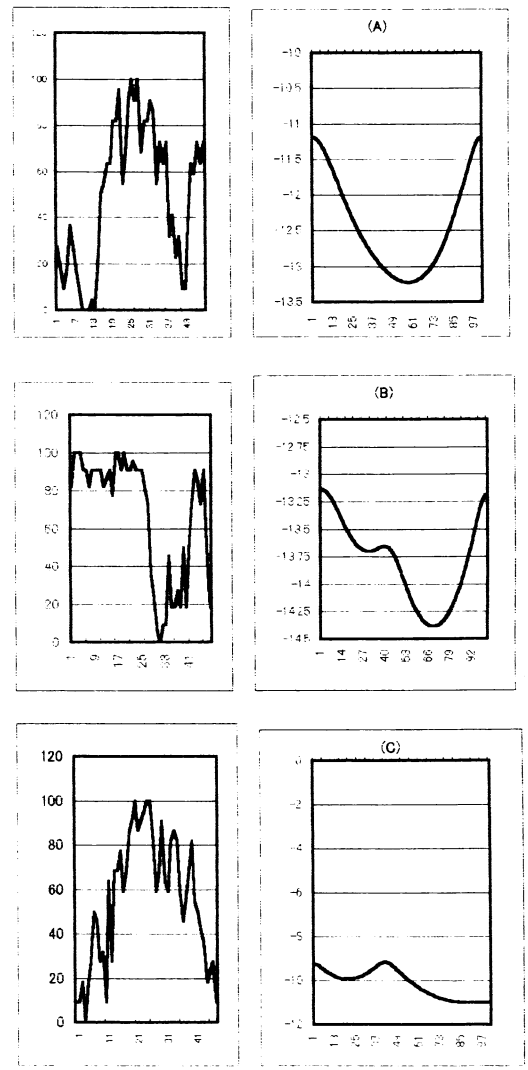
[3]http://www.epa.go.jp/j-j/doc/menu.html

[4]J.P.Burg：“A new analysis technique for time series data” .paper presented at Advanced Study Institute on signal Processing,NATO,Enschede, Netherlands(1968)

[5]T.Higuchi：“Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory” ,Physica D .31.pp.273-283(1988)

[6]北川源四郎：“時系列解析プログラミング”、岩波書店（1993）

[7]http://paos.colorado.edu/research/wavelets/



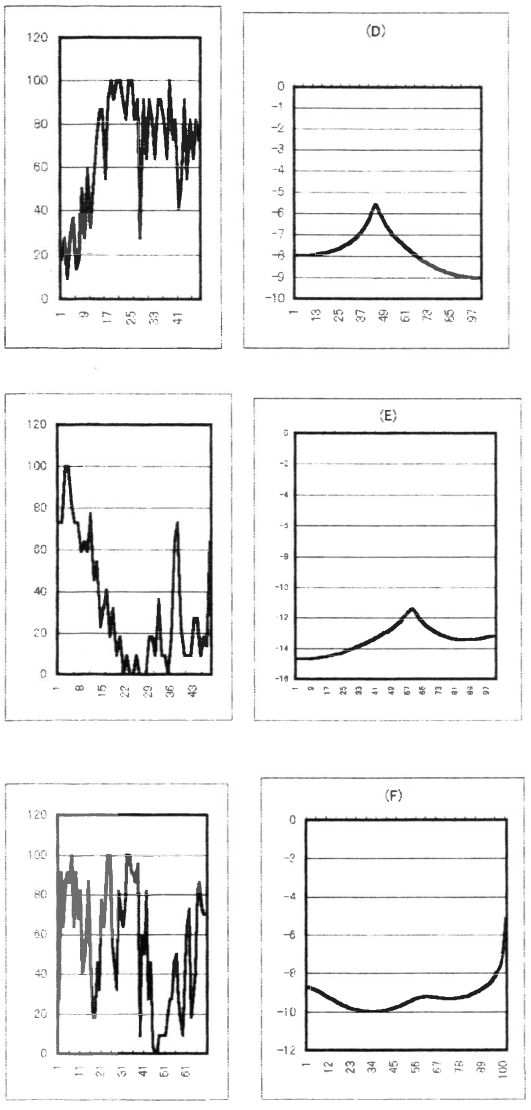


Fig.3 Local spectrum using the locally stationary AR model (Oder=10,minimum span=48,data number =320)

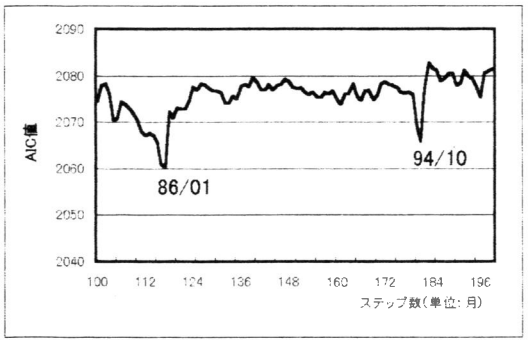


Fig.4 AIC plots using the locally stationary AR model.

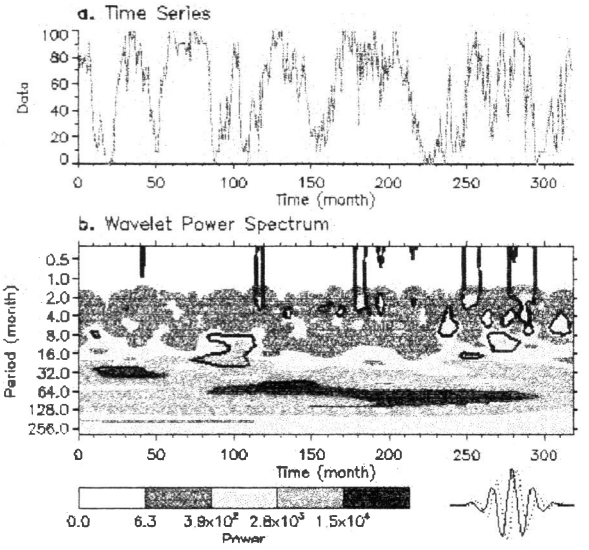


Fig.5 (a)Time series of coincident index data (b)The wavelet spectrum(Molet basis)

[問い合わせ先]
松田　充夫　樟蔭女子短期大学
〒639-0298　奈良県香芝市関屋 958
e-mail :ur7n-mtd@asahi-net.or.jp

WF1−1

ファジィ索引とその類似データ検索への応用

Fuzzy Index and Its Application to Similar Data Retrieval

馬野 元秀　大槻 充紀　宇野 裕之
Motohide UMANO　Mitsunori OTSUKI　Yushi UNO

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract We propose a fuzzy index technique for accessing rapidly to numerical data and retrieving similar data to the query data. Using the retrieved similar data, we infer a value of some attribute of query data. We propose a leaning method by adding the data to the indexed data sets or updating certainty factor in the case where the inferred value is wrong. We apply the method to the iris classification data by Fisher.

1. はじめに

データからファジィルールを獲得するためのさまざまな研究が行なわれている。しかし、データによっては、ルールがうまく抽出できない場合もある。

そこで、本研究では、数値データを対象として、データを蓄積しておき、推論したいデータと類似したデータを検索し、検索されたデータを基にして必要な値の推論を行なう方法について述べる。データを蓄積するときに、ファジィ集合による索引付けを行なっておき、類似データの検索の高速化を図るとともに、その索引を用いてデータの類似度を求める方法を提案する。また、検索要求に対して類似データが存在しない場合はこのデータを保有データに追加したり、不正解の場合には保有データの確信度を調整することにより学習を行なう。

そして、この手法を R.A. Fisher のアヤメの分類データに適用した結果を示す。

2. ファジィ索引と類似データ検索

(1) 記号データに対する索引

索引はデータの場所をデータの一部から高速に求めるための手法の 1 つである。例えば、文献を登録するときにキーワード (索引語) を設定しておき、検索時にキーワード (検索語) を用いることにより、検索語と索引語の一致から検索文献を求めることができる。各索引語と文献の間に関係があるかないかを指定し、検索語と索引語が完全に一致した場合のみ、対応する文献を検索結果として出力する。

これを拡張して、文献が索引語と関係している度合いを用いるファジィ索引も提案されている [1]。この場合、ある索引語がその文献に対してどれぐらい関係しているかを区間 $[0,1]$ の数値で表わす。これにより、文献に対するキーワードの重要性が表現でき、検索結果において、各文献が検索条件と一致している度合いを $[0,1]$ の数値で知ることができる。

(2) 数値データに対する索引

本論文では、データが数値の場合の索引付けについて考える。通常の索引を用いる場合は、各属性を適当な区間に分けて索引付けすることになる。同じデータを検索する場合はこれでよいが、類似したデータを検索する場合には、索引の境界において類似データの検索がうまくいかなくなる。例えば、$0 \leq x \leq 30$ の範囲のデータ $\{2, 13, 21, 10, 19\}$ を対象とする場合、そのデータを $0 \leq x \leq 10$、$10 < x \leq 20$、$20 < x \leq 30$ の範囲に分けて索引付けすると、検索要求 $x = 11$ に対して、$0 \leq x \leq 10$ の範囲はチェックされないので、$x = 10$ は $x = 11$ に近いにもかかわらず、検索されないことになっ

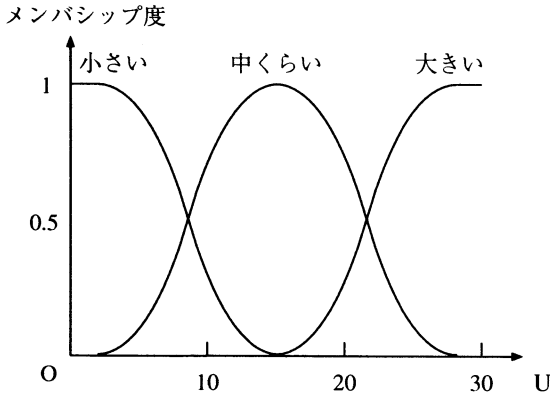


図 1. メンバシップ関数

表 1. ファジィ索引

x	小さい	中くらい	大きい
2	1	0	0
13	0.1	0.9	0
21	0	0.6	0.4
10	0.3	0.7	0
19	0	0.8	0.2

てしまう。

そこで、ファジィ集合を用いて、データを索引付けすることを考える。例えば、前と同じデータ $\{2,13,21,10,19\}$ を対象とする場合、**図 1** のような「小さい」、「中くらい」、「大きい」の 3 つのファジィ集合を用いて索引付けを行なう。この結果は**表 1** のようになる。

このとき、例えば「小さい」という検索要求に対しては、表 1 を用いると高速に検索可能で、$\{1/2, 0.1/13, 0.3/10\}$ となる。

(3) 類似データの検索

数値 11 と類似したデータを検索する場合はどうであろうか。まず、検索要求 $x = 11$ に対する索引用のファジィ集合のメンバシップ値を計算する。これは、「小さい」、「中くらい」、「大きい」に対して、それぞれ、0.2、0.8、0 となる。すると、ファジィ索引の値がこれと同じくらいになるデータが $x = 11$ と類似のデータであると見なすことができる。このとき、「中くらい」のような単調でない関数の場合には、メンバシップ値が等しくなる要素が 2 つ以上あるので、注意を要する。

一般に、検索要求に対するファジィ索引付けされた保有データの類似度の計算方法は次のようになる。

いま m 個の属性 A_1、A_2、…、A_m をもつ検索要求 $x = (x_1, x_2, \ldots, x_m)$ とファジィ索引付けされた保有データ $x_k = (x_{k1}, x_{k2}, \ldots, x_{km})$ の類似度を計算するとする。属性 A_i に関する j 番目のファジィ索引用のファジィ集合を F_{ij} とすると、x と x_k との類似度 s を求めるために、まず属性 A_i のファジィ集合 F_{ij} による類似度 s_{ij} を

$$s_{ij} = \begin{cases} \dfrac{\min(F_{ij}(x_i), F_{ij}(x_{ki}))}{\max(F_{ij}(x_i), F_{ij}(x_{ki}))} \\ \qquad \text{if } \max(F_{ij}(x_i), F_{ij}(x_{ki})) \neq 0 \\ 0 \quad \text{if } \max(F_{ij}(x_i), F_{ij}(x_{ki})) = 0 \end{cases} \tag{1}$$

により計算する。この値は、$F_{ij}(x_i) = F_{ij}(x_{ki})$ のとき 1 となり、$F_{ij}(x_i)$ または $F_{ij}(x_{ki})$ のいずれかが 0 のときは 0 となる。そして、属性 A_i の類似度 s_i を

$$s_i = \min_j s_{ij} \tag{2}$$

より計算し、データ全体の類似度 s を

$$s = \prod_i s_i \tag{3}$$

で計算する。

[例] 4 つの属性を持つ保有データ x_k =(7.3, 3.6, 6.2, 2.3) に対して、検索要求 x =(7.2, 3.6, 6.1, 2.5) を与えた場合について考える。各属性の索引用のファジィ集合としては **図 2** のものを用いた。ここで、$a_{i1} = 0$、$a_{i5} = 10$ とし、a_{i2}、a_{i3}、a_{i4} は a_{i1} と a_{i5} を 4 等分した値を用いた。

属性 A_1 に関する類似度 s_1 は、F_{13} =*middle* に関して $0.05/0.08 = 0.625$ となり、F_{14} =*large* に関して $0.95/0.97 = 0.979$ となる。したがって、属

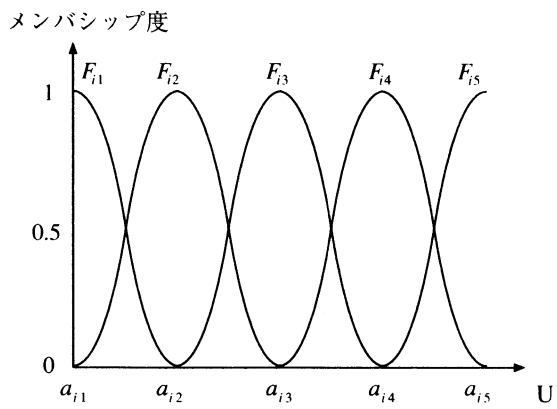


図 2. 例で使うファジィ集合

性 A_1 に関する類似度 s_1 は 2 つの小さい方をとり 0.625 となる。

同様にして、A_2、A_3、A_4 の類似度を求めると、それぞれ、1、0.847、0.987 となり、

$$s = 0.625 \times 1 \times 0.847 \times 0.987$$
$$= 0.522493$$

となる。

また、保有データ x_k =(5.5, 3.0, 7.0, 4.2) に対して、上と同じ検索要求 x =(7.2, 3.6, 6.1, 2.5) を与えた場合について考える。同様の計算を行なうと、A_1、A_2、A_3、A_4 の類似度は、それぞれ、0.051、0.222、0.169、0.20 となり、全体の類似度は

$$s = 0.051 \times 0.222 \times 0.169 \times 0.20$$
$$= 0.000383$$

となる。

R.A. Fisher のアヤメのデータ [2] を用いて、検索実験を行なった。このデータは setosa、versicolor、virginica という 3 種類のアヤメについて，がくの長さ、がくの幅、花弁の長さ、花弁の幅の 4 種類の属性を計測したもので，各種類 50 個ずつ計 150 個存在する。

このデータの 4 つの数値属性を用いて、索引のファジィ集合の数 n を変えたときの、検索対象データの数を調べた。データをランダムに半分に分け、一方を保有データ集合とし、もう一方を検索要求データとして実験を行ない、その後、保有データと検索データを入れ替え再び実験を行なう。この試行を 50 回繰り返した。その平均とその標準偏差および最大値を**表 2** に示す。

各属性の索引付けに用いるファジィ集合は、各属性 A_i の値の最大値 $x_{i,\max}$ と最小値 $x_{i,\min}$ を求め、$a_{i1} = x_{i,\min}$、$a_{in} = x_{i,\max}$ として図 2 のように定義した。

表 2. 検索対象データ数

	ファジィ集合数			
	3	5	7	9
平均	67.71	30.06	17.88	10.26
標準偏差	10.97	11.27	7.46	5.23
最大	74	47	36	23
最小	0	0	0	0

3. 類似データに基づく推論

分類クラスの値が未知のデータと類似したデータを検索し、検索されたデータの分類クラスの未知データの分類クラスの値を推論する方法が考えられる。

類似検索されたデータを分類クラスごとに分けて、クラス c_i の類似度の最大値 $s^{c_i}_{\max}$ と平均値 $s^{c_i}_{\text{ave}}$ を求める。そして、次のファジィルールでそれぞれのクラスの確信度 s^{c_i} を計算する。

If $s^{c_i}_{\max}$ is *very small* then $s^{c_i} = 0$
If $s^{c_i}_{\max}$ is *small* then $s^{c_i} = s^{c_i}_{\text{ave}}$
If $s^{c_i}_{\max}$ is *middle* then $s^{c_i} = (s^{c_i}_{\text{ave}} + s^{c_i}_{\max})/2$
If $s^{c_i}_{\max}$ is *large* then $s^{c_i} = s^{c_i}_{\max}$
If $s^{c_i}_{\max}$ is *very large* then $s^{c_i} = 1$

ここで、ファジィ集合 *very small*、*small*、*middle*、*large*、*very large* は 図2 で $a_{i1} = 0$、$a_{i5} = 1$ とし、さらに三角型のメンバシップ関数としたもので、順に、F_{i1}、F_{i2}、F_{i3}、F_{i4}、F_{i5} に対応している。

そして、この確信度が最大となるクラスを推論結果とする。

前節のアヤメのデータを用いて、推論実験を行なった。索引のファジィ集合の数 n を変えたときの、推論結果について調べた。正解数と検索失敗数の平均と標準偏差、最大値、最小値を**表 3** に示

表 3. 正解数と検索の失敗数

	ファジィ集合数			
	3		5	
	正解数	失敗数	正解数	失敗数
平均	65.62	0	67.84	0
標準偏差	2.14	0	2.14	0
最大	70	0	73	0
最小	60	0	62	0

	ファジィ集合数			
	7		9	
	正解数	失敗数	正解数	失敗数
平均	62.76	0.92	65.78	2.01
標準偏差	2.42	0.75	2.37	1.37
最大	68	2	71	6
最小	56	0	60	0

す。検索の失敗とは、すべての属性の類似度が 0 のものしか検索できなかった場合である。検索の失敗は、正解と不正解とは別に数えているので、不正解数は 75 から正解数と失敗数を引いたものになる。

表2と表3より、ファジィ集合数を増やせば、検索対象データは減少し高速に検索できるが、索引付けが細かくなり過ぎて検索の失敗数は増加する。

4. 保有データの追加と確信度の更新

類似データを用いた推論結果が正解とならない場合、その原因として、類似データが存在しない場合と誤ったデータを保有している場合が考えられる。前者の場合は入力したデータを保有データ集合に追加し、後者の場合には保有データに確信度を付け、確信度を調整すればよい。

具体的には、正解のクラスの確信度が低ければ、正解・不正解にかかわらず入力データを保有データ集合に追加し、不正解のときには、正解のクラスに属する保有データの確信度を上げ、推論されたクラス (すなわち不正解のクラス) のデータの確信度を下げる。

確信度の修正量は、次のようにして求める。確信度は $[0,1]$ の範囲にしておきたいので、確信度を $[-\infty,+\infty]$ にシグモイド関数の逆関数により写像した x を考える [3]。x の初期値を 0 とし (確信度では 0.5 ということになる)、正解ならば x に一定値 ε を加え、不正解なら x から ε を引く。この x を次のシグモイド関数で計算すれば確信度を得ることができる。

$$f(x) = \frac{1}{1 + exp(-x)} \tag{4}$$

この方法は、入力に類似したデータをできるだけ保有するので、保有データ数は大きくなる。

入力データを保有データに追加するかどうかの正解確信度のしきい値は、属性値の数 n に依存するので、1 つの属性に対するしきい値 α $(0 \leq \alpha \leq 1)$ を決めて、α^n を用いる。

数値実験は同じくアヤメのデータを用い、半分で学習を行ない、残りでテストを行なう。今回は、半分すべてを保有データ集合とするのではなく、学習を行ないながらデータを保有し確信度を更新していく。同様に、データを入れ替えて、再び実験を行なう。この試行を 50 回繰り返し、正解数と検索失敗数の平均と標準偏差、最大値、最小値を求めた。ファジィ集合の数は 5 とし、$\alpha = 0.5$ とし、確信度の修正に用いる変化量 $\varepsilon = 0.5$ とする。この結果は、**表 4** のようになる。

表 4. データの追加と確信度の更新

	正解数	失敗数	保有データ数
平均	67.69	0.10	68.32
標準偏差	2.20	0.30	1.69
最大	73	1	74
最小	62	0	64

5. おわりに

本研究では、数値データを対象として、類似データの検索の高速化を図るためにファジィ索引とこれを用いた類似データの検索方法を提案した。さらに、類似データを基にして推論を行なう方法についても述べた。さらに、簡単な学習方法も提案した。この方法は、データにあまり規則性がない場合やルールではうまく処理できない例外的なデータに対して有効であると思われる。

保有データの追加とその確信度の更新については、本論文で示した以外にも、いくつかの方法が考えられる。今後、考えて行きたい。

参考文献

[1] 宮本 定明、三宅 輝久 (1993):ファジィ理論と情報検索モデル、日本ファジィ学会 (編) : ファジィ・データベースと情報検索、日刊工業新聞社、pp.123–151

[2] R.A. Fisher (1936): The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems, *Annals of Eugenics*, Vol.7, pp.170–188

[3] 今村 佳世、篠原 清敏、馬野 元秀、田村 坦之 (1999): 定量属性を含むデータからのファジィルールの抽出—忘却型ファジィニューラルネットワークを用いて—、計測自動制御学会論文集、Vol.35、pp.407–414

[問い合わせ先]

〒599–8531
堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 0722–54–9675
FAX: 0722–54–9930
Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

WF 1−2

ファジィ・フレーム・システムの拡張

Extension of Fuzzy Frame System

馬野 元秀　後藤 聡　宇野 裕之　瀬田 和久
Motohide UMANO　Satoshi GOTO　Yushi UNO　Kazuhisa SETA

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract We have proposed Fuzzy Frame System, a tool for programming knowledge based system using fuzzy logic, a user can define fuzzy frames with fuzzy terms and fuzzy predicates for retrieving flexibly a slot value in a frame. We have re-implemented and extended the system. In this paper, we present the new system facilities using several examples.

1. はじめに

人間の知識を表現する方法としては、意味ネットワークやプロダクションルール以外に、フレームによる方法[1]がある。フレーム (frame) とは概念化された人間の知識を表すデータ構造であり、フレームは属性を保持するスロットから構成され、人間は状況に応じたフレームを用いて推論したり、得た知識をフレームとして蓄えたりしていると Minsky は提唱している。

このフレーム理論に基づいたフレームシステムの拡張として、我々は以前にファジィ理論を応用したファジィ・フレーム・システムを作成した[2]。このシステムでは、通常のフレーム・システムのようにスロットにデータを蓄えるだけでなくスロット値の検索時や更新時に自動的に起動するような手続きを埋め込むことができた。また、クラス間には上位−下位関係が定義でき、保持しないスロットの値の問い合わせに対しても、上位クラスから値を継承することができた。

さらに、ファジィ・フレーム・システムは次の機能を備えていた。

1. スロット値と確信度にファジィ集合を用いることができる。
2. 継承は多重継承 (複数の上位クラスをもつ) を許し、どれくらい属性を継承しているのかという重み (継承の度合いと呼ぶ) を付加することができる。
3. ファジィ集合や述語のラベルを各クラスごとに定義でき、同じラベルでも用いる場所で異なる意味を与えることができる。

今回、このシステムを再構築し機能を拡張した。今回の再構築も前回と同じく Common Lisp 上で、ファジィ集合処理システム[3]を用いてインプリメントした。次節以降では、元となったシステムの特徴も含めシステムの機能を紹介する。

2. フレームの定義法

元のシステムではフレームをクラスとも呼んでいたが、今回のシステムではフレームで統一することにした。本システムでフレームを定義するには次のような書式のマクロ **$def-frame** を用いる。

```
($def-frame (フレーム名 フレーム表示名)
      (スロット名1 ファシット 1-1 ファシット 1-2 ...)
      (スロット名2 ファシット 2-1 ファシット 2-2 ...)
      ...)
```

ここで、フレーム名はフレームの識別子で、シンボルで指定する。フレーム表示名は文字列であたえる。以前のシステムではフレーム名とフレームの表示名は区別していなかったが、別に定義できるようにした。以前のシステムの様にフレーム名だけを指定してもよい。その場合はシンボルの印字文字列をフレームの表示名とする。また、スロット名をファジィ集合にすることで同一のスロットに対し複数のスロット名を設定でき、さらにスロット名ごとに異なる確信度を付加することができる。各スロットはさらに、データや手続きの種類とその値からなるファシットを複数持つことができる。また、一部のスロットはファシットの指定をしなくてもよい (関係を表すスロットやフレーム全体で起動する手続きを指定するスロットなど)。さらに、ファジィ集合処理システムの機能により、関数名の前に **#&** をつけるだけで任意の関数で引数にファジィ集合を用いることが可能となる。

身長から標準体重を計算する手続き **weight** をまず定義し、「人間」フレームと「太郎」フレームを次のように定義してみる。

```
(defun weight (x)
  (* (- x 100) 0.9))
```

```
($def-frame 人間
  (言葉 :value 話す)
  (体重 :if-needed
    (#&weight
      (%get-slot-val *asked-frame* '身長))
    :cfact 0.8))

($def-frame 太郎
  (:is-a (人間 1.0))
  (身長 :value {0.7/170, 1/171, 0.8/172}))
```

ここで、:value はスロット値を表すためのファシットである。今回の拡張によりエイリアス (別名) を定義できるようにしたので:val と略記してもよいし、ユーザが別のものを定義してもよい。:if-needed は問い合わせのあったスロットに :value による値がない場合、記述された手続きを起動しその値をスロット値として返すファシットである。上の例では体重スロットに値がない場合、問い合わせのあったフレームの身長から値を計算によって返す。問い合わせのあったフレーム名はグローバル変数 *asked-frame*に束縛されるので、問い合わせのフレームに応じた処理を記述することができる。今回の拡張では、他にもこのような変数を多数用意した。また、:cfact は直前のファシットの確信度を指定する特殊なファシットである。

3. スロット値の検索

前節で定義したフレームからスロットの値を得るには以下の様にする。

$get-slot-val はフレーム名とスロット名からそのスロットの値を返す。太郎の身長を問い合わせてみると、

```
>($get-slot-val 太郎 身長)
{0.7/170, 1/171, 0.8/172}
```

とこのようになる。また、太郎には存在しないスロットの値を問い合わせてみると、

```
>($get-slot-val 太郎 言葉)
話す
```

となる。このように、上位のフレームから値を継承する。さらに、体重の値を問い合わせると、

```
>($get-slot-val 太郎 体重)
{0.7/63, 0.8/63.9, 0.8/64.8}
```

のように、人間フレームの体重スロットの :if-needed ファシットに記述された手続きが起動し、太郎の身長から体重の値を計算して返す (太郎の身長がファジィ集合の場合は拡張原理を用いる)。

この関数は、戻り値がファジィ集合の場合には、メンバシップ値を確信度で調整するが、この演算はユーザが指定可能である (デフォルトでは min)。また継承の度合いが設定されている場合、その度合いでも確信度を修正するが、その際の演算もユーザが定義可能である (デフォルトでは代数積)。

今回の拡張として、任意のファシットをデータとして扱える検索関数を用意した。$get-facet はフレーム名、スロット名、ファシットを受け取り、(1) ファシットの値、(2) 確信度、(3) 継承の段数 (継承の度合いは考慮しない)、(4) 継承パス、の 4 つの値を同時に返す多値関数である。

```
>($get-facet 太郎 体重 :val)
{0.7/63, 1/63.9, 0.8/64.8}
0.80000000000000004
1
(人間 太郎)
```

多重継承の場合には見つかった中でもっとも確信度の高いものを返す。またすべての値をリストで返す関数 $get-facet-list も用意してある。先の$get-slot-val は多重継承している場合には、すべての値をファジィ集合 (各要素のメンバシップ値が確信度を表す) で返す。さらに、どのフレームから優先的に継承するかを決定するアルゴリズムを 3 種類 (深さ優先、幅優先、ダイクストラ法) から選択できるようにした。継承に用いるしきい値としては従来よりあった継承の度合いの累積値によるもの以外に、継承の段数を用いることができる。また、複数の値が存在する場合に最初の n 個 (ユーザが指定可能) を見つけた段階で探索を打ち切る事もできる。

4. 言語ラベルの多重化

ファジィ集合はもともと言語ラベルと深い関係がある。しかし、同一のラベルでも通常は対象によって異なるファジィ集合を表していると考えられる。例えば、「高い」というラベルは、「人間」の「身長」に関しては「男」ならば「180cm」あたりで、「女」ならば「165cm」あたりで、「山」に関しては「1000m」以上で、「お菓子」に関しては「500 円」以上で最大値をとるようなファジィ集合を考えることができる。同様に、「168cm は高いか?」を考えた場合、対象が「人間」なのか、「キリン」なのか、また「男」なのか「女」なのかで異なる度合いを返すファジィ述語「高い」を考えるべきであろう。

この要求に従い、ファジィ・フレーム・システムではファジィ集合を表す言語ラベル (ファジィ語 fuzzy term) と述語を表す言語ラベル (ファジィ述語 fuzzy predicate) を各フレームの各スロットごとに定義でき、問い合わせなどでラベルの定義が必要になった場合、自動的にもっともふさわしいと思われる定義を用いる機能を備えている。もちろん今回のシステムでもこの機能を引き継いでいる。例えば、「男」フレームと「女」フレームに異なる tall を定義してみる。ファジィ語は :term というファシットを用いて直接スロットに記述するか、手続き$set-term を用いて定義する。$set-term は第一引数に (ラベル名 フレーム名 スロット名) を与え、第二引数にその定義を与える。スロット名を省略した場合はフレーム全体でのファジィ語として、フレーム名も省略した場合 (その場合は ( ) は不要) はグローバルなファジィ語として解釈される。

```
>($set-term (tall 男 身長)
           {0.2/170, 0.7/174, 1.0/177})
{0.2/170, 0.7/174, 1/177}

>($set-term (tall 女 身長)
           {0.2/155, 0.7/160, 1.0/164})
{0.2/155, 0.7/160, 1/164}
```

とする。そして、次郎と花子の身長をファジィ語tallを用い、それぞれの確信度を0.9、0.8として次のように定義する。

```
($def-frame 次郎
   (:is-a 男)
   (身長 :val tall :cf 0.9))

($def-frame 花子
   (:is-a 女)
   (身長 :val tall :cf 0.8))
```

そして、次郎と花子の身長のスロット値を検索すると、

```
>($get-slot-val 次郎 身長)
{0.2/170, 0.7/174, 0.9/177}

>($get-slot-val 花子 身長)
{0.2/155, 0.7/160, 0.8/164}
```

のようにラベルをそれぞれの上位フレームの同じスロットにある定義を用いて自動的に展開する(ただし、システムの変数*term-evaluation*の値をnilにするとtallのまま返す)。

ファジィ述語は :pred ファシットを用いてスロットに記述するか、フォーム$def-predを用いて定義する。$def-predはCommon Lispで関数を定義するためのフォームdefunと(ほぼ)同じ書式でフレームにファジィ述語を定義できる。第一引数で(述語名 フレーム名スロット名)として述語を定義するフレームとスロットを指定する。スロット名を省略した場合はフレーム全体でのファジィ述語として、フレーム名も省略した場合(その場合は( )は不要)はグローバルなファジィ述語として解釈される。第二引数は仮引数のリストで、それ以降に関数定義本体を記述する。

例としてファジィ述語tallを「男」と「女」の身長スロットにそれぞれ定義する。

```
($def-pred (tall 男 身長) (x)
  (cond
    ((\< x 170) 0)
    ((\< x 174) 0.2)
    ((\< x 177) 0.7)
    (t 1)))

($def-pred (tall 女 身長) (x)
  (cond
    ((\< x 155) 0)
    ((\< x 160) 0.2)
    ((\< x 164) 0.7)
    (t 1)))
```

この述語をスロット値が満たす度合いを求めるには述語名の前に#? をつけ、フレーム名とスロット名を与えればよい。例えば、

```
>(#?tall 次郎 身長)
{0.2/0.2, 0.7/0.7, 0.9/1}
```

となる。この例では「男」の「身長」スロットに記述されたファジィ述語 tall を、「次郎」の「身長」の値{0.2/170, 0.7/174, 0.9/177}に適用した結果が値となる。

また、特定の述語を指定したい場合は述語名の部分をリストにして(述語名フレーム名 スロット名)と表記する。例えば「花子」の「身長」に記述されているtall(実際には「女」フレームのものを継承する)で次郎の身長の度合いを調べたい場合、

```
>(#?(tall 花子 身長) 次郎 身長)
{0.9/1}
```

となる。

さらに、#@(述語名 フレーム名 スロット名)と表記することにより、ファジィ述語を通常のLISPの関数のように呼出して用いることもできる(例えば#' を前につけるとクロージャを形成することも可能である)。指定されたフレームに定義がない場合は上位フレームから継承するのでオブジェクト指向プログラミングにおけるメソッドのような使い方もできる。

```
>(#@(tall 次郎 身長) 170)
0.20000000000000001

>(#@(tall 花子 身長) 170)
1

>(funcall #'#@(tall 花子 身長) 163)
0.69999999999999996
```

次に#&を頭に付け、花子の身長スロットに定義されたtallをファジィ集合{0.7/158, 1.0/163, 0.8/165}へ適用してみると、

```
>(#&#@(tall 花子 身長)
    {0.7/158, 1.0/163, 0.8/165})
{0.7/0.2, 1/0.7, 0.8/1}
```

となり、ファジィ集合処理システムの機能も全く問題なく使用できる。

5. フレーム系

本システムでは、全く独立した複数の知識体系を同時にあつかえるようにするために、フレームが所属するフレーム系を複数定義できる。異なるフレーム系では同じシンボルで異なるフレームが参照される。フレーム系ごとに定義されるのは、フレーム以外に、エイリアスや次節で述べるフレーム間の関係とその属性、継承の発生する関係、などである。

6. 関係の定義と継承

元のファジィ・フレーム・システムでは、フレーム間の上位-下位関係しか扱えなかったが、フレーム間の関係を定義できるようにした。新しい関係の定義には$def-link

を用いる。$def-link で定義された関係にはそれに関する固有の手続きファシットやスロット等を定義できる。例えば全体–部分関係を表す関係 a-part-of を定義するには次のようにする。

```
($def-link :a-part-of)
```

この手続きはキーワード引数で、推移律の段数や、関係の度合いのしきい値等が指定可能である。他にも関係が作られた際に起動する付加手続きスロットや、スロットレベルでその関係を定義するためのファシット等を定義できる。

デフォルトでは継承が発生する関係は :is-a であるが、ユーザが定義した関係を継承が発生する関係にすることもできる。ただし同一のフレーム系で継承が発生する関係は同時に 1 種類しか指定できない。

手続き $set-link はフレーム間に関係を与える手続きで、関係を与えるフレーム名、関係名、その関係にあるフレーム名、確信度 (省略時は 1.0) を与える。例えば「人間」フレームから「地球」フレームへの :a-part-of 関係を作るには、

```
>($set-link 人間 :a-part-of 地球)
地球
1.0
```

とする。

$get-link はフレーム名と関係名を与えると、そのフレームとその関係にあるフレームのリストを度合いとともに返す。この際、フレーム間の関係も継承する。例えば「太郎」と :a-part-of 関係にあるフレームを調べてみると

```
>($get-link 太郎 :a-part-of)
((地球 1.0))
```

となり、「人間」フレームから「人間 a-part-of 地球」を継承している。

また、関係を定義すると、"関係名-p" という名前の述語が自動的に定義される。この述語はフレーム名を 2 つ受け取り、1 つ目のフレームから 2 つ目のフレームへ関係があるかどうかを調べる述語で、関係の度合い (各フレーム間の関係の度合いの累積値) と、段数 (度合いは考慮しない)、パスの 3 つの値を返す。関係が存在しない場合には nil を返す。たとえば、

```
>($set-link 地球 :a-part-of 宇宙)
宇宙
1.0
```

として、「太郎」から「宇宙」へ a-part-of 関係があるかを調べると、

```
>(:a-part-of-p '太郎 '宇宙)
1.0
2
(宇宙 地球 太郎)
```

のようになる。

7. その他の拡張

その他の拡張として次のような機能を追加した。(1) 任意のフレームから関係をたどりながら本体を実行してゆく繰り返しフォームや、すべてのフレームをたどる繰り返しフォームを使えるようにした。これにより、検索関数やファジィ述語などと組み合わせて柔軟な検索ができる。(2) 全ての付加手続きを継承可能とし、個別に継承のしきい値を設定できるようにした。(3) :value に代わるようなファシットをユーザが独自に追加定義でき、それに関する独自の付加手続きファシット (:if-needed 型のファシットの様に指定する) も定義できるようにした。(4) スロット値の型を指定する :data-type、更新禁止を表す :read-only、値や手続きを下位フレームへ継承させないようにする :not-inherit 等のファシットを追加した。(5) 手続きの起動条件を厳密にするなど、全体的にエラーチェックを強化した。(6) 現在のフレームの内容を確認できるようにした。

8. おわりに

ファジィ・フレーム・システムを再構築・拡張した。今回の拡張では従来のシステムの特徴に加え、関係やファシットをユーザが自由に定義できるようにし、付加手続きや関係も継承の対象にした。

今後はこれを利用し、現在作成中の自然言語処理システム用の知識ベースを構築する予定である。また、ファジィ・プロダクション・システムと連結させた知識システムなどを作成することも考えている。

参考文献

[1] M. Minsky (1975) : "A Framework for Representing Knowledge", in P.H. Winston (ed.), *The Phychology of Computer Vision*, McGraw-Hill, pp.211–280

[2] 角井、馬野、宮原 (1989) : 「ファジィ理論に基づくフレーム・システムの実現」、情報処理学会 第 39 回 (平成元年後期) 全国大会、pp.70–71

[3] 久米、馬野 (1989) : 「Common Lisp によるファジィ集合処理システムの実現」、情報処理学会 第 38 回 (平成元年前期) 全国大会、pp.70–71

[問い合わせ先]

〒599–8531
堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 0722–54–9675
FAX: 0722–54–9930
Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

WF1−3

幾何図形におけるアナロジーへのファジィ理論の応用

Application of Fuzzy Logic to Analogy in Geometrical Figures

馬野 元秀 Motohide UMANO　鳴戸 雅之 Masayuki NARUTO　宇野 裕之 Yushi UNO　瀬田 和久 Kazuhisa SETA

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科

Department of Mathematics and Information Sciences

College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract Analogy is very important in human reasoning, because it is used to reason some result in a field using knowledge in another field. We apply fuzzy logic to analogy in geometrical figures, where similarity relations of figures are very important. We formulate a method for calculating degrees of similarity in them using fuzzy logic.

1. はじめに

アナロジーとは，類推のことであり，その領域に関する情報が少なすぎて演繹などの手段では推論ができそうもないときに，それに類似した既知の領域の知識を用いて行う推論のことである．したがって，多分そうではないかと判断を下すことになり，推論結果は正しいとは限らないが，類推は人間が最も自然に用いる推論のひとつであり，新しい発想を得るのにも重要な役割を果たしている．機械化は非常に難しいが，機械化できればその恩恵は非常に大きいので，いくつかの方法が研究されている [1] [2].

本研究では，アナロジーの中で比較的取り扱いやすい幾何図形におけるアナロジーの問題を取り扱う．

2. 幾何図形におけるアナロジー

本論文では，図形における幾何学的類似問題について考える．その問題の例を図1に示す．この問題は「A の図が B の図に写像されるとすると，図 C の図は D の図にどのように写像されるか」という問題である．

2.1 幾何図形問題におけるアナロジーの手順

幾何図形におけるアナロジーは次のようなステップで行われる．

(1) 図形の入力

問題の表記についてはできるだけ人間の主観に依らない方法，つまり問題が与えられた時に誰がどのように入力しても同じように入力できるような方法をとるのが望ましい．具体的には，形，中心の座標，大きさを入力する．

位置は左下端を (0, 0)，右上端を (9, 9) とする座標を用い，大きさは0〜9の数値を用いる．数値以外に位置の座標または大きさが「大きい」「小さい」「中くらい」などのファジィ集合を用いた入力もできるようにする．

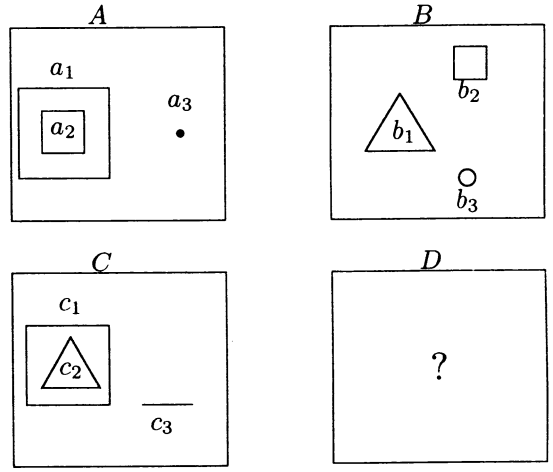


図 1. 幾何学的類似

(2) 図 A から B への対応

図 A から B への対応は，形，位置関係のうちのいずれかを用いて図形 a_1, a_2, a_3 と図形 b_1, b_2, b_3 との対応を決定する．これを基底問題における対応という．

(3) 図 A から C への対応

図 A から C への対応は，図形 a_1, a_2, a_3 と図形 c_1, c_2, c_3 との，形，位置関係，大きさのすべてを考慮して，最も類似した対応を求める．これを基底問題と目標問題の対応という．

(4) 図 D の生成

項目 (2) で求めた図 A から B への図形間の対応関係と図 A と C との図形間の対応関係に基づいて，新しい図形を生成する．このとき，図 A から B への形，位置関係，大きさの変化を図 C の図形に適用するが，変化

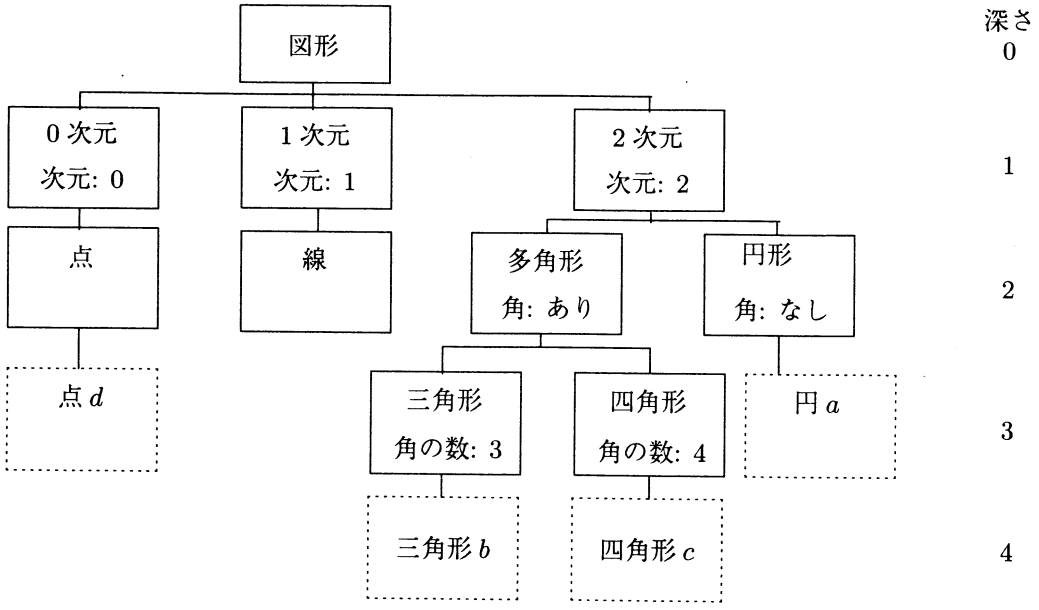


図 4. フレームの階層構造

を適用できない場合は図 B の状態を用いる.

2.2 類似

アナロジーを行う上で大きく関わってくることに，類似性がある. 幾何図形の問題では，形と位置関係と大きさの類似がある.

(1) 形の類似

形の類似は，例えば，図 2 や図 3 において 4 つの図形 a, b, c, d のうち類似している組み合わせはどれか，というものである. 図 2 では，c の正方形と d の長方形がいずれも四角形なので最も似た組み合わせとなる. 一方，図 3 では，d だけが 0 次元で他が 2 次元であるので d が他の図形と最も似ていないといえる. 残りの a, b, c の中では a は角がなく，b と c には角があるので，最も似た組み合わせは三角形 b と四角形 c の組み合わせと言える. このように，比べる対象によって類似性を判定する視点が変わってくる.

一般に α と β という「もの」が与えられただけでは α と β が類似しているかは判断できなくて，γ という視点を定めて，はじめて α と β が類似しているかどうかを議論できるようになる.

この視点を決めるためにフレームの階層構造を用いる. フレームの階層構造とは，図 4 のような構造のことをいう. ここで，四角の枠で囲まれたものがフレームで，線でつながれている上のフレームを上位フレーム，下のフレームを下位フレームと呼び，下位フレームは上位フレームの属性の値を継承している. したがって，三角形は角の数が 3, 角があり, 次元が 2 という値をもっていることになる. 図 3 の a, b, c, d は図 4 の破線の枠を持つフレームになる.

図 4 を見れば，b と c が最も類似した関係であると

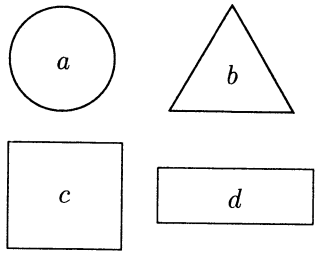


図 2. 形の類似の例 1

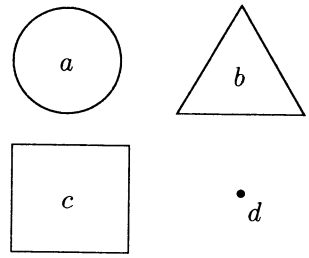


図 3. 形の類似の例 2

いうことがわかる. これは，共通の祖先 (多角形フレーム) のレベルが最も深いからである.

従来のフレームの階層構造では，図 5 の b の図形は細長い四角形としてしか表現できなかったが，アナロジーで用いる場合には，線とも類似しているといえなくてはならない. この場合，最も似た関係は a と b の間ではなく b と c の間になるようにしたい.

そこで，ファジィフレーム構造を用いて，ある図形が属するフレームを度合い付きで決められるようにすると，例えば，表 1 のように度合いを決めると b の四

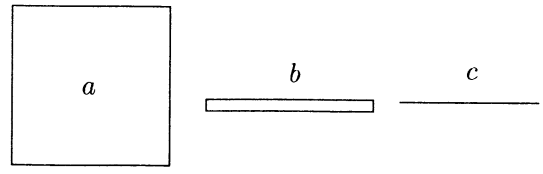


図 5. フレーム構造ではうまくいかない例

表 1. 入力図形をファジィ化したフレーム構造

	上位フレーム 1：度合い	上位フレーム 2：度合い
a	四角形：1	なし
b	線：0.7	四角形：0.3
c	線：1	なし

角形は四角形より線に近いといえ，a より c の方に類似しているといえる．

2 つの図形 p と q の形の類似度 S_f は次の式で求める．

$$S_f(p,\ q) = 2^{d-n} \times \min(b_p,\ b_q)$$

ここで，

d_p: 上位フレームへの図形 p の度合い

d_q: 上位フレームへの図形 q の度合い

n: フレームの階層構造の最も深いフレームの深さ

d: 図形 p と q の共通の祖先のうちでもっとも深いフレームの深さ

(3) 位置関係の類似

類似した位置関係を見つけるために，今回は左側に並んでいる度合い (*left* 度) と上側に並んでいる度合い (*above* 度) を計算する．そのために，まず図形 a と b の x 座標と y 座標の差，d_x と d_y を次のように求める．2 つの図形 a と b の座標を $(x_a,\ y_a)$, $(x_b,\ y_b)$ とすると，

$$d_x = x_a - x_b, \qquad d_y = y_a - y_b$$

となる．そして，*left* 度の決定は次のような簡略型ファジィ推論のルールを用いる．

rule1: if d_x is small & d_y is large then *left* is 0.1

rule2: if d_x is large & d_y is small then *left* is 0.7

rule3: if d_x is middle & d_y is middle then *left* is 0.4

rule4: if d_x is very-small then *left* is 1.0

rule5: if d_y is very-small then *left* is 0

ここで，very-small, $\cdots$, very-large のメンバーシップ関数は図 6 の通りである．推論は × - + - 重心法で行う．ただし，d_x と d_y がファジィ集合の場合には，その重心を求めてファジィ推論を行う．*above* 度は *left* 度の d_x を d_y と入れ替えて計算する．

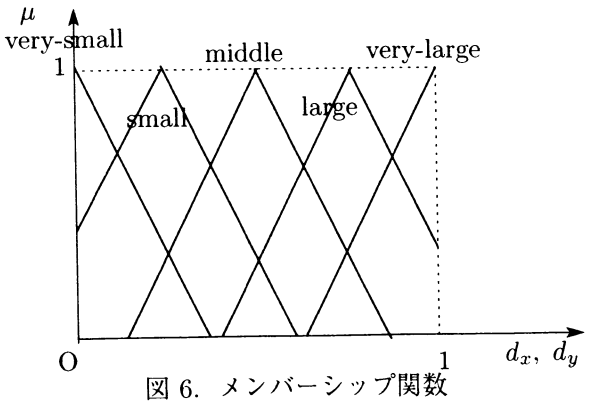


図 6. メンバーシップ関数

そして，図形 a_i と a_j の位置関係 $(a_i,\ a_j)$ と図形 c_k と c_l の位置関係 $(c_k,\ c_l)$ の類似度は，次の式で求める．

$$\begin{aligned} &S_p((a_i,\ a_j),\ (c_k,\ c_l)) \\ &= \frac{1}{2}\left(1 - |left(a_i,\ a_j) - left(c_k,\ c_l)|\right) \\ &\quad +(1 - |above(a_i,\ a_j) - above(c_k,\ c_l)|) \end{aligned}$$

(2) 大きさの類似

図形 a と b の大きさの類似度は次の式で求める．

$$S_s(a,\ b) = 1 - \frac{|s_a - s_b|}{10}$$

ここで，

s_a: 図形 a の大きさ

s_b: 図形 b の大きさ

s_a と s_b がファジィ集合の場合には，その重心を求めて計算を行う．

3. 実験例

図 1 の例を用いてアナロジーを行う．図形の入力は表 2 のようになる (ファジィ集合は図 6 を用いる)．

図 A から B への対応は形を使って計算するとする．形の類似度の計算は，例えば，$a_1 \to b_1$, $a_2 \to b_2$, $a_3 \to b_3$ という対応の場合は，

$$\begin{aligned} &\frac{1}{3}\left(S_f(a_1,\ b_1) + S_f(a_2,\ b_2) + S_f(a_3,\ b_3)\right) \\ &= \frac{1}{3}\left(2^{2-3} \times 1.0 + 2^{3-3} \times 1.0 + 2^{2-3} \times 0.3\right) \\ &= 0.55 \end{aligned}$$

となる．そして，他の対応のしかたについても同様にして計算を行うと，類似度の最も高い組み合わせは $a_1 \to b_1$, $a_2 \to b_2$, $a_3 \to b_3$ という対応になる．したがって，これが図 A から B への対応となる．

図 A から C への対応は，形，位置関係，大きさのすべてを使って求める．形の類似度の計算は上と同様にして行う (最も類似度の高い対応は $a_1 \to c_1$, $a_2 \to c_2$, $a_3 \to c_3$ の組合わせとなる)．位置関係の類似度の

表 2. 図形の入力

	位置 (水平方向, 垂直方向)	大きさ	形:度合い
a_1	(小さい, 中くらい)	とても大きい	四角形: 1
a_2	(小さい, 中くらい)	中くらい	四角形: 1
a_3	(大きい, 中くらい)	0	点: 1
b_1	(小さい, 中くらい)	大きい	三角形: 1
b_2	(大きい, 大きい)	中くらい	四角形: 1
b_3	(小さい, 大きい)	小さい	円:0.7, 点:0.3
c_1	(小さい, 中くらい)	大きい	四角形: 1
c_2	(小さい, 中くらい)	中くらい	三角形: 1
c_3	(大きい, 小さい)	中くらい	線: 1

計算は，図 A における 2 つの図形間の位置関係と，図 C における 2 つの図形間の位置関係を用いて計算する．例えば，$a_1 \to c_2$, $a_2 \to c_1$, $a_3 \to c_3$ の場合，図形 a_1 と a_2 の位置関係と図形 c_2 と c_1 の位置関係の類似度と，図形 a_1 と a_3 の位置関係と図形 c_2 と c_3 の位置関係の類似度と，図形 a_2 と a_3 の位置関係と図形 c_1 と c_3 の位置関係の類似度の平均で求める．

そこでまず，$left(a_1, a_2)$ を求める．a_1 と a_2 の座標の重心を用い d_x, d_y を次のように求める．

$$d_x = 2 - 2 = 0, \quad d_y = 5 - 5 = 0$$

これを用いて，簡略型ファジィ推論を行うと，

$$left(a_1, a_2) = 0.500$$

となる．また，$above$ 度も 0.500 となる．同様にして，残りの組み合わせに対して計算すると，次のようになる．

$$left(c_2, c_1) = 0.500, \quad above(c_2, c_1) = 0.500$$
$$left(a_1, a_3) = 0.961, \quad above(a_1, a_3) = 0.013$$
$$left(c_2, c_3) = 0.535, \quad above(c_2, c_3) = 0.265$$
$$left(a_2, a_3) = 0.961, \quad above(a_2, a_3) = 0.013$$
$$left(c_1, c_3) = 0.535, \quad above(c_1, c_3) = 0.265$$

図形 a_1 と a_2 の位置関係と図形 c_2 と c_1 の位置関係の類似度は，

$$\frac{1}{2}\,(1 - |left(a_1, a_2) - left(c_2, c_1)|) + (1 - |above(a_1, a_2) - above(c_2, c_1)|) = 1.000$$

となり，同様にして図形 a_1 と a_3 の位置関係と図形 c_2 と c_3 の位置関係の類似度が 0.661，図形 a_2 と a_3 の位置関係と図形 c_1 と c_3 の位置関係の類似度は 0.661 となる．そして，$a_1 \to c_2$, $a_2 \to c_1$, $a_3 \to c_3$ の類似度は，$\frac{1}{3}\,(1.000 + 0.661 + 0.661) = 0.71$ となる．

同様にして全組み合わせを計算する (最も類似した関係は，$a_1 \to c_1$, $a_2 \to c_2$, $a_3 \to c_3$ と $a_1 \to c_2$, $a_2 \to c_1$, $a_3 \to c_3$ の 2 通りになる)．

大きさの類似度の計算は，例えば，$a_1 \to c_1$, $a_2 \to c_2$, $a_3 \to c_3$ の場合は，

$$\frac{1}{3}\,(S_s(a_1, b_1) + S_s(a_2, b_2) + S_s(a_3, b_3)) = \frac{1}{3}\,(1 - \frac{|8-7|}{10}) + (1 - \frac{|5-5|}{10}) + (1 - \frac{|0-2|}{10}) = 0.9$$

となる．同様にしてすべての組み合わせを計算する．

形，位置関係，大きさの類似度の重み付きの和 (今回は，形の重み: 1, 位置関係の重み: 1, 大きさの重み: 0.1) が最も大きい対応は，$a_1 \to c_1$, $a_2 \to c_2$, $a_3 \to c_3$ となる．

そして，図 D の生成は次のように行われる．まず形は，図 A から B へは，$a_1 \to b_1$ は変化なしで，$a_2 \to b_2$ は四角形から三角形に変化し，$a_3 \to b_3$ は点から円に変化したので，これを用いて図 C から D を生成すると，d_1 は c_1 と同じ (三角形) で，d_2 は c_2 を変化に適用することができないので b_2 と同じ (三角形) で，d_3 は線から細長い四角形に変化した．位置関係については，図 A から B への変化を用いることができないので，図 D では図 B の各図形間の位置関係を用いる．大きさは図 A から B への各図形の大きさの変化を用いて図 C から D を生成する．以上のようにして解を生成すると，図 7 のようになる．

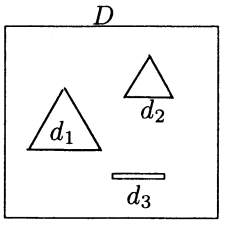


図 7. 実験結果

4. おわりに

本論文では，幾何図形におけるアナロジーにおいて，図形の座標と大きさの表現にファジィ集合を用い，位置関係の類似の決定にファジィルールを用いた．

このアルゴリズムでは，図 A から B への変化を用いて図 C から D へうまく生成できないことがある．人間は，状況に応じてうまく生成しているので，今後さらに考えていきたい．また，類似したものの組み合せを決めるときに，全組み合わせを計算しているが，図形の数が増えると計算量が膨大になってしまうので，計算量を減らす工夫が必要である．

さらに，幾何図形の問題以外の一般的なアナロジーも取り扱っていきたい．

参考文献

[1] Evans, T.G: A Heuristic Program to Solve Geometric Analogy Problems, in *Semanitic Information Processing* (Minsky, M. ed.), MIT Press (1968).

[2] Winston, P.H: Learning and Reasoning by Analogy, *CACM*, Vol. 23, No. 12, pp.132-139 (1980).

[3] 松原 仁, 青木 義次, 折原 良平 : アナロジー入門, 情報処理, Vol. 34, No.5, pp.522-535 (1992)

[問い合わせ先]
〒599–8531
堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 0722–54–9675
FAX: 0722–54–9930
Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

WF 2−1

WWW 情報検索 Agent の学習支援システムの構築

Learning Support System for WWW Information Retrieval Agent

山口 大輔　　○山本 祐亮　　滝村 尚己
Daisuke Yamaguchi　○Yuusuke Yamamoto　Naoki Takimura,
ケネス J. マッキン　　田崎 栄一郎
Kenneth J. Mackin　　Eiichiro Tazaki
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract Generally, it is difficult to extract user specific information efficaciously from a large scale database. In this paper, a reinforcement learning support system for information retrieval agents is constructed. Using agent technology, this support system aims to make flexible Web information retrieval possible. The agent is trained for each specific user using the communication function. Agents are distributed and able to operate in parallel. This system was applied to a concrete problem, and the effectiveness was verified.

1. はじめに

WorldWideWeb 上で情報検索を行う場合、Web 情報検索エンジンサービスを利用することが多い。この場合、個人の特定された必要な内容だけを一度でかつ効率的に得る事は、膨大なデータが存在するため、一般的には難しいとされている。[1]

そこで今回は Intelligent Multi-Agent 技術を用いて、Web 情報検索エンジンサービスを一つの Agent と考え、その Agent と使用者に所属した Agent が通信を行う際に、個人の特定された情報検索結果だけを抽出可能とする Agent のための学習支援システムの構築を行った。

以前本研究室で開発した Intelligent Multi-Agent 技術を用いた Web 情報検索システム[2]に今回のシステムを適用し、その有効性を検証した。

2. Agent の定義

一般に Agent の定義は様々存在する。そのため、本論文では、以下の特徴を持つものを Agent と定義する。

Agent は、動的な環境の中に置かれた計算システム(computational system)で、自律的に環境を知覚して行動することで、自分に与えられたゴールを達成するものである[3]。

また Intelligent Multi-Agent は、協調や交渉などの相互作用により Agent 個々の機能を生かし、新しい機能を創出して行く中で、その状態や Agent 群が疑似的な Intelligence を映し出す Agent の集合であると定義する。

3. 検索システム構築の概要

本論文で用いる Intelligent Multi-Agent 技術を用いた Web 情報検索システムは、次の機能を満たす必要がある。

1. 1つ以上の単語入力を受け付け、その認識を環境(使用者)に適応できる
2. 様々な情報のやり取りが複数の Agent 間で可能であり、取得情報の選択は受け取り側にある
3. 自分自身の持つ情報の処理が可能である
4. 一度行った行為に対して、何らかの学習を行え、次の行為に対してそれらの学習が反映可能である

これらを満たすシステムが構築可能であれば、本目的にあるシステムの構築が可能であるとする。

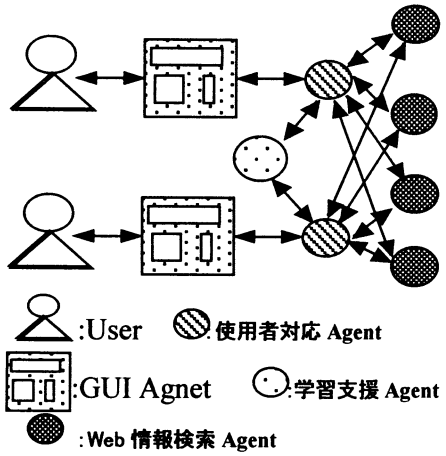


図 1. 学習支援構成

今回 Agent の学習支援を行うために、以前のシステムに図 1 のような Agent 関係が成立するようシステムに変更を加えた。この状態において、Agent の学習支援が可能か実験を行った。

このシステムにおける Agent について説明をする。使用者対応 Agent は、使用者の趣味趣向に沿った検索を、他の Agent へ依頼するなどの処理を行う Agent である。GUI Agent は、使用者と直接やり取りを行い、使用者対応 Agent に、その情報の伝達のみを行う Agent である。Web 情報検索 Agent は、検索エンジンサービスとやり取りを行い、情報の検索を行う Agent である。学習支援 Agent は、使用者対応 Agent の学習を支援するための Agent である。

これらの Agent は、すべて Agent 技術が用いた Software Agent である。重要な点は、各 Agent が機能別に独立的かつ並列に動作できるという事である[4]。

3. システムに対する Agent の評価と学習

本論文では各 Agent に対する検索結果の評価基準は、使用者の要求する情報のキーワードとシステムの検索による出力サイトが示す情報から、どの程度の情報量を得られるかであるとした。

本システムでは、Agent が提示する4つの検索結果に対して、期待しうる効果をメンバーシップ関数によってスカラー化したものを 7 段階で、使用者がそれぞれ評価するシステムである。この評価内容は、Agent に大きく反映されるが、一般的にあげられた候補に対して期待しうる効果は、必ずしも同等の基準から評価されるとは限らない。その上、使用者から受け取った情報が提供者の意図する情報と一致するとも言えない。

そこで本システムでは、Agent が提示する4つの検索結果に、使用者が基準を設けやすくするため、初期の段階でシステムに幾つかの情報を与える。この情報を基に学習支援 Agent は、Web 情報検索 Agent と使用者対応 Agent の仲介を行う際、使用者対応 Agent に対して学習を行う。この学習は、学習支援 Agent が Web 情報検索 Agent より提供されたデータで優先されている事項と、使用者対応

優先されている事項と、使用者対応 Agent 内部で優先されているデータを比較し、次回の検索で繰り返し同じ内容を対象とした際に、全く異なる判断を行わないようにするものである。

5. 学習支援 Agent のアルゴリズム

本研究では、Agent によって情報検索が、効率的に行うことができるような学習を、支援することが目的である。支援において学習支援 Agent をシステムへ追加されたが、どのような処理を行うことが望まれるのか、例を挙げて説明をする。

まず、Intelligent Multi-Agent 技術を用いた Web 情報検索システム[2]において、4つの Keyword を検索する。

表 1:検索の入力と出力

Keyword	Web Site	Rank
A	New - Site	7
B	Single - Site	7
C	Old - Site	7
D	Double - Site	7

4 つの Keyword は、それぞれ次のような関係がある。

・Keyword A と Keyword B は、全く関連性の無い単語である
・Keyword C と Keyword D は、全く関連性の無い単語である
・Keyword C は、Keyword A と Keyword B の両方意味合いを持つ
・Keyword D は、Keyword B の意味合いを持つ Keyword A と Keyword D は、全く関連性の無い単語である

4 つの Keyword を検索した結果をまとめたものが表 1 である。どの検索の結果も異なる Web Site が得られた。

そこで、この結果を参考に、学習支援 Agent をシステムに追加した場合、次のような動作が行われることになる。

Keyword A という内容について、最高の評価を得た New-Site という検索結果があった。次に Keyword B という内容について、最高の評価を得た Single-Site という検索結果があった。その後 Keyword A, B の両方の内容を含む C という内容について検索した場合、検索結果として得られた回答の中で、New-Site という検索結果では最低評価を受けいた、Old-Site という検索結果が最高の評価を得た。

一般的なシステムでは、Old-Site という検索結果が、Keyword A という内容について評価が無かった場合でも、Keyword C という内容について検索した直後に A という内容について検索した場合、先に最高の評価を得た New-Site が検索結果 Old-Site より落ちてしまうことが発生する。

このことを防ぐために本システムでは、A という内容について与えられている幾つかの情報の中に、New-Site という検索結果がどのくらい内容として含まれているかを判断する。この内容を学習支援 Agent が、以前の検索結果を最近の傾向から優先された結果表示しないように、検索結果に対して学習により、「Keyword A という内容については、New-Site が以前最高の評価を得た」と使用者対応 Agent に教える。このことにより学習支援 Agent は、過去の検索データを失うことなく、使用者より与えられた情報に沿う形になることが期待される。また使用者に特定された学習が、学習支援 Agent によって、柔軟にかつ方向性が

ずれることなく行える。

6.システム構築検証

このシステムは、学習支援システムの構築という点において、次の内容を学習し動作するかを検証する。使用者は、8 つの個人に関するデータを、システムに与える。そして単語を入力し、情報検索を行う。その上で、数回程度本システムを利用した際、前章であげられたような検索の結果を出さないように、学習を行う事ができたか実験を行った。

その結果、初期状態で使用者よりシステムに与えられる情報を実行することにより、妥当な検索結果を早期に反映できるような学習が出来た。これは、前述にもあるように、学習支援 Agent が Agent 内部において、意味を反映せた検索を行うように促したためである。

7.結論

目的とした Agent のための学習支援システムの構築という点においては、システムが構築できたと考える。

しかし、実用におけるシステム構築においていくつか考えなくてはならない点が見られる。

現在のシステムにおいては、Multi-Agent のシステム上に存在する Agent の個数増加があった場合、この処理速度の向上を含めた、交渉と協調作業における効率的な動きをさせるために、行動のプランニングが必要であるとも考えられる。

即時性を求める使用者と、内容の重要度を求める使用者など、それぞれ異なる学習を多数の観点から再度検討の必要がある。このことが改善されれば、Web 情報検索を支援するうえで、現在の Web 情報検索において重要であるが可能となると期待される。

以上の課題を今後の研究により検討していく予定である。

参考文献

[1]住田一男、三池誠司:知的情報検索の動向,人工知能学会誌,Vol.11,No.1,pp.10-15 (1995)

[2]山口大輔、ケネス J マッキン、田崎栄一郎:Intelligent Multi-Agent 技術を用いた Web 情報検索システム,日本ファジィ学会,第 15 回ファジィシステムシンポジュウム講演論文集,pp.635-638 (1999)

[3]金淵培:Agent 技術の現状と実用化,人工知能学会誌,Vol.12,No.6, pp.850-860 (1997)

[4]西田豊明:ソフトウエア Agent 人工知能学会誌,Vol.10,No.5, pp.704-711 (1995)

[問い合わせ先]

〒225-8502 神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614

桐蔭横浜大学 工学部 制御システム工学科

田崎 栄一郎

TEL:045-974-5070 FAX:045-978-1311

E-mail:tazaki@intlab.toin.ac.jp

WF2−2

複数の絵からの小話生成に関する基礎的研究

Fundamental Study on Creation of Anecdotes from Pictures

○加藤　茂
Shigeru Kato
筑波大学大学院
システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

岩田　満
Mitsuru Iwata
電気通信大学大学院
情報システム学研究科
The Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications

鬼沢　武久
Takehisa Onisawa
筑波大学機能工学系
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

Abstract: This paper describes the system that creates anecdotes considering consistency of their contents from pictures, where pictures are given at random. Picture information obtained from given pictures is inputted into the system. The system gets descriptions of basic contents of each picture using the neural network model, the fuzzy reasoning and the case based reasoning. The relation between pictures is explained using the case based reasoning. The relation between pictures is modified so as to keep consistency as contents of anecdotes. If the contradictory relations between pictures are obtained, they are eliminated from the anecdotes. The system outputs anecdotes including basic contents of pictures and relations between pictures. Finally, simulation experiments show that the presented system is useful.

1．はじめに

人間は複数並べられた絵を見て、絵に直接描かれていない事柄を主観的解釈で補いながら一貫性のある物語を作ることができる。本論文では、任意の順序で並べられた複数の絵情報から人間が作りだすような主観的で一貫性のある言語情報を自動生成するシステムの構築について述べる。このような知的で柔軟な情報処理を計算機上で実現することができれば、画像データベースへの応用、物語等の発想・創造活動支援システム、視覚障害者へのアシスタントシステムなど、非常に広い応用分野が考えられる。

本研究と関連する研究として、物語生成サポートシステム[1]がある。この研究ではユーザーが選択した複数の絵の最適な順序をシステムが決定するものであり、その絵の順序でユーザーが物語を記述するという点で本研究とは異なる。また、物語生成システムという観点では、イソップ風の物語を出力するシステム[2]や、物語内容の生成と物語表現の生成を同じ枠組みで実現する汎用的な物語作成システム[3]などがある。このような物語生成に関する研究の多くは、あらかじめ与えられた主人公の初期目標が実現できるように物語断片を組み合わせて物語を生成しており、本研究の目的とする任意に与えられた絵から話を作る処理の実現とは異なっている。

本研究では、3枚の絵が任意の順序で並べられている場合に一貫性を考慮して小話を生成するシステムの構築を目標とする。この一貫性の問題は2枚の絵から小話を生成する場合に生じない問題である。

2．システムの全体構造

システムの入力は使用する絵に関する情報であり、本論文ではこれを絵情報[4]と呼んでいる。出力は絵の内容を記述した小話である。本システムは、図1に示すように、各絵の内容を生成する基本内容生成部と、その出力から絵と絵とのつながりを説明する接続関連説明部とからなる。接続関連部で推論されたイベント行動記述が前後で矛盾する場合は一貫性を持たせるためにそれらの記述を修正している。そして、これらの出力をあわせて小話を生成する。以下に、本研究で構築するシステムの各構成要素について述べる。

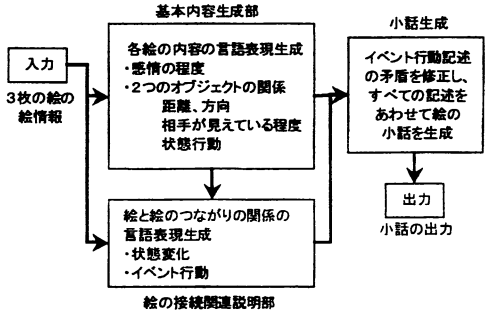


図1　システムの構造

2．1　絵情報について

本研究は画像認識ではなく画像理解に重点を置いているため、絵に登場する人間や車などのオブジェクトの位置、大きさなどの数値情報は、理想的な画像処理によってあらかじめ得られているものと仮定する。絵情報は表1のようにオブジェクトに関する客観的な情報から構成される。ここでオブジェクトの名前については、「父親」など主観的な事柄が強く含まれる名前は使用せず、「男の人」のようになるべく客観的な名前を使用している。

表1　オブジェクトの情報

項目	意味
Name	名前
Location	位置
Size	大きさ
Direction	体の向き
FaceDirection	顔の向き
EyeSize	目の大きさ
EyeShape	目の形
EyebrowSlant	眉の傾き
EyebrowShape	眉の形
MouthSize	口の大きさ
MouthShape	口の形

2．2　基本内容生成部について

基本内容生成部では、各絵に登場するオブジェクトに関する情報を計算または推論し、その言語表現を生成する。ここで推論するオブジェクトの情報は、表情から認識される感情の程度、2つのオブジェクト間の距離や方向などの配置関係、相手のオブジェクトが見えている程度、オブジェクトが行っている状態行動である。以下にそれぞれの内容を説明する。

2．2．1　感情の程度

喜び、悲しみ、驚き、恐れ、怒り、嫌悪の6種類の感情の強さを表情のみから推論するモデルをニューラルネットワークを用いて構築し、システムは絵に描かれた人間オブジェクトの表情から各感情の程度の推論を行う[4]。

2．2．2　距離、方向、相手が見えている程度

2つのオブジェクトの距離、基準となるオブジェクトから他のオブジェクトの方向は、絵情報で与えられるオブジェクトのLocation、Direction、FaceDirectionから幾何学的計算により算出する。相手が見えている程度は、ファジィ推論によって推論し、[0,1]の実数値で得られる[4]。

2．2．3　状態行動の推論

基本内容生成部ではさらに、生物オブジェクトが相手のオブジェクトに対して行う「男の人が車に乗っている」などの状態行動の推論を行う。このような行動は無数に考えられるため、あらかじめ全ての行動に関する情報を知識としてシステムに与えておくことは不可能である。そのため、与えられた知識のみからも推論可能であり、なおかつ新しい知識が追加できる事例ベース推論を用いてオブジェクトの状態行動の推論を行う。

状態行動に関する事例は図2のようなフレーム表現で事例ベースに格納される。尚、この事例は男の人（MAN）が車(CAR)に乗っているという行動を表している。フレームは複数のスロットから構成されており、各スロットには、そのスロットの重要度を表すweightが設定されている。weightは[0,1]の実数値で表され、値が高いほどそのスロットが重要であることを意味している。

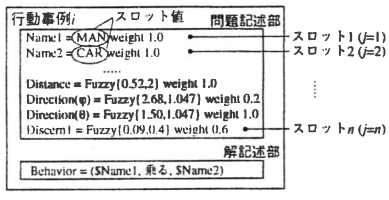


図2　状態行動の事例の例

フレームは複数のスロットから構成されており、2つのオブジェクトの情報がスロット形式で問題記述部に記述され、その状況でのメインオブジェクトの行動が解記述部に記述される。行動によって、問題記述部のスロットの重要度は異なっていると考えられる。例えば、先の例の「男の人が車に乗っている」行動の場合には、男の人と車の位置関係は重要であるが、男の人の感情の程度などは重要ではない。そこで、問題記述部の各スロットにそのスロットの重要度を表すweightを設定する。weightは[0,1]の実数値で表され、値が高い程そのスロットが行動の推論において重要であることを意味している。学習によって問題解決に必要なweightは調整される。事例を検索するときは、問題記述部のスロット毎の類似度の重み付き平均としてしきい値以上の最も類似度の高い事例を解として選択する。

2．3　接続関連説明部について

接続関連説明部では、絵のつながりの関係を推論し出力する。ここでは、図3に示すように、連続する2枚の絵の基本内容生成部の出力をそれぞれの絵の状態とし、接続関連情報データを用いてそのつながりの関係を推論し、言語記述を出力する。接続関連説明記述は状態変化記述とイベント行動記述に分かれる。状態変化記述は絵情報のオブジェクトの位置や向きの変化に関する言語記述で、イベント行動記述は2枚の絵の間でオブジェクトが行ったとされる行動記述である。

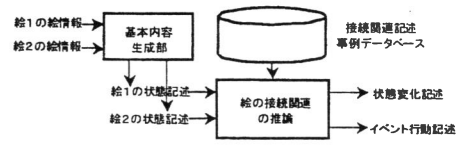


図3　絵の接続関連説明部

本システムでは、行動の推論の場合と同じ理由から事例ベース推論を用いて絵の接続関連を推論している。

3　一貫性の処理

本章では絵1、絵2間で推論された接続関連記述のイベント行動記述と絵2、絵3間で推論されたイベント行動記述同士に一貫性を持たせるための処理を導入している。

図4のように絵1、絵2の間と絵2、絵3の間で複数推論されたイベント行動記述からそれぞれ、一つずつの記述を取り出し、すべての組み合わせについて一貫性を調べ、一貫性のある記述同士の組み合わせをそれぞれの小話として出力する。

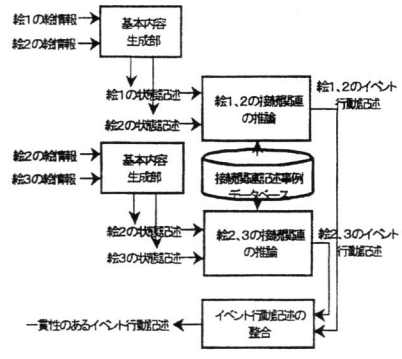


図4　一貫性の処理

3．1　一貫性について

まず、一貫性について説明する。図5の3枚の絵を見たとき、絵1→絵2で推論されたイベント行動aを「男の人はボートに隠れた」、絵2→絵3で推論されたイベント行動bを「男の人はボートから起き上がった」とするならば、「隠れた」後に「起き上がった」という行動は考えられるためa→bは“一貫性がある”といえる。しかし、aを「男の人はボートに隠れた」、bを「男の人はボートに乗り込んだ」とすると、aから、絵2の男の人はボートの中に存在するにもかかわらず、bから、男の人は海に存在していることになる。したがって、a→bについては“一貫性がない”と言える。

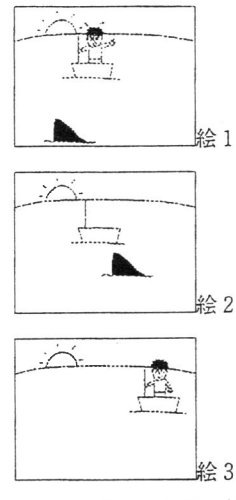


図5　一貫性の説明の絵

各絵のオブジェクトは同じ絵情報でもその解釈の違いによってイベント行動記述により異なった状態になり得る。そこで、イベント行動記述同士の一貫性を調べるためには、その記述におけるオブジェクトの状態を捉える必要がある。a→bの一貫性を調べるためにはaの直後のオブジェクトの状態とbの直前のオブジェクトの状態が一致していればよいことになる。つまり、絵2でのaによるオブジェクトの状態とは、行動aの直後の状態であり、bによるオブジェクトの状態とは、行動bの直前の状態である。この2つの状態が一致していれば、a→bは一貫性があると判断することができる。

本システムではオブジェクトの状態事例をイベント行動事例の入力と共にユーザーに入力してもらい、その情報を用いてイベント行動記述同士の一貫性について推論している。

3．2　オブジェクトの状態について

式(1)は絵iのオブジェクトo_kの状態を表している。オブジェクトの状態は2つの属性からなる。1つはオブジェクトがシーンのどの位置に存在しているかどうかを示す属性で、ℓで表現される。その値は、乗り物などの上にいると1の値をとり、それ以外であれば0の値をとる。もう一つの属性は、生物オブジェクトの身体的状態を示す属性で、sで表現される。意識があればA、意識がない状態にあるときはD、オブジェクトが今後、行動することが不可能な状態にあるときEをとる。

$$S_i(o_k) = (\ell, s) \quad (1)$$

$\ell \in \{0,1\}$

$s \in \{A,D,E\}$

ℓ：オブジェクトの位置に関する属性

s：オブジェクトの状態に関する属性

3．3　一貫性の処理方法

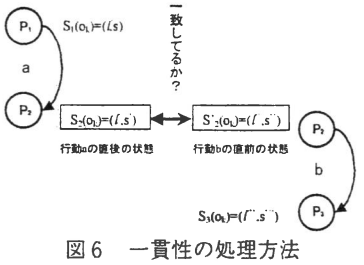


図6　一貫性の処理方法

P_1：絵1の絵情報

P_2：絵2の絵情報

P_3：絵3の絵情報

a：$P_1 \rightarrow P_2$のイベント行動記述

b：$P_2 \rightarrow P_3$のイベント行動記述

$S_1(o_k)$：絵1におけるオブジェクトo_kの状態

$S_2(o_k)$, $S'_2(o_k)$：絵2におけるオブジェクトo_kの状態

$S_3(o_k)$：絵3におけるオブジェクトo_kの状態

図6に一貫性の処理方法の概念図を示す。a,bは絵1、絵2間、絵2、絵3間でそれぞれ推論されたイベント行動記述である。絵1におけるの状態$S_1(o_k)$は行動aによって$S_2(o_k)$に変化する。同様に絵2におけるオブジェクトの状態$S'_2(o_k)$は行動bによって$S_3(o_k)$に変化する。ここで、$S_2(o_k)$と$S'_2(o_k)$が等しいかどうか比較すればよい。等しければa→bは一貫性があると判断する。

このようにして、絵1→絵2のイベント行動記述と絵2→絵3のイベント行動記述の比較を行い、一貫性のある記述同士の組み合わせのみを接続関連記述のイベント行動記述として出力する。

4　小話の生成

最終的に生成される小話は、それぞれの絵の基本内容の言語表現と、2枚の絵の接続関連記述とをあわせたものである。3枚の絵を絵情報として入力した場合の小話は、図7に示すように、まず絵1の基本内容の言語表現を出力し、次に絵1と絵2の接続関連記述を出力し、その後に絵2の基本内容、絵2と絵3の接続関連記述、絵3の基本内容の順に生成される。ただし、接続関連説明記述の一貫性を考慮したイベント行動記述の組み合わせが複数推論されるため、それに伴い複数の小話が生成される。

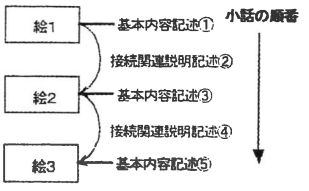


図7　小話の生成順

5．小話生成システムのシミュレーション

以下に本システムの出力が妥当であるかどうかを確認するために行ったシミュレーション結果について説明する。

5．1　シミュレーション例1

図8に示す3枚の絵について登場するオブジェクト名を男の人、ボートと設定し、各オブジェクトの位置や大きさ、表情パラメータなどの数値情報を絵情報として、入力とする。生成された小話を図9に示す。この例では、3種類の小話が生成され、3種類のイベント記述同士の組み合わせが矛盾として推論されている(図10)。なお、下線部は絵のイベント行動記述であり、かっこで閉じられている文は状態変化記述である。それ以外は基本内容記述である。また、状態変化記述と基本内容記述は1種類の絵情報に対して1種類の出力のみ推論されるため、小話2以降はその出力結果を省略している。

・　基本内容記述

入力された各絵情報から、男の人の位置、男の人の感情、状態行動についての言語記述が推論されている。「男の人がボートに乗っている」という状態行動は、男の人とボートの位置関係、すなわち乗り物の上方向、近い距離に人間がいるという情報から事例ベース推論で推論されている。

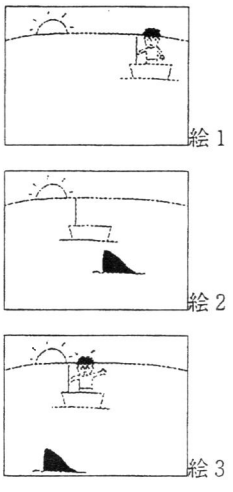


図8　シミュレーション例1

・イベント行動記述

小話1では、絵1→絵2の間で「男の人は気絶しました」が推論されている。また絵2→絵3の間で「男の人は起きました」が推論されている。絵2におけるオブジェクトの状態S_2(男の人)=(1，D)、S'_2(男の人)=(1，D)となり、絵2における男の人の状態が一致しているので、システムは一貫性があると判断している。一方、矛盾する小話として、「男の人は気絶しました。」「男の人はボートに乗り込みました。」が推論されている。S_2(男の人)=(1，D)、S'_2(男の人)=(0，A)、となり、男の人の状態が異なっているので矛盾する話として推論されている。

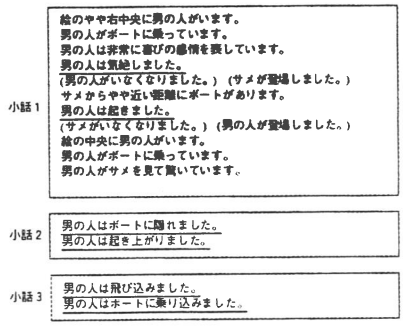


図9　シミュレーション例1で出力された小話

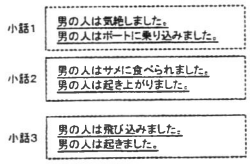


図10　シミュレーション例1で矛盾として推論された小話

5．2　シミュレーション例2

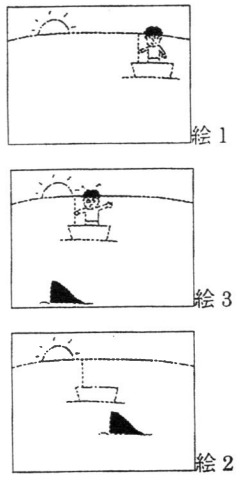


図11　シミュレーション例2

図11は例1で用いた3枚の絵を並び替えたものである。図10の絵1→絵2→絵3の順序を図13で絵1→絵3→絵2の順序に並び替えている。図11をシステムに入力し出力された小話を図12に示す。小話は5つ生成され、矛盾のあるイベント行動記述の組み合わせは検出されなかった。

システムは絵の順序を任意に与えても一貫したストーリを生成できることが確認できた。

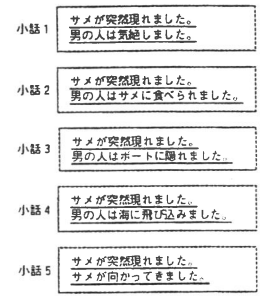


図12　シミュレーション例2で出力された5種類の小話

6　結論

本研究では、限られた状況の絵に対して一貫性を考慮した小話を生成するシステムの構築を行った。そして、複数の絵に対して一貫した小話を生成するための第一歩として3枚の任意の順序で並べられた絵情報に対して小話を生成することに成功した。それを実現するにあたって、絵情報の客観的な情報だけを元にイベント行動を推論するのではなく、絵情報の主観的な情報も用いてイベント行動記述同士の一貫性を考慮するという手法を用いた。しかし、絵の内容によって人間が持つ主観的イメージは様々である。今後は、様々な絵に対応するために、これらの要因を幅広く捉えなければならない。

7　参考文献

[1]K. Kuriyama, T. Terano and M. Numao: "Story Composition Support by IGA and CBR", Proc.of the Third Asian Fuzzy System Symposium,Masan,Korea, pp. 485-488,1998

[2]N.Okada: "Story Generation based on Dynamics of the Mind",Computational Intelligence, Vol.8, No.1 ,pp123-160,1992

[3]小方孝、堀浩一、大須賀節雄: "物語のための技法と戦略に基づく物語の概念構造生成の基本的フレームワーク", 人工知能学会誌, Vol. 11,No. 1,pp.148-159,1996

[4]M.Iwata and T.Onisawa :"Linguistic Expression Generation Model of Subjective Content in a Picture", Journal of Advanced Computational Intelligence, Vol.3 No.1,1999

問い合わせ先

〒305-8573
茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学機能工学系　鬼沢研究室
加藤茂
TEL: 0298-53-6188　FAX: 0298-53-6471
E-mail: shigeru@onisawa-gw.esys.tsukuba.ac.jp

WF 2−3

免疫ネットワークモデルを用いた話題分布構造可視化のためのキーワード抽出
Keyword Extraction for Immune Network Based Visualization of Topic Distribution

高間 康史　　廣田 薫
Yasufumi Takama　　Kaoru Hirota
東京工業大学大学院総合理工学研究科
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering
Tokyo Institute of Technology

Abstract　A keyword extraction method from a document set, based on Immune Network model, is proposed. Keywords are extracted by considering their distribution structure among the document set. Experimental results show that a set of keywords with variety can be extracted from document sets.

1　はじめに

WWW などにおける情報検索作業の結果，得られた文書集合から，話題の分布構造を反映し，かつ以降の検索に有効なキーワード集合を抽出する手法について提案する．我々は，ユーザによる情報検索過程を通じた概念体系獲得を支援するために，検索結果および検索作業履歴を考慮した漸進的話題構造可視化手法 (クエリーネットワーク) を提案し，免疫ネットワークを用いたモデル化を進めている [4]．本稿で新たに提案するキーワード抽出法は，クエリーネットワーク実現の上で重要な役割を果たすものである．

2 節で文書集合中における分布構造を考慮したキーワード抽出について考察し，3 節で免疫ネットワークの考えを用いたキーワード抽出アルゴリズムについて述べる．提案するキーワード抽出アルゴリズムを実際に用いた例を 4 節で紹介し，その特性について示す．

2　分布を考慮したキーワード抽出

クエリーネットワークでは，検索結果集合から話題分布を考慮して抽出したキーワード集合を元にノード (クエリー) を作成し，既存のネットワークに追加する事により，検索作業を通じて漸進的に構築して行くことを想定している [4]．このためには検索結果集合から，話題分布を考慮した多様性あるキーワード集合を抽出する必要がある．

文書集合中におけるキーワードの重要度を評価する指標として，従来主に用いられて来た TFIDF[1] は，キーワードの出現頻度 (TF) および分布の局所性 (IDF) のみを考慮したものであり，キーワード間の出現文書パターンに関する相関関係を一切考慮しないため，TFIDF の高いキーワードが特定の文書に集中する可能性がある．また，KeyGraph[3] では各文書において著者の主張に関連したキーワードを抽出することができるが，やはり文書集合におけるキーワードの分布構造を考慮したものではない．次節で紹介するキーワード抽出アルゴリズムは，文書集合中からまんべんなくキーワードを抽出することを目的としている点で従来手法と異なる．

3　キーワード抽出アルゴリズム

クエリーネットワークの構築は，生体におけるマルチエージェントシステムである免疫システム [2] とのアナロジーを用いてモデル化しているが，以下で紹介するアルゴリズムも，多様性を持ったキーワード集合を抽出するために同様のモデルを用いる．以下で，パラメータ m,n は対象文書数に合わせて調整すべきであるが，次節に示す例 (文書数 10 程度) では $m=n=3$ と

している．

1. 文書集合から DF が m 以上のキーワードを抽出し，ノードとする．ここで，出現文書パターンが一致するキーワードは一つにまとめる．
2. ノード間接続 (J^b_{ij}) を設定する
   - 強接続 ... 共起文書数が n 以上
   - 弱接続 ... 共起文書数が 1 以上 n 未満
3. ノード・文書間接続 (J^g_{ij}) を設定する
   - 強接続 ... 文書中の TF が n 以上
   - 弱接続 ... 文書中の TF が 1 以上 n 未満
4. ノード，文書の活性値 X_i, A_i[1] を以下に従って更新する[2]．

$$\frac{dX_i}{dt} = s + X_i(f(\sum_j J^b_{ij}X_j + \sum_j J^g_{ij}A_j) - d) \quad (1)$$

$$\frac{dA_i}{dt} = (r - kf(\sum_j J^g_{ji}X_j))X_i \quad (2)$$

$$f(h) = p\frac{h}{(h+\theta_1)}\frac{\theta_2}{(h+\theta_2)} \quad (3)$$

4 キーワード抽出の例

第 15 回ファジィシステムシンポジウム予稿集からアブストラクトを 11 編選びだし，上記アルゴリズムによりキーワード集合抽出を試みた．ステップ 1 で生成されたノード数は 22 であり，ステップ 4 を 500 回行った後で各ノード (キーワード) の活性値を比較した．主なノードの活性値，他のノード・文書との接続関係を表 1 に記す．活性値は高，中，低の 3 種類に分類しているが，それぞれ 1,000 倍程度の違いがある．

11 文書与えた場合に高活性化するノードは「増加」，「獲得」，「分析」の 3 つであり，それぞれ異なる文書をカバーしている事がわかる．反対に「次元」，「データ，クラスタリング」の活性値が低いのは，強接続数が多すぎる事，およびそれぞれ「増加」，「分析」と強接続しているためである．

そこで，「分析」および「データ，クラスタリング」を含む 2 文書 (1, 9) を除いて同様の実験を行ったところ，両ノードの関係が逆転し，「データ，クラスタリング」が高活性化し，反対に「分析」の活性度が低下することが確認できた．

[1] 初期値はノード 10，文書 100,000 とする．
[2] $s = 10$, $d = 0.4$, $r = 0.01$, $k = 0.0001$, $\theta_1 = 1{,}000$,$\theta_2 = 1000{,}000$, $p = 1.0$.

表 1: 活性値の比較

ノード	適合文書	11 文書		9 文書	
		強接続	活性値	強接続	活性値
増加	3,5,6	2/0	高	2/0	中
獲得	0,2,4	2/3	高	2/3	高
分析	1,7,8,10	5/3	高	2/1	中
次元	1,3,5,6,7	8/0	低	6/0	中
データ，クラスタリング	1,6,7,8,9	6/5	低	2/3	高

以上より，キーワードの出現文書パターンの重複度を考慮し，検索文書をバランス良くカバーするキーワード集合が活性化し，抽出できることがわかる．

5 おわりに

文書集合中における分布構造を考慮したキーワード抽出手法について提案し，例を用いて多様性のあるキーワード集合が抽出可能であることを示した．今後は，活性値更新の高速化などを行い，クエリーネットワークとの組合せを検討する予定である．

参考文献

[1] E. Bloedorn, I. Mani, and T. R. MacMillan, Machine Learning of User Profiles: Representational Issues, AAAI96, Vol. 1, pp. 433/438, 1996.

[2] A. U. Neumann and G. Weisbuch, Dynamics and Topology of Idiotypic Networks, Bull. of Math. Biology, Vol. 54, No. 5, pp. 699/726, 1992.

[3] 大澤 他, KeyGraph: 単語共起グラフの分割・統合によるキーワード抽出, 信学論, Vol. J82–D1, No. 2, pp. 391/400, 1999.

[4] 高間, 廣田, 免疫ネットワークモデルを用いた話題分布構造可視化の提案, 第 14 回ファジィ・ワークショップ in 那須, pp. 20/23, 2000.

[問い合わせ先]
〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259
東工大 G3 棟廣田研究室
高間 康史
Tel: 045-924-5682
Fax: 045-924-5676
E-mail: takama@hrt.dis.titech.ac.jp

WF3−1

ボート競技におけるファジィモデルでの知識獲得
Knowledge acquisition with fuzzy modeling for rowing boat

橘完太[1)]、古橋武[2)]、下田学[3)]、川上泰雄[3)]、福永哲夫[3)]
Kanta Tachibana[1)]. Takeshi Furuhashi[2)]. Manabu Shimoda[3)]. Yasuo Kawakami[3)]. Tetsuo Fukunaga[3)]
1) 名古屋大学工学研究科、理化学研究所 2) 名古屋大学工学研究科 3) 東京大学総合文化研究科
1) Graduate School of Engineering. Nagoya University & Riken 2) Graduate School of Engineering. Nagoya University 3) Graduate School of Art and Science. University of Tokyo

Abstract

In many sports and human motions. the relationships between skills and performance are nonlinear. A good coach inferes these relationships and give effective pieces of advice to the athletes. Fuzzy modeling identifies the input-output relationships of nonlinear system with linguistic fuzzy rules. In this study. force exerted on oar and angle of oar are measured during rowers are rowing a boat. The relationships between skills and performance are identified with fuzzy modeling. Effective pieces of advice are extractable from the obtained fuzzy rules.

1 はじめに

スポーツ選手の動作と競技パフォーマンスとの関係は多くの場合、非線形である。この関係を推定することはパフォーマンス向上のために不可欠であるが、複雑な関係であるため、理解可能なモデルを獲得することは難しい。優れたコーチは自らの経験と勘によって、この関係を推定し選手にパフォーマンス向上のためのアドバイスを与える。

これまでに運動パフォーマンスの要因を調べるためにファジィ回帰分析を応用する研究[1]やファジィ推論を応用する研究[2]が為されている。ボート競技については、Smith ら[3]が、動作の特徴量からボート選手の競技レベルを判別する手法を提案しているが、選手のレベルに合った個人へのアドバイスを獲得するまでには至っていない。

本研究では、ボート競技選手のスキルとパフォーマンスとの関係の同定にファジィモデリングを適用し、この関係を明示化する。獲得されたファジィモデルから、選手のレベルに応じた動作の特徴と、パフォーマンス向上のための改善点を読み取ることができる。ファジィモデリングの特徴は、ユーザの知識との照合が容易なファジィルールを用いて、非線形システムの入出力関係を記述することである。本研究では、部分空間内のデータ出力の分散を指標に入力空間を逐次分割する手法[4]を用いる。この手法により、木構造を持つファジィモデルが得られる。

日本代表候補選手と大学生・高校生選手を被験者として力学量を測定し、それぞれについてファジィモデルを同定する。得られたファジィルールから、選手のレベルに合ったアドバイスを獲得する。

2 ボート競技についての力学量測定

日本代表候補選手 12 名（競技経験 8〜11 年）を被験者として力学量を測定した。測定には舵手なしフォアを用い、ストロークレート（1 分間に漕ぐ回数）を指定して 100m を全力で漕がせた。100m に要する時間を計ると同時に、力学量測定装置[5]を用いて、オールにかかる力とオールの水平面内の角度を、各選手について、サンプリング周波数 30Hz で測定した。222 ストローク分の力と角度の時系列データを得た。また、大学生・高校生選手 28 名（競技経験 1〜3 年）を被験者として舵手付きフォアを用いて同様の測定を行い、343 ストローク分のデータを得た。

ボート競技では、決められた距離をいかに短い時間で漕ぎ切るかで勝敗を決めるため、ボートの速度が重要になる。また、ボートの速度が平均パワーの立方根に比例することは良く知られている。従って、選手の競技パフォーマンスは平均パワーによって量ることができる。

平均パワーを各ストローク毎に計算し、ファジィモデルの出力とする。ファジィモデルの入力には、オールの力と角度の時系列データから計算した次の 8 つの特徴量を用いる。すなわち、ストロークレート SR、力の最大値 F_m、オール角度の範囲Θ、漕ぎ出し前の無駄時間 t_{wc}、漕ぎ切り後の無駄時間 t_{wf}およびオールの角速度を用いる。オールの角速度は、オールがボートを押している角度の範囲の序盤ω_B、中盤ω_M、終盤ω_Lについて平均値を求めた。オールがボートを押す方向に動いていて、かつ、力が最大値の 10%以下である時間を、無駄時間とした。図 1に各変数を図示する。

各入力変数と出力変数との相関係数は、入出力関係が非線形であるため表 1に示すように、F_m以外はあま

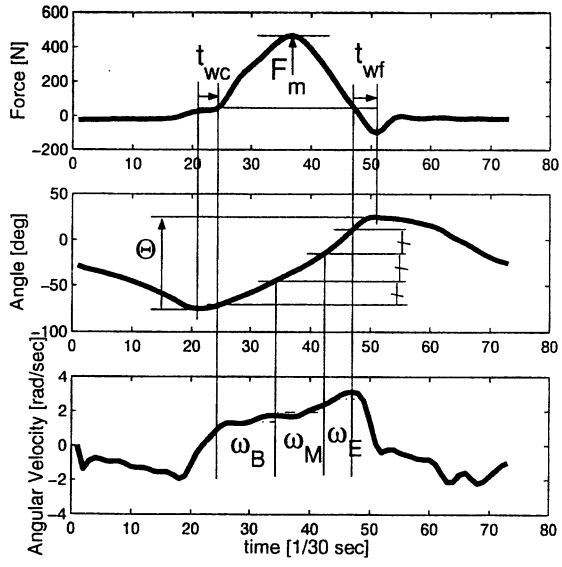


図 1: 入力変数となる特徴量

り高くない。しかし、F_m以外のパラメータも他のパラメータとの相互作用などにより、出力に影響を与えている。ファジィモデルを用いてこの非線形な関係を明示化する。

表 1: 入力変数と出力変数との相関係数

入力変数	出力との相関係数	
	代表候補選手	学生選手
SR	0.29	0.52
F_m	0.80	0.84
Θ	0.63	0.43
t_{wc}	-0.12	-0.17
t_{wf}	0.05	-0.16
ω_B	0.26	0.32
ω_M	0.47	0.51
ω_E	0.06	0.32

3 ファジィモデリング

本研究では、特徴量とパフォーマンスとの関係の明示化にファジィモデリングを用いる。文献 [2] の手法では、熟練コーチへのアンケート結果をもとにメンバシップ関数を同定し、ファジィモデルを構築している。これに対し、本研究では特徴量とパフォーマンスの入出力データの分布から入力空間を分割し、ファジィルールを獲得する。

ファジィモデリングではI入力 1 出力の非線形システムの入出力関係を次式のような If-Then 形式の言語ルールを用いて記述する。

ルール r: If x_1 is A_{r1} $\cdots$ x_I is A_{rI}, Then $y = b_r$
$(r = 1.\cdots, NOR)$

ここで、rはルールの番号を表し、NORはルール数である。$X = (x_1.\cdots.x_I)$ は入力を、yは出力を表す。A_{ri} $(i = 1.\cdots.I)$ と b_rはメンバシップ関数である。選手やコーチが知識と照合する際の簡易さを鑑み、後件部のメンバシップ関数はシングルトンとする。任意の入力に対して、r番目のルールの適合度が次式により求まる。

$$\mu_r = \prod_{i=1}^{I} \mu(x_i.A_{ri})$$

出力値は、Then 部シングルトンの適合度による加重平均により推論される。

$$y^* = \frac{\sum_{r=1}^{NOR} \mu_r b_r}{\sum_{r=1}^{NOR} \mu_r}$$

前件部のメンバシップ関数は、入力空間を逐次分割することにより獲得する。入力空間の分割は、データ出力の各部分領域内での分散が最小になるように行なう。I入力のシステムを同定する場合、I次元の入力空間が張られる。この手法では、部分空間内にあるデータの出力の分散を指標に、次の手順で入力空間を逐次分割していく。

1. 初期状態では、入力空間全体を一つの部分空間とみなし、この空間を 2 つに分割する。
2. 分割点の候補の数 Dをあらかじめ決めておき、$I \times D$個の候補について、分割後の部分空間内にあるデータ出力の分散を求める。
3. 分割点の候補のうち、分割後の 2 つの新しい部分空間についての、部分空間内にあるデータ出力の分散の和が最小となる分割を採用する。新しくできた分割に対応するルールの Then 部の値は、部分空間内にあるデータ出力の平均値とする。
4. Then 部の値を学習により調整する。調整後、データ出力の分散が最大となっている部分空間を 2 つに分割する。
5. 手順 2.3を、モデルの性能が良くなっている間、繰り返す。モデルの性能は赤池情報量基準 (AIC) により評価する。

図 2に、$I = 2.D = 3$ である場合の分割方法を示す。

4 モデリング結果および考察

入力空間の逐次分割手法によって、代表候補選手に対して 10 個のファジィルールが得られた。表 2に、獲得されたルールを示す。

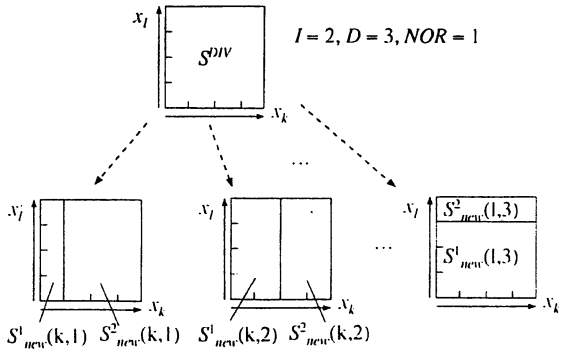


図 2: 出力の分散を指標にした入力空間分割手法

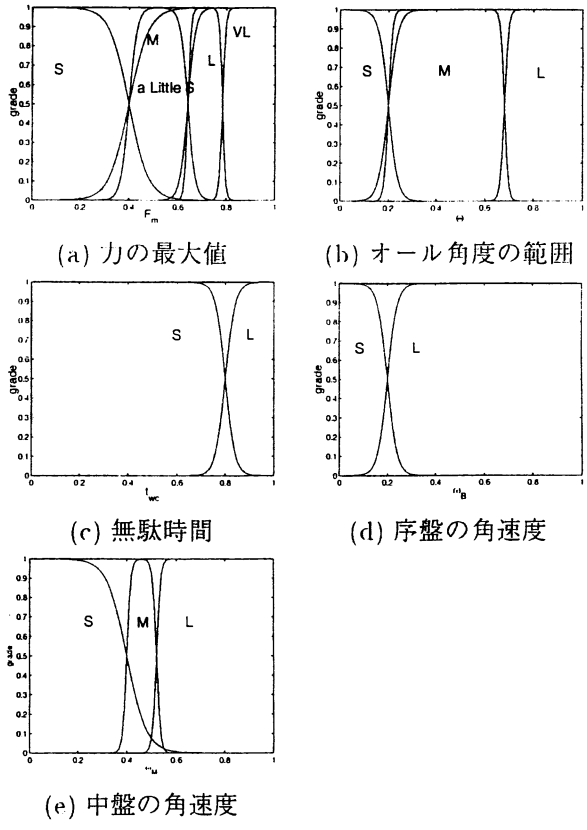
表 2では、'S'('Small')、'a Little S'、'M'('Medium')、'L'('Large')、'VL'('Very Large') の順にラベルを用いている。' 'はその変数がそのルールに関しては出力に影響しないことを示す。全てのルールに関して出力に影響しない変数は省略する。図 3に各入力変数に対するメンバシップ関数を示す。

表 2: 代表候補選手に対するファジィルール

ルール番号	If部 F_m	Θ	t_{wc}	ω_B	ω_M	Then部 出力
1			L			145
2	S		S			162
3	M	S	S			173
4	a Little S	M	S	L		189
5	M	M	S	S		199
6	L	M	S	L	S	201
7	L	M	S	L	M	224
8	L	M	S	L	L	225
9	L	L	S	L	L	249
10	VL	L	S	L	L	264

これらのルールから、選手のパフォーマンスのレベルに応じたアドバイスを読みとることができる。ルール 1 と 2 を比べると、t_{wc}が大きいか小さいかが約 20 ワットの出力の差を生んでいる。漕ぎ方の特徴量がルール 1 に該当する選手に対しては、t_{wc}を小さくするよう集中して練習させることが有効となる。次にルール 2 と 3 を比べると、F_mが異なっており、ルール 2 に該当する選手に対しては、大きな力を出させるようなアドバイスが有効となる。ルール 3 と 4 では、Θが異なっているので、ルール 3 に該当する選手に対しては、オールを大きな範囲に渡って動かすよう注意させることが有効である。ルール 6 から 8 では、ω_Mにより約 30 ワットの違いがある。ルール 8 と 9 に注目すると、Θを大きくすることで約 20 ワットの出力増加となる。ルール 9 と 10 では、再びF_mの違いが出力に影響を与えている。

このように、各選手のパフォーマンスのレベルに応じて、複数のスキルの中から集中して練習すべきスキルを特定することができる。



(a) 力の最大値　(b) オール角度の範囲

(c) 無駄時間　(d) 序盤の角速度

(e) 中盤の角速度

図 3: メンバシップ関数（代表候補選手）

表 3 に、学生選手のデータから得たファジィルールを示す。図 4に各入力変数に対するメンバシップ関数を示す。

ルール 1 と 2 を比べると、F_mが非常に小さいと、出力が約 120 ワットと小さい値になることがわかる。また、ルール 2 と 11 とを比べると、ω_Bが大きいと約 280 ワットと、ω_Bが大きくない場合の 2 倍に近い出力値になる。ルール 4 と 6 を比べると、F_mが少し小さくなってもΘを大きくすることで約 40 ワットの出力増加になることがわかる。さらに、ルール 9 と 10 を比べると、t_{wf}を小さくすることとω_Bを少し増やすことで、約 45 ワットの出力増加が期待される。

5 まとめと今後の課題

身体運動は複雑であるため、理解可能なモデルを同定することが難しい。ファジィモデリングを応用することにより、身体運動についての直観的理解が可能となった。また、ファジィモデルを用いて運動自体に由来する曖昧さを吸収できた。

本研究では、ボート競技選手の漕ぎの特徴量とパフォーマンスを測定し、入出力データの分布をもとにファジィルールを獲得した。獲得したルールから、選手のパフォーマンスのレベルに応じたアドバイスを読みとることができた。

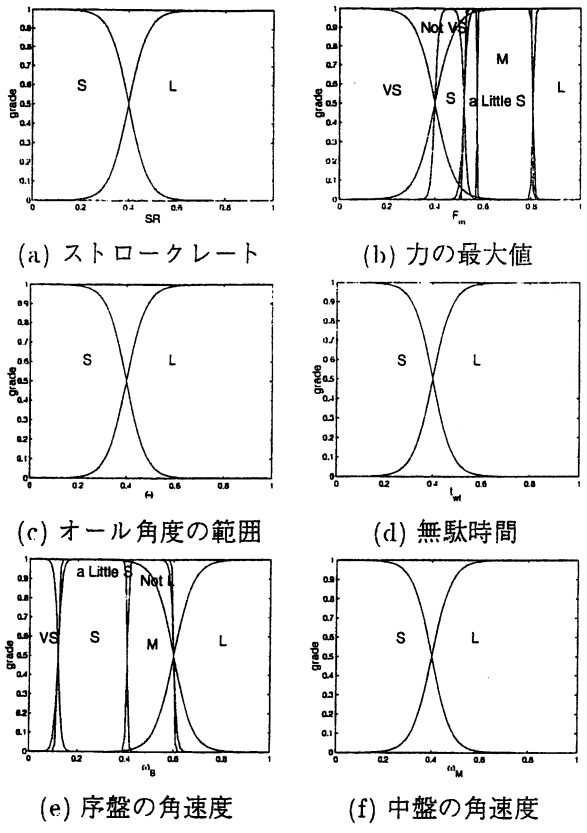


図 4: メンバシップ関数（学生選手）

今後、獲得したアドバイスを選手に実際に与え、パフォーマンス向上へのファジィモデリング適用の有効性を検証することが課題である。

参考文献

[1] 植村、坂和、中和田 "フィジカルテスト測定評価支援へのファジィ回帰分析の適用"、日本ファジィ学会誌 Vol.5, No.4, pp.791 799 (1993)

[2] 杉本、安信 "ファジィ推論を用いた運動評価支援システム"、日本ファジィ学会誌 Vol.8, No.1, pp.89 94 (1996)

[3] R. M. Smith, W. L. Srinks "Discriminant analysis of biomechanical differences between novice, good and elite rowers" Journal of Sports Science, Vol.13, pp.377 385 (1995)

[4] 橘、古橋 "入力空間の不均等分割を可能とする階層化ファジィモデリング"、第 14 回ファジィシステムシンポジウム pp.305 308 (1999)

[5] 下田、川上、福永 "漕艇の力学量測定装置と実漕中の力学データについて" 平成 9 年度日本オリンピック委員会スポーツ医・科学研究報告 No.II 競技種目別競技力向上に関する研究－第 21 報－, pp.341-349 (1998)

問い合わせ先：橘完太
〒 464-8603 名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院 工学研究科 計算理工学専攻 複雑システム工学講座
Tel: 052-789-5315
Fax: 052-789-3166
E-mail: kanta@cmplx.cse.nagoya-u.ac.jp

表 3: 学生選手に対するファジィルール

ルール番号	If 部						Then 部
	SR	F_m	Θ	t_{wf}	ω_B	ω_M	出力
1		VS					118
2		Not VS			Not L	S	149
3		a Little S			Not L		166
4		M	S		a Little S	L	167
5		Not S			VS	L	181
6		a Little S	L		a Little S	L	203
7	S	M	L		a Little S	L	211
8	L	M	L		a Little S	L	226
9		L		L	a Little S	L	229
10		L		S	S	L	274
11		Not VS			L		278
12		L		S	M	L	317

WF 3−2

ロボット・アシステッド・アクティビティにおける状況依存性の提案

Proposal of situation dependency in robot-assisted-activity

○橋本智己
○Tomomi HASHIMOTO

那須大学
Nasu university

Abstract This paper, describes an experimental emotion model having mood congruency effects. An agent chooses sensor information and its own behavior according to its emotions. Results of experiments have proved the effectiveness of the K.E. I. system.

key Words: Emotional computing, FCMs,

1. はじめに

高齢化社会を考慮して，高齢者を物理的に支援する機械システムの実現が期待されている。その一例として，橋本らは福祉支援システムを提案した[1]。その支援システムでは，人間からの指示が無くても人間に対して必要と思われる動作を，自律移動ロボットは自発的に実行する。そのロボットの制御機構が知情意の工学的モデルである。知情意の工学的モデルは，Rasmussen モデル[2]（Skill, Rule, Knowledge という人間の認知挙動を想定した階層知識構造）に，「情」と「意」という層を新たに加えた構造をしていて，その「知」「情」「意」の層間に，Kosko の提案するファジィ認知マップ[3]（FCMs：Fuzzy Cognitive Maps）で因果関係を埋め込んだ構造をしている。

一方，アニマル・アシステッド・セラピーやアニマル・アシステッド・アクティビティのように，動物を介在させた精神的支援システムが実地されている。しかしペットロス，病気の伝染等の問題がある。

本稿では，窓やドアを開けるといった物理的支援をしたり，飼育されるペットとして精神的支援をする，ロボット・アシステッド・アクティビティを提案する。その支援ロボットに，状況に応じて動作を変化させるような機能を組み込む手法を提案し，シミュレーションによってその結果を検討する。

2. 状況依存性を持つ，知情意の工学的モデルの構造

ロボットは，環境情報を特徴抽出器によって特徴情報に変換して，抽象的な事象を扱う「知（Knowledge）」，具体的な事象を扱う Rule，アクチュエータのフィードバックループ（Skill），さらに，環境認識を行わずに直接，ロボット自身の「情」へ入力する（図 1）。「知」では特徴情報から環境を認識し，「情」では「知」の認識結果と特徴情報とでロボット自身の環境に対する感情を決定し，「意」では「情」に基づいて環境に対するエージェントの動作の意図を決定する。そして，「知」の動作選択機構によって Rule の具体的な動作パターンを選択あるいは想起し，最終的に，Rule の動作パターンに従うようにアクチュエータを制御することで，ロボットは選択した動作を実行する。

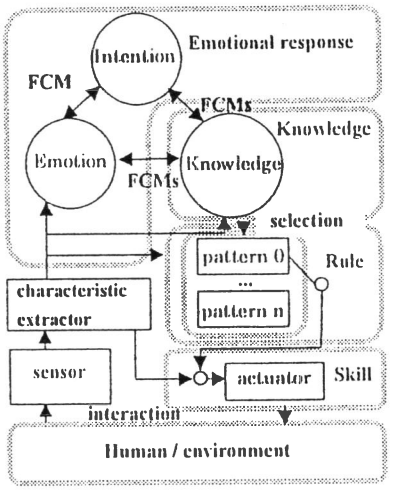
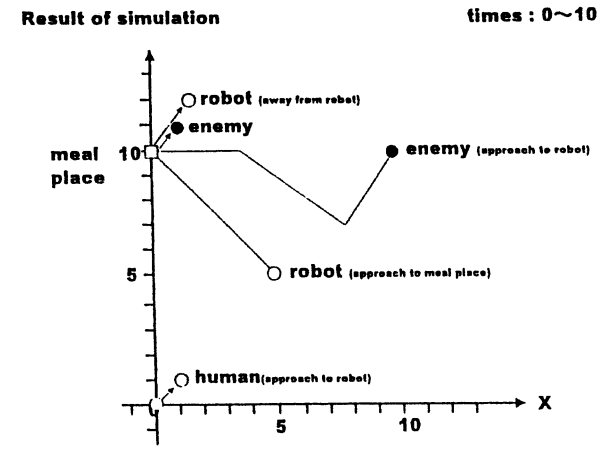
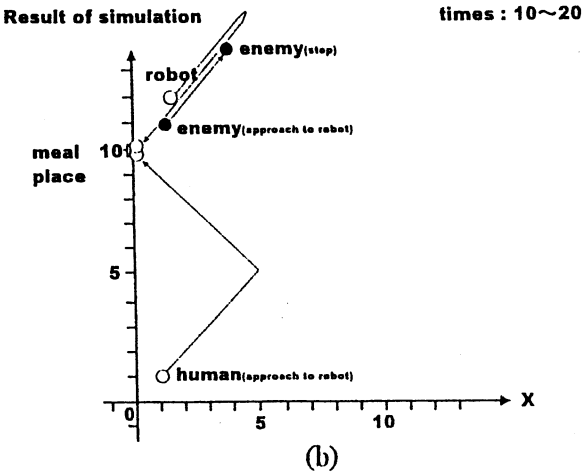


図 1：知情意の工学的モデルの構造

「知」には attention FAMOUS[4]を組み入れ，その attention の切り替えに「情」の出力を使うことで，状況に応じて連想推論の結果を修正する。



(a)



(b)

図 2：シミュレーション結果

3. シミュレーション結果

エージェントは次に示す順序で動作する。

まず，それぞれのセンサ情報をファジィ化して，電源電圧が 0.5，光度が 0.2 というように，外部環境を数値化（特徴情報）する。次に，特徴情報からファジィ認知マップによって，快が 0.8，不快が 0.4 といった自身の感情を数値表現し，相対的に感情が快であれば，「知」のアテンション（ファジィ連想記憶システムの連想マトリックス）を外部環境を認識するように切り替え，不快であれば，逆に内部環境を認識するようにアテンションを切り替える。続いて，切り替えられたアテンションとファジィ連想記憶システムによって，「お腹がすいた」，「食べ過ぎ」といった内部状態，あるいは，「人間」「敵」「食事場所」といった外部環境の認識・推測を行う。この認識・推測結果と，快-不快の感情の状態によって，「食事をとる」「敵から逃れる」「人間に近づく」といった行動の意図を決定する。最終的に，「食事場所近くで人間に出会った場合の行動」，「敵の近くで人間に出会った場合の行動」等，状況に基づいてエージェントの動作パターンを選択する。

図 2(a,b)はエージェントの移動の軌跡を示している。初期設定では，エージェントはマップの中央にいる。このとき，「情」は快であるため，外部環境を認識し，食事をとる行動をとっている。

時刻 8 で敵を認識すると，情が不快になり，アテンションを切り替えて内部センサ情報のみを選択することで心理的負荷を減らそうとエージェントはしている。そのため，時刻 9 では，敵が近づいているのに，外部環境が全く認識できない状態になる（目には映っているが，見えていない状態）。しかし時刻 10 では，情が快になったため，外部環境を認識し，敵から回避している。

その後敵がエージェントから離れると，再び，食事場所へ向かい，さらに人間が近づくと，今度は人間に従うような行動をとる。

4. おわりに

本稿では，ロボット・アシステッド・アクティビティを提案した。その支援ロボットに，状況に応じて動作を変化させるような機能を組み入れる手法を提案し，シミュレーションによってその結果を検討した。

提案するシステムは，従来の知情意の工学的モデルに山口らの提案するアテンション付きファジィ連想記憶システムを組み込んだ構造をしていて，自身の情によってそのアテンションを切り替えることで，センサ情報を取捨選択していた。エージェントは，選択された情報に基づき，状況に依存する行動を示した。

参考文献

[1]橋本智己，山口亨，宮道壽一，"福祉知能エージェントにおける情動指向のマンマシンインタフェース"，日本ロボット学会，第 16 巻，第 7 号，pp.993-1000，1998

[2] JENS RASMUSSEN : "Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.13, No.3, pp.257-266, 1983

[3]BART KOSKO: "Fuzzy cognitive maps," International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 24, pp. 65-75, 1986

[4]Tomohiro Takagi, Toru Yamaguchi and Makoto Sato, "Multi-Modal Information Integration by Conceptual Fuzzy Set for Interactive Systems", Proceedings of IJCNN'98, FUZZ-IEEE'98 and ICEC'98, pp.738-743, 1998

WF3−3

あいまい行動型制御系のセンサ特性を考慮したモジュール学習

Module Learning with Sensor Features for Fuzzy Behavior-Based Control

○泉　清高，渡辺桂吾，木口量夫
Kiyotaka Izumi, Keigo Watanabe, and Kazuo Kiguchi
佐賀大学
Saga University

Abstract We have already developed a module learning approach for the fuzzy behavior-based control system. When applying it for a mobile robot, the robot moved only in static environment. In this paper, we discuss a module learning approach in a dynamic environment. This system is constructed for the acquisition problem of a goal point in an environment surrounded with walls, using a mobile robot with two independent driving wheels.

1. はじめに

近年，様々な環境において，目的に応じて複雑な行動・作業が実行可能なロボットが広く求められており，特に家庭，福祉，サービス，パーソナルロボットなど，非製造業分野の知能ロボットの研究・開発に関心が集まっている．

我々は，自律移動ロボットの制御方法として，複数の要素行動に対してファジィ推論をあてはめ，各要素行動間でそれらのファジィ推論結果の競合・協調を行いロボットを制御する「あいまい行動型制御系」を提案している[1]〜[2]．しかし，今までの学習方法ではあいまい行動型制御系全体で学習を行っており，各要素行動における単独での行動知識が十分に学習されず，学習環境とは異なった環境では良い結果が得られない場合があった．

本稿では，あいまい行動型制御系がこれまでより環境に対して柔軟に対応できるような汎化性の高い行動知識を得るために，各要素行動ごとに学習を行う「モジュール学習」を提案する．提案手法を，目標地点が移動する動的環境に適用し，その有効性について検証する．

2. あいまい行動型制御系の構成

移動ロボットの目標地点到達問題に対し，**Fig. 1**に示すようなあいまい行動型制御系を構成する．Dは目標地点と移動ロボットとの距離，Ψは目標地点と移動ロボットの進行方位角との相対角度，dは移動ロボットと障害物との距離d，ψは移動ロボットの進行方位角と障害物との相対角度，vは移動ロボットの進行速度，ϕは移動ロボットの進行方位角，u_{ob}は目的行動出力，$u_{r\epsilon}$は反射行動出力，u_{fr}は自由行動出力とする．これらの行動出力をBUにおいて，目標地点のみ認識できている場合にはu_{ob}を，障害物のみ認識できている場合には$u_{r\epsilon}$を，目標地点，障害物ともに認識できない場合はu_{fr}をロボットへの行動入力u_{robot}として選択し，目標地点と障害物の両方が認識できている場合には

$$s = \frac{d}{sensor_{r\epsilon}} \tag{1}$$

$$u_{robot} = su_{ob} + (1.0 - s)u_{r\epsilon} \tag{2}$$

を用いて協調・競合させu_{robot}を生成する．ただし，$sensor_{r\epsilon}$は障害物センサの有効距離とする．目的行動，反射行動に対するファジィ制御ルールはGAにより学習し，自由行動に関しては，現在の進行方位を維持しかつ一定の速度で進むものとする．

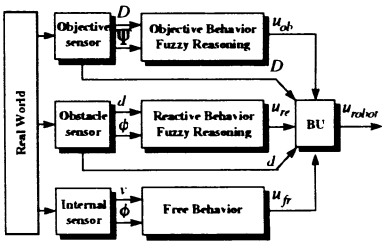


Fig. 1 A fuzzy behavior-based control system

3. 行動モジュール学習

目的行動の学習環境は，絶対座標(0.0,0.0)を出発地点とし，目標地点を絶対座標(0.3,0.0)，(0.0,0.3)，(0.0,−0.3)，(−0.3,0.0)の4通りとする．移動ロボットの初期値は速度0.0[m/s]，方位0.0[rad]，方位変更用角加速度0.0[rad/s^2]とする．シミュレーション時間は10.0[s]とし，ファジィラベル数は5ラベルとする．目的行動の学習におけるGAの適応度$fitness_{ob}$を

$$fitness_{ob} = \sum_{n=1}^{4}(D_{fit} + time_{fit} + road_{fit} + B_{d_{fit}} + B_{a_{fit}}) \tag{3}$$

Table 1 Objective parameter and simulation time of dynamic environment

	start	turn	time[s]
case A	(0.0,−0.5)	left	185.95
case B	(1.0,0.0)	right	67.3
case C	(0.0,1.5)	right	171.4
case D	(0.0,−1.5)	right	199.55
case E	(1.9,0.0)	left	73.1
case F	(0.0,−1.9)	left	92.5
case G	(−1.9,0.0)	left	117.0

とする．ただし，各要素における要素適応度は

$$D_{fit} = \frac{0.3 - D_{end}}{0.3} * 100.0$$
$$time_{fit} = \frac{10.0 - time_{end}}{10.0} * 10.0$$
$$road_{fit} = \frac{0.3 - road_{end}}{0.3} * 10.0$$
$$B_{d_{fit}} = \frac{15.0 - \sum_{l=1}^{5}|B_d|}{15.0},\ B_{a_{fit}} = \frac{15.0 - \sum_{l=1}^{5}|B_a|}{15.0}$$

である．ここで，D_{fit} は目的行動の学習における距離に関する適応度，D_{end} は移動ロボットの最終到達地点と目標地点との距離である．$time_{fit}$ は時間に関する適応度，$time_{end}$ は移動ロボットが最終到達地点までに要した時間である．$road_{fit}$ は移動距離に関する適応度，$road_{end}$ は移動ロボットが最終到達地点までの走行距離である．$B_{d_{fit}}$ と $B_{a_{fit}}$ は距離変更用出力の後件部と，角度変更用出力の後件部に関する適応度である．

反射行動の学習環境は，絶対座標(0.0, 0.0)を出発地点とし，障害物を移動ロボットから x 軸方向に0.05[m]離れた y 軸と平行かつ無限長の壁とする．移動ロボットの初期値は速度0.0[m/s]，方位変更用角加速度0.0[rad/s^2]とし，初期方位は0.0[rad]，$\pi/2.0$[rad]，$-\pi/2.0$[rad]，π[rad]の4通りとする．シミュレーション時間は5.0[s]とし，ファジィラベル数は5ラベルとする．反射行動の学習におけるGAの適応度 $fitness_{re}$ を

$$fitness_{re} = \sum_{n=1}^{4}(d_{fit} + time_{fit} + road_{fit} + B_{d_{fit}} + B_{a_{fit}}) \quad (4)$$

とする．ただし，各要素における要素適応度は

$$d_{fit} = \frac{d_{end}}{0.2} * 100.0,\ time_{fit} = \frac{0.5 - time_{end}}{0.5} * 10.0$$
$$road_{fit} = \frac{0.5 - road_{end}}{0.5} * 10.0$$
$$B_{d_{fit}} = \frac{15.0 - \sum_{l=1}^{5}|B_d|}{15.0},\ B_{a_{fit}} = \frac{15.0 - \sum_{l=1}^{5}|B_a|}{15.0}$$

である．d_{fit} は距離に関する適応度，d_{end} は移動ロボットの最終到達地点と障害物との距離である．$time_{fit}$ と $road_{fit}$ は目的行動の学習の場合と同様である．$B_{d_{fit}}$ と $B_{a_{fit}}$ は距離変更用出力の後件部と，角度変更用出力の後件部に関する適応度である．

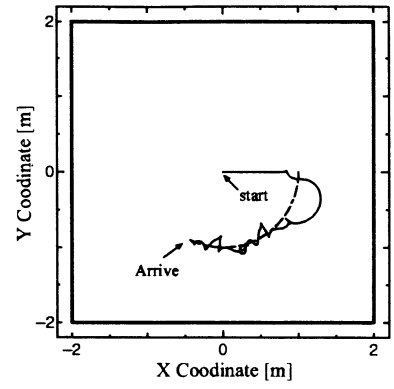


Fig. 2 Trajectory of a mobile robot in a dynamic environment (case B)

4. あいまい行動型制御系のシミュレーション

前節のモジュール学習で得られた目的行動，反射行動の知識を用いて動的環境でのシミュレーションを行う．一辺4.0[m]の壁に囲まれた正方形のシミュレーション領域内において，絶対座標(0.0, 0.0)を出発した移動ロボットが，壁に衝突することなく，原点を中心とした円の円周上を0.03[rad/s]の速さで移動する目標地点に到達する問題を考える．目標地点の出発座標と回転方向，目標地点に到達するまでに要した時間を**Table. 1**に示す．Case Bの移動ロボットの軌跡を**Fig. 2**に示す．最初は目標地点および障害物を認識できないため，自由行動が選択され，一定の速度で前進する．そして，障害物を認識した場合には反射行動が選択され，壁から遠ざかっている．目標地点を認識できるまで自由行動と反射行動を繰り返し，目標地点を認識すると目的行動が選択される．しかし，目標地点は常に移動しているため，**Fig. 2**のように目標地点に対し後方から接近する場合には，目標地点を追尾し到達する軌道を描く．

5. おわりに

本研究では，移動ロボットの目標地点到達問題に対して，モジュール学習によって各要素行動を単独で学習し，その学習によって得られた知識を用いてあいまい行動型制御系を構成しシミュレーションを行った．モジュール学習を用いると各要素行動が単独で確実に学習されるので，動的環境にも柔軟に対応することが確認できた．

参考文献

[1] 渡辺，泉，あいまい行動型制御，日本機械学会論文集C，**64**，620，(1998)，pp. 1278-1286.

[2] 泉，渡辺，藤本，多入出力のファジィ推論によるあいまい行動型制御系の構成，第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，**1**，(1998)，pp. 329-330.

[問い合わせ先]
〒840-8502
佐賀市本庄町1番地
佐賀大学 理工学部 機械システム工学科
泉 清高
FAX: (0952)28-8587
E-mail: izumi@me.saga-u.ac.jp

WF 4−1

Intelligent Multi-Agent 技術を用いた 階層型プランニングシステム

Hierarchical Planning System using Intelligent Multi-Agent Technology

○山口 大輔　関 洋恒　ケネス J. マッキン　田崎 栄一郎
○Daisuke Yamaguchi　Hirotsune Seki　Kenneth J. Mackin　Eiichiro Tazaki
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract In this paper, we propose a learning support system efficiently to transmit only necessary information possible. This system can transmit information to specific Agent among many Agents using a Multi-Agent technology. The system is also synthesized to do parallel and cooperative proposing internally. Applying the proposed method to a horse removing game, a flexible planning for victory has been done. Agent studies the best transmission route according to the maked planning in the game.

1. はじめに

Multi-Agent における集団行動の情報伝達では、多くの場合、決められた Agent が、全ての Agent に対して情報送信を行う。

この場合、規模の大きさや複雑さが増すと、動作している Agent の個々の能力が対応できないため、目的を達成できない恐れがある。

本研究では、Multi-Agent 技術を用いて、多数の Agent の中から特定の Agent へ必要な情報のみを、効率的に伝達する経路学習の支援システム構築を行った。

今回は、駒取りゲームを取り上げ、ゲームで勝利するためのプランニングが柔軟に行えることを目的として、最適な伝達経路の学習に対応した Agent の Intelligent 化、及び Multi-Agent の通信機能を用いた協調分散並列処理を可能とするシステムを構築した。

2.Multi-Agent システム

本研究での Multi-Agent システムは、複数の自律的な計算主体である Agent の集合が、与えられた複雑な情報を処理するシステムであると定義する。

Agent の定義は、様々存在するため、以下の特徴を持つものとする。

Agent は、動的な環境の中に置かれた計算システム(computational system)で、自律的に環境を知覚して行動することで、自分に与えられたゴールを達成するものであると定義する[1]。また Agent の持つ基本意思決定原理及び機構は、自己の信念や願望、意図などに基づいているものとする。

また Multi-Agent は、協調や交渉などの相互作用により Agent 個々の機能を生かし、新しい機能を創出して行く中で、その構造状況や全体像が疑似的な Intelligence を映し出す Agent の集合であると定義を拡張した。これは、Intelligent Multi-Agent であると言える。

3.階層型プランニング

本論文では、次の効率化手法を階層型プランニングと定義する。

・プランニングとは、問題空間における、初期状態から目標を含む状態に至るまでの行為系列の探索である。[2]

・Multi-Agent プランニングとは、複数の Agent の協調や交渉などの相互作用を行う為のプランニングである。[3]

本論文では、大規模な Multi-Agent システムの効率化を行う事を目的とするため、人間社会など集団生活において適用されている階層型指向の伝達系統の概念を、Multi-Agent プランニングに組み込み用いることにする。

4.システム構築による有効性の検証

本研究では、組織など命令伝達や人材配置のような、複雑かつ大規模な計画を行わなければ、効率的な作業が行えない環境を構想する。それは、Agent を自律ロボット(プログラム)ととらえたシステムにおいて、初期状態から目的状態への経路が自明でなくなる可能性があり、目的を達成できない恐れがあることに基づいている。

今回その一例として、大多数の Agent が存在する Multi-Agent システムとして、駒取りゲームを製作した。[Fig.1]

このゲームでは、それぞれの駒を一つの Agent として考え、2チーム(T1,T2)に分けて、設定した勝利条件を達成した場合にゲームが終了するようにした。

駒にはA,B,Cの3種があり、それぞれの個体数、能力は固定の値が設定されている。

また終了条件としては、個体数を1しか持たない様に設定されたAの駒が取られた場合にゲームが終了するようにする。

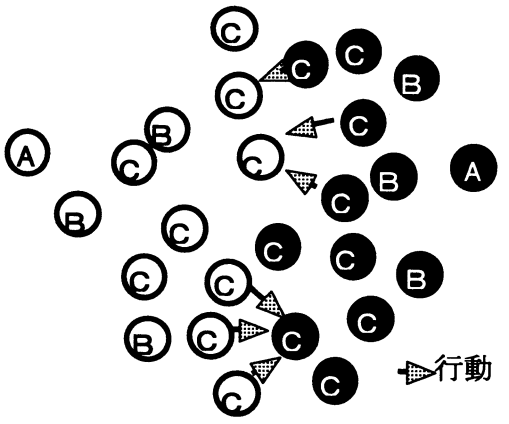


Fig.1 駒取りゲームの Image

検証方法や Multi-Agent の視点から駒取りゲームを見た場合、以下の特徴を持っている。

・ 同時に多数の Agent が行動し、Agent 同士による協調作業が目的達成の大きな要素

・全ての Agent の動きを一つの Agent が全て指示することは困難であり、分散制御することが必要

・一つの Agent が得られる情報は限られており、他の Agent との間で情報共有が必要

以上の特徴は大規模な Multi-Agent システムのモデルとしてふさわしい。

5.階層型プランニングのアルゴリズム

駒取りゲームにおける階層型のプランニングのアルゴリズムは Fig.2 のような階層型指向の通信概念を Agent の行動に適用させることを前提とする。

今回提案するプランニングアルゴリズムは、駒取りゲームのルールに準じた行動の評価値を設定しておき、それによりクラス別に数種の行動のパターンを用意しておく。(以下、ここ

ではA, B, Cをクラスと仮定する)

クラスAのAgentは探索した相手の情報を元にプランニングを行い、行動を決定し、クラスBのAgentにその行動情報を与える。

クラスBのAgentはその行動情報を参考に自分の行動をプランニングし、行動を決定し、クラスCのAgentにその行動情報を与える。

また、クラスCのAgentはその行動情報から自分の行動をプランニングし、行動する。

これらのアルゴリズムを構築する事によりAgentは情報伝達を確実に行なう事ができ、プランニングによって、目的の早期実現を目的とした行動の効率化を行なう事ができる。

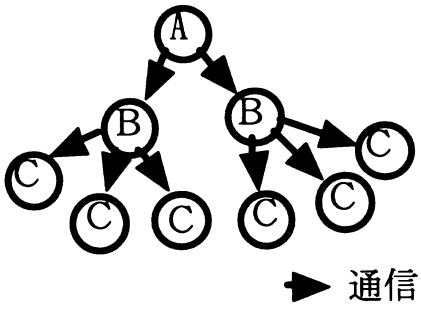


Fig.2 階層型指向の通信概念

6.実験と検証

実験は、プランニングを適用したチーム(T1)と、単純な行動原理のみを持たせたチーム(T2)を作り、その対戦結果により、プランニングの有効性の検証を行なった。

ここでの単純な行動原理として、T2は全ての駒が、

「Aの駒を取る(終了条件)」

「最も近くにいる駒(Aを除く)を取る」

という行動原理を持つ。

T1には、前述の階層型のプランニングを適用した。

駒取りゲームの設定として、駒の個体数を合計で101(A:1, B:5, C:95。T1,T2共通)とし、繰り返し対戦を行った。

7.実験結果

1回の対戦を1回の実験として考え、繰り返し2000回行い、各チームの勝敗決定時の平均終了ターン数、平均残存駒数、勝率をTable. 1に記載した。

Table. 1より、製作した階層型のプランニングを適用したT1のチームは、適用しないT2との対戦において94.6%(1893/2000)という勝率を記録し、勝利までの平均ターン数はT2よりも少なく、平均残存駒数においては多いという結果になった。これは、目的の早期実現、Agentの行動の効率化という点において良い結果であると言える。

Table. 1 実験結果

チーム名	平均ターン数	平均残存駒数	勝率
T1(P)	**43.21**	**76.01**	**94.6%**
T2(NP)	**86.6**	**58.6**	**5.35%**

P:プランニング有

NP:プランニングなし

8.結論

本研究では、大規模なMulti-Agentシステムにおける駒取りゲームにおいて、階層型プランニングの有効を提示した。

今回、プランニングに用いた行動の評価値は、対戦を繰り返し行う中で、勝利に対してのみ行った。そのため、プランニングに対する状況判断や全体像が勝利という1目的において、

疑似的な Intelligence を映し出すことに留まってしまった。しかし、各階層でプランニングを行う際、同じ勝利であっても、損失などの多目的な意思決定機構を組み込むことで、より疑似的な Intelligence を映し出すことができると考える。

Agent の動作が異なるのは、各階層の Agent の持つ基本意思決定原理及び機構が、自己の信念や願望、意図などに基づいているためである。それぞれ性質の異なる Agent である以上、その信念や願望、意図なども異なると考えられる。そのため、それぞれ優先される内容も異なるので、特殊な行動(裏切り行為や情報の漏洩など)を Agent に組み込む必要がある。これらの事を考慮し、敗戦時のデータを参照し、現在のデータと比較することで、勝利するためのプランニングを行うことも考えられる。

Agent が今後学習することは、様々な状況を考慮した有効なプランニングを行うため、条件に他ならない。もっと複雑かつ大規模な組織など命令伝達や人材配置に適用する際、様々な想像される状況と、それに対する損益の検討が判断可能なプランニングを、各階層ごとに行う必要がある。

これらのあげられた事項は、現実の状況をそのまま適用する場合だけではなく、シュミレーションということにおいては、欠かせない事項である。

参考文献

[1]金淵培:Agent 技術の現状と実用化,人工知能学会誌,Vol.12,No.6, pp.850-860 (1997)
[2] 山田 誠二:Agentのプラニング,人工知能学会誌,Vol.10,No.5,pp.677-682(1995)
[3] 大沢 英一:Multi-Agent 環境における交渉のモデル,人工知能学会誌,Vol.10,No.5, pp.690-696(1995)
[4] 伊藤 昭:ゲーム理論と Multi-Agent システム,人工知能学会誌,Vol.12,No.2(1996)

[問い合わせ先]
〒225-8502 神奈川県横浜市青葉区鉄町1614
桐蔭横浜大学 工学部 制御システム工学科
田崎 栄一郎
TEL:045-974-5070 FAX:045-978-1311
E-mail:tazaki@intlab.toin.ac.jp

WF 4−2

エージェント・アプローチによるファジィルール抽出法

A Method to Extract Fuzzy Rules Using Agent-Based Approach

領家 美奈, 中森 義輝
M. Ryoke and Y. Nakamori

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科
School of Knowledge Science
Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: In this paper, a method to extract fuzzy rules from a multi-dimensional data set is proposed by using the agent-based approach. There are two kinds of agents. One of them are called the cluster agents that have a role to select suitable variables and to release unsuitable data points in order to have better fuzzy rules. The released data points become another agents called the data agents. They detect another subset in order to join more suitable fuzzy rules for them.

1 はじめに

本論文では、エージェントベース・アプローチを用いて多次元観測データ集合からファジィルール抽出を行なう手法を提案する。現在までにファジィルールを抽出する方法は非常に多く提案されている。その中の多くの手法では、まず与えられたデータ集合に対して、ファジィルールを記述するのに適切と思われる候補変数や、なんらかの特徴を持つと思われる候補変数群等を選択してから、ルール同定を行なっている。しかしながら近年の大規模・複雑化し、またときには増加し続けるようなデータベースに対しては、あらかじめ変数群を選択することは困難になってきている。

本研究の目指すところは、増加しつづける定量的、定性的、および混合データベースに対して、ルールベースで記述される知識を獲得するための手法を開発することにある。本論文では、その第一段階として、定量的な多次元観測データから知識を獲得する手法の開発を試みる。

近年、KDD [1] における一段階であるデータマイニングが注目されている。データマイニング手法のひとつに相関ルール [2] [3] 抽出法がある。相関ルール抽出法の基本といわれているものにア・プリオリ・アルゴリズム [2] がある。大規模なデータベースに対して、相関ルールをできるだけ高速に抽出するために、様々なアルゴリズムが提案されている。相関ルールはそれ自体を抽出することも重要であるが、今まで気づかれることがなかった、例えばビールと紙オムツといったような、隠された変数間の関係の発見も期待されている。しかしながら、一方で、自明な相関ルールばかり発見されるような場合もある。

本研究では与えられた多次元観測データベースから、ある特徴を持つような部分集合同定とそれぞれの部分集合から相関ルールを抽出し、各部分集合を記述するファジィルールを同定するエージェントベース・アプローチを提案する。

2 ルールの形式

本研究の第一段階における問題設定は、定量的、かつ多次元の観測データ集合に対して、以下に記述されるようなルールを獲得することである。

$$\begin{aligned}&\text{Rule } R_i:\\ &\quad \text{if } x_1 \text{ is } X_{1i},\ x_2 \text{ is } X_{2i},\cdots,\\ &\quad \text{then } y_1 \text{ is } Y_{1i},\ y_2 \text{ is } Y_{2i},\cdots.\end{aligned} \tag{1}$$

x_j は前件部変数、y_k は後件部変数と呼ばれる。X_{ji}, Y_{ki} はファジィ部分集合である。ここでは、ファジィ部分集合は以下のような非対称型指数関数を仮定している。

$$f_{ji}(x_j;\ p_{ji1}, p_{ji2}, p_{ji3}, t_{ji1}, t_{ji2}) = \begin{cases} \exp\left\{-\dfrac{(x_j - p_{ji2})^2}{2(t_{ji1})^2(p_{ji1} - p_{ji2})^2}\right\}, & x_j \le p_{ji2} \\ \exp\left\{-\dfrac{(x_j - p_{ji2})^2}{2(t_{ji2})^2(p_{ji3} - p_{ji2})^2}\right\}, & x_j \ge p_{ji2} \end{cases} \tag{2}$$

p_{ji1}, p_{ji2}, p_{ji3} は第 i ルールを形成するデータ群の四分位点、t_{ji1}, t_{ji2} はデフォルト値 1.0 を持つパラメータである。

3 ルールの獲得

上述のルールを獲得するための問題点を以下に整理する。

- ルール同定のためのデータ分割問題
  - 各部分集合において、抽出されたルールに貢献していないデータの移動
- ルールを記述する変数集合の選択問題
  - 前件部変数、後件部変数の選択問題
- 適切なルール数の決定問題
- ルールを記述する各変数のメンバシップ関数の同定問題

データ集合全体から相関ルールを抽出する場合と比較してより意外性のあるルールを抽出できることを期待するという理由で、上述の問題に対して、データ分割を行ないながら、同時に相関ルール [2] [3] 抽出を行なうアプローチをとる。

本手法では、以下の目的の異なるエージェント群を設計して、それらの相互作用によって、対象とするデータベースごとに適応的にそれぞれの規範を学習して、さらに有効な知識を獲得できることを期待する。

I. クラスタエージェント：選択する変数群から導出される支持度と選択された変数の組合せから導出される確信度をもとに、与えられたデータ集合からルールを記述する変数群を選択する。また、選択した変数組の支持度をより高めるために、支持度に貢献していないデータを他のクラスターへ放出する。

II. データエージェント：クラスタエージェントが放出したデータが次の自分の行き先である部分集合を発見するために、ある規範を持って移動先部分集合を探索する。

4 本アプローチの課題

与えられた定量的な多次元観測データ集合に対して、エージェントベース・シミュレーションを用いてデータ分割とルール獲得を同時に行なうアルゴリズムについて多次元観測データからファジィルールを抽出する手法を簡単に述べた。

簡単な数値実験を行なうと、本手法では、獲得されたルールがもつ各変数のメンバシップ関数がうまく分離されているのに対して、データ分割結果がそれほどクリスプに分離していないことがある。これは、本手法ではルールを獲得するために相関ルール [2] [3] の考え方を応用しているが、それは必ずしもデータ分割結果がクリスプになるような規範ではないからと考えることができる。

また、本手法で使用しているメンバシップ関数は、はずれ値の影響を受けにくいように、左右非対称のメンバシップ関数を考慮できる指数型関数としている。これはロバスト性の面からみれば有効であるが、その一方で、少し中央から離れたクラスタ内データに対してもはずれ値扱いをしてしまうことを意味する。

本手法の問題点は、上述の点を踏まえた、より適切なルールを記述するメンバシップ関数を再考する必要があるという点と、得られるルールの評価手法が確立していないという点である.

それらを考慮しながら、いくつかある今後の課題の中で、まず、取り組むべきことは、各変数毎に分割数をアルゴリズム実行中に適応的に変化させて、適切なルールを抽出することを考慮できるアルゴリズムの開発である。そしてよりデータ散布をよく表現するようなメンバシップ関数を使用すること、各エージェントはまだ刺激反応系であるが、より大規模なデータベースに対応できるよう、またシミュレーション途中でデータベースが増加していっても対応できるように、各エージェントがなんらかの学習するパラメータを持つことが挙げられる。

参考文献

[1] U. M. Fayyad, G. Piatetsky, P. Smyth, R. Uthurusamy (eds.): Advances in Knowledge Discovery and Data Minig, AAAI/MIT Press (1996)

[2] R. Agrawal and R. Srikant: Fast Algorithms for Mining Association Rules, *Proc. of VLDB*, pp. 487–499 (1993)

[3] Tzung-Pei Hong, Chan-Sheng Kuo, and Sheng-Chai Chi: Mining Fuzzy Sequential Patterns from Quantitative Data, *IEEE SMC'99*, pp. 962–966 (1999)

問い合わせ先

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科 領家美奈
〒 923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1
phone: 0761-51-1757 / fax: 0761-51-1149

WF 4−3

証拠理論における不確実さの指標を用いたエージェント間コミュニケーションに関する研究

A Study on the Agents Communication using Uncertainty Measure in DS Theory

阿曽 光洋 Mitsuhiro Aso 名古屋大学 Nagoya Univ.
橋山 智訓 Tomonori Hashiyama 名古屋市立大学 Nagoya City Univ.
大熊 繁 Shigeru Okuma 名古屋大学 Nagoya Univ.

Abstract — In this paper, we are studying on measuring the uncertainty in the agent communication. The agents have their own words independently learned in the different situations. In such situation, agents need to share their words to reach some agreement. We applied the Uncertainty measure in Dempster-Shafer Theory to observe the ambiguity in the communication among agents. Simple simulations are carried out to examine these measures are useful for our purpose.

1 はじめに

本稿では、異なる環境で学習した2体のエージェントが、コミュニケーションを行ない学習し、互いの知識を共有していくまでの曖昧さを計測することを試みた。曖昧さの指標には、証拠理論[1]における不特定度、混迷度[3]を用いた。エージェントは、会話を行ない提示された事象への共通の認識をするように事象を表す単語を学習していく。証拠理論を用いることで、単語の選択の適切さの度合いを示すことができる。また、適切さの度合いを用いることで単語の選択時の不確実さ（曖昧さ）を測定することができ、実際に選択した単語が、どの程度確信をもって発せられたかを測定することができる。具体的な実験には、有田らの言語発生モデル[2]を参考にした。各エージェントは、階層型ニューラルネットワークで構成した。同じ環境で共同作業を行なう場合、エージェントは、作業対象について共通の認識を示す必要がある。また、人間の介在しない状況でエージェントが、学習の教師決定を自立的に行なう適当な方法はないため、本稿では、曖昧さの指標により、エージェントの主張の強さを数値化し、教師決定に用いた。最終的には、事象に対して異なる認識を示していたエージェントが共通の認識を示すようになった。

2 証拠理論

本節では、証拠理論における不確実さについて述べる。証拠理論では、有限集合をXとしたとき、式(1)で表される集合関数によって基本確立割当（Basic Probability Asignment:BPA)$m(\cdot)$が与えられる。 BPAは、全体集合Xのベキ集合に対して割り当てられる。$m(A)$は、ある要素$x \in X$が集合Aに属するという主張に対する信頼の度合いを示す。$m(A)$を用いることで、証拠の不特定性(式(2))、証拠の不一致性(式(3))および、証拠の混迷性(式4)を定義することができる[3][4]。式(3)、(4)におけるPlは、Plausibility測度を表し、(5)式によって計算される。また、式(6)を用いて全不確実さTを定義する。ここで、$F = \{A \in X | m(A) > 0\}$のことを焦点要素、$(F, m)$を証拠という。

$$m : 2^X \to [0,1], \quad m(\phi) = 0$$
$$\sum_{A \subseteq X} m(A) = 1 \tag{1}$$

$$N = \sum_{A_i \subseteq F} m(A_i) \log_2 |A_i| \tag{2}$$

$$E = -\sum_{A_i \subseteq F} m(A_i) \log_2 Pl(A_i) \tag{3}$$

$$C = -\sum_{A_i \subseteq F} m(A_i) \log_2 \left(\frac{m(A_i)}{Pl(A_i)} \right) \tag{4}$$

$$Pl(A_i) = \sum_{B \cap A_i \neq \phi} m(B) \tag{5}$$

$$T = N + E + C = \sum_{A_i \subseteq F} m(A_i) \log_2 \left(\frac{|A_i|}{m(A_i)} \right) \tag{6}$$

それぞれの指標の詳細は、Klir,G.J.[1]、塚本[4]に委ねるとして、ここでは、簡略にその意味を述べる。

- 不特定性 N(式(2))
  不特定性Nは、ある要素xが集合Xの部分集合A_iのどれに属するかどうかの特定できない度合を示す。
- 不一致性 E(式(3))
  不一致性Eは、$x \in X$が異なる部分集合$A_i \in X$に属するという意見のバラつき具合を示す。つまり、意見の不一致を示し、矛盾の度合が示される。
- 混迷性 C(式(4))
  混迷性Cは、証拠から要素$x \in X$の所属すべき集合$A_i \in X$を選択するとき、どのA_iに所属する度

合も確からしく、どの意見を信用してよいのかわからないという混乱状態を示している。

全ての指標は、不確かであればあるほど値が増大する。逆に指標の値が減少しすべての不確かさがなくなるとき、証拠から要素$x \in X$が一意に決定づけられることとなる。

3 問題設定

本稿では、複数のエージェントが共同で作業を行なう状況を想定する。それぞれのエージェントは、異なる環境で既に学習（知識の獲得）をしており、作業対象となる物体に対して独自の単語を関連付けているとする。よって、協力するためには、各々のエージェントが提示される物体に対して共通の認識を示す必要がある。本稿では、エージェントが認識した結果を互いに教えあい学習することで知識の共有を行なう。この場合、エージェントは、可能な限り正しい教師を選んで学習しなければいけない。しかし、人間の介在しない状況で、自主的にエージェントが、教師となるエージェントを選択する適当な方法は見当たらない。そこで、本稿では、証拠理論における不確実さの指標を用いて主張の強さを数値化する。事物の認識時において最も不確実さが少ないエージェントの主張を信頼することに対応する。

3.1 エージェントモデル

本研究におけるエージェントは、それぞれ図1に示す構成をしている。エージェントは、ニューラルネットワークを用いて構成した。提示された物体の特徴(ビット列)をI層に入力し中間層(H層)を経てX層で[0,1]の値を出力する。

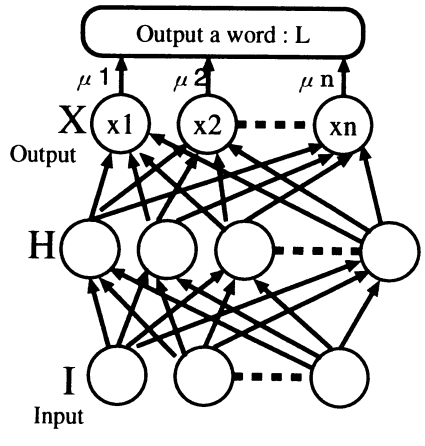


図 1: エージェントモデル

X層の各出力ニューロンには、物体を認識するためのラベル(名称)が意味付けられている。各ニューロンの出力値は、提示された物体がそのラベルで特徴付けられる度合（メンバーシップ度）を示すことになる。また、メンバーシップ度は、μ_iの最大値で正規化した。エージェントは、メンバーシップ度が最大であるラベルを採用し、単語Lとして出力する。各ニューロンの値と出力されるラベルの例(出力層のニューロン数= 5)を以下に示す。

$$if(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (0.3, 0.8, 1, 0.7, 0.1) \quad (7)$$
$$then\ L : (0, 0, 1, 0, 0)$$

3.2 ＢＰＡの割り当て

本研究のにおいて、証拠理論における不確実さを算出するためのエージェントの出力x_iとBPAの対応関係を示す。本研究のエージェントモデルでは、各ニューロンの出力を入力に対するメンバーシップの度合としている。出力は、図2で示される入れ子構造をした集合で表現できる。図3には、図2を別の方法で図示した。

このとき、式(9)を用いてBPAを求めることができる。

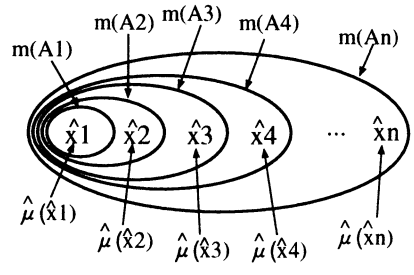


図 2: 入れ子構造をしたXの部分集合

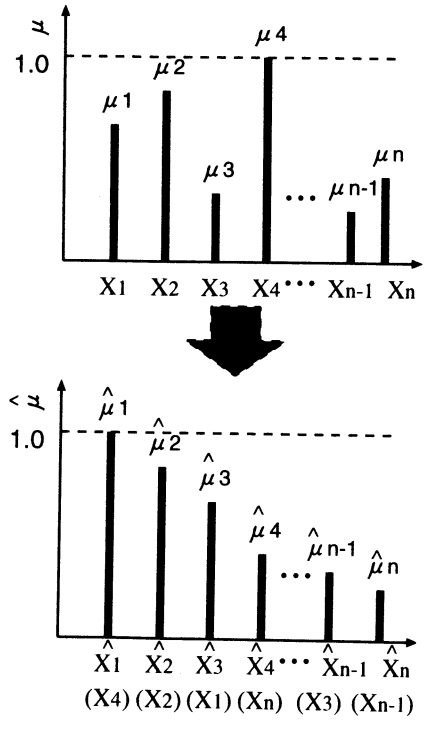


図 3: 入れ子構造とエージェント出力の関係

$$1 = \hat{\mu}_1 \geq \hat{\mu}_2 \geq \cdots \geq \hat{\mu}_n \quad (8)$$
$$m(A_i) = \hat{\mu}_i - \hat{\mu}_(i+1), \hat{\mu}_{n+1} = 0, i = 1, \cdots, n$$

3.3 モデルの持つ不確実さ

BPAが求まることで式(2)より不特定度N、式(4)より混迷度Eを求めることができる。本研究においては、出力のラベルに対して重なりはないものとみなしメンバーシップ度を割り当てるため、式(5)で示されるPlausibility 測度の値は、常に1となり式(3)で求められる不一致度は、0となる。したがって、本稿では、NとCの和を不確実さの総和Tと定義する。この全不確実さTの値がエージェントの発した単語ラベルに対する不確実さが小さい、すなわち、確信を持った主張と考えられる。なお、それぞれの不確実さは、bitの単位を持つため和をとることができる。

3.4 エージェント間の会話

それぞれのエージェントは、物体の特徴をニューラルネットワークに入力し、出力ビット毎のメンバーシップ度(: μ)とBPA (: m)を算出する。そして、会話相手への発語として規格化したメンバーシップ度の最大値を持つラベルを選択し、単語を発する。また、同時に全不確実さTを出力する。ここで、会話相手から受けとった不確実さの度合いとその時の自分の不確実さの大きさを比較し、不確実さの小さい方の主張を学習する。

4 シミュレーション

具体的にエージェントを構成し、シミュレーションを行なった。シミュレーションでは、エージェントを2体とした。シミュレーション1では、ことなる知識を持つ2体のエージェント同士がコミュニケーションを行ない、互いに知識（単語）を共有していく過程での不確実さの変化を計測した結果を示す。また、比較実験としてシミュレーション2では、有田[2]のコミュニケーションモデルに習い、各々のエージェントがコミュニケーション相手の発した単語を学習していく過程での不確実さの変化を示した。

各シミュレーションに共通した条件としては、エージェントの数は2 (Agent1,Agent2)、提示する物体の数は8 (Object1～Object8)、エージェントを構成するニューラルネットワークの重みの初期値は、ランダム、エージェントの学習則は、誤差逆伝搬法BP（学習係数：0.02)とした。

4.1 シミュレーション1とその結果

このシミュレーションでは、教師決定に際して会話相手の出力を用いることにした。つまり、Agent1は、Agent2の出力を教師として学習し、Agent2は、Agent1の出力を教師として学習する。単純にエージェントが互いの主張を相手に教えあうとき、どのように不確実さが変化し、単語の共有が行なわれるかどうか調べるためにこのシミュレーションを行なった。このシミュレーション結果の一部を図4と図5に示した。図はそれぞれ、Agent1のみ事前に学習したObject1に対するAgent1とAgent2の不確実さの変化の様子である。この実験においてAgentは、単語を共有することができなかった。また、その他の結果についても類似した変化を示した。

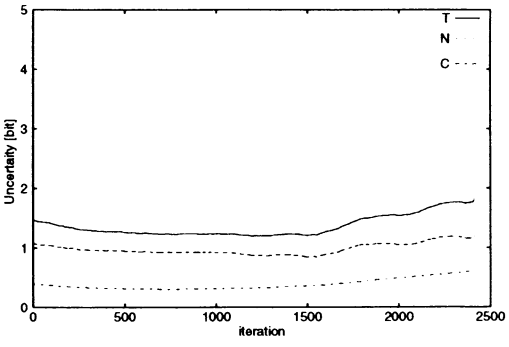


図 4: 不確実さの変化(Agent1,Object1)

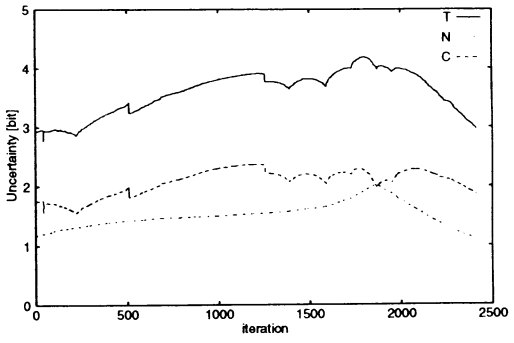


図 5: 不確実さの変化(Agent2,Object1)

4.2 シミュレーション2

本シミュレーションでは、不確実さの指標を用い、不確実さが小さなエージェントが教師となって学習することにした。知識のあるエージェントが知識のないエージェントを教える状態を想定している。それぞれのエージェントは、事前に異なる4つずつの物体に対して学習をしており、その全てを認識することができる状態となっている。

結果を図6から図9に示した。図6と図7は、Agent1のみ事前に学習済みのObject1に対するAgent1とAgent2の不確実さの変化を示している。また、図8と図9は、Agent2のみ事前に学習済みのObject4に対するAgent1とAgent2の不確実さの変化を示している。最終的にAgent1,Agent2共に全ての物体に対して共通の単語を割り当てることができた。なお、他のObjectに対しても類似した不確実さの変化を示した。

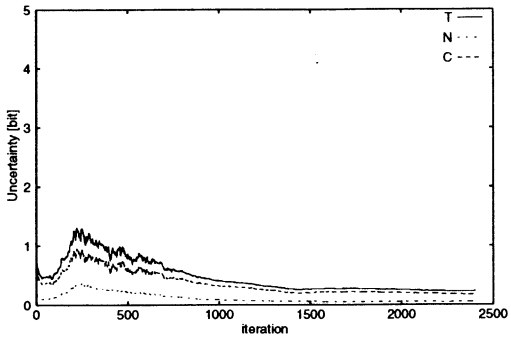


図 6: Object1に対するAgent1の不確実さの変化

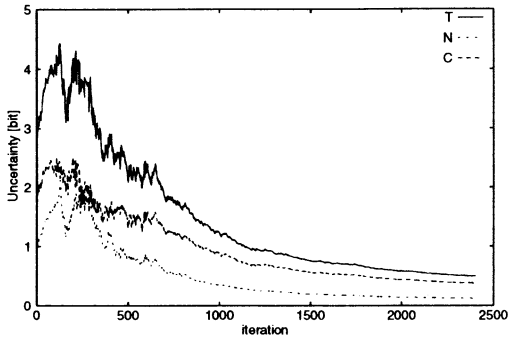


図 7: Object1に対するAgent2の不確実さの変化

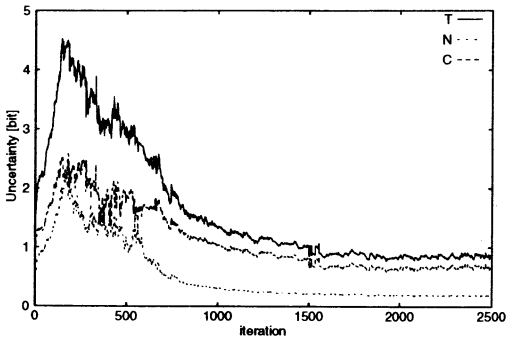


図 8: Object4に対するAgent1の不確実さの変化

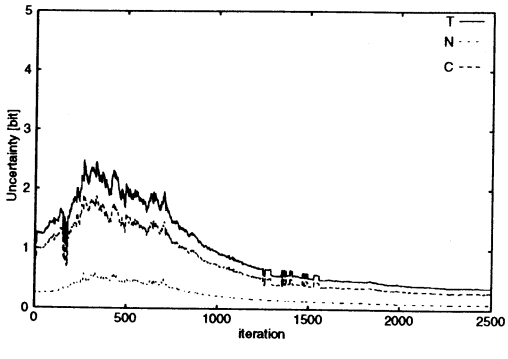


図 9: Object4に対するAgent2の不確実さの変化

5 まとめと今後の課題

本稿では、学習過程において証拠理論による不確実さの変化を測った。また、不確実さの指標の大小を用いることでうまく教師を決定することができ、エージェント間で単語を共有することができた。

今後の課題としては、不一致度を考慮できるモデルの構築、不確実さを有効に利用し、人間のコミュニケーションにより近いモデルを検討することなどがあげられる。人間に近いコミュニケーション方法に関しては、人間の意思伝達過程の流れを不確実さの変化を計測することで分析した塚本[3]の例題などが参考になると考える。ただし、これに関しても本研究同様、不一致度を用いておらず、不一致度を求めることができるようなBPAの割り当てという問題が残されている。

参考文献

[1] Klir,G.J.and Folger,T.A.,Fuzzy Sets,Uncertainty and Information,Prentice-Hall:Englewood Cliffs,NJ,1988. (本多中二 訳、ファジィ情報学、日刊工業新聞社、1993)

[2] Arita,T.,A Simple Model for the Evolution of Communication,Evolutionary Programing V - proceedings of the Fifth Annual Conference on Evolutionary Programing:MITpress,1996.

[3] 塚本弥八郎:意志伝達における不特定度と混迷度、第2回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論文集pp.65-68,1997.

[4] 塚本弥八郎:証拠理論におけるエントロピーの最近の研究、第4回東海ファジィ研究会講演論文集、pp.27-28、1996.

[5] 安西祐一郎:認識と学習、岩波出版社、pp.335－346,1989.

問い合わせ先

〒466-8603 愛知県名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院 大熊研究室
阿曽 光洋
TEL (052)789-2777
FAX (052)789-3140
E-mail aso@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp

WF 5−1

機器操作の知的支援システムの提案

An Intelligent Support System for Machine Operation

武藤 裕美　　安信 誠二
Hiromi Mutou　　Seiji Yasunobu
筑波大学 機能工学系
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

Abstract An intelligent support system is constructed by the supporting processes of expert. Fuzzy logic is one of the natural ways to integrate linguistic statements into an intelligent system. Using Fuzzy logic, the rules based on knowledge and the inference processes of the operating support instruction are expressed clearly.

1 はじめに

機器操作に不慣れな人間が操作を行う場合、そばに熟練者である支援者がいると、操作を潤滑に進めることが出来る。操作手順を記述したマニュアルによる支援よりも、人間による支援のほうが受け入れやすいからである。

支援者の出す支援情報は、自身の経験的知識に基づいた推論過程によっている。支援者が人間であるため、その知識や過程は言語表現されたものであり、被支援者にも理解しやすい。

本論文では知的支援システムを人間の支援者の支援プロセスにのっとって構築する。その際、言葉のあいまいさを表現できるファジィ理論を用いることで、操作支援指示決定のための知識ベースのルールと推論過程が明示的になる。それにより人間に受け入れやすい支援システムの構築を目指す。

2 操作支援

人間の行為は状況の認識、状況判断、目的決定、手段の決定、そして操作の決定、実行というプロセスで行われる（図 1)。

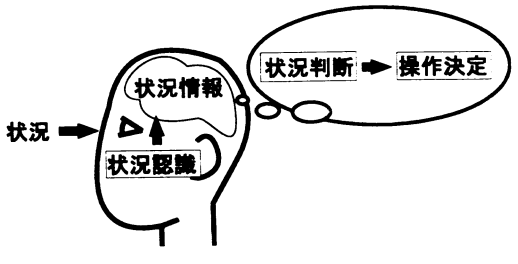


図 1: 行為にいたるまでのプロセス

一般的な機器操作の支援を考えると、支援者は前述の行為にいたるまでのプロセスを踏み、操作指示を出している（図 2)。支援を決めるための状況判断と操作決定は支援者のもつ経験的知識に依存し、その知識によって様々な支援指示が存在する。それはまた被支援者の操作によっても変化する。したがって支援システムに求められているのはその変化に相対する柔軟性である。いいかえれば状況、被支援者に合わせて知識が組換え可能であることが大切である。

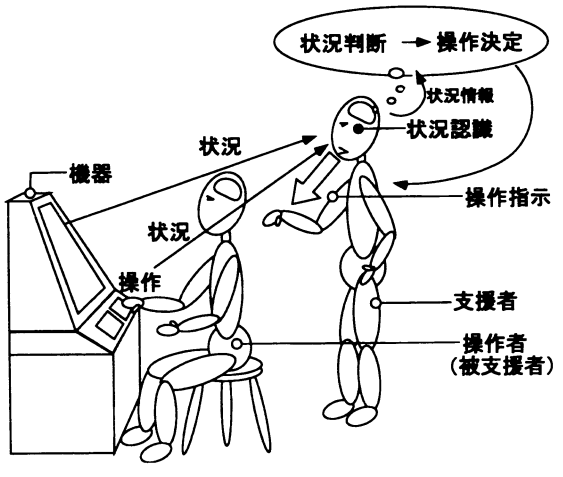


図 2: 機器の操作支援のプロセス

3 操作支援システム

支援システムを支援者という人間に見立て、前述の機器操作支援のプロセス（図 2）に即してシステムを構成する（図 3)。

3.1 状況認識部

人間の状況認識は五感で行われる。特に機器操作の場合視覚による認識が多い。人間の目に代わるものが状況認識部である。ここでは画面上の必要な情報、つまり目標設定部と操作支援部の入力となる状況（位置）情報を

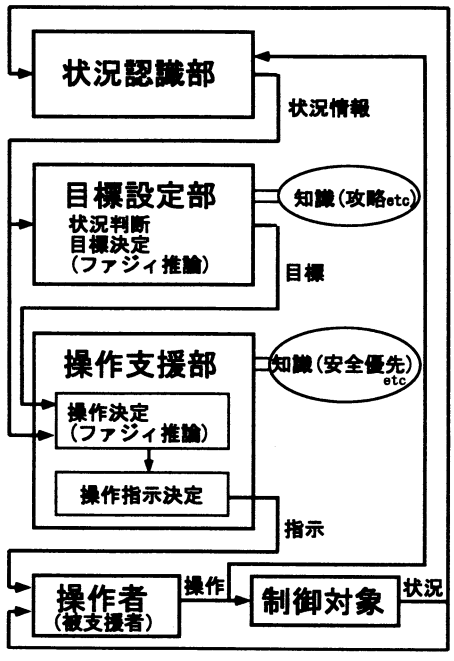


図 3: 支援システム構成図

取り出す。画像認識には HALCON5.2(MVTec 社) を用いた。

3.2 目標設定部

目標設定部では目的を遂行するための局所的な目標を設定する。

ある操作を行う場合、支援者はまずその最終目的を考えた上で、自分の持つ知識 (攻略) から局所的な目標を定めて操作を行う。これを車の運転にたとえると、A 地点に行くためには B 地点をとおるのが良い等と考え、まず B 地点をめざす。ここでは A 地点に行くことが目的で、そのための局所的な目標が B 地点である。

ここで目的をなすための目標を決める指標となるのが熟練者の知識である。目標を決める知識を、ファジィ推論を用いることにより組み込む。組み込む知識によってその時設定する目標は違うものになる。

3.3 操作支援部

局所的な目標が決まれば、次に人間が考えるのはその目標を達成する操作である。ここでもファジィ推論を用い、どの操作を行えば目標を達成できるかという人間の知識 (安全優先等) を組み込む。したがって知識次第で操作はかわる。どの操作を行えばいいかを決定すれば、それを被支援者に対して指示 (支援情報) として出す。

3.4 操作支援模擬実験

本論文で提案したシステムにおいて、目標設定部と操作支援部内の操作決定部に知識が正確に組み込めているかどうかを実験により検証した。そのため人間の操作者 (被支援者) の代わりに自動運転模擬装置を用いた。操作支援部内において、操作指示決定部は操作決定部が決めた操作をそのまま指示として出力している。

開発した操作支援模擬実験システムの構成を示す (図 4)。

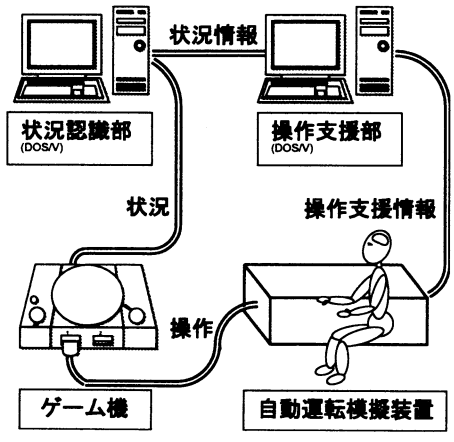


図 4: 操作支援模擬実験システム

4 おわりに

本稿では人間の言葉で表される知識を組み込むことができる汎用性の高い支援システムを提案した。今後操作支援部内の操作指示部を構築していく予定である。その際、人間の特性の考慮は課題となる。

参考文献

1. 安信 "ファジィ工学" 昭晃堂 (1991)
2. 日本ファジィ学会編、" ファジィ制御 " 日刊工業新聞社 (1993)
3. 飯島、"支援の定義", オフィスオートメーション学会支援基礎論研究部会報告書「『支援』概念の基礎づけに向けて」(1995) 第 1 部第 2 章

問い合わせ先

〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学機能工学系
知的制御システム研究室
武藤 裕美
TEL: (0298)53-6186
E-mail:muou@edu.esys.tsukuba.ac.jp

WF 5−2

カラータイムペトリネットによる災害時避難システムの構成

Synthesis of Evacuating System from Disaster Using Colored Time Petri Nets

○碓井　智範　　田崎　栄一郎
○Tomonori Usui and Eiichiro Tazaki

桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract: Petri Nets have been widely used to model computer systems, manufacturing systems, robotics systems, knowledge-based systems and other kinds of engineering and social systems. However, in the Petri Nets we have to represent all kinds of processes by separate subnets ever though the process has the same behavior of other one.

Real-world systems often contain many parts, which are similar, but not identical. This means that the total Petri Nets become very large. On the other hand, to represent time dependent systems, Time Petri Nets model have been proposed to perform a class of dynamic behaviors of them.

The kind of problems may be annoying for a small system, and it may be catastrophic for the description of a large-scale system.

To avoid this kind of problems we propose a modeling method using Colored Time Petri Nets.

To inspect the effectiveness of the proposed method, we apply it to a synthesis problem of evacuating systems from disaster.

1. はじめに

近年、ビルの高層化が進行し、当然のことながらその災害時の問題に関心が向けられてきている。その中で特に、火災などの緊急時における避難行動については重要な課題とされている。そこでこの種の問題に対する新しいアプローチとして、ペトリネット(Petri Net)にタイムペトリネット(Timed Petri Net)とカラーペトリネット（Colored Petri Net）を組み合わせて導入し、災害時における避難についての避難システムの構成し、災害時避難システムへの適用によってカラータイムペトリネット（Colored Time Petri Net）の有効性を示す。

2. ペトリネット

ペトリネットとは、ドイツの C.Petri の学位論文(1962)を出発点として発展してきた、並列非同期同時進行する複数のプロセスからなる離散事象システムを表現するモデルである。

回路やコンピュータのオペレーティングシステムの設計、及び並列で非同期的な振る舞いをするシステムをモデル化するために有効なグラフィックモデルである。つまり、ペトリネットの最大の利点は、グラフを描くことによりその構造がそのままモデルの言語に変換できることである。また変更・修正も自由に行うことができる。[1]

3. ペトリネットの種類

3-1 タイムペトリネット

実際の生産システムをモデル化し、シミュレーションをする為に導入して考えなければならないのは、時間の概念である。システムの構築に対して時間をとりいれたものがタイムペトリネットである。タイムペトリネットは、トランジションが発火可能であっても、一定時間その発火を遅らせることによって、発火規則に時間の遅れの概念を導入することができる。[1]タイムペトリネットでは、時間に関するパラメータの導入の仕方によって２つに分類される。

- トランジションタイムペトリネット
  トランジションの発火に要する時間を規定する場合に使用する。
- プレースタイムペトリネット
  プレースに入力されたトークンが利用可能になるまでの、遅延時間を導入する場合に使用する [3]

3-2 カラーペトリネット

ペトリネットは、たとえそれぞれ２つのサブネッ

トのプロセスが非常に類似したものでも、別々に全ての構造について表現しなければならなかった。このようなことはシステムのサイズが小さい場合ではさほど問題にはならないが、システム全体が非常に大きく複雑な場合になると、そのシステムにおけるサブネット間の類似性と相違性を理解することや、その構造のモデル化が非常に困難になってしまう。このような問題は実際のペトリネットの仕様において頻繁に現われており、これらを解決するために、高レベルネットであるカラーペトリネットがある。これはペトリネットにおけるそれぞれのトークンにカラーという属性を設定することによって、ある種の階層化を施すことができ、より簡潔なペトリネットモデルの構築が可能となるものである。

カラーペトリネットでは、プレース、トランジションにはそれぞれカラー集合と呼ばれるものが加えられる。そして、トランジションは、そのカラートークンの個々に対して発火することができる。発火におけるトークンの移動は、カラーに関することを除いては普通のペトリネットと同様な動作を行う。

トークンに設定されたカラーはトランジションの発火によって変化するかもしれない。アークには、そのアークに流れるトークンカラーであるアーク表現が記述され複雑なカラーを制御するためには、このアーク表現も複雑にしなければならない。発火可能トランジションに対する条件と発火規則は、ネットのアークをラベル付けする線形関数(linear function)からなる。この関数は、トランジションを発火可能にするためにどのカラーがプレースにマーキング、付加、除去しなければならないのかを表している。

以上のようにペトリネットにカラーという概念を導入することによって、同等な構造を持つネットを階層的に表現することができる。[2][4]

4.システム構築のアルゴリズム

今回のシミュレーションでは、ペトリネットを使い、以下のようなアルゴリズムを用いる。

i.エキスパートによってルール（場所の特定、災害の種類、出口などの位置、その他災害時の設備、etc）を作成する。

ii.ルールをもとにネットモデルを作成する。

iii.ネットモデルの改善に伴いサイズが大きくなった場合、カラーペトリネットなどで縮小しても構わない。

iv.ネットモデルの解析、シミュレーションを行う。（被覆木、状態方程式などの手法を導入する。）

5.実験

5-1　シュミレーションモデルの作成

モデリングは、システム構築のアルゴリズムに沿って実行していく。今回の実験に使用するモデルは、32 階の高層ビルを想定しモデルを構成した。1 階と最上階は出口があるので他の階とは別構造にした。2 階から 11 階までと、12 階から 21 階、22 階から 31 階はそれぞれ構造を統一したものとする。

5-2　ルールの設定

ペトリネットのモデルを構築する際に場所の特定はプレース、出力アークは通路、トランジションは人の行動、トークンは人に設定した。また、各階層からの脱出方法を Table.1 に示す。

Table.1　各階層からの脱出方法

階数	脱出方法
1階	出口３箇所
２階～１１階	非常階段、脱出梯子
１２階～２１階	非常階段、はしご車
２２階～３１階	非常階段、ヘリコプター
３２階	ヘリコプター

ルールには実際の避難の時間を想定し、時間ペトリネットの導入をする。導入法は屋上でヘリを待つ待機の時間、階段を降りする時間と脱出ポットの設置時間をモデルに取り入れる。階段には一度にたくさんの人数は上り下りできないので、人数を制限し待ち状態を作るためにトークンの制限をモデル化する。今回の避難モデルを Fig.1 に示す。

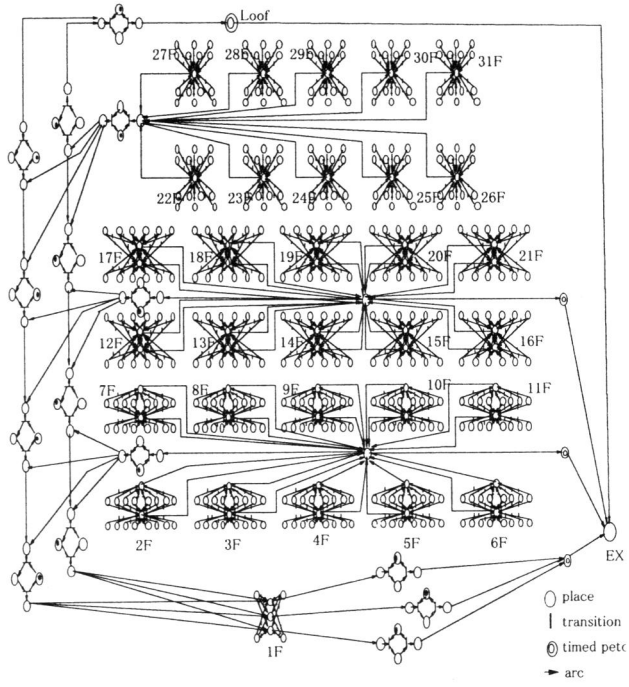


Fig.1　ビルの災害時避難モデル

解説:各プレースからEXITへトークンが移動するようにアークが伸びている。これは、ビルの部屋から安全な位置までの通路が示されている。人の制限で使用されているモデルは、各階層の通路と1階から32階までの2つの非常階段、そして1階にある3つの出口に取り入れられている。

タイムペトリネットは“◎”に示す位置に導入されている。最上階でのヘリコプター待機時間、各階層の避難器具設置時間など、人が待ち状態になっている位置に取り入れられている。シミュレーションではある一定の発火時間を設けて、避難にかかる時間を遅らせた。プレースに人の位置を自由に配置することにより避難のシミュレーションが可能となる。そしてビルのある一室からの避難ルートが理解でき、また各階からの避難時間が、ある程度予測可能となる。実際に作成したモデルの規模は、プレース数（場所）は425個、トークン数（人数）は300個である。

5-3　ネットモデルの簡略化

今回の規模になると視覚的、サイズ的にもペトリネットの理解が困難になる。そこでこのペトリネットモデルにカラーペトリネットを導入した。

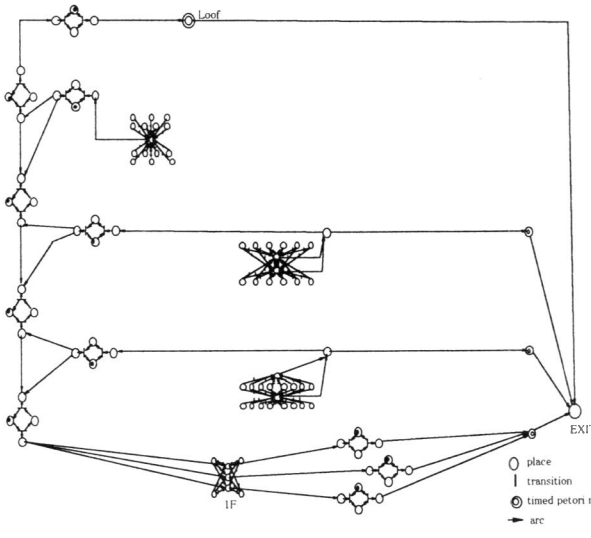


Fig.2　カラーペトリネットを使用したモデル

解説:2階から11階までと、12階から21階、22階から31階は、それぞれ構造を統一している為、同一の構造の組み合わせが階層ごとに3組できる。つまり同一の動作をするネットをまとめることができるのである。ネット内を動き回るトークンに階層ごとに色分けし属性を持たせた。Fig.2はカラーペトリネットを使用することにより、ネットモデルの構造自体は変化せずに、視覚的にもサイズ的にもネットを簡略化でき理解することが容易になった。Fig.2はFig.1より大幅に簡略化されたのが見てとれる。また、このモデルはFig.1と同等な構造、性質を持つ。

5-4　ネットモデルの解析

5-4-1：動的性質

マーキング依存の性質(marking - dependent property)とも呼ばれ、初期マーキングによるネットの挙動を解析する。(可連性、有界性、活性、可逆性等)

5-4-2：静的性質(構造的性質)

動的とは異なり、初期マーキングに依存しない、主にネット構造の性質についての解析を行う。(構造的活性、可制御性、構造的有界性、保存性、反復性、ネットインバリアント等)

5-4-3:解析法

ペトリネットにおける解析方法は、可達(被覆)木法(reach ability(cover ability)tree method)、行列方程式法(matrix equation approach)、締約あるいは分割手法(reduction or decomposition techniques)がある。可達木法は、本質的にすべての可達マーキングあるいは被覆マーキングを数え上げるものである。これはネットの全クラスに適用可能だが、状態空間発散での複雑さの問題のあるため「小規模な」ネットに限定される。一方、行列(状態)方程式は強力であるが、多くの場合、ペトリネットの特定のサブクラスあるいは特殊な条件でのみ適用可能である。そこで今回は大規模モデルと想定されるので行列方程式法を使用し解析を行った。まず、実際に作成したペトリネットモデルが表現方法として適切かを検証する為に次のことを解析していく。

○避難システムの解析法には以下の手法を使用する。
- §複数の出力アークをまとめる。
- §必要のないプレースを除去する。
- §同一のシステムを統一化する。

○ペトリネットのモデルとして適切なのかを解析する為には、以下の問題点を挙げる。
- §各プレースのトークン数は常に有界か。
- §目標の状態へ到達することができるか。
- §デッドロックを生じていないか。

以上の問題点を解析する。そこで今回の解析手法として取り入れたのが被覆木、状態方程式での方法で解析する。ペトリネットを線形代数学的方法によって、ペトリネットモデルを数列に変換し

たプログラムを作成し、チェックを行った。その後、シミュレーションする為にPDS[4]を使いシミュレーションを行った。前記の解析法で解析したペトリネットモデルをFig.3に示す。

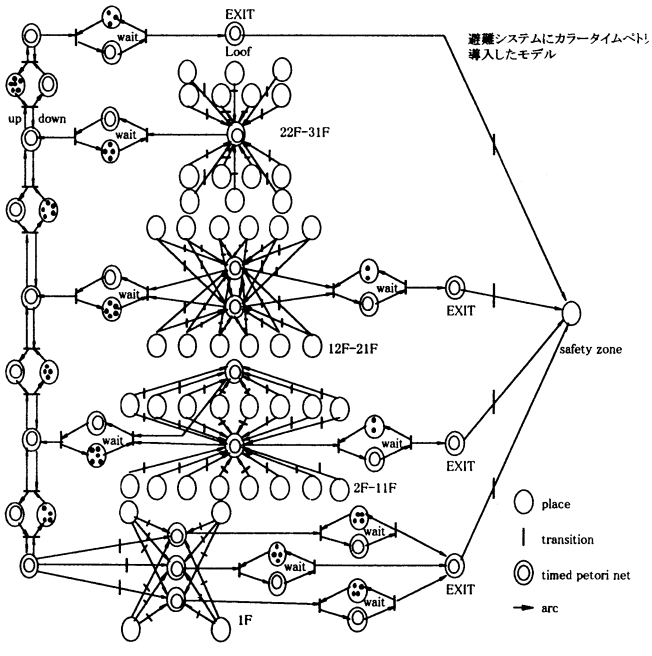


Fig.3　カラータイムペトリネットの避難モデル

各階層ごとカラー化を施し、ネットサイズを縮小した。プレースタイマーの所では、各階層ごとに割り当てられた"色"のついたトークンがあり、同じ属性でないと発火できないようになっている。プレースタイマーの所にタイムペトリネットを設置した理由は、階段を上り下りしている時間、通路を移動している時間を考慮した為である。新たに階段もカラー化してそれぞれのトークンの通過ができるように設定した。そしてビルを出ただけでは安全とはいえないので、新たにsafety zoneを設け、そこまでの移動時間もタイムペトリネットで避難時間を設定した。

シミュレーションした結果、今回のモデルでは、22階から31階までのトークンが避難時間にとても遅れが見られた。これはTable.1に示してあるように、避難経路、避難場所の数が少ないのが原因ではないかと推測できる。このようにカラータイムペトリネットを使用し、シミュレーションすることによって構造の欠点も指摘することができるのではないかと考える。

6.考察と結論

前記の「4.システム構築のアルゴリズム」を使用しモデルを構築しただけでは、正確なペトリネットなのかを判断できない。そこで、「ネットモデルの解析」に挙げられた問題点について、解析を行いモデルの改善をした。カラーペトリネットを導入し簡略化することにより、実験結果からモデルを理解するのが容易になった。またタイムペトリネットにより、時間の概念を取り入れることによって通路での移動時間、各避難器具の設置時間などに差が生じ、現実の避難行動にかかる時間が推測できるモデルを構築できた。また今回の様に、ビルのモデルを使用し様々なルールをもとに、カラータイムペトリネットによってシミュレーションしたことで、ビルの構造の欠点も指摘することができたといえる。

以上のような考察から、今回の32階建高層ビルでも簡略化でき、時間の概念を導入することでより避難行動についても判り易くなった。そして実用的に使用することが可能なものである。以上の考察より、さらに大きな災害が起きた場合、また今回のシミュレーションした場所に類似している場合などは、カラータイムペトリネットを使用することで、私たちをよりスムーズに誘導できる避難経路モデルを作成できるのである。

◇参考文献◇

[1]推塚久雄：「実例ペトリネット」：コロナ社：pp.6-147：1992.6

[2]市川惇信：「ペトリネット入門」：共立出版株式会社：pp.9-120：1974.4

[3]「ペトリネットとその応用」：計測自動制御学会：pp.40-118：1992.5

[4]大内裕士,田崎　栄一郎;"ファジーカラーペトリネットによるルール学習型推論エンジンの構築",第13回「ファジーシンポジウム」講演論文集,pp.169-172.（1997）

[5]The Petri Net Design System (PDS) : Ver.1.0 : 信州大学工学部

連絡先：

〒225-8502

神奈川県横浜市青葉区鉄町1614番地

桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科

田崎　栄一郎

TEL:045-974-5057　FAX:045-973-1311

E-mail:tazaki@intlab.toin.ac.jp

一般講演論文

9月7日（木）

TA1−1

類似概念に基づく文書クラスタリング手法の提案

Proposal of text clustering method based on similar conceptual matching.

谷口孝治　小笠原千尋　大塚和彦　高木友博
Koji TANIGUCHI / Chihiro OGASAWARA / Kazuhiko OOTSUKA / Tomohiro TAKAGI
明治大学 理工学部 情報科学科
Dept of Computer Science, School of Science and Technology, Meiji University.

Abstract In this paper, we propose "Text clustering method based on similar conceptual matching". This system extracts meaning information from plain documents, and classifies disconnected documents into similar conceptual documents group. We aim at this grouping is closely resembled that is classified by person as much as possible.

1. はじめに

近年のコンピュータの普及は，企業単位・個人単位を問わず目覚しい急進ぶりを見せている．それに伴い，コンピュータ上の文書情報も増大する一方である．そんななか，膨大な量に膨れ上がった推定形な文書情報を有効に利用する必要性が生じてきた．我々はそのような分類における問題を解決するために，コンピュータによる自動分類システムである"類似概念に基づく文書クラスタリングシステム"を提案する．

2. 類似概念文書クラスタリングとは

今回提案する"類似概念に基づく文書クラスタリング"では，"Aの文書とBの文書は類似している"という，その語に精通した人間の目で見れば易しい概念の類似性の判断を計算機上に実現する．つまり計算機に人間的な概念を持たせることにより，文書データベース中の文書ファイルの内容を理解し，それを分類することを目的とする．

文書の意味的な解析において人間に近い概念をもたせるために，後述する2つの手法を用いることによって，単なる文書情報に意味を付与することを可能とした．

2.1 文書からの単語の切り出し・概念の抽出

形態素解析※1の結果，導出された語（形態素の中でも名詞に属する語）にtf-idf法を用いることによる確率論的な語の重要性情報を付与し，さらに概念的体系であるオントロジーを用いることによって，人間的な感性を持たせた．

2.2 tf-idf法

tf-idf法とは，文書データベース中のある文書中における語に対して統計学的な重みを見出す手法である．tf-idf法によって導き出すことが出来る重要度は，その語の文書データベース内での希少性が高く，且つその語が出てくる文書内で頻繁に現れる語ほど，高い値となる．以下，このようなある文書内のある語に対するtf-idf法を適用した結果として導き出される値を重要度と呼ぶことにする．

2.3 オントロジー

オントロジーとは，ある対象世界における概念の意味や、それらの関係を何らかの方法で体系化し，その対象世界をモデル化する際の規約を与えるものである．我々は階層構造を持つBAM（Bidirectional Associative Memories）を用いることによりオントロジーの体系化を行った．図1にBAMによるオントロジーの概要を示す．

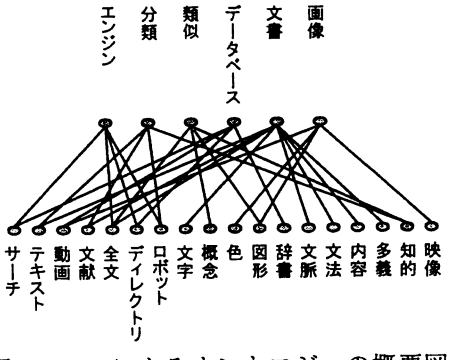


図1: BAMによるオントロジーの概要図

BAMによるオントロジーでは，連想マトリックスによって語と語がどの程度関連しているかを表現することが可能である．本研究では概念的類似性を取り扱う必要があるため，関連性の大小の見極めが行えるこの方法を採用した．

3. クラスター分析

クラスター分析とは，外的基準なしに自動的にデータを分類する手法である．言い換えればデータ以外にあらかじめ基準を設定することなく，データの集合をいくつかにグループに分ける方法のことであるといえる．本システムでは文書集合の中から群（クラスター）を見出し，意味のあるカテゴリに分類するためにこの手法を導入した．

文書を自動分類するためにFCM(:fuzzy c-means 法)を用いる．その場合，文書を多次元のベクトルにより表す．ベクトルの要素として，先述したtf-idf法による重要度とオントロジーでの活性値を考慮した値を採用する．つまり，ある文書のあるそれぞれの語に対して1つのベクトルが割り当てられる．ここで，概念体系を人為的に構築したオントロジーからの活性値は，確率的に導き出されるtf-idf法による重要度よりも人間的な概念を類似性によって決定させるため，ベクトルの要素としての比重を大きくした．

具体的には，ある文書集合のなかで採用された語の集合を$W=\{w_1,w_2,\cdots,w_{max}\}$(maxは全採用語数)とする．それぞれの語に対してtf-idf法を採用し，導出される重要度によって構成される重要度ベクトルAを$A=[a_1,a_2,\cdots,a_{max}]$と定義する．さらに，$A$の値をオントロジーに反映させ，導き出される概念的類似性Cを$C=[c_1,c_2,\cdots,c_{max}]$とする．このベクトル$C$の要素の値を用いる事によってクラスタリングを実現する．

それらのベクトルを用いることによって文書データベー

※1 形態素解析には，奈良先端科学技術大学院大学の松本研究室において開発された形態素解析システムである"茶筅"を用いた．

ス上から

（全文書数）×（全文書中に現れる採用された語数）

のベクトル行列を構成する．

4. システムの検証

ここで我々が開発した類似概念文書クラスタリングシステムの実用性を，実際に検証してみる． 今回，検証に当たって147個の文章を持つ文書データベースを用意した．この文書は学術論文の検索を目的とした CD-ROM “論文速報” 中から，“画像検索” “検索エンジン” “知的検索” “文書検索” “データベース検索” の5つのキーワードを用いた単純キーワード検索によって拾い出したものである． ここでは，このキーワードを分類の指針として用いることにする．

4.1 結果の検証

ここで本来の目的であった人間の感性・概念に本提案手法による分類がどれほど近いものかということの検証を行った結果を表1に示す．

表 1:本手法と分類者による分類結果の比較

	分類者 A	分類者 C
	分類数（分類率）	分類数（分類率）
画像検索	49(84%)	44(88%)
検索エンジン	34(59%)	36(61%)
文書検索	20(55%)	22(48%)
データベース検索	44(91%)	45(80%)
合計(平均値)	147(82%)	147(72%)

分類数とはその分類者が分類した文書数のことである．また，ここでの分類率とは分類者が行った分類に対して，実際に本システムによって分類された文書数の割合のことをいう．

次にここでキーワードマッチングと人間による分類を表2にて比較してみる．

表 2:キーワードマッチングと分類者による分類の比較

	計算機	分類者 A	分類者 C
	分類数	分類数(分類率)	分類数(分類率)
画像検索	38	49(100%)	44(95%)
検索エンジン	31	34(77%)	36(77%)
文書検索	19	20(89%)	22(84%)
データベース検索	56	44(70%)	45(68%)
合計(平均値)	144	147(80%)	147(75%)

ここでの分類率とは分類者が行なった分類に対しての単純キーワードマッチングによる分類された文書数の割合のことをいうこととする．

4.2 システムの評価

ここの検証にあたって分類者には分類の指針を一切説明せずに分類してもらったため，不都合が生じたが，分類する分野がシステムによる分野分けと一致した場合、比較的人間の概念に近い分類を行なえることが分かる．

表1・表2において，分類者それぞれの分類率の平均値が高いほど，文書全体の分類がその分類者による分類と類似していることになる．ここで，分類者ごとに本手法とキーワードマッチングとの分類率を比較すると，それぞれ82%・80%，72%・75%となっている． そこから本システムの方が分類の精度が高い（人間的である）場合と低い（人間的でない）場合があることが分かる． これは概念とは人それぞれによっても持ち方が違うためにこのような結果が出たと考えられる．

しかし，単純なキーワード検索ではデータベース検索に所属してしまうような文書を，本システムを用いるとオントロジーの要素として含まれる色・画像・映像といった語により，画像検索分野に分類することが可能になった．例を以下に示す．

文書No. 129
局所的な色とテクスチャの抽出及び空間的な照合

空間に局在する色領域とテクスチャ領域を抽出,表示および質問する統一的なシステムを提案した。このシステムはバイナリ特徴セットの逆射影を利用して厳密に卓越した領域を同定する。このバイナリ特徴セットは簡単で効果的な検索用の表示となる。画像を取込んで色領域の抽出部とテクスチャ領域の抽出部を通し，次いで色抽出とテクスチャ抽出を施して色セットとテクスチャセットを取り出すと共に,色/テクスチャ合同抽出を施して第三のセットを取り出す。抽出した全領域は空間的に局在しており,画像データベース検索において利用者は位置と領域の境界を特定できる。統一的色およびテクスチャ逆射影法を提案し,VisualSEEkコンテンツベースの検索システムへの実装について述べた。現行システムでは166色,512テクスチャが取り扱える。

5. おわりに

分類の結果では単純キーワードマッチングとの大きな差は生じなかったが，文書によってはキーワード検索では為し得なかった分類が概念を抽出することによって可能となっていた．

参考文献

[1] 横浜国立大学工学部電子情報工学科

大森信行 岡村潤 森辰則 中川祐志

“tf-idf 法を用いた関連マニュアル群のハイパーテキスト化”

URL: http://www.forest.dnj.yun.ac.jp/~ohmori/

Paper/NL121/paper1.html/

[2]Michael R. Anderberg 著 西田英朗 監訳

“クラスター分析とその応用” 1988年発行 内田老鶴圃

[3] 宮本定明 著

“クラスター分析入門

：ファジィクラスタリングの理論と応用”

1999年発行 森北出版

[問い合わせ先]

〒 214-8571

神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

明治大学 理工学部 情報科学科

ヒューマンインターフェース研究室

谷口 孝治

Tel : 044-934-7469

Fax:044-932-7912

TA1−2

失語症患者支援のための自然言語処理システム

Natural Language Processing to Assist Aphasic People

竹内晴彦
Haruhiko Takeuchi

生命工学工業技術研究所
National Institute of Bioscience and Human-Technology

Abstract The way of simplifing Japanese texts are shown in this paper. The language processing system which assists aphasic people consists of parser, word substitution block, and syntactic translation block. The author mainly discuss construction of the word substitution database and its effective use.

1. はじめに

日本には失語症患者が約33万人いると推定されている。失語症患者は、言語の認知・理解・発声などに障害を持つが、適切な支援環境を提供することにより、言葉の理解と発声に対する負荷を減少することができる。

そのような試みとして、PSET(Practical Simplification of English Text)と呼ばれるプロジェクトが、英国で進められている[1]。これは、WWWで購読可能な電子新聞を対象として、難しい文章をやさしく言い換えることによって、失語症患者が、インターネット環境を容易に利用することができるようにしようとするものである。

本稿では、日本語を対象として、失語症患者が利用可能な、わかりやすい文章を表示する自然言語処理システムの枠組みを検討し、新しい語彙変換の仕組みを提案する。

2. 日本語変換システムの枠組み

文章をわかりやすく表示する日本語変換システムの構成を図に示す。日本語変換システムは、形態素解析部、語彙変換部、及び統語変換部から構成される。形態素解析部で、文の分かち書きと統語構造の分析を行う。語彙変換部で、語彙置換データベースを参照して、難しい語をわかりやすい語に置き換える。例えば、使用頻度の低い言葉を使用頻度が高くユーザのよく知っている言葉に置き換える。統語変換部で、変換ルールデータベースを参照して、難しい表現をやさしい表現に変換する。例えば、複雑な文章を単文の組み合わせに変換したり、受動態の文章から能動態への変換を行う。

語彙置換データベースと変換ルールデータベースを複数個用意し、システムの利用者の目的に応じて適切なものを選択できるようにすることにより、失語症のタイプの違いによる多様性に対処することができるようになる。

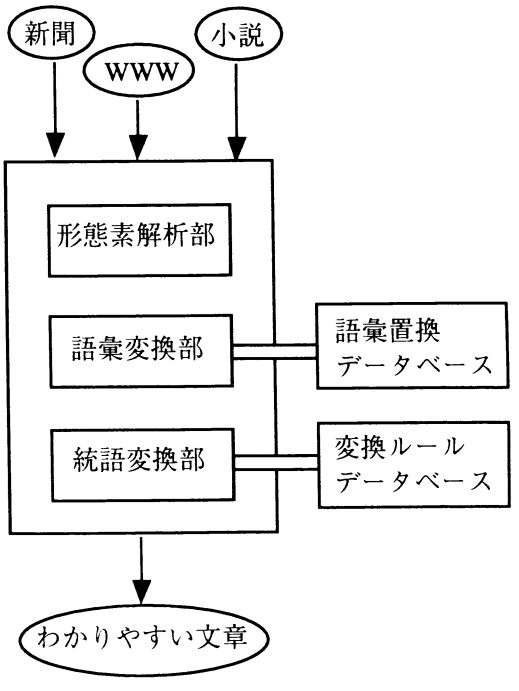


図　日本語変換システムの構成

また、種々の年齢に応じたデータベースを提供すれば、一般的な日本語変換システムとしても利用することが可能である。

3. 語彙変換部の検討

語彙変換部で使用する語彙置換データベースの作成方法を検討する。語彙置換データベースは、既存の類語辞典をもとにして作成するが、類語辞典には、語の難易度や使用頻度についての情報があまり含まれていないため、それを補う必要がある。

語の難易度に関連する指標として、新明解国語辞典の見出し語について主観的な親密度を計測したデータ[2]や、日本語能力試験で使用される各級別の語彙リスト[3]を利用することができる。また、語の使用頻度に関する資料としては、新聞記事をデータとした頻度データが利用可能である。

語彙置換データベースは、意味が相互に近い使用頻度の低い語と使用頻度の高い語をペアにしたものである。ただし、単独では意味を一意に決定できない言葉については、複数の類語を列挙しておく。この複数の類語リストから、最も適切な語を選択する手法として、潜在意味分析（LSA）[4,5]を応用する。

LSAは、文書から語彙情報に関する知識を抽出するための統計的手法である。まず、ソースとなる文書を、文脈と呼ぶ細かい単位に分割し、各語がどの文脈の中で出現するかを計算する。次に、エントロピーの概念を使った変換を加え、その行列に対して、特異値分解を行う。その結果、各語は、縮約した空間上のベクトルとして表現される。ここで、語と語の類似性は、対応する2語のベクトル間のコサインとして計算できる。

日本語変換システムにおいては、ユーザのレベルに応じた適切な文書をソースとして用意し、LSAによる分析を行い、その結果得られる語彙情報を語彙置換データベースと連携して使用する。具体的には、変換しようとする語が出現する文章中の各語と変換候補となる類語との類似性の和を比較し、その値が大きくなる語を選択する。

4. おわりに

失語症患者のための自然言語処理システムの概略を述べた。本稿では、語彙変換部について詳細な検討を加え、語彙置換データベースの構成法と類語選択におけるあいまいさをLSAを使用して解消する手法を提案した。

今後の課題として、第一に、統語変換部、及び変換ルールデータベースの構成法についても検討を進めることが必要である。第二に、失語症患者にとって、理解しやす語、及び理解しにくい語を特定し、より適切な語彙置換データベースを作成することが挙げられる。また、日本語の表記として、ひらがな、カタカナ、漢字のどれが分かりやすいかを調査し、適切な表記を使用することも必要であろう。

参考文献

[1] Carroll, J., Minnen, G. et. al. (1998) Practical Simplification of English Newspaper Text to Assist Aphasic Readers, AAAI-98.

[2] 天野成昭, 近藤公久（編）（1999）日本語の語彙特性, 三省堂.

[3] 国際交流募金（編）（1994）日本語能力試験出題基準, 凡人社.

[4] Landauer, T. K.,& Dumais, S.T. (1997) A Solution to Plato's Problem: The Latent Semantic Analysis Theory of the Acquisition, Induction, and Representation of Knowledge. Psychological Review, vol. 104, pp. 211-240.

[5] Takeuchi, H., Kitajima, M., Akamatsu, M. (2000) Extracting knowledge form texts: On the effect of context length, The Fourth Asian Fuzzy Systems Symposium.

問い合わせ先
〒 305-8566
茨城県つくば市東1-1
生命工学工業技術研究所　人間情報部
竹内晴彦
Tel: 0298-61-6645
Fax: 0298-61-6757
E-mail: takeuchi@nibh.go.jp

TA1−3

情報統合における情報の信頼性とその言語表現

Generating Linguistic Expression Based on the Reliability of Integrated Information

松下 光範 Mitsunori Matsushita
佐藤 浩史 Hiroshi Sato
藤本 和則 Kazunori Fujimoto
加藤 恒昭 Tsuneaki Kato

NTT(株) コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Corp. Communication Science Labs.

Abstract: We propose a model for integrating information acquired from unreliable sources. The model is indispensable for dialogue systems that generate utterances from information acquired from Web sites because the information from each site may have problems with completeness and reliability. In order to solve such problems, our model augments information integrated with two factors: a possibility factor and a certainty factor. The possibility factor indicates the plausibility of information, and the certainty factor indicates the confidence on the result of the synthesis. We also propose an utterance generation model based on these two factors, which provides integrated information with an intuitive manner.

1 はじめに

インターネット上に散在する豊富な情報に基づいてユーザからの問いに答える対話型情報提供システムの実現を目指している。情報源となるインターネット上のサイトは回線の不具合やサーバメンテナンス、URL 変更等の要因によりアクセス不能になる可能性があるので、特定のサイトだけから情報を取得する事は好ましくない。そのため複数のサイトから情報を取得して統合し、情報の信頼性を高めることが必要となる [1, 2]。

また、インターネット上の情報は大量かつ多様である反面、情報源によっては部分的な欠落や間違いを含むという問題もある。このような情報源から得た情報に基づいてシステムが対話するには、得られた情報だけでなくその信頼性についてもユーザが直観的に理解できる形で表現する必要がある。

本稿ではこれらを背景として、情報の信頼性を高めるために複数のサイトから情報を取得して統合し、得られた情報の信頼性を評価し、統合した情報とその信頼性をユーザに分かりやすく伝える発話生成方法を提案する。

一般に文の意味内容は、ある事象を客観的に叙述する部分とその叙述に対する話者の心的態度を表す部分とに分けられる。前者は叙述内容 (proposition)、後者は陳述 (modality) ないしムード (mood) と呼ばれる [3]。特に、真とは断定できない叙述内容を述べる際のムードは「概言」と呼ばれ、その内容によって断定保留 (〜でしょう) や推定 (〜のようだ) などに分けられる [4]。そこでシステムに適切な概言を用いて発話させることで、情報の信頼性を直観的に表現することを考える。

なお本稿では問題の理解を容易にするため、天気予報ドメインを例に議論を進める。一般に天気予報ドメインの情報は信頼性が高いと考えられているが、サイトによって更新頻度に差があるため予報値が異なる場合がある。また気象業務法の改正により、以前は気象庁のみが行なっていた気象予報を、気象予報士の有資格者であれば各市町村の 24 時間以内の気象予報を行なえるようになったため、今後は情報の多様性が増すと予想される。

2 基本方針

ユーザからの発話として、情報を尋ねる発話 (質問型発話) と情報の真偽を尋ねる発話 (確認型発話) の二種類を考える。例えば天気予報について尋ねる場合、「京都の明日の天気は ?」という発話が質問型発話に相当し、「京都は明日晴れますか ?」という発話が確認型発話に相当する。これらのユーザ発話に対して、システムはインターネット上から情報を取得して統合し、叙述内容とムードを決定して応答することが求められる。例えば叙述内容が「晴れ」でムードが断定保留であれば、「たぶん晴れるでしょう」といった発話がなされる。

叙述内容は統合情報に基づき決定する。人間の場合、サイトから得られる直接的な情報だけでなく、関連する情報の可能性 (possibility) についても主観に基づいて判断を下すことがよくある。例えば「晴れ」という天気予報を得た場合、多くの人は「晴れ」という気象現象が生じる可能性は高いと考えるだけでなく、「曇り」の可能性がないわけではないと考えるし、また「雨」の可能性は殆んどないだろうとも考える。すなわち、「晴れ」という情報から「曇り」や「雨」といった関連する情報をも得ていることになる。システムがユーザに対して柔軟に応答するためには、このような関連情報についても判断を下す必要がある。そこで取得した情報を (1) に示すような可能性分布に展開し、取り扱うことにする[1]。

$$\text{「晴れ」} \rightarrow \{1.0/\text{晴れ}, 0.4/\text{曇り}, 0.1/\text{雨}\} \quad (1)$$

従って、システムは叙述内容を統合情報だけでなくその可能性を考慮して決定することとする。

また、ムードはサイト間の情報のばらつきから決定できる。例えば 3 つのサイト A, B, C から情報を取得し、「晴れ」という情報を叙述内容として選択したと仮定する。その判断の根拠が、全てのサイトからの情報が「晴れ」であった場合とサイト A, B が「晴れ」で C が「曇り」であった場合とでは、前者のほうが信頼性が高いと考えられる。そこで、その信頼性に応じたムードを選択し、例えば前者の場合には「晴れるでしょう」と答え、後者の場合には「晴れそうです」と答えることで、叙述内容の信頼性を直観的に表現できる。我々はムードを決定するための評価値として確信度 (certainty) を採用した。つまり、確信度は各サイトから得られる情報が一致する度合によって求め、それらが一致しているほど高くなるものとする。

これらの方針から、複数のサイトから得た情報を統合する際に可能性と確信度の 2 値を求める必要がある。次章ではこの条件を満たす統合方式について述べる。

3 情報統合方式

本稿ではインターネット上のサイトから情報抽出機構 (wrapper)[6] によって得られる情報をタプル形式で表現する。例えば天気予報ドメインでは

$$< \underline{\text{予報日時}}, \underline{\text{場所}}, \text{天気予報} > \quad (2)$$

という属性で構成されるタプルが各サイトから wrapper によって獲得されるものとする。ここで下線があるものは情報を特定するための識別属性 (DB における主キーに相当) で、「天気予報」が統合対象となる情報である。得られた情報は (1) に示すような可能性分布に展開される。この展開には予測値と実測値との差分の統計や語の類似度を利用する方法が考えられるが、現在の実装では人手で作成したルールを適用して展開している。

システムは各サイトから取得した同一識別属性を持つタプルを統合する。例えば (2) の場合は同一予報日時で同一場所のタプルの情報を統合する。

情報 i の可能性を $P(i)$、$P(i)$ が $x \in [0,1]$ という値を取る確信度を $C(P(i)=x)$ と表現する。これらはいずれも [0, 1] の値をとるものとする。可能性 $P(i)$ が 0 の場合は、i が生じる可能性が無い事を意味し、1 に近付くにつれ、可能性が増していくことを意味する。同様に確信度 $C(P(i)=x)=0$ は可能性 $P(i)$ が x であることについて全く確信が無いことを意味し、1 に近付くにつれ、確信度が増していくことを意味する。

サイト集合を $\mathbf{S}=\{s_1,\ldots,s_J\}$ とし、$\mathbf{S}$ 中のあるサイト s_j $(1 \le j \le J)$ から取得した情報を元に、(3) に示す可能性分布 Πs_j が得られるものとする。

$$\Pi s_j = \{Ps_j(w)/w : w \in \mathbf{W}\} \quad (3)$$

ここで $\mathbf{W}$ は気象現象集合、$Ps_j(w)$ は s_j における気象現象 $w \in \mathbf{W}$ の可能性を表している。

確認型発話に適切に応答するためには、情報を統合する際に妥当な値を一つ選択するのではなく、可能性のある情報全てを保持しておく必要があるので、各気象現象について可能性を計算することにする。このとき、統合によって可能性が新しく生成されるのは不自然なので、統合する気象現象の可能性のいずれかを選択し、その可能性について確信度を求めることにする。従って $\mathbf{S}$ 中の全てのサイトからの情報を統合したときの気象現象 w の可能性 $P(w)$ は $\{Ps_1(w),\ldots,Ps_J(w)\}$ のいずれかであるとみなし、各々の場合の確信度を計算する。可能性 $P(w)$ が $x \in \{Ps_1(w),\ldots,Ps_J(w)\}$ である場合の確信度 $C(P(w)=x)$ は

$$C(P(w)=x) = \frac{\sum_{k=1}^{J} \alpha(s_k) \cdot \mathrm{sim}\left(|x - Ps_k(w)|\right)}{\sum_{k=1}^{J} \alpha(s_k)} \quad (4)$$

で求められる。(4) 式は w の可能性が複数のサイトで一致しているほど高くなる性質を持つ。ここで関数 sim() は二つの可能性の一致度を示す関数であり、可能性の差が開くほど値が小さくなる。現在の実装では

$$\mathrm{sim}(\Delta P) = e^{\gamma(\Delta P)^2} \quad (5)$$

[1] 可能性は確率とは違い主観的であり、「可能性が高い」は必ずしも「確率が高い」を意味しないが、それらの間には正相関があると言われている (possibility/probability consistency principle[5])。

表 1: サイト数と係数

サイト数	係数
3	1
2	0.9
1	0.8

表 2: 統合された天気予報

予測日時	場所	予測値	可能性	確信度
2000/4/16	京都市	晴れ	1.0	0.9
2000/4/16	京都市	晴れ後曇り	0.7	0.7
2000/4/16	京都市	曇り	0.4	0.7
2000/4/16	京都市	曇り時々雨	0.2	1.0
2000/4/16	京都市	雨	0.2	1.0

という関数を用いている。$\gamma(<0)$ は勾配を決める係数であり、γ が 0 に近付くにつれ、可能性の差に敏感なシステムとなる。また、$\alpha(s)$ はサイト s の信頼係数であり、$[0, 1]$ の値をとる。天気予報ドメインでは、サイトの信頼性は一般に更新時刻からの経過時間に応じて単調に低下すると考えられるので、経過時間を変数とする減衰関数を適用する。なお、サイトの更新頻度は予報の種類によって異なるので、減衰率は天気予報項目に応じて切り替える必要がある。

そして、各々の x について $C(P(w)=x)$ を求め、$C(P(w)=x)$ を最大とする x を w の統合した可能性 $P(w)$ として採用する。ただし複数の x について同じ確信度である場合は、可能性の値が最も大きいものを採用することにしている。

確信度は、その x に対応する確信度 $C(P(w)=x)$ を採用する。このとき、統合するサイトの数は、その確信度に影響を与えると考えられる。例えば統合情報として「雨の可能性が 0.7 である」が得られた場合、統合に用いたサイト数が多い場合と少ない場合を比べると、前者のほうが得られた結果に対する確信度が高いとみなすのが自然である。そこで、統合するサイト数が多いほど確信度が高くなるようにする。つまり、全てのサイトから常に情報を取得できるとは限らないので、まず予報が得られたサイトを対象として上記の方法で計算したのち、確信度に「予報があるサイト数 / 対象とする全サイト数」を変数とする数の値を掛ける。例えば全サイト数が 3 のとき表 1 のようにする。

これらの処理によって表 2 に示すような、同一予測時刻 / 場所に複数の予測値が存在する表が得られる。

4 発話生成方式

本統合方式では表 2 のように複数の予測値が存在する。しかし、質問型発話に答える際には全ての予測値について発話すると冗長になり、対話システムとしては好ましくないので、可能性と確信度の 2 値を考慮して、発話するのに最も適切だと思われる予測値を選択する必要がある。そこで、情報検索や情報抽出の分野で一般的に用いられる F 尺度 (F measure)[7] を利用し、その値が最も大きいものを最尤予測として採用することにする。すなわち、質問型発話に対しては、式 (6) の値が最も大きい予測について答えることにする。

$$F = \frac{(\beta^2+1)\cdot P\cdot C}{\beta^2\cdot P + C} \tag{6}$$

ここで $\beta(>0)$ は可能性 P と確信度 C のどちらを重視するかを決定するパラメータであり、β が 1 のとき、調和平均を意味する。β を 1 より大きくすれば可能性を重視することになるので、システムは可能性の高い情報について発話するようになる。逆に β を 0 に近付けていくと確信度を重視することになるので、システムは確実な情報について発話するようになる。

表 3: 可能性と叙述内容表現の対応

可能性	叙述内容表現
$0-a$	[予測値] ではない
$a-b$	[予測値] である可能性は低い
$b-c$	[予測値] である可能性は高い
$c-1$	[予測値] である

表 4: 確信度とムード表現の対応

確信度	ムード表現
$0-d$	[叙述内容] と思うのですが、自信がありません。
$d-e$	[叙述内容] かもしれません
$e-f$	[叙述内容] と思います
$f-1$	[叙述内容] でしょう

叙述内容とムードは各々可能性と確信度を考慮して決定される。表 3 は可能性の値と叙述内容表現との対応である。ここで $0<a<b<c<1$ である。また、表 3 の各表現中の [予測値] の部分には表 2 の予測値 (例えば「晴れ」など) がはいる。本稿では可能性の値を 4 段階に分け、対応する表現を用いて発話するようにしたが、Druzdzel の論文 [8] に見られるように曖昧さを表現する方法は様々に存在するので、より詳細に分けることも可能である。

また、表 4 は確信度の値とムード表現との対応である。ここで、$0<d<e<f<1$ である。また、[叙述内容] には表 3 を参照して可能性値に応じて決定された表現がはいる。ただし、可能性を反映した叙述内容表現が「[予測値] である」の場合、確信度が高いときには「[予測値] であるでしょう」と、日本語としてやや変

な言い回しになるので、この場合には「[予測値] でしょう」と適宜修正して発話するようにしている。

例として、3 章で示した統合方式によって表 2 が得られている場合のシステムの応答を示す (表 3 および 4 は均等に分けるものとする)。例えば、2000 年 4 月 15 日にユーザが「明日の京都の天気は?」と尋ねた場合、システムはこの質問を質問型発話だと判断し、まず発話すべき予測値を (6) 式によって決定する。β を 1 とした場合、F 値が最も大きいのは予測値が「晴れ」の場合なので、「晴れ」についての発話を生成する。「晴れ」の可能性は 1.0 なので、叙述内容表現として「晴れである」が選択される。また、確信度が 0.9 なので、ムード表現には「でしょう」が選択される。システムはこれらの表現を組み合わせて修正を施し、ユーザに対して「晴れでしょう」と応答する。

同様に、ユーザが「明日京都は曇りですか?」と尋ねた場合、システムはこの質問を確認型発話だと判断し、表 2 中の「曇り」の情報に基づいて発話を生成する。表 2 では「曇り」の可能性は 0.4 なので、叙述内容表現として「曇りである可能性は低い」が選択される。また、確信度が 0.7 なので、ムード表現として「と思います」が選択される。システムはこれらの表現を組み合わせ、ユーザに対して「曇りである可能性は低いと思います」と応答する。また、表 2 には全ての気象現象の場合について可能性と確信度が計算されているので、「明日京都は雨ですか?」と尋ねた場合にも「雨ではないでしょう」と応答することができる。

5 関連研究との比較

佐藤は、統合の問題点としてデータの不完全性および不確実性があり、複数情報の同一性を識別能力と言う観点で分類した属性に基づいて判定している [1]。この方法は同一名称の団体などを識別するには有効だと思われるが、データの不確実性を取り扱うには十分ではない。

また、情報を二つの尺度で評価する方法は、例えば鈴木らが上界確率と下界確率の 2 値で表現する方法を提案している [9]。しかし、この手法で用いている二つの値は同じ尺度上の評価値であり、叙述内容やムードと対応していないので、発話文生成に用いるには難があり、そのままでは「雨の可能性が 0.5 から 0.8 の範囲にある」というような表現しかできないので、自然な発話文を生成するという点では十分でないと思われる。

岡本らは情報の不確実性を確率的な現象の不確実性に起因するものと認識主体の側の情報の不足に起因するものとに分離し、前者を主観確率、後者を確信度で表現している [10]。この情報の取り扱い方は我々の考え方に近いが、事象の不確実さを確率として扱っているため、事象の確からしさに対する意味づけが大きく異なっており、我々の想定する問題に適用するには問題がある。

提案方式は、これらの方式に比べ、発話の叙述内容とムードを意識しているので、発話生成により適した方法だと言える。

6 おわりに

本稿では、可能性と確信度を考慮して発話を生成するモデルを提案した。提案手法では、複数のサイトから取得した情報を統合することで、信頼性の問題を低減する。このとき、ある事象についての情報を統合する際に、可能性と確信度の 2 値を付与する事により、統合した情報の信頼性を表現することができる。また、それらの値を考慮することで、情報の信頼性をユーザが直観的に理解できる表現を生成できる。

今後、対話実験などにより理解容易性や自然性について定量的な評価を行なう予定である。

参考文献

[1] 佐藤:「ワールドワイドウェブを利用した住所探索」, 言語処理学会年次大会, pp. 447-450 (2000)

[2] Levy: "Combining Artificial Intelligence and Databases for Data Integration," in *LNCS*, Vol. 1600, pp. 249-268 (1999)

[3] 寺村: 日本語のシンタクスと意味 I, くろしお出版 (1992)

[4] 益岡, 田窪: 基礎日本語文法 — 改訂版 —, くろしお出版 (1992)

[5] Zadeh: Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, **1**(1), pp. 3-28 (1978).

[6] Ashish and Knoblock: Semi-automatic Wrapper Generation for Internet Information Sources, in *Proc. CoopIS 97*, pp. 160-169 (1997)

[7] 徳永: 情報検索と言語処理, 東京大学出版会 (1999)

[8] Druzdzel: Verbal Uncertainty Expressions: Literature Review, *Tech. Rep. CMU-EPP-1990-03-02* (1989).

[9] 鈴木 他:「推論の信頼性を考慮した不確実な知識の表現法と推論法について」, 情処論文誌, **35**(5), pp. 691-705 (1994)

[10] 岡本 他:「確信度と主観確率を持つ信念推論システム」, 人工知能学会誌, **7**(2), pp. 263-270 (1992)

[問い合わせ先]

〒 619-0237 京都府相楽群精華町光台 2-4
NTT コミュニケーション科学基礎研究所
松下 光範
TEL: 0774-93-5374, FAX: 0774-93-5385
E-mail: mat@cslab.kecl.ntt.co.jp

TA2−1

笑いの認知的考察

Cognitive Considerations on Laugh

北垣　郁雄

Ikuo KITAGAKI

広島大学　大学院 教育学研究科／高等教育研究開発センター

Hiroshima University; Graduate School of Education/ Res.Inst.High.Educ.

Abstract Aiming to form a descriptive model of laugh, we consider a cognitive approach to laugh. As factors of laugh, we discuss the cognition of inferiority, popularity, similarity, and so forth. Then the possibility of its description is discussed.

1. はじめに

人が何を認知したときに笑いを発するかを、その誘発論理の記述可能性に視点をあてつつ、カテゴリー分けしている。笑いをもたらす誘発要因の中で、いくつかの要因が記述可能となった場合、ある事象に対して２つ以上の笑いの要因が想定されたときには、それらの間に何らかの演算を施すことにより、笑いの大きさ等の諸出力を定めることができるはずである[1][2]。本研究では、これまで主張されていた笑いの要因をまとめるとともに、その記述可能性を論じている。

2. 笑いの認知的枠組

本来、‘笑い’は一つの表現行動とされ、それを誘発する感情として、喜びとおかしみがあるとされる。とりあえずは、特にこれらを区別することなく、何を認知したときに笑いを誘発するかをまとめる。

- 快の認知：生理的快と心理的快が挙げられる。生理的快とは、例えば赤ちゃんをくすぐると笑う、というような物理的刺激に対する反応である。心理的快とは、喜びという感情による笑いである。喜びをもたらした事象が物質的であったり可測であるときは、その因果関係の記述がより容易になる。
- 和の認知：デュプレールの述べる社会的帰属感に対応する。数人による私的な談話で、理解できないような話には笑うことはできない。しかし、要旨を理解できたときには、特にジョークに類する事柄が含まれていなくとも、ひとまとまりの話の区切りのあとで、笑いを発することは、日常的に経験する。理解を分かち合うという意味での‘和’を感じたときに‘快’を感じると考えれば、喜びによる笑いと解釈することもできる。
- 緩の認知：フロイトやカントのエネルギー論やヘイワーズの安全感に対応する。前者は、張り詰めた緊張感が無に帰したときに起こる笑いとされる。危険を予知し、対応策を講じた結果、それを回避できたときには、喜びによる笑いを発するであろう。しかし、その予知がはずれていたとか大して危険なことではなかった場合などは、結果的に過度な自己防衛と判断され、その認知の時点で自身でもおかしみを発するであろう。このように、喜びとおかしみは、ややあいまい然とした関係とも言える。
- 魂の認知：魂の存在を感じさせないような環境において、不意に魂を感じさせるようなものを認知したときに発する笑いである。感じ方の問題でもあるから、主観的である。外表面が２つの玉に分割気味の形状を呈するよ

うなピンク色の桃を見て、人のお尻を連想したときには笑いを発するであろう。あるいは、部屋の中に茶・白の縞模様の網の一端が見えると思ったとたん、それが動いて猫の尻尾だとわかった、などもほぼ同様である。前者の例は、お尻が排泄や性を想起させるという意味では、のちの俗の認知に属するともいえる。ベルクソンは、帽子が‘人間’を想起させる例として挙げている[3]。

- 類の認知：　類音性や類構性である[4]。‘駄洒落’は類音性の例である。川柳は類構性にのちに述べる‘俗’が重畳したものと考えられよう。「犬も歩かなければ、ボける」は、類音性と類構性が共に関与する。もちろん、「犬」と「歩く」という内容はオリジナルの格言にも含まれ、いわば類容性が保持されている。さらに、「ボける」という現象は、のちの‘劣’をも連想させる。一方、２つの事柄が、１つの属性において類を認知し、別の属性において非類を認知したときの笑いもある。類音を通り道にして、無関係な話に自然に転換するなどの漫才は、これに該当しよう。
- 俗（衆）の認知：通俗性または大衆性である[5]。予想より通俗性(大衆性)が高かったという場合の笑いである。一般に、精神的事柄より肉体的事柄のほうが通俗性が高いとされる。その意味では、（東京・東銀座の）歌舞伎座と（新宿の）歌舞伎町の対は、先の類音も手伝って、俗の認知による笑いの素材を提供する。美女と野獣は、美醜的尺度の対極に位置し、この対は、俗による笑いの可能性を持っている。
- 劣（弱）の認知：　優・劣は、競争社会に不可避な関係である。M.パニョルは、優劣の確立が笑いの要因であるという[6]。このカテゴリーでは、優劣が確立したときの‘劣’を笑いの対象とする。優や劣は相対的であるから、順序性が重要である。一般に、ゲームでは、その参加者に対して順序付けが可能になり、ゲーム終了時に誰かに対して笑いを生み出すことになる。また、主に対する従、強に対する弱などもこのカテゴリーに該当する。前述の俗(衆)を劣と直結させるならば、‘劣’と‘俗’は順序性が本質という点で、同一カテゴリーと考えられる。

3.　笑いの誘発の記述可能性

２節で見てきたように、笑いの個々の事象は誘発要因のどれか一つに確定的に帰属するというより、状況の多少の変化によりまた考え方の相違により、複数の要因に帰属すると見なされることがある。したがって、笑いの規範モデルでは一事象が複数の要因に帰属するような記述のほうが都合がよい。その意味において、メンバーシップ関数を一つの出発点とするファジィ科学の援用が可能である。

また、俗(衆)と劣(弱)の２つの誘発要因は、順序性が直接関与する。その点では、単語レベルまたは簡素な文章表現で考えるならば、規範モデルの具体的な記述が比較的容易と判断される。特に、勝敗を競うゲームで、一手一手で有利・不利が度合表現できるようなものは、それを変数とした誘発関数の開発が期待される。

参考文献

[1]北垣郁雄：おかしみの誘発にかかわるファジィ論的定式化と通俗性/劣弱性、日本ファジィ学会誌,2,1,100-104,1990

[2]北垣郁雄：ファジィ推論を用いた‘笑うコンピュータ’について、情報処理学会、人文科学とコンピュータ,32-1,pp.1-6,1996

[3]ベルクソン(林達夫訳)：笑い、岩波文庫,1938

[4] 北垣郁雄：駄洒落にかかわる同音の抽出と模擬ソフトの試作、信学技報,HC92-65,pp.1-6,1993

[5] 中務哲郎ほか：ギリシャ人のことばローマ人のことば、岩波ジュニア新書、1986

[6] M.パニョル（鈴木力衛訳）：笑いについて、角川文庫、昭和６３

[7]佐々木みよ子ほか：笑いの世界旅行、平凡社,1989

[8] 木村洋二：笑いの社会学、世界思想社,1983

[9]桑山善之助：笑いの科学 、同成社,1970

[10] とこ住彰文：感情と感情理解の計算モデル、数理科学,1987,6

[問い合わせ先]

〒739-8512 東広島市 鏡山 1-2-2 広島大学

大学院教育学研究科/高等教育研究開発センター

北垣 郁雄

tel./fax; 0824-24-6238/0824-22-7104

E-mail; kitagaki@hiroshima-u.ac.jp

TA2−2

似顔絵生成システムにおける感性の構造
KANSEI model on facial caricature drawing system

宮越 淳 * 白井 治彦 * 西野 順二 * 小高 知宏 *
Jun Miyagosi Haruhiko Shirai Junji Nishino Tomohiro Odaka

小倉 久和 *
Hisakazu Ogura

* 福井大学 工学部
Faculty of Engineering, Fukui University

Abstract : In this paper, we introduced a facial caricature drawing system using linguistic expression and KANSEI model on facial caricature. Fuzzy set is given to this system for each linguistic expression. A value of parameter for drawing facial caricature is calculated by fuzzy operation when you input special feature of a face by linguistic expression. We suggest new facial caricature drawing system this time and report it about the result that we examined about the effect.

1 はじめに

本研究では、ファジィ言語表現を用いて似顔絵を作成するシステムを実装し、似顔絵における感性の構造を検討することを目的とする。

人間の感性および言語表現はあいまいであり、かつ複雑である。人間が顔の特徴を表現するとき、そこには個人の感性が反映される。例えば、二人の人間が同じ顔を見たときに、ひとりは"かわいい"、もうひとりは"やさしい"と違った表現をするもしれない。また、人がある顔を"活発な顔"と表現したとする。その人は別の顔の印象も同じように、"活発な顔"と表現することもあるだろう。このような、あいまいで複雑な表現をどのように表現するかが問題となる。

本研究で、作成したシステムは既に提案された似顔絵システム [1] の描画システム部分を変更し、より多様な似顔絵を作成することを可能にしたものである。表現力の大きいシステムとすることにより、より広い範囲で似顔絵と言語表現の関係を検討することができる。本論文では、その似顔絵システムとその効果についての報告を行なう。

2 似顔絵作成システム

コンピュータによって似顔絵を生成するにあたって問題となるのが、人間が感じとった顔の印象、特徴をどのように入力し、どのように処理・表現させるかである。本システムでは顔の特徴を表現するための言語表現（特徴語）と、それに対する知識（特徴語意識）を用意した。そして、それを用いてファジィ集合を生成し、ファジィ演算を行うことで入力された特徴語に対する似顔絵の描画を行っている。

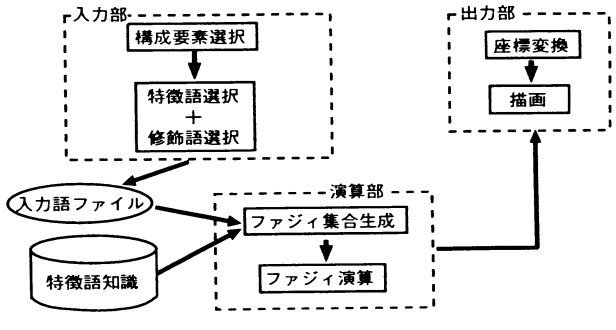


図 1: 似顔絵作成システム

本システムは図 1のような構成である。

入力部では特徴語の入力をおこなう。特徴語は 目, 鼻, 口, 耳 , 眉, 輪郭, 髪 の顔の部分と、雰囲気 の各構成要素についてそれぞれいくつか用意した。また、特徴語は"とても"、"普通"、"やや"のいずれかの修飾語をつけて選択する。

演算部はファジィ集合の生成とその演算をおこなう。入力部で入力されたすべての特徴語に対して、各パラメータに関するファジィ集合を生成する。ここで、修飾語"とても"に対しては集中化を、"やや"に対しては拡大化をおこなった。今回、特徴語知識は人間の手で作成した。与えられたファジィ集合に対して共通集

合演算を行ない、各パラメータの値を決定する。

描画部は、与えられたパラメータの値から描画の座標を求めて描画をおこなう。本研究では、この部分のシステムを変更した。

3 似顔絵作成における感性

以前のシステム [1] の描画部は、顔の整合性を保つために描画に制限を加えていた。例えば、目を輪郭内に納めるために、目の大きさを変えるときに、同時に輪郭も変えていた。

今回は、描画の自由度を増すために、各要素ごとにパラメータを独立させ、他の要素のパラメータの影響をなくした。それによって、より広い範囲で似顔絵の描画が可能になった。

また、描画の制限をなくすことによって、顔に対する感性はすべて特徴語知識で表される。したがって、特徴語知識を効果的に表現することで似顔絵における感性がわかると考える。

図2に本システムを用いて作成した似顔絵とその特徴語を示す。本システムで作成した似顔絵と、入力した特徴語の関係についての評価のために簡単な実験を行なった。被験者に入力した特徴語を教えずに似顔絵を見せ、その似顔絵に対して被験者がどのように感じたかを特徴語の一覧から選んでもらうという方法である。特徴語は一つの似顔絵に対して3～5個入力した。

入力したほとんどの特徴語について、被験者もそれと同じまたは、近い特徴語を選択するという結果が得られた。これより、その特徴語について用意した特徴語知識が有効であると考える。しかし、まったく選ばれないような特徴語もあった。これには、知識が不適切であるか、その特徴語の入力が、他の特徴語により打ち消されたという理由が考えられる。

実験の結果のまとめを以下に示す。

- 一つのパラメータの変化だけで、その顔の構成要素の印象が大きく変わる
- ある構成要素が変化するだけで、その周辺の構成要素に対する印象も変わる
- 各個人によって、特徴語が示す似顔絵の範囲や、特徴の捕らえ方が違う
- 変化の大きいものほど特徴を捕らえやすい。

実験から、現在の特徴語知識はある程度は有効であると考えられるが、複雑な知識を与えておらず、特徴語の入力が増えたときには不十分である。また、入力した特徴語が3～5個であるにも関わらず、ほとんどの被験者が、それよりも多くの特徴をあげており、人間の感性の複雑さ、曖昧さを示していた。



目	丸い	とても
	ツリ目	とても
鼻	小さい	とても
	低い	やや
	下つき	ふつう
口	小さい	やや
	厚唇	とても
耳	小さい	やや
眉	上がり気味	やや
	長い	とても
	細眉	やや
輪郭	三角	とても
	幅広	ふつう
髪	ロング	とても
	長い前髪	やや

図 2: 似顔絵と入力した特徴語

4 考察とまとめ

今回の研究では、似顔絵システムの描画システム部分の変更を行ない、表現力を増した。この変更により、より多様な似顔絵が作成可能になった。また、特徴語の入力に対して適当な顔も作成されることを確かめた。しかし、描画の制限が減ったために、整合性の失われた顔や、特徴語知識が不適切で、特徴語とはかけ離れた顔などが作成されることもある。より性格で表現表現力のある特徴語知識を得る必要がある。

今後は、今回の特徴語知識は人間が作成した単純な直積和集合であるので知識の有効な獲得方法や、より効果的な知識の表現方法について検討する必要がある。

参考文献

[1] 西野, 島崎, 白井, 小高, 小倉. ファジィ言語表現による似顔絵生成の試み. 第13回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 465–468. 日本ファジィ学会, 1997.

問い合わせ先：
〒910－8507
福井市文京3－9－1
福井大学工学部知能システム工学科
小倉 久和
ogura@nqueen.fuis.fukui-u.ac.jp
TEL&FAX: 0776-27-8582(ダイアルイン)

TA2−3

表情を考慮した似顔絵描写

Facial Caricature Drawing with Emotions

武田 夕紀
Yuuki Takeda
筑波大学理工学研究科
Master's Program in
Science and Engineering,
University of Tsukuba

岩下 志乃
Shino Iwashita
筑波大学工学研究科
Doctoral Program in Engineering,
University of Tsukuba

鬼沢 武久
Takehisa Onisawa
筑波大学機能工学系
Institute of Engineering
Mechanics and Systems,
University of Tsukuba

Abstract: This paper considers to add facial expressions to an expressionless facial caricature. An expressionless facial caricature is drawn using line based on impressions and features of a face that are expressed by linguistic terms. Expressive facial caricatures are drawn from the expressionless one using the facial expression parameter values and their transformations. The facial expression parameter values are obtained by the analysis of questionnaire data about facial expressions. Finally, some examples of expressive facial caricatures, which are drawn by the present process, are shown.

1 はじめに

人間同士の対面コミュニケーションにおいて、顔は言葉によらない情報の伝達媒体として重要な役割を果たしている。顔はその人物が誰であるかという個人識別に有効であるだけでなく、顔が作る表情というものによって、相手に感情や意思などの情報も伝えることができる。顔の表情が変化することにより、うれしい、悲しい、困惑、驚きなどのさまざまな心の動きが、言葉で表現することなく相手に伝わる。

これまでに、線画の顔の表情を変化させ、その感情を認識する研究[1]や、似顔絵をコンピュータに描かせる研究[2]など顔に関する研究は数多くある。また、似顔絵に表情を持たせる研究[3]もあるが、一連の連続画像に対する表情の変化を似顔絵で表す形で行われており、印象を反映させた似顔絵に表情を持たせる研究は少ない。

本論文では、言語表現により描かれた線画の似顔絵を表情豊かなものにすることを試みる。ここではモデルの顔の忠実な再現や表情生成を目的とするのではなく、印象や性格など感性的な表現を生かし、その人の雰囲気を出した線画の似顔絵[4]に表情を付加することを目的とする。

2 表情付加システムの概要

無表情の似顔絵に表情を付加するプロセスを図 1 に示す。平均顔[4]を用いて、まず各表情を付加する際に変化させるべきパラメータについて調査する（図 1 上）。無表情の似顔絵にある表情の表現（「笑っている」など）を与えると、この調査で得られた表情のパラメータ変化によって各部位のパラメータ値がそれぞれ変換され、その表情を持つ似顔絵が作成される（図 1 下）。出力された複数の似顔絵の中から、作成者がモデルを最もよく表せていると感じる似顔絵を選択、決定する。

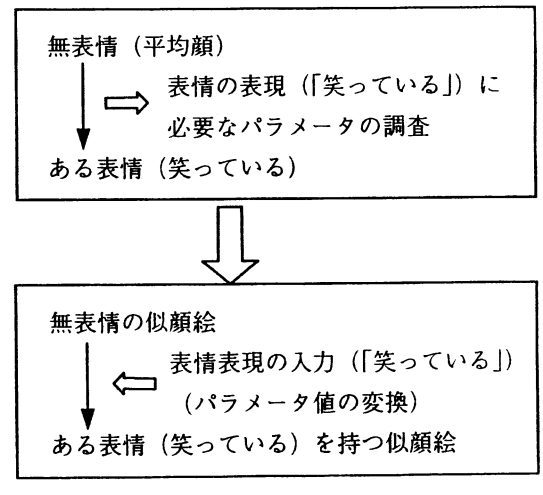


図 1：システムの流れと似顔絵への埋め込み

3 無表情の似顔絵

本研究で用いられる無表情の似顔絵の生成には、言語表現による似顔絵作成手法[4]を用いる。入力された印象語、副詞、特徴語に応じて部位の持つパラメータ値が変化し、

印象や特徴を反映した似顔絵が画面上に出力される。出力された線画の似顔絵を無表情の似顔絵であると定義し、本手法で表情を付加する顔として用いる。

4　表情付加のための被験者実験

ある表情を持った顔とは、無表情の顔のどの部位がどのように変化しているのかを調べるために、文献[4] における平均顔の似顔絵を用いてアンケート調査を行う。ここで用いる平均顔は髪の毛と唇を描かず、口の形はまっすぐなものを使用する。

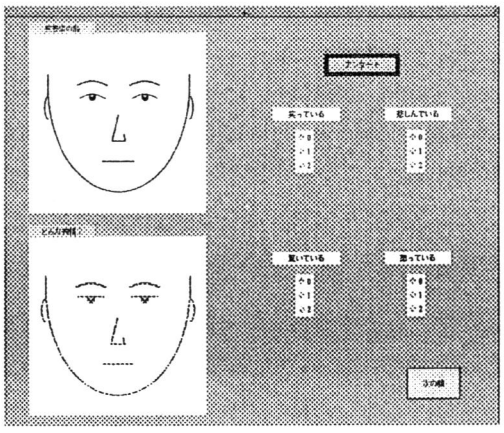


図2：アンケート用インタフェース

図2のようなインタフェース上で、無表情の平均顔である上の似顔絵とパラメータを変化させた下の顔とを比較し、パラメータの変化と表情の関係を調べる。顔の部位の中で表情が変化するときに主に変化する部分としては目、口、眉を考える。黒目の位置、目の傾き、形、口の幅、形、大きさ(開き具合)、眉の傾き、形、目と眉の間隔の位置関係の 9 種類のパラメータを組み合わせながらさまざまな顔表情を出力し、アンケートを行う。

4.1　1つの部位についてのアンケート調査

まず目、口、眉に関する 9 種類の各パラメータについて、人の顔に見える範囲を調査するための予備実験を行う。無表情の似顔絵において、各パラメータのスケールを被験者に自由に動かしてもらい、人の顔として不自然であると感じる限界の値を調査する。ここで得られた各パラメータの限界値をもとに、図3に示すような0と上限の中間値（中間値Ⅰ）、0と下限の中間値（中間値Ⅱ）、0の3段階をアンケート調査を行うためのパラメータ値の変化に用い、様々な顔表情を作成する。

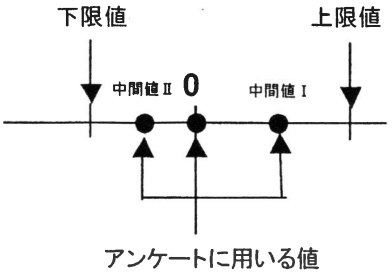


図3：アンケートで用いるパラメータ値

ここで用いる表情の表現については「笑っている」「悲しんでいる」「驚いている」「怒っている」の4種類とする。無表情の顔と、パラメータ値を変化させた顔とを比較し、4つの表情をそれぞれどの程度感じるかを、0“感じない”、1“少し感じる”、2“とても感じる”の3段階で評価する。また、パラメータ値が変化する組み合わせを部位ごとに考える。これによりアンケート数は目と口については26組、眉については8組、位置については2組の合計62組となり、文献[5]より大幅にアンケート数を減らすことができる。

4.2　各部位の組み合わせを考慮したアンケート調査

先のアンケートで得られた結果において、被験者ごとに、各表情を“感じない(0)”と評価されている組み合わせではその表情を表せないとして削除する。“その表情を感じる(1または2)”と評価されている組み合わせのみを残し、目と口、目と眉、口と眉の2つの部位ごとで組み合わせ、被験者ごとにアンケート調査を行う。

5　アンケートデータの解析

5.1　パラメータ変化の組み合わせと表情の関係

これらのアンケート調査を行った結果、4.1章の各部位ごとでのアンケートでは、被験者ごとに多くのパラメータ変化の組み合わせが表情を付加するための候補として残されていた。続いて4.2章の調査において、「笑っている」「悲しんでいる」「驚いている」「怒っている」のうち1つの表情だけを“感じる(1または2)”、残りの3つの表情を“感じない(0)”と評価されているパラメータ変化の組み合わせを似顔絵への表情付加のための候補として残し、被験者全員のデータをまとめて解析した。その結果、「笑っている」表情と「怒っている」表情では、“そう感じる”と共通して評価した組み合わせが多く、「悲しんでいる」

と「驚いている」表情では共通している組み合わせは少なかった。後者2つの表情は個人による違いが大きいと考えられる。実際に表情を付加するときには、“そう感じる”と答えた被験者の人数が多い組み合わせから順に似顔絵に付加し、画面上に出力することにする。

5.2 スケール変換

無表情の似顔絵のパラメータ値を、表情を持った似顔絵のパラメータ値に変換するために、式(1)、(2)を用いて変換を行う[5]。ただし、無表情の似顔絵の特徴としてのあるパラメータの値を $a(-1 \leqq a \leqq 1)$、表情を持った似顔絵の対応するパラメータの値を $b(-1 \leqq b \leqq 1)$とする。また図4にスケール変換の概念図を示す。

$a \geqq 0$ のとき $a' = a + b \cdot (1 - a)$ (1)

$a < 0$ のとき $a' = a + b \cdot (1 + a)$ (2)

無表情の似顔絵において、パラメータ値の絶対値が大きい部分がその人の特徴を表している部分であると言える。この変換式では、絶対値が大きいパラメータほど表情を付加するときの変化は小さく、逆に0に近いパラメータほど大きく変化させることができる。この変換によって、特徴のある部分はあまり変化させずその特徴を残し、平均的な部分を大きく変化させることができ、その人の特徴を生かしたまま表情を付加することができる。

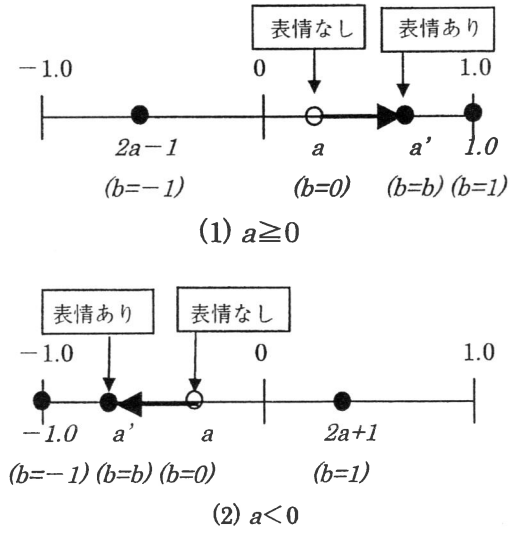


図4：パラメータ値の変換方法

6 表情の付加例

6.1 表情付加インタフェース

描かれた無表情の似顔絵に付加したい表情を“笑う”、“悲しむ”、“驚く”、“怒る”の4種類から作成者が選ぶと、その表情が付加された似顔絵が6種類ずつインタフェース上に出力される。

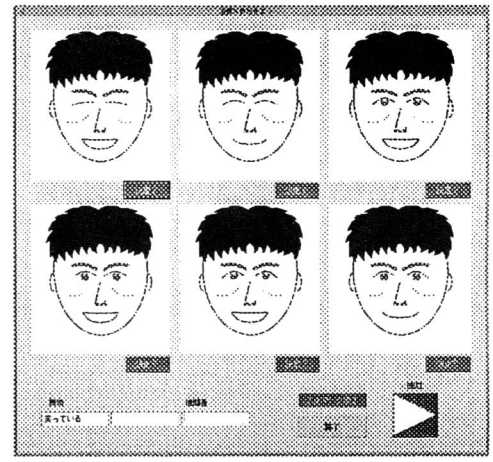


図5：出力インタフェース

図5はあるモデルの似顔絵に「笑っている」表情を付加したときの出力の一例である。4章で得られた表情としてのパラメータ変化の組み合わせを、各表情で多数の被験者が“そう感じる”と評価したパラメータ変化の組み合わせから順に似顔絵に付加し、画面上に出力していく。6種類ずつ表示された似顔絵の中にモデルをよく表せていると感じる似顔絵があれば、その似顔絵の下にある決定ボタンを押すことにより候補として選択される。矢印ボタンを押すことにより、変化するパラメータの組み合わせが異なる似顔絵が順次6種類ずつ出力される。最終的に選択された似顔絵がもう一度出力され、その中で作成者がモデルを最もよく表せていると感じる似顔絵を選択し、決定する。

6.2 シミュレーション例

言語表現によって描かれた無表情の似顔絵に4種類の表情を付加した例を紹介する。図6中央が無表情の似顔絵であり、左上(a)が笑っている表情を付加したもの、右上(b)が悲しんでいる表情を付加したもの、左下(c)が驚いている表情を付加したもの、右下(d)が怒っている表情を付加したものである。これらはそれぞれ、出力された似顔絵の中で、被験者がモデルの表情を最もよく表せていると感じ、最終的に選択された似顔絵である。

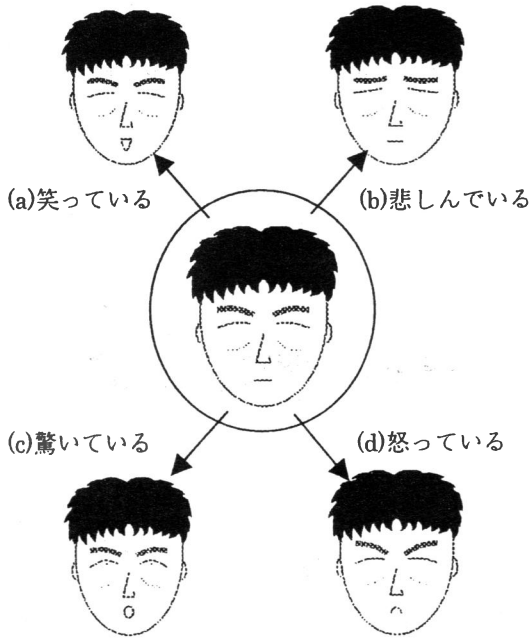


図6：さまざまな表情の似顔絵の例

6.3 考察

「笑っている」と「怒っている」表情では多くの被験者が共通して同じようなパラメータ値の組み合わせを選択しているため、始めの方に出力される似顔絵に満足するものが現れ、後になるにつれて候補に残るものは減っていった。しかし、「悲しんでいる」と「驚いている」では共通するパラメータ値の組み合わせが少ないため、始めの方に満足する似顔絵が出力されるとは限らず、候補として残したいと感じるものが後の方にも現れる傾向があった。これらの結果から、前者の表情については共通の組み合わせを主とし、後者の表情については個人データを主として出力させるようにすれば被験者の満足する表情を得ることができるようになると考えられる。

また、インタフェース上に出力する際に、似たような顔が何度も出力されることが多かった。このようなものは1つにまとめたりするなどの工夫が必要であると思われる。

7 おわりに

本論文では、作成者がモデルらしい表情であると感じる、表情豊かな似顔絵を作成することが目的であった。被験者実験により求められたパラメータの変化の組み合わせを用いて表情を付加し、インタフェース上に複数の似顔絵を表示し選択してもらうことにより、作成者がモデルをよく表せていると感じる似顔絵を作成することができた。

今後は複数の被験者に表情付加のシミュレーションを行ってもらい、表情を付加するためのパラメータ変化の組み合わせと出力方法についてさらに検証していくことが必要である。また選択された似顔絵の表情の程度を考慮したり、描かれた似顔絵にいろいろな状況を与え、その状況に応じ表情を付加したりするような応用例を検討する予定である。

参考文献

[1] 牛田，高木，山口："連想記憶と言語指示学習に基づく表情モデルの構築"，電気学会論文誌，Vol.113-C No.12，pp.1062－1071，1993.

[2] 花岡，金子，原："描き手の画調に基づく似顔絵の自動生成"，電子情報通信学会論文誌，Vol.J80-D-Ⅱ，No.8，pp.2110－2118，1997.

[3] 富永，林，村上，輿水："表情表出過程における動きの似顔絵生成の試み"，電子情報通信学会論文誌，Vol.J81-D-Ⅱ，No.8，pp.1856－1866，1998.

[4] 岩下，鬼沢："印象と誇張を反映させた似顔絵の描写"，第14回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.439－442，1998.

[5] 武田，岩下，鬼沢："似顔絵描写における表情の付加"，第15回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.693－696，1999.

問い合わせ先

〒305-8573
茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学機能工学系　鬼沢研究室
武田夕紀
TEL：0298-53-6188　FAX：0298-53-5207
E-mail：yuuki@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

TA3−1

インタラクティブECを用いた感情自動獲得支援システム

Support System for Automatically Emotional Generation Using Interactive EC

桂田有香
Yuka KATURADA

前田 陽一郎
Yoichiro MAEDA

大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract — The purpose of our research is to attempt to represent and generate emotions for the autonomous mobile robot by using fuzzy reasoning. However, it had a problem that an operator can not easily express emotional behaviors of a mobile robot by fuzzy rules. Therefore, we constructed the simulator which supports to generate the emotional model of the operator by applying Interactive EC based on the subjective evaluation of human for the selection of emotional behaviors. In this paper, we also report some results of simulation to confirm the efficiency of this simulator.

1 緒言

ここ数年、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム、強化学習法などといったソフトコンピューティング手法が設計・計画問題を計算機で解くための要素技術として研究されている。これらの特徴は目標を与えると、あとは自動的に計算が進み十分な計算を経た後、解が得られることである。これに対し、インタラクティブEC(Evolutionary Computaiton)は、積極的に人間の優れた評価能力をシステム最適化のための評価関数として利用する手法である。この技術は、人間の評価系と進化的計算論(EC)によるシステム最適化とがインタラクティブ(対話的)に行なわれる。インタラクティブECは現在画像生成や音楽生成を中心とする芸術分野への応用研究が中心である。青木ら[1]は3次元CGライティングの設計にインタラクティブECを導入し、CG経験が浅いデザイナには統計的に有意なデザイン支援効果が得られることを確認している。またBilesら[2]はインタラクティブECをジャズセッションのメロディー生成に適用することにより、on-line状態で評価を与え、フレーズ単位に進化させ評価時間の短縮を図っている。最近では工学の分野にも応用が始められ、渡辺ら[3]は歪んだ音声の回復を試み、設計者の聴感評価に基づいてGAが歪回復フィルタの8つの係数を最適化し、その結果本来の音声より音質が回復されていることを示している。さらに人間の疲労問題[4]インタラクティブECのインターフェース[5]など、心理実験を伴う研究への応用も増え始めている。

本研究室では論理的知識に比べて表現が比較的困難である感情を自律移動ロボットに移入・生成させることを目的として数年前から研究を進めている[6][7][8]。昨年度の研究では、周囲の環境や状況により、自動的に感情が変化する感情発生機構を持った感情自動生成モデルをSSAの概念を用いて構築した[9][10]。このモデルを用いることにより、周囲の環境や状況により3つの基本ベクトル値(Joy,Anger,Sadness)が序々に変化し、それに対応して自律移動ロボットの感情行動も適切に実現できたことが確認されている。

そこで本研究では、昨年度の結果をふまえて、人間の主観的評価を用いることによりオペレータが表現したい感情を容易に実現できる感情自動獲得シミュレータを構築する。昨年度の研究では、評価関数を用いることにより感情表現を行っており、例えば、怒りと悲しみが共に大きい時は2つの感情が合わさった感情行動となり、どの感情が表れているのかがわかりにくいなどの問題点があった。そこで本年度はある感情行動を画面上にいくつか表示し、その中から人間が人為選択により適切な行動を選ぶという操作を繰り返すことにより、その人から見た感情にふさわしい行動を進化学習により自動的に抽出するというシステムを構築する。さらにこのシミュレータを用いて、様々な感情が獲得可能であるかどうかを評価するシミュレーションを行なったので、その結果についても報告する。

2 感情自動獲得支援システム

ここでは今回提案するインタラクティブECを用いた感情自動獲得支援システムについて説明する。一般に、感情行動は個人差があり定義しにくいものであり、評価関数を用いて表現することは困難である。そこで、本研究では進化の際の親の決定に評価関数ではなく、人間の主観的評価を用いて行なうインタラクティブECを用いた手法を提案する。ここではEC手法として進化戦略(ES)を用いている。ESは個体表現として直接実数値を扱い、従来のGAのような遺伝子型から表現型への変換が不要であるという特徴を持ち、主に突然変異によって遺伝的操作が行なわれる[11]。

2.1 遺伝子のコーディング

本研究ではファジィルール後件部シングルトンの値を遺伝子として個体を作り、その個体を進化戦略(ES)を用いて学習させる。まずGAと同様に個体の遺伝子をコーディングする。GAでは一般に0と1の並びであるビット列を遺伝子を表す記号列として用いるのに対して、ESでは実数値を用いる。今回はファジィルール後件部シングルトンの値を遺伝子のビットとし、各個体を$x_i(k)$(k:世代数、$i=0$:親、$i=1$:子)とおき、

$$x_i(k) = (S_0, S_1, \cdots, S_{11}) \tag{1}$$

と表す。$S_0, S_1, \cdots, S_{11}$はファジィ後件部シングルトンの値を示し、遺伝子のビットの値は-10.0～10.0の範囲とする。

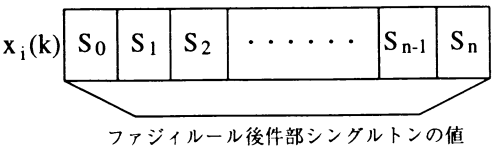


図1: 遺伝子のコーディング

2.2 本手法のアルゴリズムフロー

今回提案するインタラクティブECを用いた感情自動獲得支援システムの各手順について説明する。図2にこのアルゴリズムのフローチャートを示す。

1. 初期世代の生成
   ランダムに初期世代を生成する。
2. 新世代の生成

進化戦略を用いて子を生成する。子の生成は次式に従って行なわれる。

$$x_1(k) = x_0(k) + N_n(0, \sigma^2(k)) \qquad (2)$$

$N_n(0,\sigma)$ は各要素が独立で平均 0、分散$\sigma^2(k)$ の独立な要素からなる n 次元ベクトルを示す。つまり、子は親のベクトル各要素に正規乱数を加えることにより生成する。

3. 軌跡の表示
   初期位置と向きを設定し、光源までの距離と方位を算出する。ファジィルールにより操舵角を計算し、次の地点を求め現在位置から次の地点までを直線で結ぶ。この操作を繰り返すことにより軌跡を表示する。
4. 人為選択
   親個体あるいは子個体の 2 つの軌跡を画面上に表示し、目的の感情にふさわしい動きをしていると思われる方を人間の主観的な判断により選択し、次世代の親とする。
5. 突然変異の Step 幅の変更
   Step 幅の変更は 6 世代に 1 回行なうものとする。成功回数を基に次式に従って Step 幅を変更する。今回はファジィルール後件部シングルトンの値が、-10.0〜10.0 の範囲のため、Step 幅を $2.0 < \sigma < 1.0$ とした。

$$\sigma(k+1) = \begin{cases} \sigma(k) * C & p/g < 1/3 \text{ のとき} \\ \sigma(k)/C & p/g \geqq 1/3 \text{ のとき} \end{cases} \qquad (3)$$

Cは重み係数 $(0 < C < 1)$、今回は 0.85 とした。p は成功回数、g は世代数を示す。

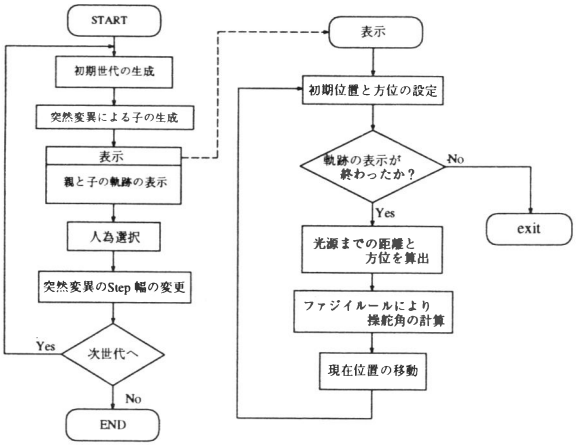


図 2: 本手法のアルゴリズムフロー

3 感情自動獲得シミュレーション

本研究では AT 互換機 Gateway2000(Windows95) 上で制御用グラフィックプログラミングツール LabVIEW を用い、感情行動の選択に人間の主観的評価を取り入れ 、インタラクティブ EC によりその感情にふさわしい動きを獲得していく感情自動獲得シミュレータを開発した。以下に本システムならびにこれを用いたシミュレーション結果について説明する。

3.1 感情自動獲得シミュレータ

ここでは本研究により構築した感情自動獲得シミュレータの概要について説明する。シミュレータの画面構成を以下に示す。図 3にはメインパネルを、図 4には軌跡表示パネルを示す。

図 3に示すメインパネルには、図 4に示す軌跡表示パネルでリアルタイムに動いた軌跡の最終結果のみが次々に表示される。図 3上部 3 つのパネルは親個体を表し、下部 3 つのパネルは子個体を表す。このパネルの上部にはシミュレータ制御用のボタンがあり、これによってシミュレーションの開始、終了が行なえる。下部には世代数、成功回数、突然変異の Step 幅、最終的に得られたファジィルール後件部シングルトンの値が表示されるようになっている。図 4に示す表示パネルにはロボットの動きがリアルタイムに表示される。

表示部 (図 2右側参照) では現在位置から基準点 (光源) までの距離と方位を求める。これを用いて重心計算を行ない、操舵角を求める。なお光源は (0,0) にあるものとする。図 5 にシミュレーションで用いたファジィルールを示す。初期世代の親個体のファジィルール後件部シングルトンの値は乱数を用いて生成される。この親個体に進化戦略による突然変異 (式 (2) 参照) をかけることにより、子個体を生成する。ファジィルール後件部シングルトンの値は進化戦略により学習させていく。進化戦略による突然変異の記述には C 言語を用いた。このプログラムをダイナミックリンクライブラリ (DLL) に変換し、Call Library 関数によって、LabVIEW に C 言語を組み込んでいる。

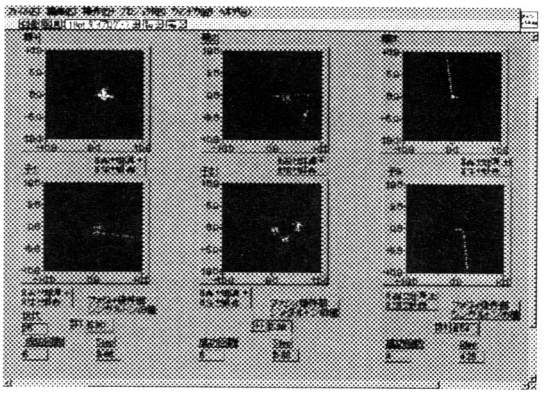


図 3: 感情自動獲得シミュレータのメインパネル

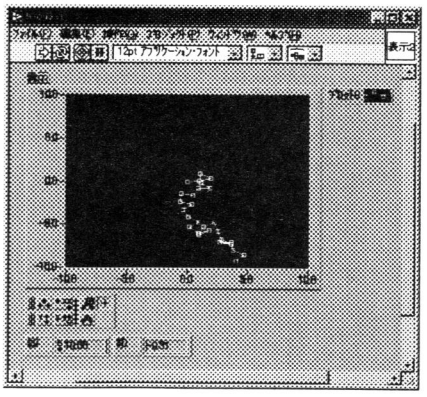
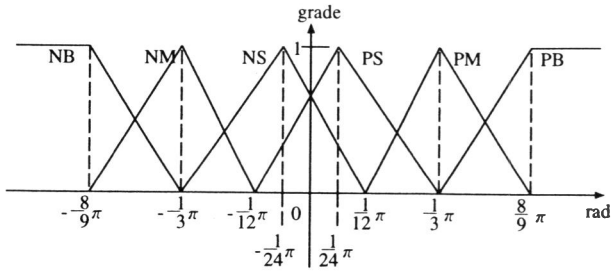
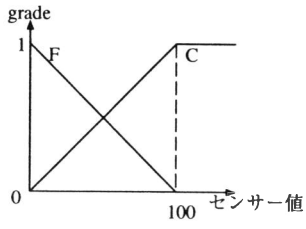


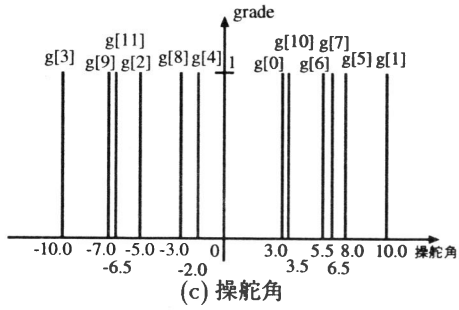
図 4: 感情自動獲得シミュレータの軌跡表示パネル



(a) 方位



(b) 距離



(c) 操舵角

(d) ファジィルール

	NB	NM	NS	PS	PM	PB
F	g[0]	g[1]	g[2]	g[3]	g[4]	g[5]
C	g[6]	g[7]	g[8]	g[9]	g[10]	g[11]

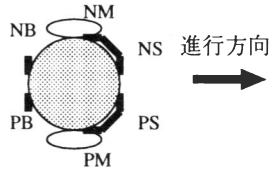


図 5: シミュレーションで用いたファジィルール

3.2 シミュレーション結果

今回構築した感情自動獲得シミュレータを用いて、喜び、怒り、悲しみ、それぞれの感情にふさわしい動きを獲得することが可能かどうかをシミュレーションにより検証した。ロボットの初期位置 (0,0)、方位 0 度、光源 (0,0)、Step 幅 5.0、$C = 0.85$ を初期条件とし、シミュレーションを行なった。これにより得られた結果を以下に示す。図 6はシミュレーションで得られた後件部シングルトンを表す。図 7は喜び、悲しみ、怒りの感情行動の軌跡を表す。喜びは光源の周りをくるくる回るような動きが得られ、悲しみは光源からくねくねと遠ざかって行くような動きが得られた。怒りは直進的に光源から遠ざかるような動きが得られた。これより、人間の主観的評価を用いることで比較的感性に合った感情行動を獲得できることがわかった。

4 結言

本研究ではユーザの主観性を重視した感情表現に対するインタラクティブ EC の有効性をシミュレーションを通して検証した。今回のシミュレーション結果である喜び、悲しみ、怒りのそれぞれの軌跡より、比較的ユーザの感覚に合った感情行動が獲得できている様子がわかる。

しかしながら主観を扱い人為選択のみで選択を行なう場合には進化の方向がユーザの希望しない方向へ進む場合もある。これを解決するために、例えば過去の履歴を用いて良い個体を保存し、ユーザが進化の方向性を自ら変更する方法などが考えられる。この方法に関する検討は今後の課題である。今回構築したシミュレータは親個体、子個体の選択に人為選択を用いたため毎回時間がかかるという問題点があり、これについても今後改良が必要であると考えられる。

参考文献

[1] 青木 研, 高木 英行: "3 次元 CG におけるライティングデザイン支援" , 第 *13* 回ファジィシステムシンポジウム , pp.311-314 (1997)

[2] 岩井 政佳: "遺伝的アルゴリズムによる FM 音源パラメータの調整" , 夏のプログラム・シンポジウム「娯楽とコンピュータ」, pp.203-205 (1994)

[3] 渡辺 辰巳, 高木 英行: "対話型 GA を用いた歪音声の音質の改善" , 第 *13* 回ファジィシステムシンポジウム, pp.183-186 (1995)

[4] 高木 英行, 畝見 達夫, 寺野 隆雄: "対話型進化計算法の研究動向" , 人工知能学会誌, Vol.13 , No.5 , pp.692-703 (1998)

[5] 大崎 美穂, 高木 英行: "対話型 EC 操作者の負担低減-評価値予測による提示インターフェースの改善-" , 人工知能学会誌, Vol.13 , No.5 , pp.712-719 (1998)

[6] 前田 陽一郎, 田中 秀樹: "基本心理状態に基づく自律移動ロボットの感情シミュレータ" , 第 *13* 回ファジィシステムシンポジウム予稿集, pp743-746 (1997)

[7] Y.Meda: "Fuzzy Rule Express for Emotional Behaviors in an Autonomous Mobile Robot" , *Proc. of 7th IFSA World Congress (IFSA'97)*, Vol.IV , pp.445-450 (1997)

[8] Y.Meda: "Emotional Expression for Autonomous Mobile Robot" , *Proc. of 5th International Conference on Soft Computing (IIZUKA'98)* , Vol.1 , pp.243-246 (1998)

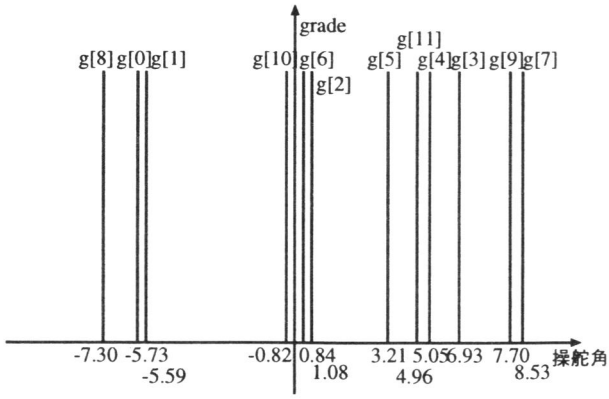
[9] 前田 陽一郎, 武田 由加: "サブサンプション・アーキテクチャに基づく自律移動ロボットの感情自動生成モデルの構築" , 第 *16* 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1313-1314 (1998)

[10] Y.Maeda: "Fuzzy Rule Expression for Emotional Generation Model based on Subsumption Architecture" , *Proc. of 18th International Coference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS'99)* , pp.781-785 (1999)

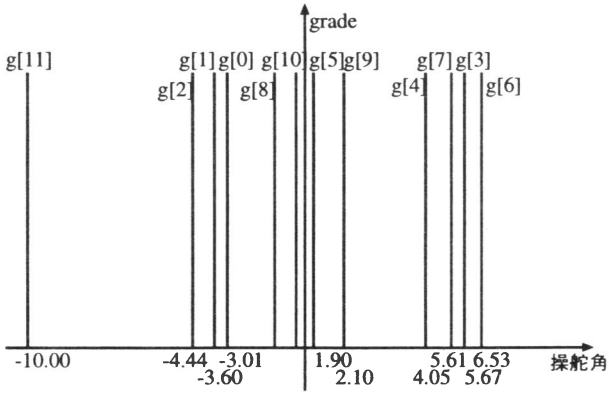
[11] 福田 敏男, 久保田 直行: "進化的計算手法とロボティクス" , 日本ロボット学会誌, Vol.15 , No.5 , pp.667-670 (1997)

＜連絡先＞

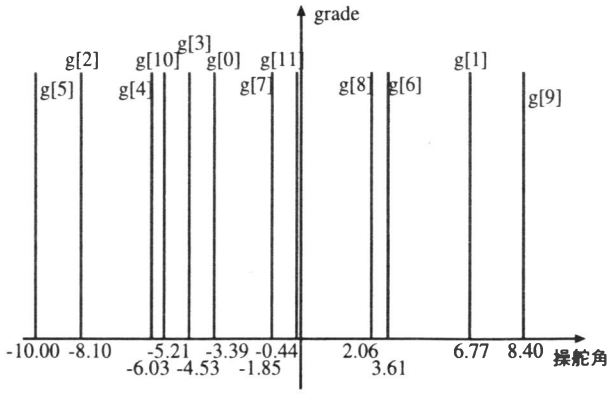
〒 572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学 総合情報学部 情報工学科 前田 陽一郎
Tel & Fax : 072-825-4698(直通)
E-mail : maeda@mdlab.osakac.ac.jp



(a) 喜び

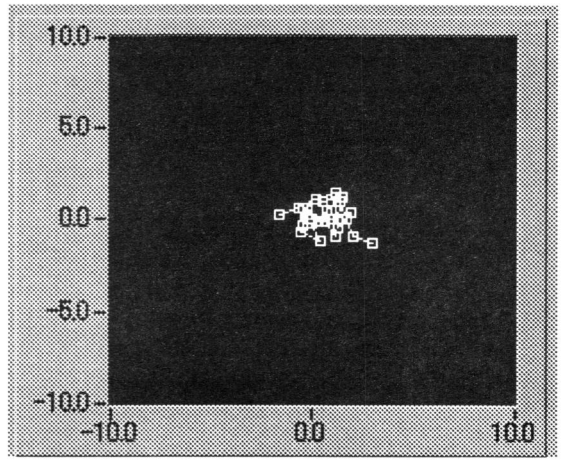


(b) 悲しみ

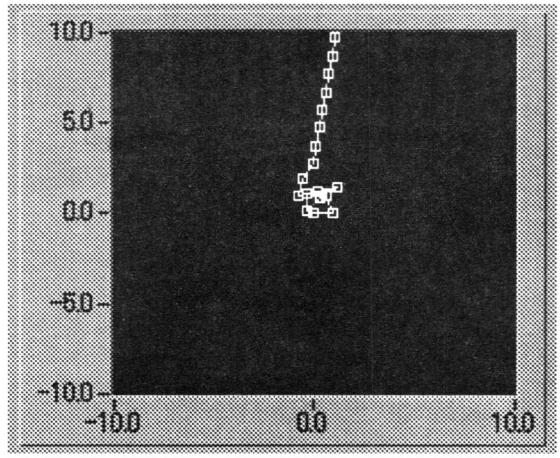


(c) 怒り

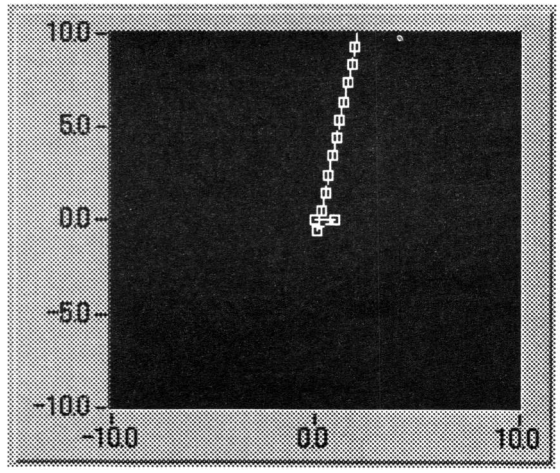
図 6: シミュレーションで得られた後件部シングルトン



(a) 喜び



(b) 悲しみ



(c) 怒り

図 7: シミュレーション結果

TA3−2

感性に基づく人間聴覚系快適システムの設計法

Design method of a system making pleasant sound surroundings based on Kansei

小島 瞳
Hitomi KOJIMA
北海道大学大学院
Graduate School of Engineering,
Hokkaido University

王碩玉
Syouyu WANG
高知工科大学
Kochi University of Technology

土谷武士
Takeshi TSUCHIYA
北海道大学大学院
Graduate School of Engineering,
Hokkaido University

Abstract : Recently it is hoped that Kansei is taken into consideration on design. In this paper, we proposes design method of a system making pleasant surroundings by sound and music. As our frame of mind is variable, the system must stay in step with change on each occasion. Specifically, this system outputs music in response to human frame of mind through the use of distance-type fuzzy reasoning method.

1 はじめに

これまで音楽情報処理の分野において，人の感性と音楽を関連付けた研究が多く報告されている．これは音楽が芸術の中でも自然科学やコンピュータと強い関わりを持っているためである．自動作曲システムはコンピュータの発明とほぼ同時期に作られているが，人の心に訴える音楽を創造することでは人間に敵わず，現在は人間の競演者として振る舞う協調型自動演奏システム[1]や編曲者の個性や要求に応じてメロディに和声を付ける編曲システム[2]など人の感性を考慮した研究が進んでいる．

このように個人の好みに合わせた音楽を作ろうとする研究があるのは，音楽が人の生活を快適にすることが経験的に知られているためである．本システムの目的は音楽や効果音による日常レベルでの音環境の充実であり，人の日により時間により変化する気分や感情に動的に対応し，その時々にふさわしい音環境を作る聴覚系快適システムの構築を目指している．

2 音楽要素と感性情報

音楽は“調子”,“拍子”,“旋律”,“和音”など多くの構成要素からなり，これらの中には様々な「対比」が存在する[3]．表1はH-P.Schmitz(音楽家・哲学博士)がその著書の中で示したものであり，この2極を“左のグループ”,“右のグループ”としている．これらの対比こそ音楽の原点であり，感情誘起の原点となるものである．実際の音楽では音列の並び方により多様で複雑な感情を誘起する．以下に述べるシステムではこれらの対比関係を利用した．

表 1: 音楽と人間活動の対比関係

	左のグループ	右のグループ
テンポ	遅い	早い
音程	低い	高い
和音	短調	長調
対比の言葉	重	軽
	暗	明
	悲	嬉

3 感性コントローラの設計

3.1 システムの概要

本システムは人の感性を入力とする感性フィードバックシステムである．全体の流れを図1に示した．ユーザーが自分の求めるイメージを感性語で入力し，これを x とする．これに対し後に述べる距離型ファジィ推論法[4]によるコントローラで適当な出力 y_0 を返す．ユーザーは出力された音を聴き，それに対する評価値を感性語により x' として入力する．

ここではファジィ推論の前件部 x_i に“重−軽”などの感性語を，後件部 c_i に音楽要素量としてテンポを割り当てた場合を例に取り，以下にその具体的な処理手順を説明する．

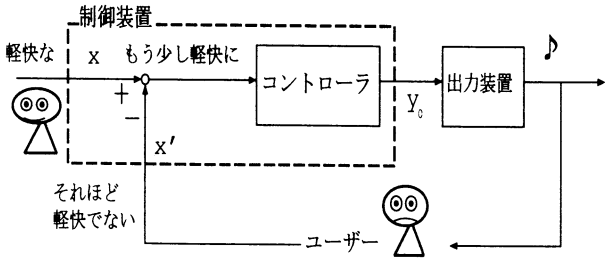


図 1: 感性フィードバック制御システム

1. 目標とする軽快さを表す値を入力 x とし，後述の距離型ファジィ推論法によりテンポのパラメータとなる y を推論する．
2. 出力装置により再生された音を聴き，ユーザーが感じる軽快さ x' を与える．
3. ユーザーは $x - x'$ 分だけ感性量のずれを感じているわけであるから，この差分を元の目標値に足した値を用いて再び推論する．
4. 出力された音を聴き評価値を与え，同じ手順で推論を繰り返す．

このシステムにおいて目標値入力とセンサ部分をユーザーに委ねることにより，個人の感性に動的に対応できると考えられる．

3.2 距離型ファジィ推論法

コントローラの推論部分に距離型ファジィ推論法を用いた．距離型ファジィ推論はルールベースが疎でも推論が可能なため，ルールベースを作る上での制約を受けにくく，人の感性に忠実なルールの作成が容易であると考えられる．また，距離型ファジィ推論法はシングルトン(離散値)の扱いが容易である．ここでは説明の簡単のため，シングルトンの場合について説明する．

ルールの前件部と事実が実数である場合，事実 $x^j \in \mathbf{R}$ に対して以下の様にユークリッド距離 d_i を計算する．x^i は i 番目のルールの前件部である．また，入力の数 m に対して $1 \leq j \leq m$ である．

$$d_i = \left[\sum_{j=1}^{m} (x^{ij} - x^j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

更に，ルールにおける後件部も具体的な実数 c_i である場合，推論結果 y_0 は式(2)のように与えられる．

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[c_i \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j \right]}{\sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1, j\neq i}^{n} d_j} \tag{2}$$

4 まとめ

本報告では距離型ファジィ推論法を用い，快適な音環境を構築する上での感性フィードバック制御法の一つの方法を示した．この手法についてのシミュレーションの結果については当日示す．

ファジィ推論で感性を扱う場合，感性情報を抽出し，更にそこから感性量と音楽要素量とを対応させファジィルールを作成する手法が難しい問題となってくる．今後も慎重にこの点を検討していくべきである．

また，本システムは音楽的・工学的知識を持たない個人ユーザーに対応させることが目的であるため，操作量が過大になり扱いが複雑になっては快適なシステムとは言い難い．常によりよいヒューマンインターフェースを構築する事を考慮しなければならない．

参考文献

[1] 井口征士. '感性情報処理'. オーム社, 東京, 1994.

[2] 徳丸正孝. 'パートナー型編曲システム"HASCAP"における編曲者の主観的曖昧性を含む音楽的知識の導入について'. 日本ファジィ学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 876–887, 1998.

[3] 大蔵康義. '音と音楽の基礎知識'. 国書刊行会, 東京, 1999.

[4] 王碩玉, 土谷武士. '距離型ファジィ推論法part1'. 第12回ファジィシステムシンポジウム論文集, pp. 9–12, 1996.

[問い合わせ先]
〒060-8628
札幌市北区北13条西8丁目
北海道大学大学院 工学研究科 システム情報工学専攻
制御情報工学講座 制御工学分野
小島 瞳
Tel: 011-706-6761
Fax: 011-706-7890
E-mail: kojima@ctrl.coin.eng.hokudai.ac.jp

TA3−3

感性を用いた屋内熱環境の快適性のファジィ的評価

Fuzzy Evaluation of Comfortability of Indoor Thermal Environment with KANSEI

清水　友彦　　椎塚 久雄

Tomohiko Shimizu　　Hisao Shiizuka

工学院大学　情報工学科

Kogakuin University

Abstract : This paper is aimming at construction of an indoor evaluation system based on the personal KANSEI , in other word , our human sensitivity of the everyday life . It is shown that the evaluation method of the comfortability of residence spaces is affected by various condition of thermal elements defined by PMV with the concepts of fuzzy sets and KANSEI . Also it shown that the judgment of comfortability for the thermal environment can be obtained .

1. はじめに

我々は日常生活の大半を室内環境で過ごすことが多い。そしてその室内環境は我々の健康に多大な影響を与えている。

本論文では人の感性に基づく汎用評価システムの構築を目指し、数々の室内環境の中から熱環境を対象として主に被験者の感性による快適性の評価を行う方法の構築を目的としている。その一例として従来の温熱感環境指標の一つであるPMV に、ファジィ集合と感性の概念を適用して評価を行うシステムを考察した。

2. 屋内熱環境の快適性

屋内の快適性は様々な要素に影響される。熱環境、空気環境、光環境、音環境…その中でも熱環境の一つである温度は最も重要な要因の一つである。本論文ではこの温度を中心要素として研究している。

主観的に最適な温度のことを主観的至適温度、または快適温度という。至適温度にはこのほか生体が最小のエネルギー消耗によって生命を維持し、かつ行動能力が最高に発揮し得る温度を表す生理的至適温度、作業の効率がもっともよくなる温度を指す経済的至適温度（生産至適温度）などがあるが、通常至適温度という場合には主観的至適温度を指す場合が多い。至適温度は気温だけではなく湿度、放射熱、風などの温熱因子によって影響される。このほか至適温度は作業強度、衣服によっても大きく変化する。

通常は快適感を生じる温熱条件は生理的にも好ましい環境であるが、特殊な条件下では快適感の改善が生理的に好ましくない場合がある。例えば寒冷環境で手袋すると快適感の改善が見られるが、この時むしろ体温は低下し、生理的には好ましくない状況になることがある。

ASHRAE（米国暖房冷凍空気調和学会）による在室者の８０％以上が快適と感じる室内条件は下図の通りである。

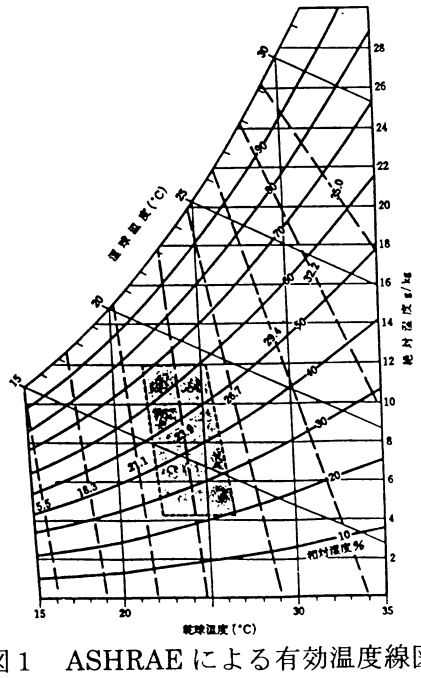


図１　ASHRAE による有効温度線図

3　評価方法

評価とはある価値観に基づいて対象の価値を定めることである。従って評価を行う際には、評価の目的と評価基準の測定値を明確にする必要がある。加えて複数の評価基準から対象の評価値を求めるには、各評価基準のウエイト（要素の重

視度）の設定も必要である。

本論文ではまず有効温度線図とPMVに基づく評価を行う。その結果に対し人の感性に基づいた修正を行い、その結果を修正評価とする。はじめの評価結果と修正評価結果を比較し、最終的な評価とする。

3.1 PMVによる評価

PMV（予測平均申告）は人体の体内温が定常状態であるとき、周囲の環境との間の熱平衡式に、各種の放熱算定式や皮膚温及び発汗蒸発放熱量の快適条件を組み入れて導いたもので、PMVは快適方程式から人体に対する熱負荷を求め、これを人間の温冷感と結びつけて算出されている。

$$\frac{\delta Y}{\delta L} = 0.303e^{-0.036M} + 0.028$$

$$PMV(=Y) = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)L$$

ここでLは熱負荷、Yは温冷感、Mは代謝量である。

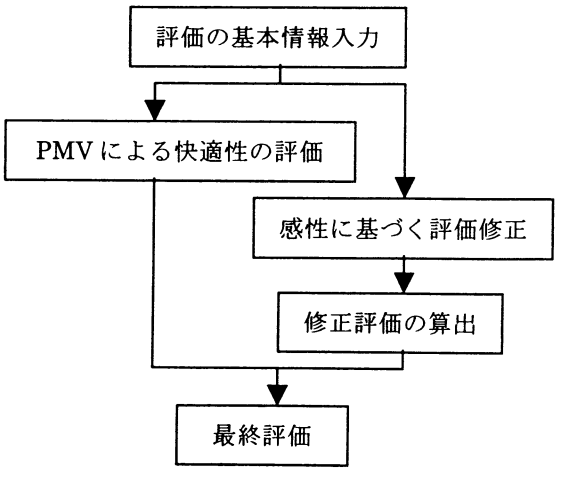
3.2 ファジィ・感性を用いた修正

個人の感性に基づいた修正を行うため、3.1の結果にアンケートによる修正を加える。各評価項目に対し解答を行ってもらい、設問ごとに設定したパラメータによるウエイトの調整を行っていく。修正は、熱環境に関係する以下の各条件に対応するパラメータに対して行うことにする。

① 温度・湿度関係
② 空気環境
③ 被験者の情報（服装等）関係

4. システム

本評価システムは以下の様に構成される。



システムのフローチャート

（1） 被験者に基本情報を入力してもらう。この情報を元にPMV評価を行う。またこの際、有効温度線図による評価も同時に行う。

（2） 続いてアンケートによる修正評価を行う。修正評価yの求め方は以下の通り。

$$y = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot f\left(X_i\right)$$

ここでwiはアンケートによる評価者によるウエイト、Xiは各評価項目の評価数値である。

（3） （1）で求めたPMV評価と、（2）によって算出された修正評価の比較する。この際、各評価要素ごとに評価結果を表示する。

（4） 最終的な評価を導出する。

5. まとめ

今回の発表は評価システムの提案段階になっている。評価結果・考察については会場で当日資料を配付する予定である。

参考文献

[1] 日本ファジィ学会（編）：講座ファジィ② ファジィ集合、日刊工業新聞社、1993
[2] 日本ファジィ学会（編）：講座ファジィ⑥ ファジィOR、日刊工業新聞社、1993
[3] 横山浩一、空気調和の設計、共立出版株式会社、1985
[4] 楽落 澄、現代の空気調整工学、朝倉書店、1996

連絡先
〒163-8677
東京都西新宿1-24-2 工学院大学大学院
情報学専攻 清水友彦
Tel：03-3342-1211(内線2649)
Email：em99013@ccs.kogakuin.ac.jp

TA4−1

属性の縮約を使って多様な商品選好を少数の新開発商品に集約する方法

Proposal of Attribute Reduct as the Condition of Making a few New Products Meet Diversified Preference

森　典彦*　　高梨　令*　　粂田起男*　　熊丸健一**

Norihiko MORI*　Rei TAKANASHI*　Tateo KUMEDA*　Ken-ichi KUMAMARU**

*東京工芸大学芸術学部　　**東京工芸大学大学院

*Faculty of Arts, Tokyo Institute of Polytechnics　　**Graduate Course, Tokyo Institute of Polytechnics

Many consumer distinguish the difference of attributes existing among a certain products such as personal car, and often prefer plural brands which have no any common attribute among them. This paper discusses a new method of marketing under such the state of things. The necessary and sufficient condition of discrimination of preference to all other brands is the attribute reduct in rough set theory. So in this paper the attribute reduct of each consumer preference is calculated, and then several number of the reducts are linked together. Thus linked reducts is the design condition of making a few new products meet many diversified preference. As the case, cars of wagon type are adopted.

1. まえがき

クルマを買おうとするとき人はいくつかの候補を挙げ、どれにするか迷うことが多い。その複数の候補は互いに似ていることもあるが、全く共通の属性がない場合もあることは経験するところである。これはクルマを買う多くの人のように、その商品の全体集合について互いのおよその違いを知っていてその中で選ぶという商品選びのときに起こるようで、人は個々の商品を他の商品から識別し、識別のための属性(以下識別属性という)をその商品の特徴として見ていると思われる。

この状況下でマーケティングを考えると、従来のように消費者それぞれの選好対象の平均的な属性を求めることは適当でない。すべての選好対象の識別属性を確実に拾い上げる必要がある。

2.目的

消費者の多様な選好対象はそれぞれが特徴としての識別属性をもつ。少数の開発商品がそれらの識別属性を確実にもつことによって消費者の多様な選好を満たすようにするための、開発商品の属性の条件を求める。

3.方法と過程

商品の特徴としての識別属性を厳密に考えると、それはその商品を他から識別するための属性上の十分条件にほかならない。そうであればそれはラフ集合理論における属性の縮約(Reduct)[1]で求められ、必要不可欠の属性のみに絞った十分条件は同じく極小縮約で求められる。

本論は極小縮約(以下単に縮約という)を用いて以下の手順で目的の条件を求める。

3-1. 多くの消費者に商品の全体集合の中から各自の選好対象を選抜してもらう。全体集合の属性データとともに表1にように書く。

3-2. 選抜された選好対象のそれぞれについて属性の極小縮約を求める。

3-3. 縮約は選好対象ごとに一般に複数得られるので

(1)構成する属性(要素)数が少ない。

(2)縮約間に重複して現れる要素を含む。

表1　データ

商品番号	属性(数字はカテゴリー) A	B	…	…	消費者P(数字は番号)の選好		
U1	A3	B1	…	…	P1		
U2	A1	B2	…	…			
U3	A2	B3	…	…		P2	
U4	A1	B3	…	…	P1		
U5	A2	B1	…	…		P2	
…	…	…	…	…			

を基準にして採用する。(1)は条件が簡単になって開発の自由度が増すからであり、(2)は信頼度が増すからである。(2)は例えば表1においてP1の選好商品U1の縮約が6個あったとして　A3E1F1G1H1,　B1D2,　B1C2F1,　B1J2N1,　C2G1L1,　E1M1

のとき、B1は3個の縮約に重複して現れるからこれを含む　B1D2,　B1C2F1,　B1J2N1を採用するのがよい。

3-4. 縮約を消費者間にまたがって併合する。併合とは縮約をand結合することであり、併合縮約は元の縮約の対象のいずれかをそれら以外から識別する属性条件である。併合の仕方は恣意的であるがなるべく

(1) 併合後の要素数が少ない。

(2) 多くの消費者をカバーする。

を満たすようにする。(1)は3-3.(1)と同じ理由からであり、(2)はより少ない商品で消費者選好を満たすためである。

表2　併合の候補

	P1	
縮約	U1	U4
B1D2	*	
…	*	
…	*	*
…		*
…		*

	P2	
縮約	U3	U5
A2E1	*	
…	*	
…	*	*
A2C1	*	*
B1F1		*
…		*

例えば表２のとき P1 と P2 にまたがる併合縮約 B1D2A2C1 は U1, U3, U5 を含むが２人であり、B1D2F1 は U1, U5 しか含まないけれども同じく２人であって要素数はこの方が少ないからこの方がよい。

4.クルマの開発での実験

ワゴン型のクルマの外観デザインについて７人の被験者の選好を調べた。一人を除き２ないし５の選好車があり全部で 18 車であった。外形に関する主な 11 属性を選びそれぞれを２ないし３個の形状カテゴリーに分割した。表３に示す。

表３　クルマの外形属性

属性	カテゴリー
A タイヤ径	1小　2大
B 全長	1 小　2中　3大
C ボデー高/全長	1小　2中　3大
D フッド長/全長	1小　2中　3大
E ルーフ長/全長	1小　2中　3大
G サイドガラス高/ボデー高	1小　2大
H 太いリヤピラーの位置	1最後尾　2その次
J リヤゲート傾斜	1寝てる　2立ってる
K キャビン曲線度	1丸いか中程度　3平ら
L ヘツドランプ形状	1丸い　2長方形
M グリル形状	1目立つ　2小さい　3なし

18 選好車を含む現在市販の 67 車につき形状カテゴリーを調べ、被験者の選好とともに表１の形式にならってデータとした。

被験者ごとに縮約を求めた。例えば被験者 P1 は３選好車をもつのでこの３車を他の 64 車から識別する縮約である。縮約は１選好車で 100 個に達するものがあり、すべては２ないし５要素で構成されていたが、3-3.(1)の基準によって２ないし４要素のものに限ると１選好車につき最大 14 個最少１個であった。表４にその一部を示す。

これらを 3-3.(2)の基準を考慮しながら 3-4.(1)としては７要素までとし、かつ 3-4.(2)をなるべく満たすように考えると、２個の併合縮約で７被験者の選好を満たせることが分った。つまり７被験者を２グループに分けてそれぞれに１個の縮約を配分することで選好を満たせる。そしてグループの分け方も縮約も一つとは限らないことも分った。

実際に調べた結果は

(1) 被験者を{P1, P2, P5, P6}と{P3, P4, P7}にグループ化し、前者に１個の縮約 B3C1D2E3G2J1K2、後者に 23 個の縮約のいずれか例えば C3M1J1H2B2D3 という 23 通りの組合わせ。

(2) 被験者を{P3, P5, P6}と{P1, P2, P4, P7}にグループ化し、前者に３個の縮約のいずれか例えば B3C1D2E3G2M3A2、後者に２個の縮約のいずれか例えば C3M1J1K2E3H2 という６通りの組合わせ。

(3) 被験者を{P4, P5, P6}と{P1, P2, P3, P7}にグループ化し、前者に１個の縮約 B3C1D2E3G2M2J1、後者に７個の縮約のいずれか例えば C3M1J1K2E3B2 という７通りの組合わせ。

という合計36通りの併合縮約の組み合わせ方が得られた。

表４　被験者ごとの選好車の縮約

P1	P2	P3	P4	P5	
U41	U13	U9	U2	U53	
A2C2E2	B2C3D2	A2E1J2	C3H2J1	C1E3G2	
B2E2A2	B2C3M1	J2C2D3	H2B1J1		
B2E2H2	K2B2G2	J2C2E1	U29	P6	
D2H2C2	L2D2C3	J2E1M2	D2M2G2J1		
E2C2H2	M1C3D2	K2B2D3	D2B2L1G2	U38	U39
K2C2E2	U21	K2B2L1	D2M2G2JE1	B3D2G2	B3D2G2
K2H2B2	C1D1B2	K2C2H1		C1K2E1	
L2C2G1	D1E1A1	K2C2L1			
M1E2C2	D1E1C1	U56		P7	
U42	U37	A2E3M3		U31	U32
K2E3J1	C1H2D3	L2M3		なし	M1C3J1
	H2G1D3	M3B2			C3D3K1

5.あとがき

消費者が既知の多くの選択肢から商品を選好する場合のマーケティングのために、従来の統計処理とは異なる考えに基づく商品企画の方法を示した。

縮約は十分条件であるから縮約以外の属性は商品開発において自由な属性である。上記のクルマのデザインの例では11-7=4 属性はデザイナーが全体スタイルのバランスを考えてきめてよい。

縮約は十分条件といってもデータとした既存の商品集合の中での十分条件であって、存在し得る架空の商品を含めると可能性を示すにすぎない。真の十分条件に近づけるためにデータを十分大きく取る必要がある。

注および参考文献

[1]極小縮約はラフ集合論における識別行列の列を or 結合した上で行方向に and 結合し、or を+、and を×としてブール演算することによって求められる。詳しくは森典彦、高梨令、ラフ集合の概念による推論を用いた設計支援、東京工芸大学芸術学部紀要 Vol. 3、p35、1997. および津本周作、田中博、ラフ集合−その理論と応用、第５回−６回、数理科学 377−378、1994. を参照。

問い合わせ先
164-8678 東京都中野本町 2-9-5
東京工芸大学大学院芸術学研究科
森　典彦
Tel. 03-3372-1321　Fax. 03-3372-1330
e-mail. nmori@dsn.t-kougei.ac.jp

TA4−2

信頼性工学におけるファジィ論的側面
− 故障判定における事例 −

A Side based on Fuzzy Theory for Reliability Engineering

村 田 忠

Tadashi MURATA

福 岡 工 業 大 学

Fukuoka Institute of Technology (FIT)

Abstract: This paper describe one side based on Fuzzy theory for reliability engineering. As a fact, there are many fuzzy or feeling events on decision process of parts /equipment failure, so that author will insist to study on Fuzzy theory and/or Kansei Engineering for those process analyses. This paper shows some examples on actual decision process on parts/equipment failure at the aircraft equipment and so on.

1．はじめに

信頼性工学の数理においては，一般に故障件数をもとにして信頼性理論式を適用し，機器や部品の故障率，寿命等の各種特性が明確に計算される。すなわち，信頼性に関する研究論文では，試験総数 N 個,故障数 n 個，信頼性試験期間 T 時間が与えられると，試験打ち切り数を考慮した信頼性理論式により，その機器や部品の寿命とかMTBF（平均故障間隔）等が見事に算出される。そこで，信頼性研究者以外の者からすれば，信頼性工学の研究分野にはファジィ理論とか感性工学的なものはほとんどないように思いがちである。

しかし，この信頼性問題の中身をみると，意外なほどファジィ理論や感性工学的な事象があるのに気がつく。例えば，機器や装置・部品の故障をみても，経験的なことや人間の感性に基づいて合否判定を行うケースが多々ある。ここでは，故障判定について，著者が経験したいくつかの事例を通して信頼性工学における感性工学的側面を述べて，その問題点や留意点を指摘する。(1) (2)

2．信頼性工学とは

本論にはいる前に，信頼性工学の概要を次に紹介しよう(3)。定義によれば，機器の信頼性とは，その機器が使用されている環境と時間を決めて，その中で機器が機能を発揮する性質（または確率）のことである。そして機器の故障率と経過時間の関係は有名な図１のバスタブ曲線で表現される。さらに信頼性の主要な特性値は図２で示される。

図２で，R（t）：信頼度関数，f（t）：故障密度関数，である。この図には信頼性の主要な値が示されているが，その基本となる故障密度関数 f（t）をみ

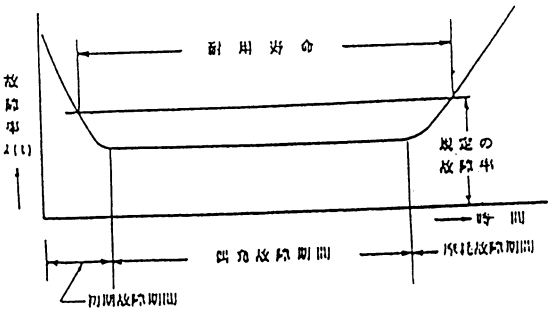


図１ 故障率のバスタブ曲線

ても，機器や部品の故障をどうとらえるかによって

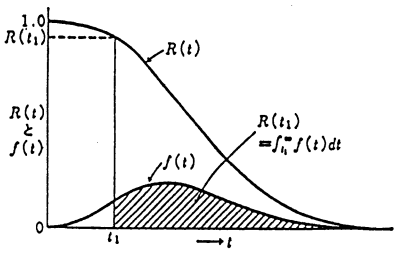


図２　信頼性特性値の曲線

ｆ（ｔ）の値や分布形状が大きく変化する。また故障の種類には，とくに外観検査や作動の微妙な動き方については，故障の判断基準が定性的でファジィな表現が技術仕様書に書かれていることが多い。したがって，故障と判断するまでの過程にファジィな面も，検査者の感性に基づく面も多々ある。それらのことで故障判定基準の決め方でメーカ，ユーザ相互でもめることがしばしば起きる。

一方，機器信頼性の研究区分は，現在次のように多岐にわたっており，いずれの研究区分にも，故障をどのように判断するかの過程でファジィ理論や感性工学（人間との接点部分）の活用の場がある。

① 信頼性（度）の配分
② 信頼性設計の向上
③ 信頼性試験法と評価
④ 市場データの収集と解析
⑤ 故障診断・故障物理の問題
⑥ 部品の信頼性改善
⑦ 保全生の問題
⑧ ソフトに関する問題

３．故障診断からみた信頼性の研究 (3)

感性工学的研究からみて関係の深いものについて考えてみよう。一例として，航空機用機器の故障診断や故障解析では，その故障が発生する以前から工場段階で故障解析作業が行われている。機器や部品の故障診断アプローチの手法は大別して図３のように実施されている。この図で，３軸とも原点から離れるにつれて診断レベルが高度になっていることを意味している。Ａ軸に示した故障の定義にしても，現在ＪＩＳの規定

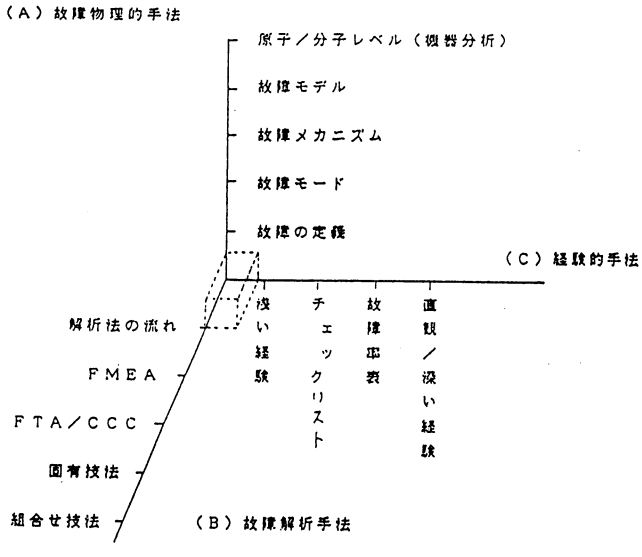


図３　故障診断のアプローチ

では約３０種類の故障区分があり，故障はそれぞれ細分化され，文章のみで説明されている。Ｃ軸の経験的手法には，ベテラン技術者の経験や知識が故障診断作業に大きく影響している。この面では，現在ファジィ推論を用いた故障診断支援エキスパートシステムの研究が進められている。

4. 故障判定へのファジィ論／感性工学的影響 (4) (5)

機器・装置や部品の故障判定に感性工学的影響があった事例の一部を表１に示す。この表には，航空機用の精密油圧機械，電子機器，および車両乗り心地試験装置等での外観検査や機能試験での問題点を取り上げている。

表１に見るように，検査規定が定性的な表現の場合は，判定の解釈が検査者の感性に基づく主観的見解により合否が決まる。これらのことをまとめると，共通事項として次のことが挙げられる；

（１）　検査規定が定性的な表現になっている。
（２）　機器や装置の使用環境の影響。

表１　故障判定に感性が関係した事例

検査項目	検査規定	判定（解釈）	備　考
油圧機器の油漏れ（外観検査）	外部に油が漏れないこと	日本：油がしみ出ないこと 米国：油が外部にﾎﾟﾀﾎﾟﾀ落ちないこと	日本：日本人の潔癖性 米国：機能から見た外観の許容
航空機の自動操縦時の水平飛行（作動試験）	機体に不快な揺れを感じないこと	不快な感じ方はﾊﾟｲﾛｯﾄの個人差大	大勢のﾊﾟｲﾛｯﾄによる比較検査（機器の微少ﾉｲｽﾞが関係）
振動試験装置の動き（作動試験）	装置の動作はｽﾑｰｽﾞであること	ﾕｰｻﾞ検査者の感性	ｹｰｽﾊﾞｲｹｰｽで処理

（3）　製品の価格に関係する。
（4）　ユーザの先入観が検査の合否に関係する。
（5）　合否は，最終的には使用するユーザの主観的判断による。
（6）　メーカ側の判定基準とユーザ側のそれとは立場上の差異がある。　　他

技術仕様書の上で，判定規格を定量的にすべて表現できないケースも残されている。このように信頼性工学について，故障判定に関してファジィで感性工学的研究の余地がある。

5．検　討

これまで信頼性工学は故障を重視して発展をしてきた。信頼性と故障は切っても切れない関係にある。そのためメーカでは企画，設計段階はもちろん，すべての段階で如何にして製品の故障を減らし，製品を長寿命にするかに努力している。例えば，設計工程では寿命について設計目標値を設定し，設計図面にDR（設計審査），製品のプロトタイプには信頼性試験や耐久試験を実施して，つねに継続してメーカの立場で製品の故障を監視し，改善を図っている。

製品の検査規定の仕様書上の表現とメーカ，ユーザの認識または要求レベル（または解釈のきびしさ）を示せば図４となる。

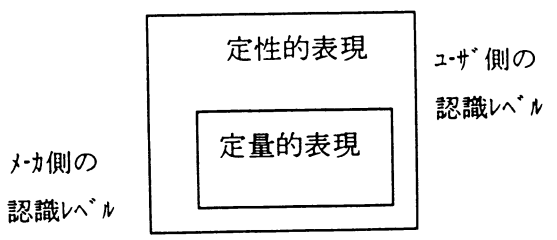


図４　仕様書中の検査規定の表現

また製品の不具合に対するユーザ側の「我慢できる程度」は，ラフな表現であるが，次のような関係式で示すことができるだろう。

我慢できる程度≒A×B×C×D×E×F×G×H
に関係する因子　×I

ここで；A：機能的問題，B：環境的問題，C：期間的問題，D：安全上の問題，E：コストの問題，F：

外観上の問題，G：実用上の問題，H：感性的問題，I：使用者，

このように検査規格を定性的な表現のままにしておけば，ユーザ側は時間とともにその検査項目についてますます高度な要求をすることがある。そのためメーカ側はできるだけ定性的表現を定量的表現にするべく，代用特性も考慮して検査規格を明示することが重要である。一方，検査規格が定性的表現になっている場合，メーカ，ユーザの双方が，いつでも，誰でも，どこでも，同一条件の判断ができるようファジィ論または感性工学的な研究を行うことが強く望まれる。

6．むすび

これまで述べてきたことを要約すれば次のようになる；

（1） 製品の技術仕様書にあって，検査項目のなかには，検査規格が定性的に表現されているものがある。

（2） 製品故障について，ユーザ側の我慢できる程度には多くの関係する要因がある。それらの要因には人間の感性に関係するものも多い。

（3） 定性的な表現で書かれた検査規格にたいして，メーカ側とユーザ側の見方や考え方を合わせるためにファジィ論 and/or 感性工学的な研究が重要である。

以上のように，信頼性工学の研究分野にも，故障判定プロセスにおいてファジィ論 and/or 感性工学の研究が関係者の誤解を少なくするため必要である。

参考文献

（1）村田忠，小川幸成：「ファジィ推論による電子機器の信頼度予測について」，ファジィ学会誌，Vol.5,No.4，pp.856-861(1993)

（2）村田忠：「ファジィ理論による電子機器の信頼性評価」，ファジィ学会誌，Vol.5,No.5,pp.981-990(1993)

（3）村田忠：「信頼性ハンドブック」，日本信頼性学会編，pp.86-87,日科技連出版（1997）

（4）長沢伸也：「感性工学とビジネス」，感性工学会誌，Vol.1,No.1,pp.37-47(1999)

（5）長町三生：「感性工学の役割とその方法論」，感性工学会誌，Nol.1,No.1, pp.24-30(1999)

問い合わせ先：

〒811-0295 福岡市東区和白東 3-30-1

福岡工業大学　情報工学部

村　田　　忠

TEL 092-616-3131 EX.2775,

E-mail: murata@fit.ac.jp

TA4−3

ニューラルネットワークによるゴルフクラブの感性評価

Kansei Evaluation of the Golf Club using Neural Network

菊池 彰洋[1]　徳丸 正孝[1]　村中 徳明[1]　今西 茂[1]
Akihiro KIKUCHI　Masataka TOKUMARU　Noriaki MURANAKA　Shigeru IMANISHI
山下 一美[2]　長尾 裕史[3]　鳴尾 丈司[3]　佐藤 文宣[3]
Kazumi YAMASHITA　Hiroshi NAGAO　Takeshi NARUO　Fuminobu SATOH
1: 関西大学　工学部
Faculty of Engineering, Kansai University
2: 大阪市立大学名誉教授
Emeritus professor, Osaka City University
3: ミズノ（株）
Mizuno Corporation

Abstract Kansei evaluation is influenced by the various factors of human liking, peculiarity, condition, and so on. In order to remove the influence by these factors, we compose the computer system which do kansai evaluation automatically using the neural network which possess the capacity for pattern recognition. In this paper, we take up a golf club as an example. we carried out the questionnaire and performed the principal component analysis based on the questionnaire result. Subjects are divide the any group so that what the questionnaire resembled may become the same group. The neural network learns the relationship between the representation value of each group and the design value of a golf club. The good result is obtained when unknown data was inputted into the neural network which has learned.

1. はじめに

感性評価は人間の好みや癖，体調といった様々な要因により変化するため，物理量との直接的な関係を探るのは容易ではない．また，新製品を作る際には，多くの試作品が必要となり，手間やコストが非常にかかるので，設計値と評価の関係が分かれば非常に有効である．筆者らは文献[1]において，ニューラルネットワークを用いることで，ゴルフクラブの打撃音の物理的特徴から音色の印象を抽出する手法について検討しており，良好な結果を得ている．本研究では本手法を応用し，ゴルフクラブの設計値と感性評価の関係を学習させることで，ゴルフクラブの設計値から人による感性評価の結果を予測するシステムについて検討する．本稿では，まずゴルフクラブのアンケートを基に主成分分析を行った．そして，アンケートに答えた被験者を解答の類似度を基にグループ分けを行い,各グループの代表値を求め，この代表値とクラブの設計値を対応させるニューラルネットワークを構成し評価を行った．簡単な処理の流れを図 1 に示す．

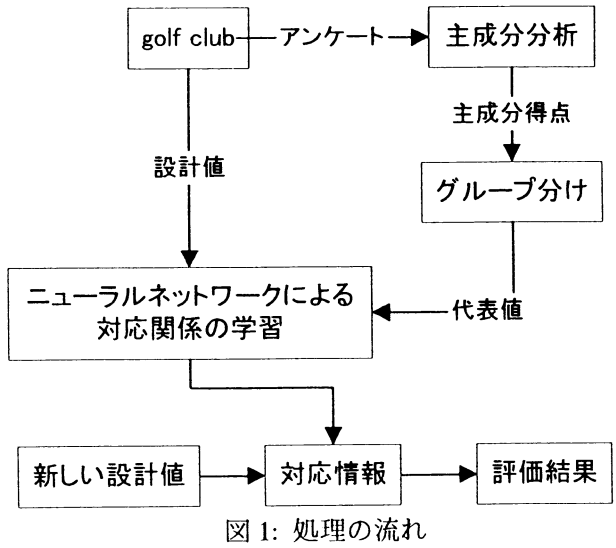


図 1: 処理の流れ

2. 主成分分析とグループ分け

今回，サンプルとして 5 本のゴルフクラブ（ドライバー）を用意し，102 人に対し 1〜7 の 7 段階で，クラブの特性を表すと思われる形容詞対 30 項目についてアンケートを行った．アンケート結果に主成分分析を行ったところ，1)飛びと打球の安定性，2)重さ感・硬さ感，3)スイングのし易さ，4)打球感・打球音の 4 つの因子にまとめられた．各クラブの評価として，102 人分の評価が存在するわけだが，1 つのクラブに対して 102 個の評価を対応させるのは非常に困難である．そこで，各被験者のアンケート

結果の類似度に基づいて被験者をグループ化し，各グループの代表値を求めることで，これをグループに属する人間全体の感性評価値として扱う．グループ分けには，クラスター分析の代表的な手法であるウォード法を用いている[2]．ウォード法では，分類対象である要素間の類似度は，ユークリッドの平方距離の 1/2 により定義されており，クラスターを逐次統合する毎に類似度が更新される．以上の方法により 102 名の被験者は，5 個のグループに分類された．各グループの代表値には，構成員の主成分得点の平均値を用いた．ここで，次の条件を満たさない被験者は削除した．

<条件>

$\Delta an_\Delta bx \leq \Delta an_\Delta bm \ (x \neq m)$

$\Delta an_\Delta bx \leq \theta$

an : 被験者の主成分得点
bm : 各グループの代表値
n : 1～102 被験者の番号
m : 1～5 グループ番号
x : 1～5 被験者の属するグループ番号
ΔA_B : AとBの二乗誤差
θ = 閾値

3. ニューラルネットワークによる学習

各グループに 1 つのニューラルネットワークを用意し，グループごとに学習を行う．構成は全て同じである．ここで用いたニューラルネットワークは階層型 3 層構成とし，学習アルゴリズムにはパターン認識などに適した誤差逆伝搬法を用いた．入力層はクラブの設計値パラメータ 6 種類を入力とする 6 ユニットとし，出力層は主成分分析によってまとめられた 4 つの因子にそれぞれ対応する 4 ユニットとした．データとしては，入力には設計値パラメータの値を，教師信号には先ほど求めた各グループの代表値を用いる．どちらも，0.01～0.99 の間で正規化している．また，5 本のクラブのうち 4 本を学習用データとし，他の 1 本を未知データとする．ただし，学習に用いるクラブは，偏ることなく十分全体を学習できるような 4 本の組合せとする．

4. 評価結果

学習後のニューラルネットワークに未知データを入力した時の結果の一例を図 2 に示す．代表値については，特に因子 3 の“スイングのし易さ”で違いを見ることができ，各グループの評価の違いを認識できる．これに対する評価結果は，group5 ではほぼ一致しており，未知のデータに対して評価を推測できることが分かる．group3 では多少誤差がある．これは，今回用いた学習データが少なかったために，十分な学習を行ったはずが，ただ学習パターンを記憶するだけにとどまり，入出力関係の完全な学習は行えていない可能性が考えられる．

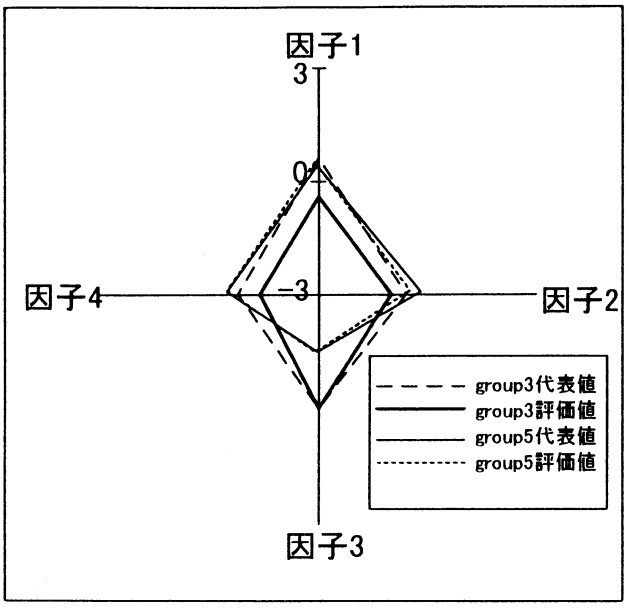


図 2: 評価結果

5. まとめ

本稿では，ニューラルネットワークを用いてゴルフクラブの設計値と人による評価の対応付けを行った．今後は，各グループの評価の違いに対する意味付けを行っていく．また，ニューラルネットワークの性能が確かめられた上で，設計値の変化に対する評価の変化を調べていく．

参考文献

[1] 井澤，片岡，佐藤（清），山下，佐藤（文），長尾，“ウェーブレット解析を用いた打撃音の感性情報処理”，電気関係学会関西支部，G17-7,1994

[2] 田中 豊，脇本 和昌，“多変量統計解析法”，現代数学社，1983

[問い合わせ先]
〒564-8680
吹田市山手町 3-3-35
関西大学工学部電子工学科　計算機研究室
菊池　彰洋
TEL：06-6368-1121（内線 5748）
FAX：06-6368-0944
E-mail: akihiro@k3ki.densi.kansai-u.ac.jp

TA5−1

曲のイメージを考慮した 対話型編曲システムに関する研究

A study about interactive harmonization system considering image of melody

木村　真理　　徳丸　正孝　　村中　徳明　　今西　茂

Mari KIMURA Masataka TOKUMARU Noriaki MURANAKA Shigeru IMANISHI

関西大学　工学部

Faculty of Engineering, Kansai University

Abstract　We construct a harmonization system considering arranger's personality and his sence. In the past, we have constructed the membership functions of fuzzysets by using some parameters that arranger determined as his likes. But the mithod of reasoning chord progressions makes music theory main constituent, and defining the membership functions is difficult for beginers. Therfore, in this paper, we make to correspond the chord progression patterns and adjective, and propose to construct the interactive hermonization system that reflects personal individualities.

1　はじめに

本研究の目的は，高度な知識を必要とする作業について，専門知識を持たない人間の補助を行うシステムを構築することである．人間の持つ専門的知識の中には，主観や経験による曖昧性を含む問題が多い．そこで本論文では，このような曖昧性を含む専門知識として，メロディの和声付け問題を取り上げる．人間の個性や好みなどの主観的要素を加味した返答を行うことができ，コンピュータと人間がやり取りすることで人間と共同で作業を進めることのできる人間的な補助システムの構築を試みている．

既に徳丸らの編曲システム[1]でファジィ集合のメンバーシップ関数をユーザが定義することにより個人の主観を取り入れてきたが，コード推論方法が音楽理論主体であり，ファジィ集合[2]のメンバーシップ関数の定義が初心者には困難である．このため本研究では，コードの再検討を行う過程でコード進行のパターンと感性語の対応付けを行い，個人の主観性を反映させた「対話型」編曲システムの構築を目指している．

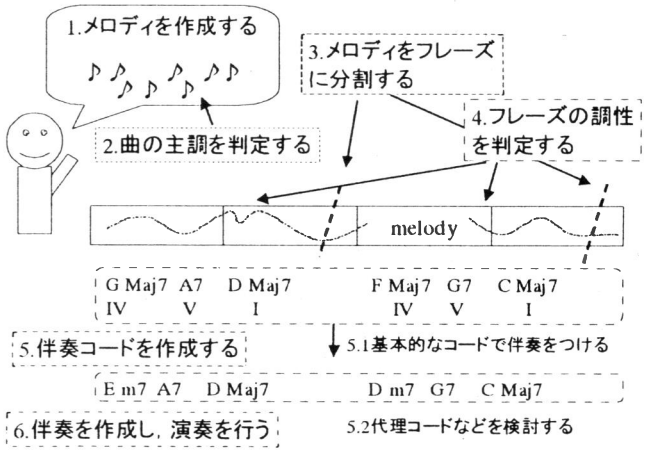


図1　編曲のプロセス

2　対話型編曲システム

2.1　システムの構成

本システムは，音楽知識をもたない初心者でも，自分が考えたメロディに伴奏を付け，演奏を楽しむことができるように編曲作業の支援を行うことを目的としている．そこで，人間が単音のメロディを作り，演奏を行うまでのプロセスは図1に示す6つの過程に分類する．過程5については，さらに5.1と5.2の2つの過程に分類する．本システムはこれらのプロセスに従ってメロディの和声付けを行い，編曲者と対話をしながら伴奏コードの再検討を行って編曲者を支援する．システムの構成を図2に示す．編曲者，すなわちユーザがMIDI楽器を用いてメロディをコンピュータに入力の処理を行い，伴奏コードを出力し，その出力結果ですると，システムはユーザに代わって図1の過程2〜5の処理

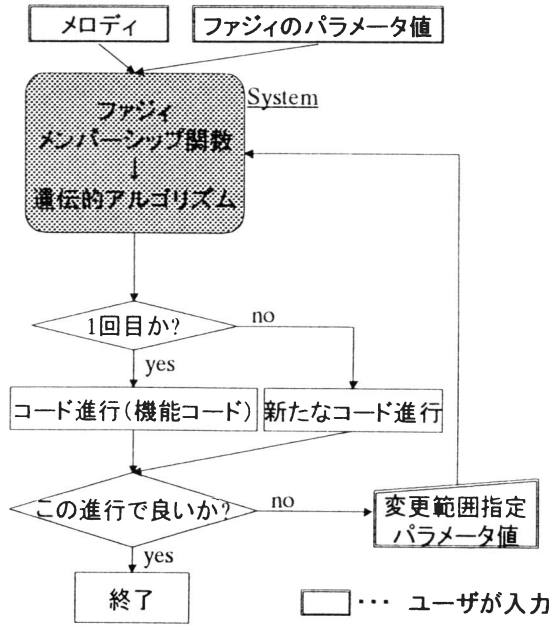


図2　システムの構成

を行い，その出力結果で良いかどうかをユーザに尋ねる．もし出力結果が気に入らなければユーザとシステムがやり取りすることで過程5.2を繰り返し，ユーザの好みにあったコード進行を提案する．ファジィ集合のメンバーシップ関数を定義することで個人の主観を取り入れ本論文ではユーザとの対話からコード進行の選出を行う過程5.2に焦点を絞ってシステムの構築を行っている．

2.2 システムに用いる音楽的知識

本システムは図1の過程2，4及び5.1について音楽的知識に基づいて処理を行っており，それぞれの過程を「曲調推論部」,「調性推論部」,「機能コード選出部」と呼ぶ．本システムで用いる調性は，長・短あわせて24個の調である．1個の調は7個の音で構成される音階を持ち，過程5.1ではこれらの音階上の4音から構成される機能コード(Function Chord)を使用する．各フレーズは，過程4で判定された調性のもつ雰囲気を損なわないようにするため，その調性の機能コードを用いて伴奏コードの作成を行っている．

前述の3つの処理部は，それぞれ2つの基本的な音楽的原則に基づいて処理を行っている．曲調推論部は，入力されたメロディ全体の主調の判定を行う．現代の音楽は，曲の途中で何度か転調を行うものが多いが，曲の多くの部分を占め，曲の終わりを印象づける調性が存在する．本システムではこの調性を曲の主調としている．曲調推論部で用いる音楽的ルールは次の2つである．

(1) メロディの多くの部分の雰囲気と調性感が一致する
(2) メロディの最後の音と調性感が一致する

調性推論部は，過程で分割されたフレーズ毎の調性判定を行い，次の2つの音楽的ルールを用いる．

(3) フレーズの雰囲気と調性感が一致する
(4) 主調に近い雰囲気をもつ調である

機能コード選出部は，過程4で判定された各フレーズの調性に基づき伴奏コードの推論を行う．伴奏コードは，伴奏コードの和音とその部分のメロディの雰囲気が一致することが重要であるが，それ以外にもある種メロディとは独立した「和音の移り変わりによる響きの変化の印象」に密接に関わっているため，次の2つの音楽的ルールを用いる．

(5)伴奏コード(和音)の響きとその部分のメロディの雰囲気が一致する
(6) 伴奏コードの繋がりが自然である

以上に述べた知識の中で(1)～(3)及び(5)は，メロディを作っているそれぞれの音をユーザがどのように解釈しているかが重要なポイントになっている．本システムでは，音楽に含まれる様々な要素からメロディを構成する各音の相対的重要度を判定し，ユーザのメロディ解釈のモデル化を行っている．

3 音の相対的重要度

本システムではメロディの印象による各音の重み付けを行うために，メロディを構成する各音の重要度を以下に示す3個の重要度を用いて決定している．

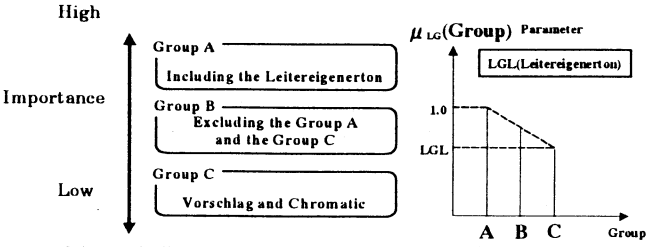


図3 音階固有音を考慮した各音の相対的重要度

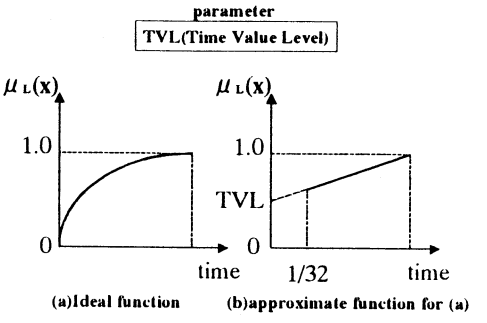


図4 各音の存在時間に関する重要度

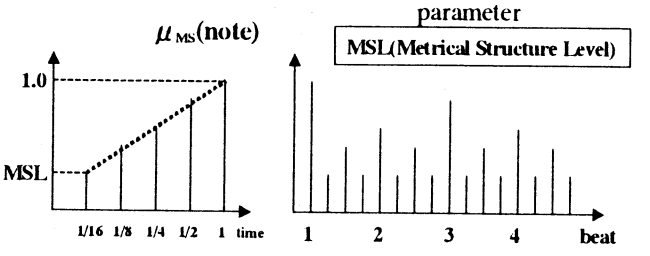


図5 強拍・弱拍位置に関する音の相対的重要度

(a) 音階固有音を考慮した各音の相対的重要度(図3)
(b) 各音の存在時間に関する重要度(図4)
(c) 強拍・弱拍位置に関する音の相対的重要度(図5)

各音の相対的重要度を表すメンバーシップ関数 $\mu_N(note)$ は次式で表される．

$$\mu_N(note) = \mu_{LG}(Group) \cdot \mu_{Length}(t_k) \cdot \mu_{MS}(beat) \quad (1)$$

4 コードの種類とコード間の繋がり

本システムでは，過程5を基本的なコードである機能コード(Function Chord)でコード進行を選出する過程5.1と，代理コードなどを検討して新たなコード進行を選出する過程5.2に分割する．

過程5.1で使用する機能コードとは，ダイアトニック・コードの中でも他のコードより調性を強く感じさせるコードのことで，トニック・コード(Tonic Chord :I Maj7,I m7)，サブドミナント・コード(Sub Dominant Chord :IV Maj7,IV m7)，ドミナント・コード(Dominant Chord :V7)がある．ここではスケールの1番目，4番目，5番目に位置するコードをそれぞれトニック・コード，サブドミナント・コード，ドミナント・コードとする．ダイアトニック・コードのうち，機能コード以外のコードはほとんどこの3種に属し，機能コードのどれかの代理コード(それぞれの機能の代理をするコード)と見ることができる．ダイアトニック・スケールに

表1　ハ長調(Key of C Major)における
機能コードと代理コードの関係

	I	II	III	IV	V	VI	VII
note	c	d	e	f	g	a	b
Chord	C Maj7	D m7	E m7	F Maj7	G 7	A m7	Bm7♭5
Function Chord	Tonic			Sub Dominant	Dominant		
代理 Chord		Sub Dominant	Tonic			Tonic	(Dominant)

おける機能コードと代理コードの関係の一例を表1に示す．

過程5.2では，機能コードに加えてそれぞれのコードの代理コードやダブルドミナントを考慮に入れて新たなコード進行をユーザに提案している．

また，過程5.1ではコードの自然な流れのことである，「コード進行の妥当性」を考慮する．これは，本来人間が伴奏コード付けを行うプロセスでは，コードを一つ一つばらばらに当てはめていくのではなく，多項関係として前後数小節単位で伴奏コードを付けていくことから，必要であると考えられる．例えば，コード進行のパターンとして，Sub Dominant Chord → Dominant Chord → Tonic Chord となるパターンは十分に考えられるが，Dominant Chord → Sub Dominant Chord → Tonic Chord というパターンは考えにくい．このコード進行の基本的なパターンを「ケーデンス(Cadence)」[3]と言い，機能コードによる基本的なパターンは，以下のようなものがあげられる．(ただし，T :Tonic Chord, D :Dominant Chord, SD :Sub Dominant Chord)

(1) D → T
(2) SD → T
(3) SD → D → T

メロディの伴奏コード付けは，このパターンが組み合わさりつながること，すなわちパターンの羅列によって行われると考えられる．これらのパターンを用い，実際に高度な音楽的知識を持たない編曲者でも，進行感の心地よい好みの伴奏コードを得ることができる．しかし，ケーデンスを構成する各コードが可変長であり，そのつながったものであるケーデンス自体も可変長であると考えると，曲全体のコード進行パターンは無数にあると考えられる．そこで，本システムでは遺伝的アルゴリズム(GA)[2]の手法を用いることで，伴奏コードを多項関係として扱っており，3で述べた音の相対的重要度を用いて個体の評価を行っている．

5　コード進行の印象の評価

本システムでは，過程5.2において個人の主観性を反映させるために，コード進行のパターンと感性語の関係を調べている．コード1つ1つの印象と，数小節単位のコード進行の印象は異なるため，4小節を一単位とした様々なコード進行のパターンについてSD法[4]に基づく感性語評価実験を行っている．そして，得られた評価値について因子分析を行い，その結果を因子空間として表現する．因子空間上に各コード進行のパターンを配置することで，ユーザは少ないパラメータを設定するだけで自分の好みのコード進行を得ることができる．コード進行の印象の分析手順を図6に示す．

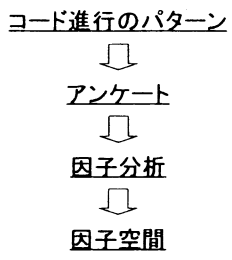


図6　分析手順

5.1 実験方法

アンケートに際しては，42個のコード進行パターンについて12種の評価語(形容詞対)を用い，それぞれ7段階で評価を行っている．曲のタイトルの代わりに，先入観をなくすため1から順に番号を用いている．音源としては，YAMAHA clavinova CVP-98を使用し，42個の進行パターンをカセットテープおよびMDに録音している．実験に使用した形容詞対を表2に示す．

被験者としては音楽経験が十分にあると考えられる5年以上の経験者50名を対象としている．被験者は，1曲(4小節)の試聴が終了した時点で12個の形容詞対についての評価を行い，評価が終わったところで次の曲に移る．

5.2 因子分析

5.1の結果について因子分析を行い，第3因子まで求めている．因子分析には主因子法，セントロイド法などがあるが，ここでは，因子負荷の絶対値和を第1因子から順次最大をするような因子解を求めていくセントロイド法を採用している[4]．更に，因子の解釈が容易になるように，バリマックス法[4]によって因子軸の回転を行っている．

5.3 因子分析結果

因子分析の結果として，バリマックス回転後の因子負荷量を表2に示す．第1因子は(安定感のある - 不安定な)から(古典的な - 斬新な)までの5つの形容詞対が特に寄与度が高く，「安定感」を表していると言える．第2因子は(悲しい - 嬉しい)から(高揚 - 抑鬱)までの4つの形容詞対が特に寄与度が高く，「明るさ」を表していると言える．第3因子は(都会的な - 野暮ったい)から(進行感が強い - 弱い)までの3つの形容詞対が特に寄与度が高く，「華やかさ」を表していると言える．また，42曲の各曲について，回帰推定法[5]により求めた因子得点の一部を表3に示す．これらの因子得点を使って各曲を因子空間上に配置し，コード進行のパターンを幾つかのグループに分類している．

6　伴奏コードの再検討

5.3で得られた因子空間を過程5.2に適用する．ユーザは

3つの因子の要素値を入力することにより，ユーザの好みのコード進行を得ることができると考えられる．再検討部の流れを図7に示す．新たなコード進行のパターンは次のようにして求める．新しくユーザに入力されたコード進行のイメージを表す要素値を基に因子空間上に点を取る．システムはその点と因子空間上の各点の距離を比較し，最も距離の短いパターンを選出する．ユーザが入力した点と因子空間上の各店との距離は次式で求められる．

$$Differ_l = (dif_t1^2 + dif_t2^2 + dif_t3^2)^{1/2} \qquad (2)$$

本研究では，ユーザとコンピュータが対話形式でこの流れを何度も繰り返すことによって，ユーザの個性を反映させ，ユーザの好みのコード進行を提案する．

7 まとめ

本論文では，コード進行のパターンとそのイメージ(形容詞対)との関係を調べ，3つの因子に集約することができた．

表2 因子負荷量

形容詞対	安定感	明るさ	華やかさ	共通性
安定感のある－不安定な	**0.729**	0.216	0.295	0.665
緊張感のある－リラックスした	**-0.664**	-0.132	0.062	0.463
穏やかな－激しい	**0.659**	-0.030	0.062	0.440
くどい－あっさりした	**-0.563**	-0.252	-0.318	0.482
古典的な－斬新な	**0.487**	0.023	-0.329	0.346
悲しい－嬉しい	-0.191	-0.794	-0.125	0.683
寂しい－にぎやかな	-0.047	**-0.769**	**-0.115**	0.607
明るい－暗い	0.131	**0.630**	0.303	0.506
高揚－抑うつ	0.048	**0.564**	0.516	0.586
都会的な－野暮ったい	-0.061	0.096	**0.654**	0.441
生き生きした－生気のない	0.174	0.468	**0.627**	0.642
進行感　強い－弱い	0.124	0.216	**0.527**	0.340
寄与度	2.069	2.342	1.791	

表3 因子得点

曲番号	因子1	因子2	因子3	グループ番号
:	:	:	:	:
21	0.327	-0.349	-0.028	16
22	0.233	-0.255	-0.550	16
23	-1.483	-0.496	-0.559	12
24	-0.910	-0.364	-0.433	11
25	-0.563	-0.478	-0.399	11
26	0.638	-0.533	1.652	17
27	-0.322	0.364	0.943	5
28	-0.176	-0.625	-0.185	11
29	-0.350	-1.538	-0.438	18
30	-1.068	-0.323	0.209	19
31	0.388	-1.071	0.743	17
32	0.483	-0.159	-0.736	16
33	0.226	0.409	0.383	7
34	0.427	0.721	-1.084	14
35	0.866	0.708	-0.044	14

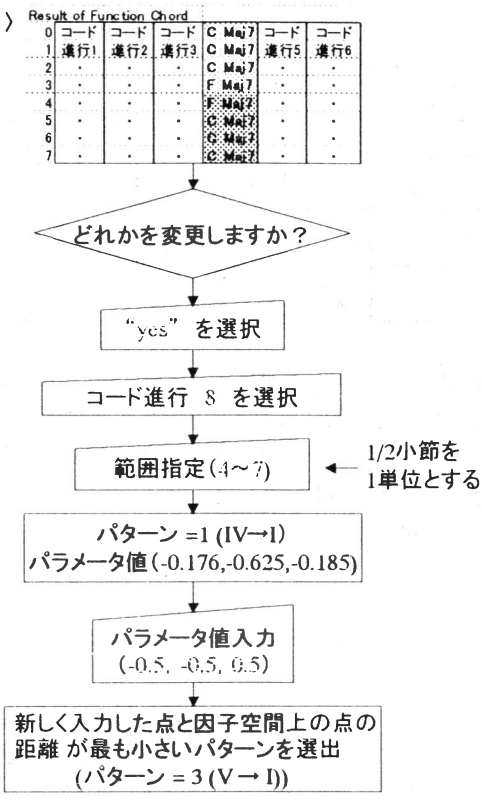


図7 伴奏コード再検討部

これにより，従来の編曲システムでは困難であったパラメータの設定が，経験の浅い者や初心者でも容易にできるようになると考えられる．今後は更にユーザが操作しやすくなるよう，パラメータ値を入力するのではなく,「もっと明るく」や,「もう少し落ち着いた感じ」など，言葉によるパラメータの変更など，インターフェース面も改良していく予定である．また，ユーザの個性を学習することも検討する．

参考文献

[1] 徳丸ほか，“パートナー型編曲システム“HASCAP”における編曲の主観的曖昧性を含む音楽的知識の導入について”，日本ファジィ学会誌，vol.10,no.5, pp876-887,1998

[2] 萩原，“ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム”，産業図書，1994

[3] 草野，“すぐに役立つコード進行ガイドブック”，シンコー・ミュージック，1993

[4] 岩下豊彦，“SD法によるイメージの測定”，川島書店，1983

[5] 菅民郎，“多変量解析の実践”，現代数学社，1993

[問い合わせ先]
〒564-8680　　吹田市山手町3-3-35
関西大学工学部電子工学科計算機研究室
木村　真理
Tel: 06-6368-1121(内線5748)
Fax: 06-6368-0944
E-mail: kimura@k3ki.densi.kansai-u.ac.jp

TA5−2

自動作曲システム

Automatic Composition System

三重野　芳典　　椎塚　久雄

Yoshinori MIENO　　Hisao SHIIZUKA

工学院大学　情報工学科

Kogakuin University

Abstract We propose an automatic composition system that is based on Markov process and the genetic algorithm (GA). It is shown that the pitch name depends on The Markov process and the total arrangement of composed music will be refined by using the genetic algorithm.

Our primary purpose is to design the automatic composition system which provides human KANSEI.

1．はじめに

自動作曲を扱った類いの研究は、今まで数が数えきれないほど行われてきた。しかし、今までの研究では、あまりにも機械的過ぎて、人間の知識や経験などが全く生かされていないものが大半であった。

そこで、本研究は、この欠点を補い、音楽理論に照らし合わせた上で、人間が聞いても不自然ではない、芸術としての自動作曲の確立を目指し、システム化したものである。この欠点を補うシステム上の理論であるが、主にマルコフ情報源と遺伝的アルゴリズムを使用して作成した。

2．情報理論について

本研究では、特に情報理論の中でも、マルコフ情報源について着目して、研究を展開した。なぜ、このマルコフ情報源が重要であるかというと、音のつながりを表現するのに、最適であったからである。

さらに、相対エントロピーを用いることにより、音のつながりの規則性を判定することが可能となった。本研究では、規則性の判定を50％として、ＧＡへと展開している。

3．遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）について

ＧＡを簡単に説明すると、生物の遺伝や進化を擬似的に、計算機で計算する方法である。そのためには、初期遺伝子集団の決定、遺伝子の交叉、評価処理、その評価に対する制限（淘汰・増殖）、また、予測不可能な突然変異などに分類される。

本研究では、初期遺伝子集団をマルコフ過程から選定した。選定された音列（遺伝子列）の交叉と評価処理の制限をＧＡから設け、それに当てはまる音列を選択し、最終結果として出力した。ここで特に強調したいのが、人間の経験と知識が、評価制限で表現されていると言うことである。

4．音楽理論について

本研究では、音楽の知識を得るために、音楽理論を採用した。また、楽典との併用により、より一層、音楽に対して、理解を深めることが可能となった。

また、本研究では、音列の情報源として楽譜の採譜する作業（情報収集）があった。そのため、音楽の知識が必要不可欠であったため、採用したのである。

5．システムの流れ

最終目標は、実際に人が聞いても不自然とは感じられない曲作りである。そのためには、採譜作業がとても重要になってくる。と言うのも、このシステムでは元となる譜面の情報が必要で、その情報は多ければ多いほどいいわけである。

その情報を元に、マルコフ情報源で音のつながりを

表現し、その結果から、ＧＡで人間の経験と知識を評価処理として、最終的な結論を導き出している（システムの流れを図1.1に示す）。

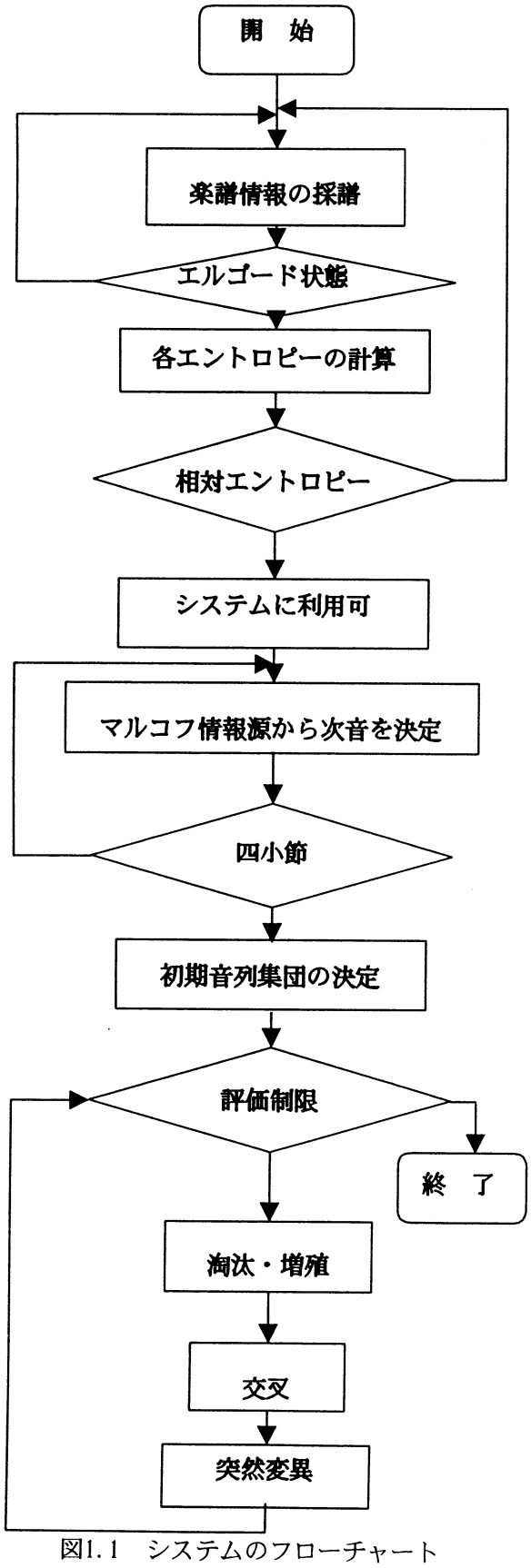


図1.1　システムのフローチャート

6．まとめ

システムを構築し、実行した結果から得られたものは、非常に興味深いものであった（システムの結果を図1.2に示す）。もちろん、実際に人が聞いても不自然ではなかったのだが、情報源として採譜した音楽家の癖をも、ものの見事に再現していたことであった。これに対しては、非常に価値のある結果であったと満足している。

しかし、楽曲を採譜する作業効率が悪い上、作曲といってもまだまだ初期の段階である。これらの問題点を、今後どのように解決していくかが課題であり、研究の余地がまだ残されていることが言える。

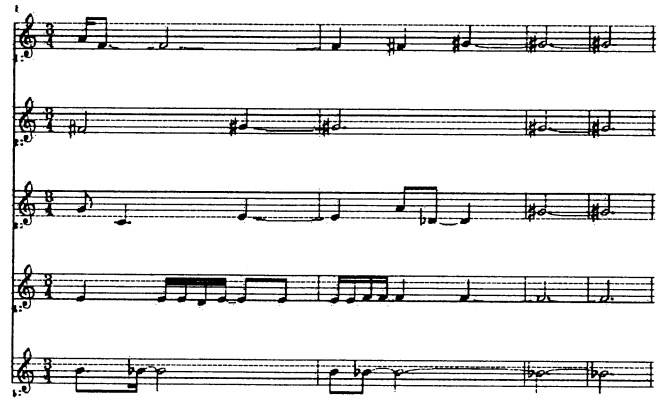


図1.2　システムからの実行結果

【参考文献】

[1]南敏：“情報処理(第２版)”、産業図書、1995.

[2]北野宏明：“遺伝的アルゴリズム”、産業図書、1993.

[3]森口繁一：“応用数学夜話”、日科技連、

[問い合わせ先]

〒163-8677

東京都新宿区西新宿1-24-2

工学院大学　情報工学科数理情報学研究室

三重野芳典（情報学専攻）

Tel：03-3342-1211(代表)　内線：2649

Email：em00028@ccs.kogakuin.ac.jp

TA5−3

教育評価としての感性評価の実践活用とその意義について（1）

○中島　洋一（滝川市立江陵中学校、空知マルチメディア教育実践研究会）
但馬　文彦（横浜国立大学教育人間科学部）松田　修三（法政大学工学部）、
小田　哲久（愛知工業大学工学部）、　　宮武　直樹（法政大学工学部）、

要旨

我々は緩やかで共感的な工学的評価手法の一つしての感性評価法を数年にわたって継続的に研究してきた。今回、感性評価の理論モデルとして従来活用してきた、λ-fuzzy積分法（FIM法）に新たにfuzzy多項目並列評定法（fuzzy-set Concurrent Rating Method：FCR法）の次元軸を加え、子どもの心理状態の矛盾度を指導者との距離に置き換えて、心理的な揺らぎを取り出すことに成功したので、これを報告する。

キーワード

感性評価法、λ-fuzzy積分法（FIM法）、fuzzy多項目並列評定法（fuzzy-setConcurrentRatingMethod：FCR法）

1，はじめに

我々の感性評価研究は、中学校現場における教育評価のあり方への批判と直接結びついて継続されてきた。子どもをテストの得点によってのみ順番輪切りで評定し、これによって個々の子どものよさや可能性を引き出すことなく、入試選抜システムへ送り込み、端末入力可能な数値データに個人の価値を置き換えるという「物としての扱い」を行ってきたことへの深い反省があることを告げねばならない。

今回、感性評価の理論モデルとして従来活用してきた、菅野氏のλ-fuzzy積分法（FIM法）に新たに愛知工業大学小田氏のfuzzy多項目並列評定法（fuzzy-set Concurrent Rating Method：FCR法）を加え、次元軸を増やすことで、子どもの心理状態の矛盾度と従来の感性度との分散として表現し、これを指導者との距離として、継続的に測定し、子どもの心理的な揺らぎを取り出してみた。以下、その具体的な内容と方法を紹介する。

2，理論モデル

（1）λ-fuzzy積分法
(fuzzy integral Method：FIM法)

X：評価項目の有限集合＝｛X_1、X_2、X_3、・・・・X_n｝

$F = 2^X$

μ：ファジィ測度μ：F→〔0.1〕

$\mu_{(\phi)} = 0$，　$\mu_{(X)} = 1$

A、B∈F、A⊂B→　$\mu_{(A)} = \mu_{(B)}$

Z_j＝j番目の評価対象のfuzzy積分は、

$Z_j = \bigvee_{j=1}^{n} \{X_{(xj)} \wedge H_{(j)}\}$ となる

参考文献：94.10第20回教育工学研究協議会研究論文集：p137、ショケ積分を用いた書写の評価についてより

（2）fuzzy多項目並列評定法
(fuzzy-setConcurrentRatingMethod：FCR法)

矛盾度：{Positiveかつ Negative} 公式1

$$I_1 = \frac{\int_{(x-G)^2 \mu(X)\,dx}}{\int_{\mu(X)\,dx}}$$

矛盾度（[0.1]区間内実数値）：公式2

$I_2 = \min(\alpha/\beta、\beta/\alpha)$

関心度：公式3

$I_3 = 0.5 \times (\alpha+\beta) \times \min(\alpha/\beta、\beta/\alpha)$

整合度（矛盾度の逆指標）：公式4

$$I_4 = \frac{\int_{(x-G)^3 \mu(X)\,dx}}{\int_{\mu(X)\,dx}}$$

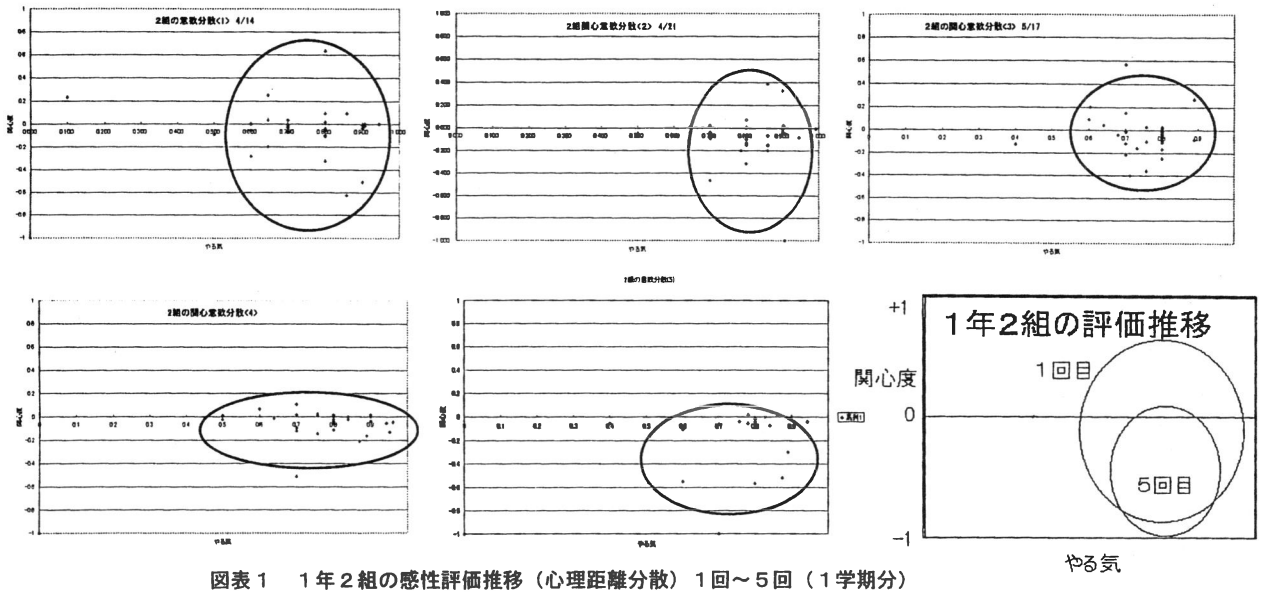
緊張度（重心まわり3次モメントの絶対値）：公式5

$$I_5 = \frac{\int_{(x-G)^3 \mu(X)\,dx}}{\int_{\mu(X)\,dx}}$$

参考文献：95.3第5回ノンエンジニアリングファジィ学会講演論文集：p104、FCR法の心理学への適用より

3，実践応用

学級開きは教師と子どもの出会いの場面である。個々の子どもの様々な環境を教師はまだ理解しておらず、限られた情報をもとにして子どもへの指導をその状況下において適切に行う必要があると言える。学級開きは数日間をかけて、学級集団の機能を使いながら、学校生活に必要な諸々の活動を子どもに付与する作業である。このとき、教師の教育的な姿勢がその後の1年間の学級経営を左右すると言っても過言ではなく、1年のうちもっとも重要な教育指導場面である。



図表１　１年２組の感性評価推移（心理距離分散）１回～５回（１学期分）

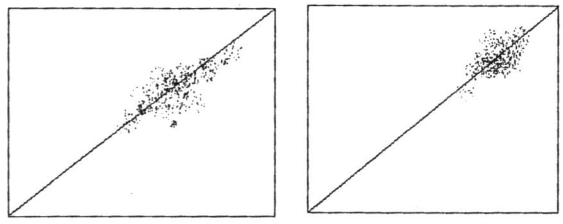
さて、学級指導の数日後から１学期間をかけて５回のデータを質問紙形式で行う。(図表２参照)アンケートの内容は以下の通りである。

1，全ての質問に１０段階の評価数字を入れて答えてください。
(1) あなたはこの学級にどのくらい慣れましたか
(2) あたなは自分たちのクラスメートの学活態度はどれくらいよいと思いますか
(3) あなたは自分たちのクラスメートの授業態度はどれくらいよいと思いますか
(4) あなたは自分たちのクラスメートの休み時間の態度はどれくらいよいと思いますか
(5) あなたは学校でどのくらい楽しいですか
(6) あなたは学級でどのくらい清掃活動や給食配膳がスムーズにできると思いますか
2，全ての質問に0から１０の間にチェックを入れて答えてください。
(1) あなたは学級担任の話し方・接し方がどのくらい好きですか
(2) あなたは学級担任の話し方・接し方がどのくらい嫌いですか
(3) あなたは学級の態度・雰囲気がどのくらい好きですか
(4) あなたは学級の態度・雰囲気がどのくらい嫌いですか

初めの質問はFI法によって処理される感性評価である。これによって子どもの「やる気」「意欲」を見出す。次の質問はFCR法によて処理される感性評価である。これによって子どもと指導者(友達) との心理的距離を見出す。FIM法はX軸、FCR法は-1から１までの評定範囲でY軸とし、分散グラフを得た。

４，実践方法

FI法による感性評価では、子どものやる気は徐々に増加し、評価項目を変えずにおくと、一定の集団的なアパシー状態になる。これは、マンネリ化の問題と、課題克服の難易度の問題の両方を含むため、回数を多くすることは実際に用いうる上で必要がないことが理解される。また、教師の絶対評価との相関においても図表２のように緩やかに変化することがわかっており、適切な評価のタイミングによって、子どものやる気を大きく引き延ばし、これが教師の直感評価を支援していることがわかる。



図表２　教師の直感評価と感性評価（FI法）の相関推移

また、FCR法によって、子どものPositiveかつNegativeな心理状態を次元軸からの距離で表れると考えてみた。この考察では、「好きかつ嫌い」という矛盾した状態をチェックによって示し、これを実長で測定し、計算数値化して表現する。図表１は今年度滝川江陵中学校１年２組のデータである。これでは担任との心理的な距離が開きつつ、意欲は向上していることがわかる。FCR法では好きと嫌いを足し合わせた長さがチェックバーの長さに等しい場合に矛盾は測定されない。中学１年生ではこれをすぐに理解せず、質問の二つを切り離して考える傾向が見られるため、はっきりとした矛盾が取り出せることになるのである。

５，考察と今後の課題

FI法とFCR法を組み合わせることによって、子どもの心理状態の変化を見出すことが可能になった。しかし、曖昧な状態を保持した評価方法には子どもを優しく支援するよさのある反面、現状に対する厳しい評価へ「忍耐」「克苦」という態度を形成させる上の弱さがあることを否定できない。やる気を持続しながら、なおかつさらに自分自身に厳しさを求めていくような評価のあり方は今後の課題としたい。

TB1−1

CGを利用したマシンの3次元構造進化システム

A system for evolving 3D machine structure using CG

澤 亮治　　萩原 将文
Ryoji Sawa　Masafumi Hagiwara
慶應義塾大学
Keio University

Abstract In this paper, we propose a system of evolving virtual machine structure in three-dimensional space. It is easy for users to design the structure of machines in the system by use of Computer Graphics(CG). The system can acquire suitable machine structures for given virtual world by evolutionary approach. Most of the conventional systems using evolving approaches are restricted to the two-dimensional ones or the morphology of virtual creatures. In the proposed system, first, the virtual environment in which virtual machines move is set. Next, all types of the machine parts data are inputted to the system. A machine structure consists of parts data and the information on the combination. One machine structure is transformed to one gene. The first population of genes is made of combination of a few parts selected at random. Offspring are generated by evolutionary techniques: selection, mutation, and crossover. The machine structure is adapted to the virtual world by repetition of evolution. We assumed a flat plane with various obstacles as the virtual environment. It is confirmed that various structures could be obtained through computer experiments.

1　はじめに

工業社会の発達により、機械の高機能化が進んでいる。この高機能化に伴う機械の内部構造の複雑化により、機械の構造決定が重要となりつつある。一般に新構造の決定では、以前の構造が基本とされる。しかし、以前の構造を踏襲するのでは、新規な構造決定は困難である。

一方、生物の構造は進化が進むごとに複雑になっている。生物の構造は初期の段階から構造が決定していたものではないが、環境に適応するように進化することで、生物は複雑な構造を自動的に獲得したのである [1]-[2]。

近年、生物の進化的な構造獲得を計算機でシミュレートする研究が行われている [3]-[6]。生物が構造を自動的に獲得したように、マシンの構造を進化的に獲得する手法は有効と考えられる。仮想環境での構造獲得は、実際に機械を作成しないためコストを抑えることができる。また、シミュレーションによる構造の有効性判定が容易という利点を有する。この分野での従来の研究では、円柱を表す線分により2次元上の荷重点を支持するモデルの進化の研究がある [3]。しかし、2次元構造の進化が可能だが、3次元への適用は図られていない。また、3次元構造の進化では仮想生物の形態獲得の研究がある [5, 6]。これらでは、シミュレーション上で仮想生物が仮想環境下で形態を獲得している。しかし、各パーツ内に動作モデルが存在し独立の機能を持っているため、パーツごとに異なる機能を持つマシンの構造には応用できない。

本研究では、CGを利用し、仮想環境に適応するマシンの3次元構造の進化システムを提案する。進化手法を利用し、仮想生物ではない部品ごとの特性を活かしたマシン構造の獲得を行う。CGの利用により、ユーザが3次元構造を容易に理解することが可能となっている。

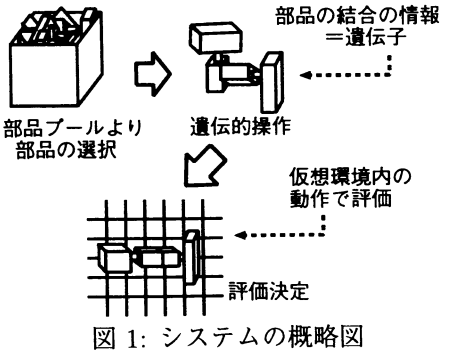


図 1: システムの概略図

2　提案システム

2.1　構造進化システム概略

環境に適応するため、生物は少しずつ機能を追加する形で自らの構造を進化的に獲得している。一方、マシンの構造は機能の異なる部品の結合であるが、生物と同様に、進化的に獲得することが可能であると考えられる。

ここでは、提案するマシンの3次元構造進化システムの概略 (図1) について説明する。提案システムでは、まずユーザがマシンを動作させる環境、およびマシンを構成する部品の集合である部品郡を設定する。進化システムは、部品郡からランダムに部品を結合させ、初期のマシン構造を決定し、これを遺伝子型 (genotype) に変換し初期遺伝子を作成する。マシン構造はパーツの種類と結合情報で表現され、遺伝子型に変換される。初期遺伝

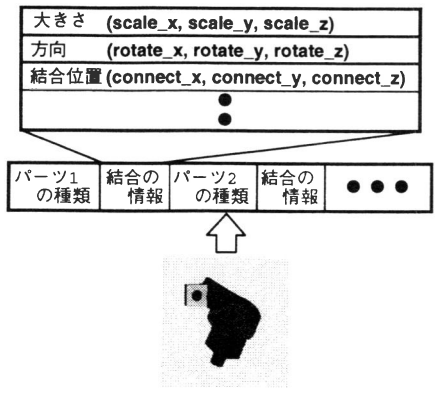


図 2: 遺伝子コーディング

子に遺伝的操作が行われ、遺伝子は進化する。進化後の遺伝子は表現型 (phenotype) であるマシン構造に再変換され、環境内に発生する。マシンは仮想的な環境内で動作を行い、動作結果によりマシンの適応度が決まる。

2.2 構造を表現する遺伝子

提案システムでは一つのマシンの構造を、一つの遺伝子で表現している。マシンの構造は複数の部品の結合で構成される。遺伝子は図 2に示すように部品の種類など部品固有の情報と部品間の結合の情報で構成される。

パーツの情報には、大きさ (scale 要素)、軸方向の向き (rotate 要素)、結合位置 (connect 要素) がある。パーツは 3 次元形状であるため、各要素は (x, y, z) の 3 値を持つ。scale 要素はパーツの形状データに掛けられ、大きさを決定する。rotate 要素はパーツの軸方向の向きを表しており、初期のパーツ (軸方向:z軸) の向きが変更される。大きさに scale 要素を適用後のパーツに connect 要素が掛けられ、掛けた後の値がパーツの結合位置となる。図 3に結合情報をパーツに適用した後の変化を示す。

これらの要素を持つ遺伝子に対し、遺伝的操作として淘汰、突然変異、交叉を適用する。

2.2.1 淘汰

遺伝子の環境に対する適合度に従い、淘汰の操作を行うことで、より適合度の大きい個体を環境に残す。

淘汰の方式は、t_{size}のサイズを持つトーナメント方式とした。この方法では、全遺伝子からランダムに t_{size}個の遺伝子を選び、最高の適合度の遺伝子を次世代に子孫として残す。この過程を集団数が得られるまで繰り返す。

2.2.2 突然変異

提案システムでの突然変異の操作は、以下の 2 つの操作からなる。

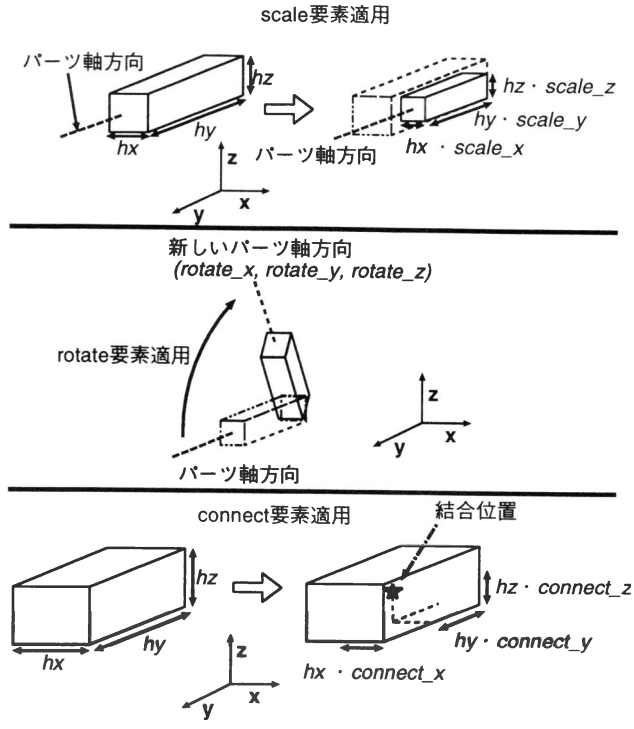


図 3: 遺伝子コーディングされるパーツの情報

1. 結合情報の変化: 変異率に従い変化させる結合情報を決定する。突然変異が起こった結合情報に対しては、新しい結合情報がランダムに決定される。
2. 新しい部品の追加: 変異率により、各遺伝子ごとに部品を追加するかを決定する。変異の起こった遺伝子は、新たな部品を遺伝子の最後に追加する。追加部品の種類・結合の情報は、ランダムに決定される。

2.2.3 交叉

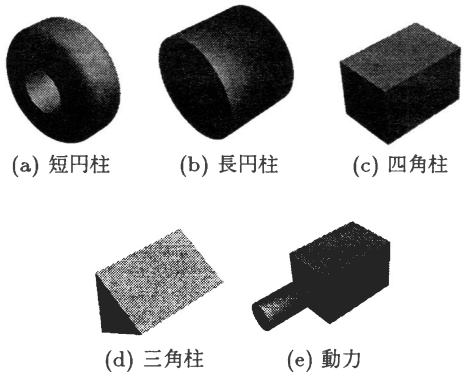
交叉の操作では、全遺伝子からランダムに選択された 2 遺伝子の結合を交換する。交叉は交叉位置が一つの一点交叉とした。選択された遺伝子内の各パーツ間の結合部分をランダムに選択し、交叉位置とし交叉を行う。

環境には、無性と有性の遺伝子が存在するとし、有性の遺伝子のみが交叉の操作を行う。有性であるか無性であるかは、交叉率に従って決定される。

2.3 評価部

評価部では、環境内での遺伝子の適合度を決定する。仮想環境では、一世代内での経過時間が定められており、この時間内で各世代の個体を動作させる。環境内での遺伝子の動作結果により、遺伝子の適合度を決定する。

提案システムを用いたシミュレーションでは、地面となる平面を仮想環境とした。そして、この平面内で一定時間動作後のマシンの移動距離を適合度として利用した。



(a) 短円柱　(b) 長円柱　(c) 四角柱

(d) 三角柱　(e) 動力

図 4: 部品群

表 1: 遺伝的操作のパラメータ

淘汰のトーナメントサイズ t_{size}	2
scale 要素への突然変異率	0.03
rotate 要素への突然変異率	0.03
connect 要素への突然変異率	0.03
最大回転角度の突然変異率	0.03
パーツの挿入の突然変異率	0.2
交叉率 (有性遺伝子の割合)	0.1
動力の最大回転角度 θ_{max}	180 °
回転角度単位 θ_{unit}	30 °

3　適用例

3.1　平面環境での進化

提案した構造進化システムを適用したシミュレーションについて説明する。マシンの動作する仮想環境として平面を設定した。各世代ごとに、一定時間が経過するまで、環境内でマシンはその構造に従って動作をする。平面上でのマシンの移動距離によって評価値を決定する。

3.2　使用したパーツ

図 4にマシンを構成するための部品群の一覧を示す。

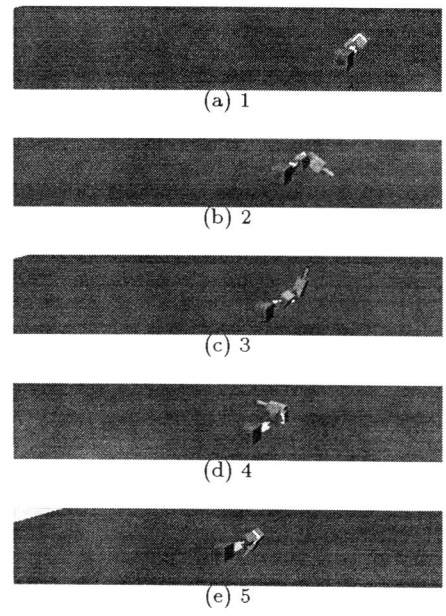
部品群から部品をランダムに選択・結合し、初期構造を作成する。これを遺伝子型に変換し初期遺伝子とし、進化させる。動力以外の部品は、大きさ (scale 要素)、向き (rotate 要素)、結合位置 (connect 要素) の情報を持つ。マシンの動力となる動力パーツには、2 つの種類がある。通常のエンジンのように同じ回転方向に回転を続ける動力と、回転角が制限されている動力である。回転角が制限された動力に結合したパーツは、振り子のような動作をする。回転角が制限された動力は最大の回転角度の情報を持ち、他のパーツ情報と同様に突然変異が起こる。突然変異が起こった場合、最大の回転角度θは次式で決定される。r は、一様乱数 [0,1] である。

$$\theta = (r \times \frac{\theta_{max}}{\theta_{unit}} + 1.0) \times \theta_{unit} \quad (1)$$

θ_{max} : 最大回転角度, θ_{unit} : 角度の振り幅の単位

3.3　評価値

設定した平面は (x, y) 平面であり、z軸が高さとなる。遺伝子の先頭パーツを構造の胴体部分とし、胴体部分の底面が (x, y) 平面と並行になるようにする。時間経過ごとに動力パーツの動作により、マシンが移動する。移動ベクトルは、マシンと地面との接地部分の動作により計算される。移動ベクトルは (x, y) 平面に並行で動力の回転軸に垂直の方向で回転軸と接地点の距離に比例した大きさとなる。移動距離は、動力の角速度と接地点と回転軸間の距離により計算される。移動距離を遺伝子に結合しているパーツ数で割った値を評価値として用いる。



(a) 1

(b) 2

(c) 3

(d) 4

(e) 5

図 5: 結果 1: 平面

4　実験結果

前述した障害物の存在しない平面を仮想環境と設定し、平面上での移動可能な構造の獲得を目指し、進化実験を行った。評価値は、移動距離をもとに計算される。遺伝的操作に利用したパラメータを表 1に示し、結果の例を図 5に示す。

図 5に示した実験では、回転軸の方向がほぼ等しい複数の動力が結合したマシンが生成された。一つの動力に地面を蹴って回転するパーツが結合したのでは、動力一つ分の回転角度しか得られない。回転軸の方向がほぼ等しい複数の動力を結合させることで、動力一つの場合と

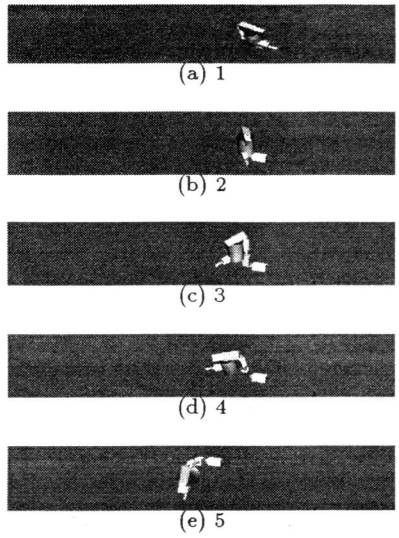


図 6: 実験結果 2: 平面

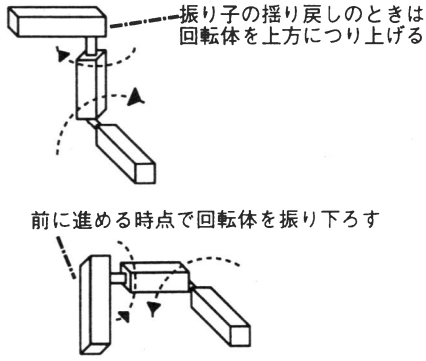


図 7: 振り子動作する動力を利用した移動

比較して回転角度を増大させての移動が可能である。

図6に示す結果は、使用する動力パーツの種類を制限した場合に生成されたマシンの構造である。動力としては、通常の同方向に回転を続ける動力は使用せず、回転角度が制限された動力のみを使用する。通常の動力と回転が制限された動力を同様に使用する場合の実験においては、進化後の最終的な個体が通常の動力を使用した個体に偏ってしまう結果となった。そこで、動力となるパーツとして角度が制限したパーツのみを使用するように制限を加えて実験を行った。

図6では、マシンは図5とは異なった進化をしている。単純に回転するだけでは、振り子の揺り戻しにより、前に進んだ後に元の位置に戻ってしまう。そこで、複数の動力を異なる向きで結合させることでこの問題を解決している。すなわち図7のように、振り子動作する動力が前方へ進む回転を行っている間は、複数の動力の先頭に結合した回転体が地面に振り下ろされる。振り子動作の揺り戻しの間は、振り下ろされたままであれば後ろに戻ってしまうため、他の振り子の動力を利用して上方に振り上げられる。

平面環境では使用するパーツの種類の制限に関わらず、複数の動力が結合して移動メカニズムを構成するような構造が獲得された。使用するパーツの種類に制限を加えない場合には、主に回転角度を大きくするために複数の動力の結合が利用される。一方パーツの種類が制限される場合には、図7で示すように前進するための工夫として、複数の動力が利用されるのが特徴である。

謝辞

本研究の一部は、文部省の分子・超分子・超構造体理工学プロジェクトによっている。

参考文献

[1] Dawkins, R.:“The Blind Watchmaker”, Harlow Longman, 1986.
[2] Wainwright, S.:“Axis and Circumference”, Harvard Univ. Press, 1988.
[3] 吉村允孝, 清水義仁: “生物の進化を模擬した創生的機械システム設計”, 機論 (C), vol.61-589, pp.3789–3797, 1995.
[4] 吉村允孝, 能勢幸嗣: “先入観のない状態からの機械システムに対する形状・機能の創成的概念設計”, 機論 (C), vol.60-571, pp.1098–1104, 1994.
[5] Sims, K.:“Evolving 3D morphology and behavior by competition”, Artificial Life IV, The MIT Press, pp.28–39, 1994.
[6] Ventrella, J.:“Explorations in the emergence of morphology and locomotion behavior in animated characters”, Artificial Life IV, The MIT Press, pp.436–441, 1994.

連絡先

〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
慶應義塾大学理工学部情報工学科
萩原研究室
萩原 将文
TEL (045)563-1141 内線 (3336)
FAX (045)563-2773
E-mail hagiwara@soft.ics.keio.ac.jp

TB1−2

共進化型ファジィクラシファイアシステムの提案

A Proposal of Coevolutionary Fuzzy Classifier System

野田 崇
Takashi NODA
岡山大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Techn., Okayama University

半田 久志
Hisashi HANDA
岡山大学工学部
Faculty of Engineering, Okayama University

小西 忠孝
Tadataka KONISHI
岡山大学工学部
Faculty of Engineering, Okayama University

片井 修
Osamu KATAI
京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

Abstract : In this paper, we propose a novel Fuzzy Classifier System (FCS) involving a mechanism of co-evolution in order not only to keep the diversity rule sets in FCS but also to maintain reliable series of actions. Proposed method, called Coevolutionary Fuzzy Classifier Systems, consists of FCS and Symbol-Level Genetic Algorithm (SLGA). In this approach, the genetic space of SLGA is regulated by rule sets of FCS, on the other hand, effective rules indicated by SLGA are preferentially survived against GA operations of FCS.

1 はじめに

未知環境下において学習者が自らの行為を通して得られる経験をもとに適切な行動則を獲得する問題を逐次意志決定問題という．このような問題を解決する機械学習手法の一つにファジィ分類子 (クラシファイア) システム (FCS) がある [1], [2]．FCS では学習者は知覚入力や行動として連続量を取り扱えることが特徴であり，これら連続量に対してファジィ数を用いることにより記号レベルで処理可能となる．

本稿では，FCS に行動列を学習する GA を併用した共進化型 FCS の提案を行なう．ここで，行動列とは，一連の発火した行動則の列をさしており，近年，通常の（ファジィではない）クラシファイアシステムで導入されている Chunk と同様のものを指している [3]．提案手法では，ファジィクラシファイアについて考えており，そこでは，単純に発火系列からではより確実に報酬へと誘う行動列を容易に見出せない．そこで，行動列を学習する GA を導入する．

2 共進化型 FCS

本稿で提案する共進化型 FCS の枠組を図 1 に示す．図に示すように，提案する共進化型 FCS は FCS と記号レベル GA の 2 つからなる: FCS は与えられた環境に対して適切な行動則を学習する．一方，記号レベル GA はより確実に報酬へと誘う行為系列の探索を行なう．この記号レベル GA に内包される個体は，FCS のルールインデックスを遺伝子としている．すなわち，記号レベル GA の探索空間は FCS によって規定されている．また，FCS で GA 操作を行なう際，行動列 GA が探索した効果的な行為系列を含むルールに対しては，バイアスを掛け，そのようなルールが壊れないように保存する．このような相互作用のもと，多様性のある行動則を模索しつつ適切な行動則を積極的に保存するよう共進化型 FCS は学習を行なう．以下では，FCS と記号レベル GA のそれぞれについて述べる．

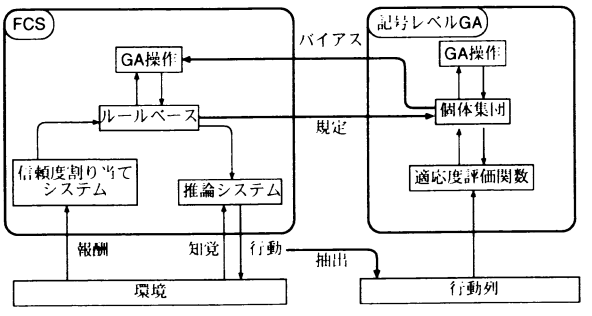


図 1: 共進化型 FCS の枠組

2.1 FCS

FCS は，ファジィルールベース部，推論システム部，信頼度割り当てシステム部，GA 操作部からなる: ルールベース部は，前件部と後件部からなるルール群で構成される．前件部と後件部ともメンバシップ関数として三角型ファジィ数を用いる．本稿では，この三角ファジィ数として，幅を固定し，左右対称とすることにより，中心値の 1 変数で表現されるものを用いた．推論システム部は，知覚入力とルールベース部に内在するルールの前件部から適合度の高いルールを選び，選ばれたルールの後件部 (三角型ファジィ数) を用いて行動を推論する．

信頼度割り当てシステム部は，知覚行為列によるに基づいて，環境から与えられた報酬を信頼度として各個体に配分する．その配分方法は，プロフィットシェアリングを用いる．すなわち，行動に関わった個体に対し，その時の適合度を積み立て，一連の行動の終りに，適合度の積み立てに応じて報酬を与え，信頼度を更新する．その計算式を以下に示す．

$$Strength_{i,j} = Strength_{i,j-1} + \Delta\alpha_i \qquad (1)$$

$$\Delta\alpha_i = \alpha_K \sum_{t=0}^{end} fitness_{i,t} \qquad (2)$$

ただし，iは個体番号，jは探索回数，$Strength_{i,j}$は個体iのj回目の探索時の信頼度，KはRもしくは，Pを表すインデックスであり$(R:Reward, P:Penalty)$，$\alpha_R(>0)$は正の報酬，$\alpha_P(<0)$は負の報酬を表している．endは探索の終了時のタイムステップである．GA操作部は，あらかじめ決められたステップ毎に起動し，ルールベース部に対し各個体の信頼度に基づき，選択，交叉，突然変異により新ルールを生成する．

2.2 記号レベルGA

記号レベルGAは，従来型GAであり，すなわち，個体集団，適応度評価関数，GA操作からなる．このGAにおける個体はFCSに内在するルールのインデックスを遺伝子として有し，それを集めたものを染色体として用いる．つまり，一個体はある行動列を表現している．適応度評価関数は，FCSがとった行動列に対して個体とのパターンマッチを行ない，各個体に適応度を割り当てる．そして，GA操作部は，個体集団に対し各個体の適応度に基づき選択，交叉，突然変異により新しい個体を生成する．

3 共進化型FCSの実装

本稿では自律移動ロボットkheperaのシミュレータ上に提案手法を実装した．kheperaは，赤外線による近接センサと光センサをそれぞれ8つ，前後左右に備えており，オプションとしてカメラなどを取り付けることもできる．

FCSの入力は赤外線による近接センサと光センサ，それとカメラによる画像とし，出力は左右に備えられた車輪の回転量とする．そこで，FCSの遺伝子表現方法を，表3のようにした．前件部としてそれぞれ8つの距離と光に対応する三角型ファジィ数$Pr_i, L_j(i=0,\cdots,7, j=0,\cdots,7)$，画像に対応する四角錐ファジィ数$Ph$のそれぞれを用いた．後件部は左右のモータ出力$Left, Right$の両方を持つ．ただし，前件部は全ての入力に対応するファジィ数を持つのではなく，ところどころにdon't care symbolが挿入されている．また，三角型ファジィはその入力が1次元であるので，2.1節で述べたように1変数で表現する．また，四角錐ファジィ数は，三角型ファジィ数を拡張したもので，画像平面上の一定範囲内の単一色を認識するために用いる．つまり，四角錐はカメラの画像内のある領域を示している．四角錐の中心は画像平面上の座標により指定され，領域の広さは一次元の三角型ファジィ数の時と同様に一定とした．さらにどの色に反応するかを指定するために，それぞれの四角錐には，RGBの3原色を用いてある色が関連づけられている．つまり，本稿では四角錐ファジィ数を中心座標(x,y)と色(R,G,B)の5変数を用いて表現する．信頼度割り当てシステム部は，行動に関わった個体に対し，その時の適合度を積み立てる．一連の行動の結果，積み立てに応じて報酬を与え，信頼度を更新する．ただし，報酬はゴール(光源)に到達した時に与えるものとする．

表1: クラシファイア

前件部	後件部
$Pr_0,\cdots,Pr_7,L_0,\cdots,L_7,Ph$	$Left, Right$

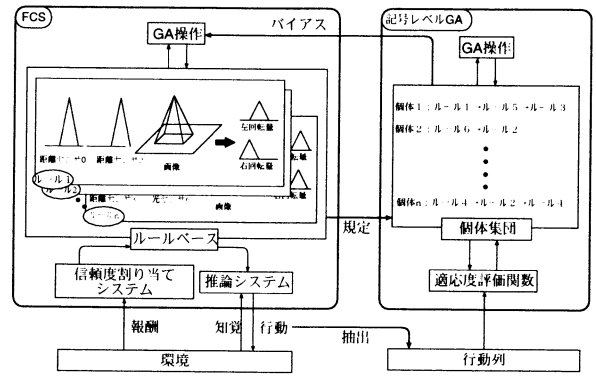


図2: 共進化型FCSの実装

4 むすび

以上のように，シミュレーション環境上で実装した提案システムについて，計算機シミュレーションを行なった．その詳細については当日発表する．

参考文献

[1] 中岡謙，古橋武，内川嘉樹，前田宏: ファジィクラシファイアシステムの報酬と信頼度割り当てに関する一提案，日本ファジィ学会誌，Vol.8, No.1, pp65-72, (1996).

[2] D.E.Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addson-Wesley, (1989).

[3] 嶋田総太郎，安西祐一郎: クラシファイアシステムにおける効率的なチェイン生成のための一手法，信学技報，pp.69-76, (1999).

問い合わせ先

〒700-8530　岡山市津島中3-1-1
岡山大学工学部　情報工学科
半田 久志
TEL : (086)251-8250　FAX : (086)251-8256
E-mail : handa@sdc.it.okayama-u.ac.jp

TB1−3

木構造表現を用いた進化的デザイン支援システム

An evolutionary design-support-system with tree structure representation

小谷 淳司　　萩原 将文
Junji Kotani　Masafumi Hagiwara
慶應義塾大学　慶應義塾大学
Keio University　Keio University

Abstract In this paper, we propose a tool creating support system using evolutionary techniques. Here, a tool is defined as an object which consists of multiple parts, and is encoded to tree structure. The proposed system is composed of two phases: the fundamental-parts-generation-phase where each fundamental part is generated, and the structuring-phase where the generated parts are combined. On each phase, evolutionary techniques which utilize user's evaluations as decision of fitness are employed. Therefore it is possible to obtain desirable shapes for users. We have implemented this system on the O2 computer, and have evaluated the proposed system. As a result, it is confirmed that various novel shapes can be obtained.

1 はじめに

設計やデザインは人間の高度情報処理機能が必要とされる場面の一つである [1]. それ故, 設計者への負担は大きく, デザインへの支援システムや自動化システムの実現が望まれている.

佐藤らは, そのようなデザイン支援システムとして, 対話型進化手法 [2] を用いて 3 次元物体のデザイン案を新しく生成し提示するという発想支援システムを提案した [3]. このシステムは, 設計対象として道具を採用し, ユーザへの効果的な発想支援を実現した. しかし, このシステムでは, 2 種類の部品から構成される道具しか作成できず, そのデザイン能力には限界があった.

そこで本論文では, 佐藤らのシステムを発展させ, 部品の数と接続構造の制限がない道具を進化的手法によって作成することによりユーザへの設計支援を行なうシステムを提案する.

2 道具の構造

道具とは一般的に, それぞれ機能を持った複数の部分構造に分割することができる. 各部分構造に注目すると, それらはさらに小さな部分構造に分けることができ, 道具は階層的な構造を持っていると言える [3]. 本論文では, 道具の部分構造を「部品」, 道具を可能な限り分解した時に得られる最小部分構造を,「基本部品」と呼ぶことにする. 道具全体や部品や基本部品の 3 次元空間での具体的な形を「形状」と呼ぶことにする.

このようなコンセプトを元にした道具を作成するシステムとして、佐藤らのデザイン支援システムがある [3]. 佐藤らの実現したシステムは 2 種類の基本部品からなる道具の形状を, ユーザの好みに応じて対話的に生成することが可能である. しかし, このシステムでは基本部品の数と構造が固定された道具しか生成することができない.

これに対し本論文では, 階層道具を持つ道具を二分木構造にエンコードして扱うことにする. この木の形を変形することにより, 任意の構造を持つ道具を実現可能である. 道具を表す木の例を図 1に示す.

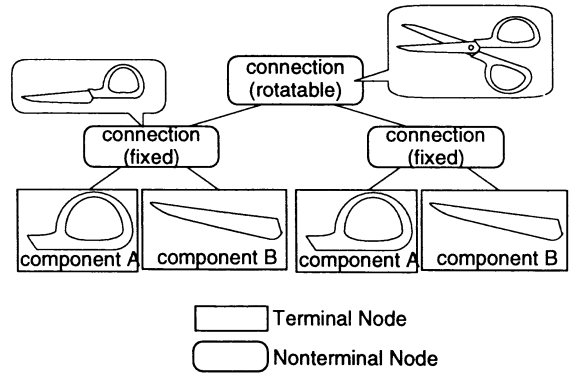


図 1: はさみの木構造表現

3 提案法

提案システムは 2 つの段階からなる. 1 つは基本部品生成段階であり, もう 1 つは構造化段階である. 前者で終端記号が生成され, それらを用いて後者で二分木構造が生成される. 図 2にシステムの概要図を示す.

ここで, ステージという言葉を定義する. 1 つのステージでは, 何らかの設計対象が設定されていて, 対象の形状が進化的手法により生成される. 基本部品が n 種類ある場合, 基本部品生成段階を n ステージに分けて種類別に形状を生成する. また構造化段階は, 得られた基本部

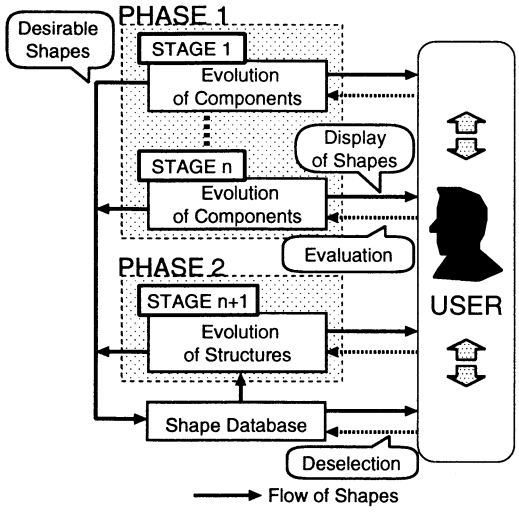


図 2: システムの概要

品を組み合わせたものを設計対象にした1つのステージからなる．したがって，本システム全体は計 $n+1$ のステージから構成されている．$n+1$ の各ステージにおける進化的計算法としては，対話型の手法を用いており，それぞれユーザの評価にしたがって対象形状が進化していく．各ステージの切り替えはユーザが行なう．

また，$n+1$ の各ステージの進化の途中で，ユーザが有用と思う形状が現れた場合には，ユーザはそれを形状データベースに保存することができる．形状データベースに保存されている形状は遺伝的操作を受けず，変化することはない．形状データベース内の形状は，構造化段階において個体を作るための部品として使用される．

ユーザは，満足のいく形状を得られるまでこれらの操作を繰り返すことができる．

3.1 個体の表現方法

3.1.1 終端ノード—基本部品形状情報

1つの終端ノードでは1つの基本部品の形状が定義される．定義される情報としては，基本部品の種類を表す値 P_{type} と，種類に依存するパラメータ集合 P である．基本部品が n 種類あった場合，P_{type} は $1, 2, \ldots, n$ のいずれかを取る．i 番目のステージ内では $P_{type} = i$ である形状が進化する．

3.1.2 非終端ノード—結合情報

非終端ノードで定義される非終端記号は，2つの子部分木が表す形状を結合させるためのパラメータ群が集まったものである．具体的なパラメータは，2部品のそれぞれの結合点 $\boldsymbol{cp}_0$, $\boldsymbol{cp}_1$，相対的な角度を表す $\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\lambda}$,

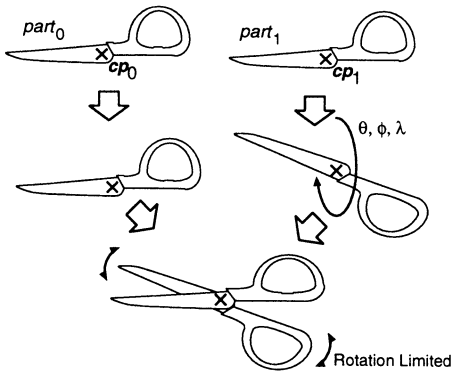


図 3: 結合の概念図

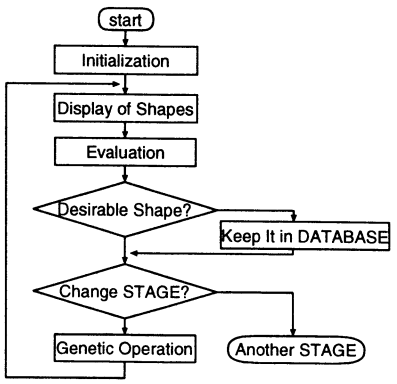


図 4: 各ステージでの流れ

相対的な部品の動作関係を表す値 C_{type}，動作の軸 $axis$ である．ここでは C_{type} として，部品間の相対的な動きが無い「固定」，$axis$ 回りに回転可能な「回転」,「回転」に対し可動角の制限を付加した「制限付き回転」，$axis$ 方向に平行移動可能な「スライド」を用意した．図3に結合の概念図を示す．このはさみの例では，C_{type} として「制限付き回転」，$axis$ として紙面に垂直な軸が選ばれている．

3.2 各 stage での進化

進化的計算法は，提案システムの各ステージで用いられる．すべてのステージでの進化は共通のユーザインタフェースを持ち，図4で示す共通の流れで進行する．実装したインタフェースの例を図5に示す．以下に共通の流れ，および各ステージでの相違点を述べる．

1. **初期化**: 第1世代の形状群が形成される．初期化の方法はステージ毎に異なる．基本部品生成段階のステージでは，種類によって異なる初期化方法を用いる．構造化段階では，形状データベース内の任意の2形状を結合させて初期形状を生成する．なお，この結合の非終端記号はランダムに生成される．

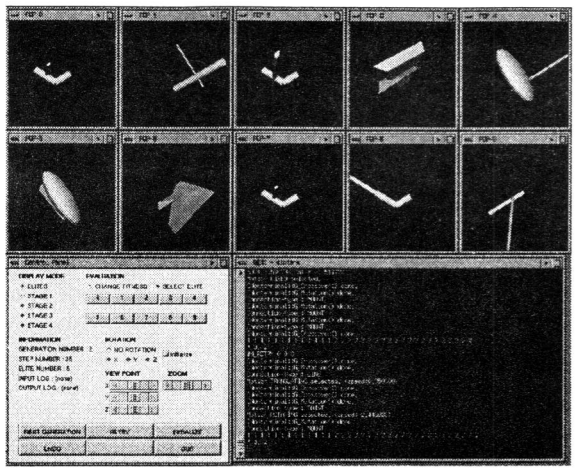


図 5: インタフェース

2. **形状の提示**: その世代の形状群はディスプレイ上に 3D CG で表示される．ユーザは任意の角度から形状を観察することができる．

3. **個体の評価**: ユーザは，提示された形状に対し評価を行なう．評価は，+1，0，-1 という離散的な 3 段階の評価値を各個体に与えることによって行なう．+1 の評価を受けた個体は，次世代において全ての個体の親となり，-1 の評価を受けた個体は淘汰され次世代に残らない．

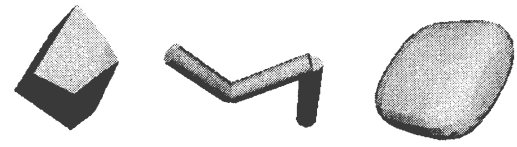
4. **個体の保存**: ユーザは，もし提示された形状の中で有用と思うものがあれば，評価とは別に形状データベースにその形状を保存する．

5. **他ステージへの切り替えの選択**: ユーザは，他ステージへの切り替えとシステムの終了を自由に選択することができる．

6. **遺伝的操作**: ユーザの評価に基づき，個体集団に対して遺伝的操作が適用される．それにより，各個体の形状が変形され，次世代の個体集団が生成される．遺伝的操作の種類と，その選択確率はステージ毎にあらかじめ定められている．なお，特に構造化段階においては，Genetic Programming[4] で用いられる遺伝的操作に類似した操作を用いている。

4 計算機実験

提案した道具デザイン支援システムを SGI 社の O2 ワークステーション上に実装した．実装したシステムでは 3 種類の基本部品を採用している．したがって実装されたシステムは 4 ステージからなる．各世代の個体数は 10 とした．まず実装した基本部品について説明する．



(a) 多面体　(b) 多関節円柱　(c) 超 2 次関数

図 6: 実装した基本部品

4.1 実装した基本部品

実装したシステムでは基本部品として，多面体，多関節円柱，超 2 次関数の 3 種類を用意した．これらの形状例を図 6に示す．多面体モデルは，凹みのない多面体として表現される基本部品である．多関節円柱モデルは折れ曲がりのある円柱である．超 2 次関数とは少ないパラメータで多様な形状を表現できる関数であり，これによる形状も基本部品として用いている．なお，これら 3 種類の基本部品には，それぞれ別個に初期形状と遺伝的操作を定義してある．

これらの基本部品を採用した理由は，現実の道具の基本部品に対して類似性があるからである．もちろん，道具とは異なる設計対象であれば，基本部品の種類を任意に変更して実装することも可能である．

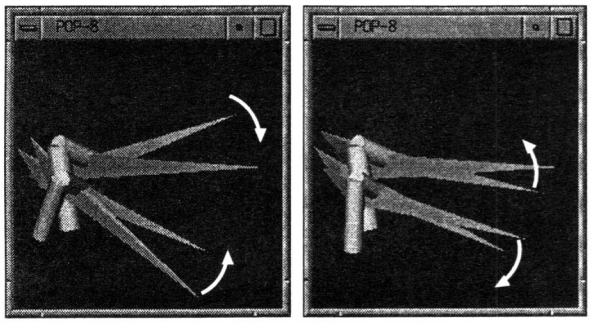
4.2 設計実験

8 名の被験者に本システムを使ってもらい「切る機能を持つ道具をデザインする」という課題を課した．それによりデザインされた道具の例を図 7に，それらの道具の構造木を図 8に示す．なお，図中の世代数とは，その形状が現れる時点までの通算世代数である．

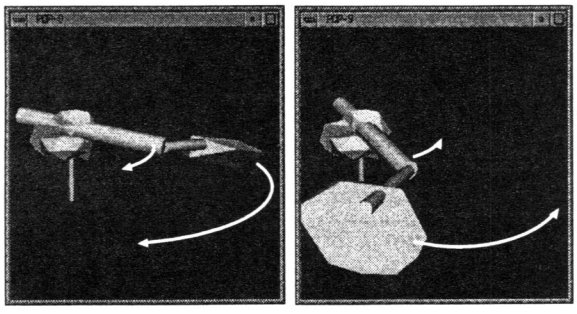
図 7(a) は，刃が 4 枚ついているはさみである．アンケートによると被験者は 2 個所同時に切れる道具を発想できたとしている．図 7(b) は，ヌンチャクのように振り回すことで切る機能を実現した道具である．図 7(c) は回転する刃を持つ道具である．また，図 7(d) はユニークな道具である．被験者はこの形状を作り出して観察することによって，物が左上の部分で砕かれ，中央部の斜面をすべり降り，右の部分で潰されるという，ジューサーのような機能を発想することができた．

このように，本システムで得られた道具は目的とする機能を実現しつつも，様々なアプローチでその機能を実現していることが分かる．

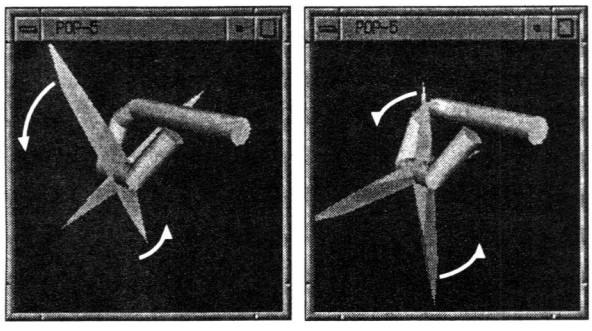
本システムで得られたようなユニークな発想は，通常は既成概念に邪魔されて出にくい．本システムは，このように設計者のアイディアを喚起するような，新しい形状を生成することができたと言える．



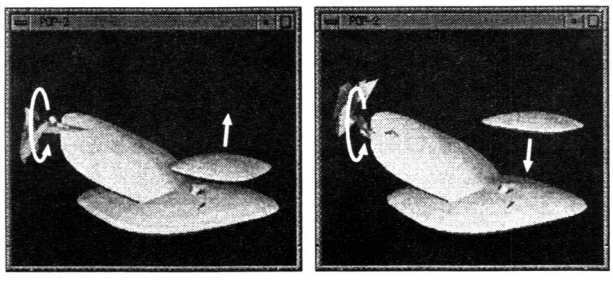
(a) 2 重はさみ (182 世代)



(b) 刃を振り回す道具 (152 世代)

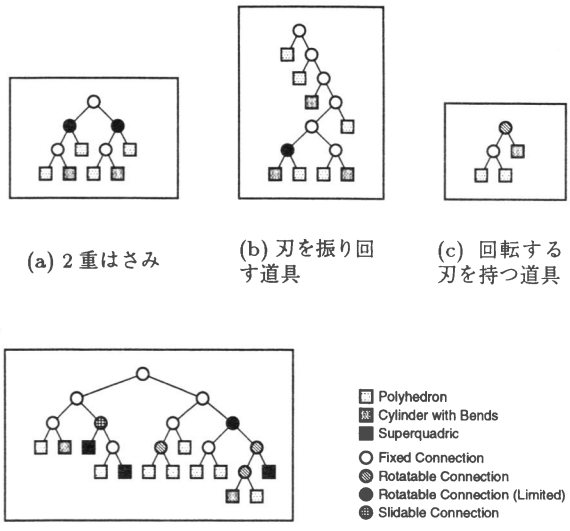


(c) 回転する刃を持つ道具 (172 世代)



(d) ジューサー (126 世代)

図 7: 得られた道具形状の例



(a) 2 重はさみ　(b) 刃を振り回す道具　(c) 回転する刃を持つ道具

(d) ジューサー

図 8: 得られた道具の構造木

5 まとめ

本論文では対話型進化的計算法を用いて，道具の形状の作成を支援するシステムを提案した．本システムによる設計実験を行なったところ，ユーザの目的にあった新しい道具の形状を生成することができた．また得られた形状の中にはユーザに対し発想の喚起を促すものも含まれており，発想支援システムとしての本システムの有効性を確認した．また，提案システムの設計対象は一般的な木構造で表現されているため，その表現の範囲は広く，様々な分野での応用が期待される．

なお，本研究の一部は，文部省の分子・超分子・超構造体理工学プロジェクトによっている．

参考文献

[1] 小林重信: “進化的計算から進化的設計論への展開,” 信学技報, AI97–6, pp. 39–46, 1997.
[2] 高木英行, 畝見達夫, 寺野隆雄: “対話型進化計算法の研究動向,” 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp. 24–35, 1998.
[3] 佐藤智也, 萩原将文: “進化的手法を用いた道具作成支援システム,” 第 15 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 363–366, 1999.
[4] John R. Koza: “Genetic Programming, on the Programming of Computers by Means of Natural Selection,” MIT Press, 1992.

問い合わせ先

〒 223-8522　横浜市港北区日吉 3-14-1
慶應義塾大学理工学部 情報工学科
小谷 淳司
TEL (045)563-1151 内線 43253
FAX (045)563-2898
E-mail kotani@soft.ics.keio.ac.jp

TB2−1

2レベル線形計画問題のStackelberg解の遺伝的アルゴリズムによる計算

A computational method through genetic algorithms for obtaining Stackelberg solutions to two-level linear programming problems

西崎 一郎
Nishizaki Ichiro
広島大学
Hiroshima University

坂和 正敏
Masatoshi Sakawa
広島大学
Hiroshima University

丹羽 啓一
Keiichi Niwa
広島経済大学
Hiroshima University of Economics

Abstract In this paper, we consider a two-level linear programming problem in which there is not coordination between the upper level decision maker (leader) and the lower level decison maker (follower). After the leader chooses a strategy, the follower chooses a strategy with full knowledge of the strategy of the leader in the two-level programming models. Such strategies are called Stackelberg solutions. A computational method, which is based on genetic algorithms, for obtaining the Stackelberg solution to two-level linear programming problem is developed. To demonstrate the efficiency of the proposed computational method, computational experiments are carried out.

1. はじめに

現実の意思決定状況においては，各意思決定者 (DM: Decision Maker) が相互に独立し，競合する目的をもち，二人のDMの決定が逐次的に行われるような2レベル計画問題として定式化されることが少なくない．2レベル計画問題における意思決定は上位レベルから下位レベルへと順に行われ，各々のレベルのDMは，他のレベルのDMの意思決定の影響を受けながら，自己の目的関数を最適にするように意思決定を行う．

2レベル計画問題において二人のDMは互いに相手と自らの目的関数と制約条件を知っており，下位レベルのDMは上位レベルのDMの選択した決定を十分に知った上で自らの目的を最適にする決定を選択し，そのような仮定の下で上位レベルのDMも自己の目的を最適にする決定を選択する．このように定義される解のことをStackelberg解と呼ぶ[5].

本研究では，遺伝的アルゴリズム [4] を用いて2レベル線形計画問題のStackelberg解を導出することを試みる．その際，下位レベルの問題の最適性条件に含まれる相補条件に対して0-1変数を導入することで，2レベル線形計画問題を1レベルの混合0-1計画問題に変換し，0-1変数を0-1ビット列の個体として表現することで，遺伝的アルゴリズムを適用する．得られた混合0-1計画問題の特徴を考慮した初期個体群の生成および対応する遺伝的オペレータを採用したStackelberg解の計算方法を提案し，数値実験によって，Hansenら [3] が提案している変数除去法やGendreauら [2] によって提案されたタブーサーチに基づく計算方法と提案する計算方法の比較を行うことでその有効性を検証する．

2. 2レベル線形計画問題

簡略化のために上位レベルのDMと下位レベルのDMをそれぞれDM1とDM2で表す．DM1とDM2の目的関数をそれぞれ $z_1(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$, $z_2(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ とし，$\boldsymbol{x}=(x_1,\ldots,x_m)^T$, $\boldsymbol{y}=(y_1,\ldots,y_n)^T$ をそれぞれDM1とDM2の決定変数ベクトルとする．ただし，上付添字 T は転置を表す．目的関数の係数ベクトルをそれぞれ $\boldsymbol{c}_1=(c_{11},\ldots,c_{1m})$, $\boldsymbol{d}_1=(d_{11},\ldots,d_{1n})$, $\boldsymbol{c}_2=(c_{21},\ldots,c_{2m})$, $\boldsymbol{d}_2=(d_{21},\ldots,d_{2n})$ で表し，制約式の係数行列を $l\times m$ 行列 A, $l\times n$ 行列 B で表す．制約式の右辺定数ベクトルを $\boldsymbol{b}=(b_1,\ldots,b_l)^T$ とする．このとき，2レベル線形計画問題は一般に以下のように定式化される．

$$\left.\begin{array}{ll} \underset{\boldsymbol{x}}{\text{minimize}} & z_1(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=\boldsymbol{c}_1\boldsymbol{x}+\boldsymbol{d}_1\boldsymbol{y} \\ \text{where } \boldsymbol{y} \text{ solves} & \\ \underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}} & z_2(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=\boldsymbol{c}_2\boldsymbol{x}+\boldsymbol{d}_2\boldsymbol{y} \\ \text{subject to} & A\boldsymbol{x}+B\boldsymbol{y}\leqq\boldsymbol{b} \\ & \boldsymbol{x}\geqq\boldsymbol{0} \\ & \boldsymbol{y}\geqq\boldsymbol{0} \end{array}\right\} \quad (1)$$

問題 (1) のStackelberg解を計算する上で重要となる概念を示すと次のようになる．

1) 実行可能領域:

$$S=\{(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})|A\boldsymbol{x}+B\boldsymbol{y}\leqq\boldsymbol{b},\boldsymbol{x}\geqq\boldsymbol{0},\boldsymbol{y}\geqq\boldsymbol{0}\} \quad (2)$$

2) DM1 が $\boldsymbol{x}$ を選択したときの下位レベルの実行可能領域:

$$S(\boldsymbol{x}) = \{\boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0} | B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} - A\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0}\} \quad (3)$$

3) DM1 の決定空間:

$$S(X) = \{\boldsymbol{x} \geqq \boldsymbol{0} \mid A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} \text{ をみたす } \boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0} \text{ が存在する}\} \quad (4)$$

4) DM1 が $\boldsymbol{x} \in S(X)$ を選択したときの DM2 の合理的応答集合:

$$R(\boldsymbol{x}) = \{\boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0} \mid \boldsymbol{y} \in \arg\min_{\boldsymbol{y} \in S(\boldsymbol{x})} z_2(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})\} \quad (5)$$

5) 誘導領域:

$$IR = \{(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \mid (\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \in S, \boldsymbol{y} \in R(\boldsymbol{x})\} \quad (6)$$

6) Stackelberg 解:

$$\{(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \mid (\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \in \arg\min_{(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \in IR} z_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})\} \quad (7)$$

2 レベル線形計画問題 (1) の Stackelberg 解を見つけるための代表的な手法として Kuhn-Tucker アプローチが挙げられる．このアプローチは，下位レベルの問題の最適性に関する Kuhn-Tucker 条件を上位レベルの問題の制約に入れることで，通常の 1 レベルの問題に変形し，その問題を解くことで Stackelberg 解を導出する方法である．

Kuhn-Tucker アプローチについて説明すると，まず，DM1 の決定変数 $\boldsymbol{x}$ をパラメータとした問題

$$\left.\begin{array}{ll} \underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}} & z_2(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = \boldsymbol{d}_2\boldsymbol{y} + \boldsymbol{c}_2\boldsymbol{x} \\ \text{subject to} & B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} - A\boldsymbol{x} \\ & \boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0} \end{array}\right\} \quad (8)$$

の Kuhn-Tucker 条件

$$\left.\begin{array}{l} \boldsymbol{u}B - \boldsymbol{v} = -\boldsymbol{d}_2 \\ \boldsymbol{u}(A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} - \boldsymbol{b}) - \boldsymbol{v}\boldsymbol{y} = 0 \\ A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} \\ \boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{u}^T \geqq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{v}^T \geqq \boldsymbol{0} \end{array}\right\} \quad (9)$$

を上位レベルの問題の制約に入れて，通常の 1 レベルの計画問題

$$\left.\begin{array}{ll} \text{minimize} & z_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = \boldsymbol{c}_1\boldsymbol{x} + \boldsymbol{d}_1\boldsymbol{y} \\ \text{subject to} & \boldsymbol{u}B - \boldsymbol{v} = -\boldsymbol{d}_2 \\ & \boldsymbol{u}(A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} - \boldsymbol{b}) - \boldsymbol{v}\boldsymbol{y} = 0 \\ & A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} \\ & \boldsymbol{x} \geqq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{u} \geqq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{v} \geqq \boldsymbol{0} \end{array}\right\} \quad (10)$$

と定式化する．ここで，$\boldsymbol{u} = (u_1, \ldots, u_l)$, $\boldsymbol{v} = (v_1, \ldots, v_n)$ である．

問題 (10) の等式制約を用いて相補制約式の $\boldsymbol{v}$ を消去すると次の制約式が得られる．

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{b} - A\boldsymbol{x} - B\boldsymbol{y}) + (\boldsymbol{u}B + \boldsymbol{d}_2)\boldsymbol{y} = 0 \quad (11)$$

さらに，等式 (11) の各要素は，$\boldsymbol{u}^T \geqq \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{b} - A\boldsymbol{x} - B\boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0}$, $(\boldsymbol{u}B + \boldsymbol{d}_2)^T \geqq \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0}$ となるので，等式 (11) を満足するためには，$i = 1, \ldots, l$ に対して $u_i = 0$ または，$b_i - A_i\boldsymbol{x} - B_i\boldsymbol{y} = 0$ かつ，$j = 1, \ldots, n$ に対して $\boldsymbol{u}B^j + d_{2j} = 0$ または，$y_j = 0$ を満たさなければならない．ここで，A_i, B_i は行列 A, B の第 i 行ベクトルであり，B^j は B の第 j 列ベクトルである．よって，0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1 = (w_{11}, \ldots, w_{1l})$, $\boldsymbol{w}_2 = (w_{21}, \ldots, w_{2n})$ を導入することで，等式 (11) は以下のように分解することができる [1].

$$\left.\begin{array}{l} \boldsymbol{u} \leqq M\boldsymbol{w}_1 \\ \boldsymbol{b} - A\boldsymbol{x} - B\boldsymbol{y} \leqq M(\boldsymbol{e} - \boldsymbol{w}_1^T) \\ \boldsymbol{u}B + \boldsymbol{d}_2 \leqq M\boldsymbol{w}_2 \\ \boldsymbol{y} \leqq M(\boldsymbol{e} - \boldsymbol{w}_2^T) \end{array}\right\} \quad (12)$$

ここで，$\boldsymbol{e}$ は要素のすべてが 1 となる対応する次元の列ベクトルであり，M は十分大きな正数である．

したがって，問題 (10) は次のような混合 0-1 計画問題と等価となる．

$$\left.\begin{array}{ll} \text{minimize} & z_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = \boldsymbol{c}_1\boldsymbol{x} + \boldsymbol{d}_1\boldsymbol{y} \\ \text{subject to} & \boldsymbol{0} \leqq \boldsymbol{u}^T \leqq M\boldsymbol{w}_1^T \\ & \boldsymbol{0} \leqq \boldsymbol{b} - A\boldsymbol{x} - B\boldsymbol{y} \leqq M(\boldsymbol{e} - \boldsymbol{w}_1^T) \\ & \boldsymbol{0} \leqq (\boldsymbol{u}B + \boldsymbol{d}_2)^T \leqq M\boldsymbol{w}_2^T \\ & \boldsymbol{0} \leqq \boldsymbol{y} \leqq M(\boldsymbol{e} - \boldsymbol{w}_2^T) \\ & \boldsymbol{x} \geqq \boldsymbol{0} \end{array}\right\} \quad (13)$$

この問題を遺伝的アルゴリズム [4] に基づく計算方法によって解くことで，Stackelberg 解を導出する．

3. 遺伝的アルゴリズムを用いた計算方法

本研究で提案する遺伝的アルゴリズムを用いた計算方法では，0-1 変数に対応する個体を生成し，対応する線形計画問題を解く方法を採用する．しかし，ランダムに 0-1 変数を生成すると実行不可能な個体を数多く発生させることになり，効率のよい解の探索が望めないので，実行可能な個体を効率よく生成する工夫が必要となる．そこで次節において，問題 (13) の性質について考察する．

3.1. 2 レベル線形計画問題の特徴

まず，問題 (13) の制約条件に現れる $\boldsymbol{u}$ に注目する．変数 $\boldsymbol{u}$ が含まれている制約式には，DM1 の決定変数 $\boldsymbol{x}$ も DM2 の決定変数 $\boldsymbol{y}$ も共に含まれていない．さらに，目的関数に関しても決定変数 $\boldsymbol{u}$ は含まれていない．

このことから，0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ を固定して得られる線形計画問題において変数 $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}$ と変数 $\boldsymbol{u}$ は分離可能となる．とくに，0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ を固定したときの変数 $\boldsymbol{u}$ を含む制約式によって構成される領域

$$\left.\begin{array}{l} \boldsymbol{u} \leqq M\boldsymbol{w}_1 \\ \boldsymbol{u}B + \boldsymbol{d}_2 \leqq M\boldsymbol{w}_2 \end{array}\right\} \tag{14}$$

が空であれば，どのように変数 $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}$ をとっても Kuhn-Tucker 条件を満足しない．すなわち，誘導領域にあるペア $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}$ を見つけられないことを示し，逆に空でなければ，0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ を固定して得られる線形計画問題の最適解は誘導領域 IR 上にあることがわかる．

次に，DM2 の決定変数 $\boldsymbol{y}$ が含まれている制約式に注目すると，どの制約式も下限は 0 であり，上限は 0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ の値によって 0 か，もしくは上限なしのどちらかに決定されている．いいかえると 0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ の値によって，$\boldsymbol{y}$ が含まれている制約式が等式制約か不等式制約かに定められることになる．

0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ の値によって，実行可能領域や合理的応答がいかに変化するかを検討するために次の例を与える．

例　DM1 および DM2 がそれぞれ一つの決定変数をもつ図 1 に示される 2 次元の 2 レベル線形計画問題を考える．

$$\underset{x}{\text{minimize}} \quad z_1(x,y) = 5x + y \tag{15a}$$

where y solves

$$\underset{y}{\text{minimize}} \quad z_2(x,y) = -x + 7y \tag{15b}$$

$$\text{subject to} \quad x - y \geqq 2 \tag{15c}$$

$$x + 3y \leqq 15 \tag{15d}$$

$$4x + y \leqq 26 \tag{15e}$$

$$x - 2y \leqq 4 \tag{15f}$$

$$x \geqq 0 \tag{15g}$$

$$y \geqq 0 \tag{15h}$$

図 1 の 2 レベル線形計画問題では，$\boldsymbol{w}_1$ を 1 にすることが制約式 (15c), (15d), (15e), (15f) を等式制約にすることに対応し，$\boldsymbol{w}_2$ を 1 にすることが制約式 (15h) を等式制約にすることに対応している．この問題に対して 0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ の値を定めて得られる不等式と等式制約の組合せには次のような場合が考えられる．(1) 3 本以上の等式制約をもつ場合には明らかに実行可能領域が空集合となる．(2) 2 本の場合は端点上で実行可能となるか，実行不可能となる．(3) 1 本あるいはすべて不等式の場合は実行可能である．図の例では，(1) の場合 16 通り，(2) の場合 10 通り，(3) の場合 6 通りであり，実行可能な場合はこの 32 通り中で 11 通りである．さらに，得られた解が誘導領域　IR に属さなければならないことを考慮するとさらに 6 通りに限定される．

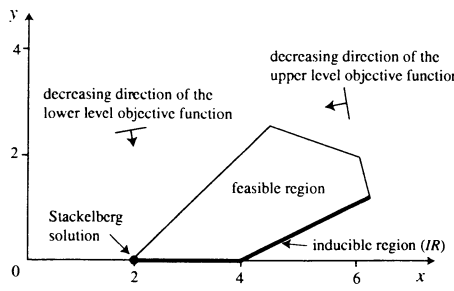


図 1: 実行可能領域と合理的応答．

上記の考察は，問題 (13) の 0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ の値を適切に選び，いかに効率よく Stackelberg 解を見つけるかという問題に対して次のような示唆を与えている．$\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ の値において，0 を多くとると，領域 (14) において，等式となる $\boldsymbol{u}$ に関する制約式が増え，実行不可能となりやすい．一方，1 を多くとると，$A_i\boldsymbol{x} + B_i\boldsymbol{y} \leqq b_i$ を等式にすることになるため，$\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}$ に関する制約式が増え，目的関数が小さくならず，最適解が得られない．

問題 (13) の最適解，すなわち Stackelberg 解は原問題 (1) の実行可能領域

$$A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{x} \geqq \boldsymbol{0} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{y} \geqq \boldsymbol{0} \tag{18}$$

の端点でもある．このことは非退化の仮定のもとでは (16)– (18) のうち，$m + n$ 本が活性，すなわち等式となる．0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ の値の取り方によって，(16), (18) が等式になる本数は最小で 0 となり，最大で $l+n$ 本となるが，上記のことから (16), (18) の制約は端点では少なくとも n 本は等式になっていなければならない．したがって，$\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ は少なくとも　n 個の 1 が必要なので，あらかじめ $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ の値として 1 を最小化させるように残りの変数を定めることによって Stackelberg 解を探索する．

3.2.　遺伝的アルゴリズムの適用

個体表現，遺伝的オペレータ，適合度の計算について述べる．

3.2.1.　個体表現

問題 (13) における 0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ に対して，0-1 ビット列で表現される個体を採用する．必要なビット数は $l + n$ となる．前節での考察から $l + n$ ビット中

n ビットに 1 を入れ，その他に 0 を入れる．

3.2.2. 初期個体群の生成

実行可能な個体を生成し，かつ探索領域を限定するために $l+n$ ビットの個体を定められた数だけ次の手順にしたがって生成する．

手順 1 0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ を $l+n$ ビットで表現し，n ビットに 1 を入れ，その他に 0 を入れる．

手順 2 手順 1 で定められた $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ にしたがって定められる $\boldsymbol{u}$ の領域 (14) が空でないかどうかをシンプレックス法の第 1 段で調べ，空であるならば手順 1 へ戻る．

手順 3 初期個体群サイズに達すれば終了，それ以外は手順 1 へ戻る．

3.2.3. 適合度の計算

適合度は問題 (13) において 0-1 変数 $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2$ を固定することによって得られる線形計画問題の最適値を計算し，線形スケーリングしたのちに，逆数をとることによって定められる．

3.2.4. 再生

本研究では，適合度の総計に対する各個体の割合を次世代への選択確率として個体を選択するルーレット選択に，現在の個体の中で最大の適合度の個体は無条件で次世代に残すというエリート保存戦略を加えたエリートルーレット選択を採用する．

3.2.5. 遺伝的オペレータ

個体における 1 の数を常に n 個に保つために，以下のような交叉と突然変異を採用する．交叉は次の手順に従い，図 2 のように行われる．

交叉の手順

手順 1 親 1 と親 2 を選択し，ランダムに一つの交叉点を決定する．

手順 2 親 1 と親 2 の交叉部分に現れる 1 の数をそれぞれ q_1, q_2 とし，その差 $q_1 - q_2$ を計算する．

手順 3 交叉後，親 1 と親 2 の間で交叉をしていない部分に対して，$q_1 - q_2 < 0$ ならば，親 1 のビットが 1 となり親 2 のビットが 0 となるペアをランダムに $q_2 - q_1$ 個入れ替える．$q_1 - q_2 > 0$ の場合，その逆の操作を行い，$q_1 - q_2 = 0$ ならば何もしない．

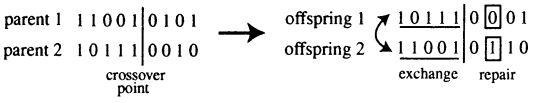


図 2: 交叉

突然変異に関しても個体における 1 の数が変化しないようにするために，図 3 のように突然変異点としてランダムに 0 の点，1 の点を 1 箇所ずつ決定し，ビット反転を行う．

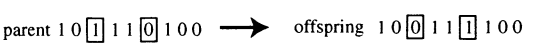


図 3: 突然変異

4. おわりに

本研究では，遺伝的アルゴリズムを用いて 2 レベル線形計画問題の Stackelberg 解を導出することを試みた．下位レベルの問題の最適性条件に含まれる相補条件に対して 0-1 変数を導入することで，2 レベル線形計画問題を 1 レベルの混合 0-1 計画問題に変換し，0-1 変数を 0-1 ビット列の個体として表現することで，遺伝的アルゴリズムを適用した．得られた混合 0-1 計画問題の特徴を考慮した初期個体群の生成および対応する遺伝的オペレータを採用した Stackelberg 解の計算方法を提案し，数値実験によって，変数除去法とタブーサーチに基づく計算方法と比較する予定である．

参考文献

[1] J. Fortuny-Amat and B. McCarl: "A representation and economic interpretation of a two-level programming problem," Journal of the Operational Research Society, Vol. 32, pp. 783–792 (1981).

[2] M. Gendreau, P. Marcotte and G. Savard: "A Hybrid Tabu-Ascent Algorithm for the Linear Bileval Programming Problem," Journal of Global Optimization, Vol. 8, pp. 217–233 (1996).

[3] P. Hansen, B. Jaumard and G. Savard: "New branch-and-bound rules for linear bilevel programming," SIAM Journal of Scientific and Satistical Computing, Vol. 13, pp. 1194–1217 (1992).

[4] 坂和正敏，田中雅博: 遺伝的アルゴリズム，朝倉書店 (1995).

[5] K. Shimizu, Y. Ishizuka and J.F. Bard: *Nondifferentiable and two-level mathematical programming*, Kluwer Academic Publishers (1997).

問い合わせ先

〒 731-0192
広島市安佐南区祇園 5 丁目 37-1
広島経済大学経済学部
丹羽 啓一
TEL: 082-871-1048
FAX: 082-871-1005
E-mail: ki-niwa@hue.ac.jp

TB2−2

多目的2レベル0-1計画問題に対する遺伝的アルゴリズムを用いたStackelberg解の計算方法

A computational method using genetic algorithms for obtaining Stackelberg solutions to multiobjective two-level zero-one programming problems

丹羽 啓一
Keiichi Niwa
広島経済大学
Hiroshima University of Economics

西崎 一郎
Nishizaki Ichiro
広島大学
Hiroshima University

坂和 正敏
Masatoshi Sakawa
広島大学
Hiroshima University

Abstract In this paper, we consider a multiobjective two-level zero-one programming problem in which the decision maker at each level has multiple objective functions conflicting with each other. The decision maker at the upper level must take account of multiple rational responses of the decision maker at the lower level in the problem; an optimistic anticipation, a pessimistic anticipation, and an anticipation arising from past behavior of the decision maker at the lower level. Mathematical programming problems for obtaining the Stackelberg solutions based on three kinds of anticipation are formulated and to derive multiple rational responses of the decision maker at the lower, the vector evaluated genetic algorithms are employed.

1. はじめに

本論文では，二人の意思決定者 (DM: decision maker) がそれぞれ互いに競合する複数の目的をもち，協力する動機がなく，彼らの決定には順序があり，後で決定するDMは先に決定したDMの決定を十分認識した上で自己の決定を行う多目的2レベル計画問題について考察する．

単一目的2レベル計画問題では，下位レベルのDMが上位レベルの決定に対して最適な応答をするという仮定のもとに，上位レベルのDMは自己の目的関数を最小化するように意思決定を行うという考えに基づいたStackelberg解 [3] が解の概念として採用されることが多い．このとき，通常上位レベルのDMの決定に対する下位レベルのDMの最適応答は唯一の決定で与えられるということが仮定される．しかし，多目的環境では，このような仮定はもはや現実的でなく，上位レベルのDMの決定に対して下位レベルのDMの複数あるいは無限の応答を考慮しなければならない．

そこで，本研究では，多目的2レベル0-1計画問題に焦点をあて，上位レベルのDMが下位レベルのDMの合理的な応答に何らかの主観的な予想を与え，その予想に基づいて決定する状況について考察し，問題を定式化する．また，Stackelberg解を求めるために遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithms) を用いた計算方法を提案し，数値実験によって提案する手法の有効性を検証する．

2. 多目的2レベル0-1計画問題

多目的2レベル0-1計画問題を定式化すると次のようになる．

$$\left.\begin{array}{ll}
\underset{\boldsymbol{x}}{\text{minimize}} & z_{11}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \boldsymbol{c}_{11}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{d}_{11}\boldsymbol{y} \\
& \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\underset{\boldsymbol{x}}{\text{minimize}} & z_{1k_1}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \boldsymbol{c}_{1k_1}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{d}_{1k_1}\boldsymbol{y} \\
\text{where } \boldsymbol{y} \text{ solves} & \\
\underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}} & z_{21}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \boldsymbol{c}_{21}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{d}_{21}\boldsymbol{y} \\
& \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}} & z_{2k_2}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \boldsymbol{c}_{2k_2}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{d}_{2k_2}\boldsymbol{y} \\
\text{subject to} & A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} \\
& x_i \in \{0,1\},\ i = 1,\ldots,n_1 \\
& y_i \in \{0,1\},\ i = 1,\ldots,n_2
\end{array}\right\} \quad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{x}$ は上位レベルのDMの n_1 次元0-1決定変数列ベクトル，$\boldsymbol{y}$ は下位レベルのDMの n_2 次元0-1決定変数列ベクトルを表し，$\boldsymbol{c}_{ij}, i = 1,2, j = 1,\ldots,k_i$ は n_1 次元費用係数行ベクトル，$\boldsymbol{d}_{ij}, i = 1,2, j = 1,\ldots,k_i$ は n_2 次元費用係数行ベクトル，$\boldsymbol{b}$ は m 次元右辺定数列ベクトル，A は $m \times n_1$ の係数行列，B は $m \times n_2$ の係数行列を表す．また，$z_{1j}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}), j = 1,\ldots,k_1$ は上位レベルのDMの目的関数，$z_{2j}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}), j = 1,\ldots,k_2$ は下位レベルのDMの目的関数を表す．

本研究では，下位レベルの応答が，少なくとも多目的最適化の解の概念であるパレート最適解を選択すると考えることとする．

単一目的の2レベル計画問題の合理的応答集合 $R(\boldsymbol{x})$ の概念 [3] を拡張し，本研究で扱う多目的2レベル0-1計画問題のパレート合理的応答集合を $P(\boldsymbol{x})$ として表すと，$P(\boldsymbol{x})$ の定義は次のように表すことができる．

$$P(\boldsymbol{x}) = \{\boldsymbol{y} \in S(\boldsymbol{x}) \mid z_{2j}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}') \leqq z_{2j}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}), \forall j, \quad j = 1,\ldots,k_2 \text{ かつ，少なくとも一つの } \ell \text{ において } z_{2\ell}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}') \neq z_{2\ell}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) \text{ となるような別の } \boldsymbol{y}' \in S(\boldsymbol{x}) \text{ が存在しない}\} \tag{2}$$

ここで，$S(\boldsymbol{x}) = \{\boldsymbol{y} \mid B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} - A\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{y} \in \{0,1\}^{n_2}\}$ である．

一般に，上位レベルのDMは，自己の決定 $\boldsymbol{x}$ に対して，下位レベルのDMが，パレート合理的応答集合 $P(\boldsymbol{x})$ にしたがった応答 $\boldsymbol{y}$ を返すことしか推測できない．このことから，上位レベルのDMの任意の決定 $\boldsymbol{x}$ に対する下位レベルのDMの応答を一意的に決定できない．したがって，上位レベルのDMは下位レベルのDMの最適応答に対する何らかの主観的な予想に従った結果を分析することになる．そこで，上位レベルのDMが下位レベルのDMが取りうる3種類の戦略の予想を立て，その予想に基づいた問題について考察する．

2.1. 楽観的な予測に基づくStackelberg解

上位レベルのDMが $\hat{\boldsymbol{x}}$ を決定したとき，下位レベルのDMは上位レベルのDMの決定 $\hat{\boldsymbol{x}}$ の知識を十分に用して次の多目的0-1計画問題を解き，$\boldsymbol{y}$ を決定する．

$$\left.\begin{array}{ll} \underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}} & z_{21}(\hat{\boldsymbol{x}},\boldsymbol{y}) = \boldsymbol{d}_{21}\boldsymbol{y} + \boldsymbol{c}_{21}\hat{\boldsymbol{x}} \\ & \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}} & z_{2k_2}(\hat{\boldsymbol{x}},\boldsymbol{y}) = \boldsymbol{d}_{2k_2}\boldsymbol{y} + \boldsymbol{c}_{2k_2}\hat{\boldsymbol{x}} \\ \text{subject to} & B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} - A\hat{\boldsymbol{x}} \\ & y_i \in \{0,1\},\ i = 1,\ldots,n_2 \end{array}\right\} \tag{3}$$

現実の意思決定状況において，上位レベルのDMが自己の価値関数を大域的に同定することは困難であると考えられる．そこで，本研究では，意思決定者が繰り返し問題を解くことで自己の局所的な選好を学習しつつ，明らかにしていく対話型の手法を導入する．

導入する対話型手法には，Wierzbicki [5] によって提案された基準点法を用いる．上位レベルのDMの基準点 (志望水準) を $(\bar{z}_{11},\ldots,\bar{z}_{1k_1})$ とすると，最小化すべき達成度関数は以下のようになる．

$$\max_{i=1,\ldots,k_1}\{z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \bar{z}_{1i}\} + \rho\sum_{i=1}^{k_1}(z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \bar{z}_{1i}) \tag{4}$$

ここで，ρ は十分小さな正の値とする．この関数 (4) は拡大Tchebyshevノルムと呼ばれ，多目的最適化のスカラ化関数としていくつかの望ましい性質をもつことが知られている．

楽観的な予測に基づくStackelberg解 (楽観的Stackelberg解) は次の問題を対話的に解き，基準点を更新することで与えられる．

$$\left.\begin{array}{ll} \underset{\boldsymbol{x}}{\text{minimize}} & \underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}}\Big\{\max\limits_{i=1,\ldots,k_1}\{z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \bar{z}_{1i}\} + \rho\sum\limits_{i=1}^{k_1}(z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \bar{z}_{1i})\Big\} \\ \text{subject to} & \boldsymbol{y} \in P(\boldsymbol{x}) \\ & A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} \\ & x_i \in \{0,1\},\ i = 1,\ldots,n_1 \\ & y_i \in \{0,1\},\ i = 1,\ldots,n_2 \end{array}\right\} \tag{5}$$

補助変数 σ を用いることで問題 (5) は等価な問題 (6) に変形することができる．

$$\left.\begin{array}{ll} \underset{\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\sigma}{\text{minimize}} & \sigma + \rho\sum\limits_{i=1}^{k_1}(z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \bar{z}_{1i}) \\ \text{subject to} & \boldsymbol{y} \in P(\boldsymbol{x}) \\ & z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \bar{z}_{1i} \leqq \sigma,\ i = 1,\ldots,k_1 \\ & A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} \\ & x_i \in \{0,1\},\ i = 1,\ldots,n_1 \\ & y_i \in \{0,1\},\ i = 1,\ldots,n_2 \end{array}\right\} \tag{6}$$

2.2. 悲観的な予測に基づく解と予測可能な選好に基づく解

$(\bar{z}_{11},\ldots,\bar{z}_{1k_1})$ を基準点とし，(4) の達成度関数を用いると，悲観的な予想に基づいたStackelberg解は次に示す問題を対話的に解き，基準点を更新することで与えられる．

$$\left.\begin{array}{ll} \underset{\boldsymbol{x}}{\text{minimize}} & \underset{\boldsymbol{y}}{\text{maximize}}\Big\{\max\limits_{i=1,\ldots,k_1}\{z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \bar{z}_{1i}\} + \rho\sum\limits_{i=1}^{k_1}(z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \bar{z}_{1i})\Big\} \\ \text{subject to} & \boldsymbol{y} \in P(\boldsymbol{x}) \\ & A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{b} \\ & x_i \in \{0,1\},\ i = 1,\ldots,n_1 \\ & y_i \in \{0,1\},\ i = 1,\ldots,n_2 \end{array}\right\} \tag{7}$$

次に，上位レベルのDMと下位レベルのDMがしばしば意思決定問題 (1) として定式化される意思決定状況に直面し，何度か意思決定を行うことで上位レベルのDMが実際に下位レベルのDMの選好を評価したことがある場合や下位レベルのDMの選好を前もって予想できる場合について考える．

この場合，上位レベルのDMは自己の選好や自己の目的に対する志望水準を更新していくことで学習しつつ明らかにできると仮定するが，上位レベルの予測する下位レベルのDMの選好は志望水準として表現されるものの対話過程での選好を学習したり，同定するこ

とはないと考える．

$(\bar{z}_{21},\ldots,\bar{z}_{2k_2})$ は上位レベルの DM によって定められた下位レベルの DM の基準点とする．

そのとき，下位レベルの DM は，上位レベルの DM の決定 $\hat{\boldsymbol{x}}$ にしたがって次の問題を解き，$\hat{\boldsymbol{y}}$ を返す．

$$\left.\begin{array}{ll}\underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}} & \left\{\max\limits_{i=1,\ldots,k_2}\{z_{2i}(\hat{\boldsymbol{x}},\boldsymbol{y})-\bar{z}_{2i}\}\right. \\ & \left.+\rho\sum\limits_{i=1}^{k_2}(z_{2i}(\hat{\boldsymbol{x}},\boldsymbol{y})-\bar{z}_{2i})\right\} \\ \text{subject to} & B\boldsymbol{y}\leqq\boldsymbol{b}-A\hat{\boldsymbol{x}} \\ & y_i\in\{0,1\},\ i=1,\ldots,n_2\end{array}\right\} \quad (8)$$

与えられた $\hat{\boldsymbol{x}}$ において，下位レベルの DM の合理的応答集合 $R(\hat{\boldsymbol{x}})$ が問題 (8) の最適解の集合になる．

上位レベルの DM が下位レベルの DM の選好を予測できる状況下では，与えられた $\hat{\boldsymbol{x}}$ に対する下位レベルの DM の応答が一意に決定されるものとして考えることができるので任意の $\hat{\boldsymbol{x}}$ に対する合理的応答集合 $R(\hat{\boldsymbol{x}})$ は唯一であるとして仮定する．

一方，上位レベルの DM に関しては，楽観的な予想に基づく Stackelberg 解や悲観的な予想に基づく Stackelberg 解を得たときと同様に，上位レベルの DM が自己の志望水準を与え，繰り返し問題を解くことで自己の局所的な選好を学習しつつ明らかにしていく対話型手法として基準点法を用いる．

下位レベルの DM の選好に基づいた Stackelberg 解は以下に示す問題を対話的に解き，基準点を更新することで与えられる．

$$\left.\begin{array}{ll}\underset{\boldsymbol{x}}{\text{minimize}} & \left\{\max\limits_{i=1,\ldots,k_1}\{z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})-\bar{z}_{1i}\}\right. \\ & \left.+\rho\sum\limits_{i=1}^{k_1}(z_{1i}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})-\bar{z}_{1i})\right\} \\ \text{subject to} & \boldsymbol{y}\in R(\boldsymbol{x}) \\ & A\boldsymbol{x}+B\boldsymbol{y}\leqq\boldsymbol{b} \\ & x_i\in\{0,1\},\ i=1,\ldots,n_1 \\ & y_i\in\{0,1\},\ i=1,\ldots,n_2\end{array}\right\} \quad (9)$$

次に，問題 (6)，問題 (7)，問題 (9) の Stackelberg 解を得るために GA を用いた計算方法を提案する．

3. Stackelberg 解の計算方法

問題 (6) の Stackelberg 解を得るために GA を用いた計算方法を提案する．上位レベルの DM および下位レベルの DM が扱う決定変数が 0-1 変数であることから提案する計算方法においては，坂和ら [1] によって提案された 2 重構造文字列 (図 1) を個体表現として採用した GA を導入する．2 重構造文字列は，変数の添字に対応する上段の文字列と 0-1 変数の値に対応する下段の文字列が一対になった文字列のことである．

また，本研究では，2 レベル 0-1 計画問題を扱うため，図 1 のように上位レベルと下位レベルのそれぞれの DM の決定に対応する部分文字列によって構成される 2 重構造文字列を用いることとし，それぞれの部分個体ごとに遺伝的操作を行う．ここで，上位レベルの DM の決定を扱う GA を上位レベル GA と呼び，下位レベルの DM の決定を扱う GA を下位レベル GA と呼ぶこととする．

← $\boldsymbol{x}$ に関する個体 →			← $\boldsymbol{y}$ に関する個体 →		
$i_x(1)$	$\cdots$	$i_x(n_1)$	$i_y(1)$	$\cdots$	$i_y(n_2)$
$S_{i_x(1)}$	$\cdots$	$S_{i_x(n_1)}$	$S_{i_y(1)}$	$\cdots$	$S_{i_y(n_2)}$

図 1: 2 重構造文字列を用いた個体表現

上位レベル GA では，図 1 に示したように，上位レベルの決定変数 $\boldsymbol{x}$ に対応する文字列を形成するため，上段の文字列には n_1 個の変数の添字を重複することなくランダムに設定する．また，下段の文字列には n_1 個の遺伝子に $\{0,1\}$ の値をランダムに設定する．同様に，下位レベル GA の個体に対しても上段の文字列には n_2 個の変数の添字を重複することなくランダムに設定し，下段の 2 進文字列には n_2 個の遺伝子に $\{0,1\}$ の値をランダムに設定することで個体を形成する．問題の制約に含まれる係数値はすべて正の値とし，2 重構造文字列と文字列の構造を活かしたデコーディングアルゴリズムを用いることで実行可能な個体のみを生成する．

本研究では，上位レベルの DM の決定 $\boldsymbol{x}$ に対して，下位レベルの DM はパレート最適性を満たした決定 $\boldsymbol{y}\in P(\boldsymbol{x})$ を応答とすると仮定しているので，下位レベル GA には，パレート解を効率よく導出する方法を用いることが望ましいと考えられる．

そこで，多目的計画問題のパレート解集合を導出するために Schaffer [2] によって提案されたベクトル評価型遺伝的アルゴリズム (Vector Evaluated Genetic Algorithms: VEGA) と VEGA の問題点を克服するために玉置ら [4] によって提案されたパレート保存戦略を併用した GA を導入する．

次に，楽観的 Stackelberg 解を求めるための計算方法のアルゴリズムについて要約したものを示す．

楽観的 Stackelberg 解を求めるためのアルゴリズム

手順 1 上位レベル GA の世代数を $t:=0$ とする．上位レベル GA の初期個体をランダムに N_u 個生成する．

手順 2 上位レベル GA の各個体 $\boldsymbol{x}$ に対して，次に示す手順 2-1 から手順 2-3 の下位レベル GA の操作を繰り返し適用することでパレート合理的応答集合に含まれる個体を求める．

手順 2-1 下位レベル GA の個体 $\boldsymbol{y}$ を N_l 個ランダムに生成し，下位レベル GA の初期個体群と

する．

手順 2-2 上位レベル GA の個体によって与えられた $\boldsymbol{x}$ と生成された $\boldsymbol{y}$ を用いて下位レベルの DM の各目的関数値を計算し，並列選択によって個体を再生する．そのとき，現在の個体群に存在する非支配解をすべて保存しておく．

手順 2-3 もし，現在の反復回数が予め設定された打ち切り世代数 M_l を越えていれば，手順 3 に進む．そうでなければ，下位レベル GA の各個体に対して交叉，突然変異を適用したあと，保存しておいた非支配解を個体群にランダムに挿入し，手順 2-2 に戻る．

手順 3 下位レベル GA の操作によって求められたパレート合理的応答集合 $P(\boldsymbol{x})$ に含まれる個体と与えられた上位レベル GA の個体 $\boldsymbol{x}$ を用いて適合度の値を計算し，個体を再生する．

手順 4 上位レベル GA の現在の反復回数が予め設定された打ち切り回数 M_u に到達すれば，アルゴリズムを終了し，それまでに得られた個体の中でもっとも適合度の値が大きい個体を問題 (1) の最適な Stackelberg 解とする．そうでなければ，手順 5 に進む．

手順 5 再生後，上位レベル GA の個体群の個体に対して交叉と突然変異を適用し，$t := t+1$ として手順 2 に戻る．

次に，悲観的 Stackelberg 解を求めるための計算方法について考える．問題 (7) は問題 (6) と類似した構造をしていると考えられるので，楽観的 Stackelberg 解を得るために用いたアルゴリズムと同様のアルゴリズムを用いて解くことができる．

最後に，下位レベルの DM の選好が上位レベルの DM に予測可能である問題 (9) の Stackelberg 解を求めるための計算方法について考える．

問題 (9) では，与えられた $\hat{\boldsymbol{x}}$ に対する下位レベルの DM の合理的応答集合 $R(\hat{\boldsymbol{x}})$ が問題 (8) の最適解の集合になることから，問題 (9) の Stackelberg 解を求めるための計算手法において，下位レベル GA には，並列選択とパレート保存戦略を用いた GA を用いるのではなく，2 重構造文字列を個体表現とした通常の GA を用いることができる．

このような計算方法を用いることで，問題 (6)，問題 (7)，問題 (9) のそれぞれの場合の Stackelberg 解を求めることができる．

4. おわりに

本研究では，2 人の DM がそれぞれ互いに競合する複数の目的をもち，協力する動機がなく，彼らの決定には順序があり，後で決定する DM は先に決定した DM の決定を十分認識した上で自己の決定を行う多目的 2 レベル 0-1 計画問題について考察した．

単一目的 2 レベル計画問題においてよく用いられている Stackelberg 解の概念は，下位レベルの DM が上位レベルの決定に対して最適な応答をするという仮定のもとに，上位レベルの DM は自己の目的関数を最小化するような決定を行うという考えに基づいており，通常，上位レベルの DM の決定に対する下位レベルの DM の最適応答は唯一の決定で与えられるということが仮定される．しかし，多目的環境では，このような仮定はもはや現実的でなく，上位レベルの DM の決定に対して下位レベルの DM の複数あるいは無限の応答を考慮しなければならないと考えられる．そこで，上位レベルの DM が下位レベルの DM の合理的な応答に何らかの主観的な予想を与え，その予想に基づいて決定する状況について考察し，問題の定式化を行った後，Stackelberg 解を求めるために遺伝的アルゴリズムと基準点法を用いた計算方法を提案し，提案する手法の有効性を示すために数値実験を行った．

参考文献

[1] 坂和正敏，田中雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店 (1995).

[2] J.D. Schaffer: "Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms," *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, New Jersey, pp. 93–100 (1985).

[3] K. Shimizu, Y. Ishizuka and J.F. Bard: *Nondifferentiable and two-level mathematical programming*, Kluwer Academic Publishers (1997).

[4] 玉置久，森正勝，荒木光彦: "遺伝アルゴリズムを用いたパレート最適解集合の生成法," 計測自動制御学会論文集，Vol. 31, No. 8, pp. 1185–1192 (1995).

[5] A.P. Wierzbicki: "The use of reference objectives in multiobjective optimization," Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, No. 177, pp.468–486, Springer-Verlag, Berlin (1980).

問い合わせ先

〒 731-0192
広島市安佐南区祇園 5 丁目 37-1
広島経済大学経済学部
丹羽 啓一
TEL: 082-871-1048
FAX: 082-871-1005
E-mail: ki-niwa@hue.ac.jp

TB2−3

ファジィランダム線形ナップサック問題

Fuzzy Random Linear Knapsack Problems

片桐 英樹* 石井 博昭 坂和 正敏
Hideki KATAGIRI Hiroaki ISHII Masatoshi SAKAWA
大阪大学 大阪大学 広島大学
Osaka University Osaka University Hiroshima University

Abstract This paper considers knapsack problem where each weight is fuzzy random variable. The problem is formulated as a chance constrained programming problem with respect to possibilty measure and is transformed into the deterministic one by using the method of stochastic programming and fuzzy theory. In order solve the deterministic problem, we introduce a subproblem and construct an algorithm for solving the original problem efficiently.

1 はじめに

本研究では, 不確実・不確定な係数を含む線形ナップサック問題を扱う. Ishii ら [1] は目的関数の係数が確率変数で表される場合における意思決定法を考え, 効率的な解法を示している. また, ファジィ理論に基づいて多くの意思決定問題に現れる確率的な不確実性とは異なる曖昧さを扱う手法も研究されている [2]. これまでの研究では, 確率的な不確実性と人間の主観や知識などから含まれる曖昧性が個別に扱われることが多かったが, 現実の問題においては, それぞれの事象において実現値をはっきりと知ることができず, 熟練者によっておおよその値が見積もられる場合もあると考えられる. そのような場合, 係数は不確実・不確定な値になり, ファジィランダム変数で表すことができる.

本研究では, ファジィランダム変数を係数にもつナップサック問題をファジィ数理計画法と確率計画法に基づいて, 可能性測度に関する機会制約条件計画問題として定式化する. その問題を等価な確定問題に変形した後, 解法について述べる.

2 定式化

次のナップサック問題を考える.

$$\mathbf{P}_1 \quad : \quad \max \quad \boldsymbol{cx}$$
$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{n} a_j x_j = b_0$$
$$0 \leqq x_j \leqq b_j,\ j = 1, 2, \ldots, n$$

ただし, $\boldsymbol{c} = (c_1, \ldots, c_n)$, $\boldsymbol{x} = (x_1, \ldots, x_n)^t$ であり, c_j は次のメンバシップ関数によって特性づけられるファジィランダム変数 $C_j(\omega)$ とする.

$$\mu_{C_j(\omega)}(c_j) = \begin{cases} L\left(\dfrac{d_j(\omega) - c_j}{\alpha_j}\right) & (c_j \leqq d_j(\omega)) \\ R\left(\dfrac{c_j - d_j(\omega)}{\beta_j}\right) & (c_j \geqq d_j(\omega)) \end{cases}$$

L は $[0, +\infty)$ から $[0, 1]$ への関数で $0 \leqq r \leqq r'$ において狭義減少かつ $r' \geqq r$ において値 0 をとる連続関数とし, R も同様の条件を満たすものとする. また $d_j(\omega)$ は平均 m_j, 分散 σ_j^2 をもつ正規分布に従う互いに独立な確率変数であるとし, α_j, β_j はそれぞれ左右の広がりを表す正数とする. 以下では, 便宜上, この L - R ファジィ数を $(d_j(\omega),\ \alpha_j,\ \beta_j)_{LR}$ と表記する.

拡張原理に基づく L - R ファジィ数の演算を用いて計算すると, 目的関数 $y(= \boldsymbol{cx})$ を表すファジィランダム変数 $Y(\omega)$ は次のようになる.

$$Y(\omega) = \left(\sum_{j=1}^{n} d_j(\omega) x_j,\ \sum_{j=1}^{n} \alpha_j x_j,\ \sum_{j=1}^{n} \beta_j x_j\right)_{LR}$$

この目的関数に対して, "だいたい f_1 以上である" というファジィ目標を設定し, メンバシップ関数 μ_G で特性づけられるファジィ集合で表す. 関数 μ_G は $[0, \infty] \to [0, 1]$ の連続関数とし, $y \geqq f_0$ において 0, $f_0 \leqq y \leqq f_1$ において単調増加, $f_1 \leqq y$ において 1 をとるものとする.

Inuiguchi ら [3] は目的関数の係数が可能性変数である場合において, 可能性理論に基づいた可能性計画問題を考えた. 即ち,

$$\Pi_{Y(\omega)}(G) = \sup_y \min\left\{\mu_{Y(\omega)}(y),\ \mu_G(y)\right\} \qquad (1)$$

によって与えれらた可能性測度を最大化する問題として定式化した. 係数がファジィランダム変数の場合に

*平成12年4月1日より広島大学工学部

は，そのまま適用することはできないが，式(1)で与えられる可能性測度の値が確率的に変化することに着目し，問題$\mathbf{P}_1$の意思決定法として次の問題$\mathbf{P}_2$を考える．

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_2 \quad : \quad \max \quad & h \\ \text{s.t.} \quad & Pr\left(\Pi_{Y(\omega)}(G) \geq h\right) \geq \alpha \\ & \sum_{j=1}^{n} a_j x_j = b_0, \\ & 0 \leq x_j \leq b_j,\ j = 1, 2, \ldots, n\end{aligned}$$

ここで$Pr(\cdot)$は確率測度であり，αは意思決定者によって与えられる定数で$\alpha > 1/2$を満たすものとする．この問題は可能性測度に関する機会制約条件計画問題になっており，次の等価確定問題に変換できる．

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_3 \quad : \quad \max \quad & h \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{n} \{m_j + R^*(h)\beta_j\} x_j \\ & \qquad -K_\alpha \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \sigma_i^2 x_i} \geq \mu_G^*(h) \\ & \sum_{j=1}^{n} a_j x_j = b_0 \\ & 0 \leq x_j \leq b_j,\ j = 1, 2, \ldots, n\end{aligned}$$

ただし，$R^*(\cdot)$および$\mu_G^*(\cdot)$は擬逆関数であり次のように表される．

$$R^*(h) = \begin{cases} \sup\{r | L(r) > h, r \geq 0\} & (0 < h \leq 1) \\ \infty & (h = 0) \end{cases}$$

$$\mu_G^*(h) = \inf\{r | \mu_G(r) \geq h\}$$

問題$\mathbf{P}_3$を解くためにまず次の部分問題を導入する．

$$\begin{aligned}\mathbf{P}(q) \ : \ \min \quad & -\sum_{j=1}^{n} \left\{\hat{m}_j + q\hat{\beta}_j\right\} y_j + \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \hat{\sigma}_j^2 y_j^2} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{n} y_j = b \\ & 0 \leq y_j \leq \hat{b}_j,\ j = 1, 2, \ldots, n\end{aligned}$$

ただし，qはパラメータであり，$R^*(h) = q$，$y_j = a_j x_j$，$\hat{b}_j = a_j b_j$，$\hat{m}_j = m_j / a_j$，$\hat{\sigma}_j^2 = K_\alpha^2 \sigma_j^2 / a_j^2$，$j = 1, 2, \ldots, n$とした．問題$\mathbf{P}(q)$の最適解および最適値をそれぞれ$\boldsymbol{y}(q)$，$Z_q$とする．また$\mathbf{P}_3$の最適値および最適解をそれぞれ，$h^*$，$\boldsymbol{x}^*$とし，さらに$\boldsymbol{y}^* \equiv \boldsymbol{a}\boldsymbol{x}^*$と定義するとき，次の定理が成り立つ．

定理 1 $\boldsymbol{y}(q) = \boldsymbol{y}^*$となるための必要十分条件は$Z_q = -\mu_G^*(R(q))$が成り立つことである．

この定理は，$\mathbf{P}(q)$において適切なqを選んで解くことにより元の問題$\mathbf{P}_3$の最適解が得られることを示している．

問題$\mathbf{P}(q)$はqが固定値の場合，Helgason[4]およびIshii[1]の方法で多項式時間で解くことができる．したがって，問題$\mathbf{P}_3$に対してはその解法を応用したアルゴリズムを構築することができ，多項式時間で解くことが可能である．

また，ナップサック問題本来の形である決定変数が整数値を取る場合も定式化および式変形については同様に行うことができる．一方，解法については，パラメータを含んだ動的計画法を繰り返し解く手続きによって最適解を求めることが可能である．

3 おわりに

本研究では，目的関数の係数がファジィランダム変数で与えられるナップサック問題を扱った．まず可能性測度に関する機会制約条件計画問題として定式化し，等価確定問題に変換した後，効率的に解く方法を示した．必然性測度に関する機会制約条件計画問題も同様して扱うことができる．今後の課題としては，本研究で考えた意思決定法を他の意思決定問題に応用することや意思決定者の嗜好や価値基準を反映するための別の方法を考えることなどが挙げられる．

参考文献

[1] H. Ishii and T. Nishida, "Stochastic linear knapsack problem," *Technology Reports of the Osaka University*, Vol. 32, pp. 25-30, 1982.

[2] 坂和正敏，石井博昭，西崎一郎，ソフト最適化，朝倉書店，1995.

[3] M. Inuiguchi and H. Ichihashi, "Relative modalities and their use in possibilistic linear programming," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 35, pp. 303-323, 1990.

[4] R. Helgason, J. Kennington and H. Lall, "A polynomially bounded algorithm for a singly constrained quadratic program," *Mathematical Programming*, Vol. 18, pp. 338-343, 1990.

[問い合わせ先] (平成12年4月1日より)

〒739-8527
東広島市鏡山1丁目4番1号
広島大学工学部第二類（電気系）
片桐 英樹
Tel: 0824-24-7701
Fax: 0824-22-7195
E-mail: katagiri@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

TB3−1

作業間の従属関係を考慮したファジィプロジェクトネットワーク問題の解析

An Analysis of Fuzzy Project Network Problems Based on Dependence among Activities

岡田 真幸
Shinkoh Okada
足利短期大学
Ashikaga Junior College

Abstract An analysis of the project network with fuzzy activity duration times is discussed in this paper. Each duration time along an activity in the network is represented as a fuzzy number. A concept of the degree of criticality for an activity, which is the possibility that an activity is on the critical path of the network, is introduced. While it is assumed that duration times of activities are mutually independent in the conventional approaches, we point out their contradictions and define a new degree of criticality taking dependence among activities into consideration. A new method is presented for identifying the degree of criticality of each activity based on the definition. In particular, an algorithm is described by computing a α-level set of a fuzzy duration time of each activity and providing multiple labels at each node.

1 はじめに

本論文では，各作業の所要時間がファジィ数で表現されたプロジェクトネットワーク問題を考える。このような問題では，各作業がクリティカルであるのか，あるいはそうでないのかを二者択一で決定することは適切ではないと考える。そこで，ある作業が，クリティカルパスの上にある可能性の度合いであるクリティカルの度合い (degree of criticality) を導入する。クリティカルの度合いの従来の定義では，各作業の所要時間がそれぞれ独立であるという仮定のもとに定義されていた [1–4]。そこで，本論文では，従来の定義の矛盾点を指摘し，各作業の従属性と依存関係を考慮した新たなクリティカルの度合いを定義する。この定義に基づいて，各作業のクリティカルの度合いとファジィプロジェクト遂行時間を求める解法を提案する。解法では，α-レベル集合によってファジィ数を区間として簡略化した反復計算と前進手法のみですべてのクリティカルの度合いを決定するために各結合点に先行結合点を示すラベルを付加する手法を適用する。

2 準 備

三角型ファジィ数 $\tilde{a}$ のメンバシップ関数 $\mu_{\tilde{a}}(x)$ を，左端 a^L，中心 a^M および右端 a^R を用いて，$\tilde{a}=(a^L,a^M,a^R)$ と表記する。$a^L>0$ のとき，$\tilde{a}$ を正のファジィ数という。ファジィ数 $\tilde{a}$ の α-レベル集合を次のように表す。
$(\tilde{a})_\alpha=\{x\in R^1 \mid \mu_{\tilde{a}}(x)\geq\alpha\}=[\underline{(a)_\alpha},\overline{(a)_\alpha}]$
ただし，$\underline{(a)_\alpha}$ と $\overline{(a)_\alpha}$ は，それぞれ左右の端点を表す。

定義 1 ファジィ数の和と最大値は，拡張原理によって，それぞれ，次のように定義する。

$$\mu_{\tilde{a}\oplus\tilde{b}}(x) = \sup_{x=u+v}\min\{\mu_{\tilde{a}}(u),\mu_{\tilde{b}}(v)\}, \quad (1)$$

$$\mu_{\widetilde{\max\{\tilde{a},\tilde{b}\}}}(r) = \sup_{x=\max\{u,v\}}\min\{\mu_{\tilde{a}}(u),\mu_{\tilde{b}}(v)\}. \quad (2)$$

特に，ファジィ数 $\tilde{a},\tilde{b}$ の α-レベル集合に対して，和と最大値を適用する場合，次のように定義する。

$$\begin{aligned}(\tilde{a}\oplus\tilde{b})_\alpha &= [\underline{(a)_\alpha},\overline{(a)_\alpha}]+[\underline{(b)_\alpha},\overline{(b)_\alpha}]\\ &= [\underline{(a)_\alpha}+\underline{(b)_\alpha},\overline{(a)_\alpha}+\overline{(b)_\alpha}], \quad (3)\\ (\widehat{\max}\{\tilde{a},\tilde{b}\})_\alpha &= \max\{[\underline{(a)_\alpha},\overline{(a)_\alpha}],[\underline{(b)_\alpha},\overline{(b)_\alpha}]\}\\ &= [\max\{\underline{(a)_\alpha},\underline{(b)_\alpha}\},\max\{\overline{(a)_\alpha},\overline{(b)_\alpha}\}]. \quad (4)\end{aligned}$$

定義 2 ファジィ数 $\tilde{a}$ と $\tilde{b}$ に対して，“ $\tilde{a}$ が $\tilde{b}$ 以上である可能性の度合い ”を次のように定義する。

$$\mathrm{Poss}(\tilde{a}\geq\tilde{b})=\sup_{u\geq v}\min(\mu_{\tilde{a}}(u),\mu_{\tilde{b}}(v))$$

性質 1 ファジィ数 $\tilde{a},\tilde{b}$ 及び $\tilde{c}$ に対して，
$\mathrm{Poss}(\tilde{a}\oplus\tilde{c}\geq\tilde{b}\oplus\tilde{c})=\mathrm{Poss}(\tilde{a}\geq\tilde{b})$
が成り立つ。

[証明]

$$\begin{aligned}&\mathrm{Poss}(\tilde{a}\oplus\tilde{c}\geq\tilde{b}\oplus\tilde{c})\\ &= \sup_{x\geq y}\min(\mu_{\tilde{a}\oplus\tilde{c}}(x),\mu_{\tilde{b}\oplus\tilde{c}}(y))\\ &= \sup_{x\geq y}\min(\sup_{x=u+w}\min(\mu_{\tilde{a}}(u),\mu_{\tilde{c}}(w)),\\ &\qquad \sup_{y=v+w}\min(\mu_{\tilde{b}}(v),\mu_{\tilde{c}}(w)))\\ &= \sup_{x\geq y}\min(\sup_{w}\min(\mu_{\tilde{a}}(x-w),\mu_{\tilde{c}}(w)),\\ &\qquad \sup_{w}\min(\mu_{\tilde{b}}(y-w),\mu_{\tilde{c}}(w)))\\ &= \sup_{u+w\geq v+w}\min(\sup_{w}\min(\mu_{\tilde{a}}(x-w),\\ &\qquad \mu_{\tilde{b}}(y-w),\mu_{\tilde{c}}(w)))\\ &= \sup_{u\geq v}\min(\sup_{w}\min(\mu_{\tilde{a}}(u),\mu_{\tilde{b}}(v),\mu_{\tilde{c}}(w)))\\ &= \sup_{u\geq v}\min(\mu_{\tilde{a}}(u),\mu_{\tilde{b}}(v))\\ &= \mathrm{Poss}(\tilde{a}\geq\tilde{b}) \qquad \square\end{aligned}$$

3 定式化

有向かつアサイクリックなネットワークを $G=(N,A)$ とする。ここで，$N=\{1,2,\ldots,n\}$ は n 個の結合点の集合，$A=\{(i,j)\mid i<j,(i,j)\subset N\times N\}$ は m 個のアーク（作業）の集合である。結合点 i から j へのアーク (i,j) はただ一つであるとする。アーク (i,j) には正のファジィ数で表現された所要時間 $\tilde{d}_{ij}$ が対応付けられる。結合点 1 及び n をそれぞれ始点と終点とする。結合点 i から j へのパスをアークと結合点の列で $p_{ij}=\{i,(i,k),\ldots,(l,j),j\}$ と表す。ただし，どの結合点も異なるとする。また，パス p のファジィ所要時間を $\tilde{d}(p)=\sum_{(s,t)\in p}\tilde{d}_{st}$ と表す。ここで，$\sum$ は，定義 1 によるファジィ数の加法を意味する。

$\widetilde{t_i^E}$ を結合点 i におけるファジィ最早結合点時刻，$\widetilde{ES}_{ij}$ をファジィ最早開始時刻，$\widetilde{EF}_{ij}$ をファジィ最早終了時刻とすると，ファジィプロジェクトネットワーク問題 FPN は，次のように定式化され，終点 n における $\widetilde{t_n^E}$ がファジィプロジェクト遂行時間となる。

$$\begin{aligned}\widetilde{t_1^E} &= \tilde{0},\\ \widetilde{t_i^E} &= \widetilde{\max_{(k,i)\in A}}\{\widetilde{t_k^E}+\tilde{d}_{ki}\},\quad i=2,\ldots,n,\qquad (5)\\ \widetilde{ES}_{ij} &= \widetilde{t_i^E},\quad (i,j)\in A,\\ \widetilde{EF}_{ij} &= \widetilde{t_i^E}+\tilde{d}_{ij},\quad (i,j)\in A.\end{aligned}$$

$G(r)=\{N',A'\}\subset G$ $(2\le r\le n)$ を部分ネットワークとする。ただし，$N'=\{1,\ldots,r\}$ 及び $A'=\{(i,j)\mid i,j\le r,\ (i,j)\in A\}$ とする。$G(r)$ において，始点を 1，終点を r としたプロジェクトネットワーク部分問題を FPN(r) とする。

4 クリティカルの度合い

ファジィプロジェクトネットワーク問題では，各作業が，クリティカルなのか，あるいはそうでないのかを二者択一で決定することは適切ではないと考える。そこで，各作業に対して，可能性理論に基づいて，クリティカルの度合いのを導入する。従来の定義を次に示す [3]。

定義 3 作業 (i,j) のクリティカルの度合い Cr_{ij} は，$[0,1]$ 間の実数値であり，$Cr_{ij}=\max_{p\in P_{(i,j)}}\{Cr_p\}$ と定義する。

ここで，$P_{(i,j)}$ は，始点 1 から終点 n までの全てのパスの中で作業 (i,j) を含むパスの集合であり，p は，その要素である。Cr_p は，パス p のクリティカルの度合いを意味し，次のように定義する。

$$Cr_p=\mathrm{poss}\{\tilde{T}_p=\tilde{T}\}=\sup_x\inf\{\mu_{\tilde{T}_p}(x),\mu_{\tilde{T}}(x)\}.$$

ここで，$\tilde{T}$ は，ファジィプロジェクト遂行時間であり，$\tilde{T}_p$ は，パス p の遂行時間である。

しかし，この定義では，次の 2 点の問題点が考えられる。

表 1: プロジェクトネットワーク例の所要時間

作業 (i,j)	所要時間 $\tilde{d}_{ij}$	0.75-レベル集合 $(\tilde{d}_{ij})_{0.75}$	0.25-レベル集合 $(\tilde{d}_{ij})_{0.25}$
(1,2)	(5,6,8)	[5.75,6.50]	[5.25,7.50]
(2,3)	(2,4,7)	[3.50,4.75]	[2.50,6.25]
(2,4)	(6,7,8)	[6.75,7.25]	[6.25,7.75]
(3,4)	(0,0,0)	[0.00,0.00]	[0.00,0.00]
(4,5)	(15,16,20)	[15.75,17.00]	[15.25,19.00]

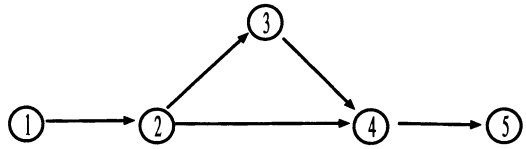


図 1: プロジェクトネットワーク例

1. 各作業の所要時間は互いに独立と仮定されている。そのために，クリティカルの度合いの計算対象となる作業を含むすべてのパスの相互の関連性や依存関係が考慮されていない。
2. 大規模なネットワークでは，始点から終点までのすべてのパスを求めることは計算上困難である。

この第一の問題点を図 1 のプロジェクトネットワーク例 (各作業の所要時間を表 1 に示す) を用いて示す。上記のクリティカルの度合いの定義による作業 (2,3) のクリティカルの度合い Cr_{23} を求める。ここで，パスを

$p_1=\{1,(1,2),2,(2,4),4,(4,5),5\}$,

$p_2=\{1,(1,2),2,(2,3),3,(3,4),4,(4,5),5\}$

とすると，ファジイ遂行時間は，$\tilde{d}(p_1)=(26,29,36)$ 及び $\tilde{d}(p_2)=(22,26,35)$ となる。

よって，作業 (2,3) のクリティカルの度合い Cr_{23} は，

$$\begin{aligned}Cr_{23} &= \max_{p\in P_{(2,3)}}\{Cr_p\}\\ &= Cr_{p_2}\\ &= \mathrm{Poss}\{\tilde{d}(p_2)\ge\tilde{d}(p_1)\}\\ &= 0.75\end{aligned}$$

と求められ，その値は，$\mu_{\widetilde{d(p_1)}}(28.25)=\mu_{\widetilde{d(p_2)}}(28.25)=0.75$ である。

ファジィ数の可能性変数をそれぞれ $t_{12}\in\tilde{d}_{12},t_{23}\in\tilde{d}_{23},t_{24}\in\tilde{d}_{24},t_{45}\in\tilde{d}_{45}$ とすると，この値を実現する可能性変数値は，

パス $p_1: t_{12}+t_{24}+t_{45}=5.75+6.75+15.75=28.25$,

パス $p_2: t_{12}+t_{23}+t_{45}=6.5+4.75+17.00=28.25$

である。ここで，作業 (1,2) と (4,5) は，各パスに共通であるが，異なる可能性変数値を実現している。これは，各作業を独立と考えていることによる。

そこで，二つのパスに共通する作業の従属性を考慮する。即ち，共通な作業の取りうる可能性変数値は同一で

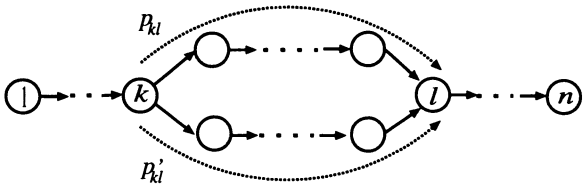


図 2: 並行するパス

あるとすると，性質 1 より，

$$\begin{aligned} Cr_{23} &= \mathrm{Poss}(\tilde{d}(p_2) \geq \tilde{d}(p_1)) \\ &= \mathrm{Poss}(\tilde{a} \oplus \tilde{b} \oplus \tilde{e} \geq \tilde{a} \oplus \tilde{c} \oplus \tilde{e}) \\ &= \mathrm{Poss}(\tilde{b} \geq \tilde{c}) \\ &= 0.25 \end{aligned}$$

となる。

本論文では，上記の 2 点の問題点を改善したクリティカルの度合いを新たに定義する。

定義 4 作業 $(i,j) \in A$ のクリティカルの度合い $Cr_{ij} \in [0,1]$ を可能性理論に基づいて次のように定義する。

$$Cr_{ij} = \max_{p \in P_{(i,j)}} \{Cr_p\}$$

更に，パス p のクリティカルの度合い Cr_p を次のように定義する。

$$Cr_p = \min_{p' \in \mathcal{P}_{1n}} \mathrm{Poss}(\tilde{d}(p) \geq \tilde{d}(p'))$$

ここで，p' は，結合点 1 から n までのすべてのパスの集合 $\mathcal{P}_{1n}$ の要素である。

ここで，パス p と p' には共通の作業があるかもしれないので，Poss は性質 1 にしたがって計算される。

そこで，図 2 に示すように，パス p と p' に共通の部分パスを p_{1k}，p_{ln} とし，並行するパスをそれぞれ p_{kl}，p'_{kl} $(p_{kl} \cap p'_{kl} = \emptyset)$ とすると，次のように計算される。

$$\begin{aligned} &\mathrm{Poss}(\tilde{d}(p) \geq \tilde{d}(p')) \\ &= \mathrm{Poss}(\tilde{d}(p_{1k}) \oplus \tilde{d}(p_{kl}) \oplus \tilde{d}(p_{ln}) \\ &\qquad \geq \tilde{d}(p_{1k}) \oplus \tilde{d}(p'_{kl}) \oplus \tilde{d}(p_{ln})) \\ &= \mathrm{Poss}(\tilde{d}(p_{kl}) \geq \tilde{d}(p'_{kl})) \end{aligned}$$

5 提案する解法

ファジィプロジェクトネットワーク問題においてファジィプロジェクト遂行時間とクリティカルパスを求める解法 [1,2,4] を改良し，各作業のクリティカルの度合いを求める解法を提案する。

従来の研究で提案された解法には，次に示すような取り扱いの困難な問題点が挙げられる。

1. 定義 1 によるファジィ数の最大値の計算は，現実的ではあるが，ファジィ数のメンバーシップ関数の形状が徐々に複雑になり，計算が繁雑となる。
2. 作業間の依存関係が考慮されていない。
3. 後退法を実行するには，ファジィ数間の減法を定義する必要がある。しかし，この減法はファジィ数の加法の逆演算ではないので，取り扱いが難しい点がある。
4. 前進法だけで全てのクリティカルパスを求めることはできない。

これらの問題点を解決するために，本論文で提案する解法では，次の手法を導入する。

1. α-レベル集合を用いたファジィ数の演算。
2. クリティカルの度合いの導入。
3. 始点からの各結合点へのすべてのパスを保存したラベルを各結合点に付加。

5.1 α-レベル集合による演算

本論文では，クリティカルの度合いの計算を容易にするために，区間 [0,1] を h 等分し，しきい値 $\alpha = \frac{i}{h}$ $(i = 1,\ldots,h)$ に対して，ファジィ数で表現された所要時間の α-レベル集合を求め，区間演算 (3) 及び (4) を用いて，ファジィプロジェクトネットワーク問題を解く。

この解法を h 回の各反復において，次の定理 1 及び 2 の手続きによって処理を大幅に効率化することができる。

定理 1 $p \in \mathcal{P}_{1r}$，$p' \in \mathcal{P}_{rn}$ とする。FPN(r) において，$Cr_p < \alpha$ であるならば，FPN において，$Cr_{p \cup p'} < \alpha$ である。

[証明] $Cr_p < \alpha$ より，$\mathrm{Poss}(\tilde{d}(p) \geq \tilde{d}(p'')) < \alpha$ となるパス $p'' \in \mathcal{P}_{1r}$ が存在する。よって，

$$\begin{aligned} &Cr_{p \cup p'} \\ &< \mathrm{Poss}(\tilde{d}(p \cup p') \geq \tilde{d}(p'' \cup p')) \\ &= \mathrm{Poss}(\tilde{d}(p) \oplus \tilde{d}(p') \geq \tilde{d}(p'') \oplus \tilde{d}(p')) \\ &= \mathrm{Poss}(\tilde{d}(p) \geq \tilde{d}(p'')) < \alpha \end{aligned}$$

□

$Cr_{ij} \geq \alpha$ である作業 $(i,j) \in p$ を求めるとき，パス $p \cup p'$ は，定義 4 よりその計算に影響を及ぼさない。ゆえに，i 回目の反復での各結合点 r にて $Cr_p < \frac{i}{h}$ であるパス $p \in P_{1r}$ を削除する。

定理 2 $0 < \alpha \leq 1$ に対して，ネットワーク G において，$A_1 = \{(i,j) \mid Cr_{ij} \geq \alpha\}$ とし，ネットワーク $G - \{(i,j) \mid Cr_{ij} < \alpha\}$ において，$A_2 = \{(i,j) \mid Cr_{ij} \geq \alpha\}$ とすると，$A_1 = A_2$ である。

[証明] 作業 $(s,t) \in \{(i,j) \mid Cr_{ij} < \alpha\}$ に対して，$Cr_p < \alpha$，$(\forall p \in P_{(s,t)})$ である。したがって，定義 4 より $p \in P_{(s,t)}$ は，$Cr_{ij} \geq \alpha$ となる Cr_{ij} の計算に影響を与えない。 □

i $(i = 1,\ldots,h)$ 回目の反復で得られたクリティカルの度合いが $\frac{i}{h}$ 未満の作業に対応するアークをプロジェクトネットワークから削除し，そのネットワークを $i+1$ 回目の計算すべきネットワークとする。この操作により，

反復ごとに計算対象となるネットワークの作業の個数は減少していくため，計算効率は大幅に向上する。

5.2 ラベルの付加

始点から結合点 r $(r=2,\ldots,n)$ までのパスを認識するために結合点 r にラベル $[i,k]$ のリスト L_r を付加する。ここで，i と k は，それぞれ，先行結合点 i とそのリスト L_i の k 番目のラベルであることを示す。結合点 r に対応するラベル $[i,k]\in L_r$ を始点までたどることにより，パス $p=\{1,\ldots,i,(i,r),r\}$ が構成される。ゆえに，始点から結合点 r までの異なるパスの個数は $|L_r|$ となる。ここで，しきい値 α に関して、L_r から構成されるパスの集合を $\mathcal{P}_{1r}^{\alpha}$ とする。

5.3 解法

ファジィプロジェクト遂行時間と各作業のクリティカルの度合いを求める解法を提案する。この解法は，次に示す Algorithm 1 と Algorithm 2 から構成され，Algorithm 1 では，設定された分割数で，しきい値 α の値を引数として，Algorithm 2 を反復実行し，各作業のクリティカルの度合いを近似的に決定する。Algorithm 2 では，しきい値 α の値に対する区間で表現されたプロジェクト遂行時間及びクリティカルの度合いが，α 以上のすべての作業を決定する。提案する解法を次に示す。ただし，B_r は，結合点 r の先行結合点の集合 $\{i\mid(i,r)\in A'\}$ を表す。

Algorithm 1

ステップ 0. 区間 [0,1] を等分割する分割数 $h\in Z^{+}$ を設定する。
$Cr_{ij}\leftarrow 0,\ \forall(i,j)\in A.$
$A'\leftarrow A.$

ステップ 1. しきい値 $\alpha=\frac{1}{h},\frac{2}{h},\ldots,1$ の各値に対して，ステップ 2，3 を反復する。

ステップ 2. しきい値を α として Algorithm 2 を実行する。

ステップ 3. $A'\leftarrow A'-\{(i,j)\mid(i,j)\in A',Cr_{ij}<\alpha\}$

ステップ 4. $Cr_{ij}\ (\forall(i,j)\in A)$ 及び $\cup_{\alpha=\frac{1}{h}}^{1}(\widetilde{t_n^E})_{\alpha}$ を出力する。
終了する。

Algorithm 2

ステップ 0. 引数 α に対して，$(\widetilde{d}_{ij})_{\alpha}\ (\forall(i,j)\in A')$ を計算する。

ステップ 1. $L_1\leftarrow[-,-].$
$L_j\leftarrow\emptyset,\ (j=2,\ldots,n).$
$(\widetilde{t_1^E})_{\alpha}\leftarrow[0,0].$

ステップ 2. $r=2,\ldots,n$ に対して，ステップ 3，4，5 を反復する。

ステップ 3. $L_r\leftarrow\cup_{j\in B_r}L_j.$

ステップ 4. もし，$|B_r|>1$ ならば，ステップ 5 を行う。そうでなければ，ステップ 2 に戻る。

ステップ 5. すべてのラベルの対 $[j_s,k_s],[j_t,k_t]\in L_r$ に対して，$[j_s,k_s],[j_t,k_t]$ をたどって，それぞれパス p_s，p_t を構成する。
もし，$\mathrm{Poss}(\widetilde{d}(p_s)\geq\widetilde{d}(p_t))<\alpha$ であるならば，
$L_r\leftarrow L_r-[j_s,k_s]$

ステップ 6. $Cr_{ij}\leftarrow\alpha,\forall(i,j)\in p,\ p\in\mathcal{P}_{1n}^{\alpha}.$
$(\widetilde{t_n^E})_{\alpha}=(\widetilde{\max}_{p\in\mathcal{P}_{1n}^{\alpha}}\{\widetilde{d}(p)\})_{\alpha}$
終了する。

6 おわりに

本論文では，所要時間がファジィ数で表されたプロジェクトネットワーク問題において，各作業の従属関係を考慮した解法を提案した。

参考文献

[1] 岡田真幸, “ファジィプロジェクトネットワーク問題におけるクリティカルパスの解析,” **日本ファジィ学会誌**, vol. 12, pp. 133–142, 2000.

[2] S. Okada, “Critical path analysis in project network with fuzzy activity times,” *Proc. of the Eighth International Fuzzy Systems Association World Congress*, vol. 2, pp. 111 –111, 1999.

[3] C. S. McCahon, “Using PERT as an approximation of fuzzy project-network analysis,” *IEEE trans. on engineering management*, vol. 40, no. 2, pp. 146–153, 1993.

[4] 岡田真幸, “所要時間にあいまいさを含むプロジェクトスケジューリング問題の解析,” **第 *14* 回ファジィシステムシンポジウム**, pp. 509–510, 1998.

問い合わせ先

〒 326-0808 栃木県足利市本城 3 丁目 2120
足利短期大学
岡田真幸
TEL 0284-21-8242
FAX 0284-21-1270
E-mail okada@ashikaga.ac.jp

Scheduling with Fuzzy Delays and Fuzzy Precedences*

Shao Chin Sung
School of Information Science,
Japan Advanced Institute of Science
and Technology.

Hiroaki Ishii
Graduate School of Engineering,
Osaka University.

Milan Vlach
School of Information Science,
Japan Advanced Institute of Science
and Technology.

Abstract: A problem of nonpreemptively scheduling jobs on a single machine subject to fuzzy precedence constraints is considered. Time delays between jobs are allowed to be fuzzy numbers. Schedules are evaluated not only by their makespan but also by levels of satisfaction with time delays and levels of satisfaction with fuzzy precedence constraints.

1 Introduction

Recently Wikum et al. [4] investigated the problem of nonpreemptively scheduling $n+1$ jobs $J_*, J_1, J_2, \ldots, J_n$ on a single machine to minimize makespan subject to constraints which generalize the standard precedence constraints as follows: In addition to specifying a strict partial order $\prec$ on the set of jobs, the generalized precedence constraints require that if job J_i must precede job J_j (that is, $J_i \prec J_j$) then the time between the completion of J_i and the beginning of J_j must be at least l_{ij} and no more than u_{ij} of time units, where $0 \leq l_{ij} \leq u_{ij} \leq \infty$.

We consider an analogous problem under the assumptions that $u_{ij} = \infty$, time delays l_{ij} are allowed to be fuzzy numbers, and schedules are evaluated not only by their makespan but also by levels of satisfaction with time delays and levels of satisfaction with fuzzy precedence constraints. We show that the resulting three-criteria optimization problem can be solved in polynomial time, provided the prescribed partial order $\prec$ consists of 1-chains, in the terminology of Wikum et al. [4].

*Corresponding Author: Shao Chin Sung, School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, 1-1 Asahidai, Tatsunokuchi, Ishikawa, 923-1292, Japan. Email: son@jaist.ac.jp

2 Problem Formulation

There are $n+1$ jobs $J_*, J_1, J_2, \ldots, J_n$ to be scheduled on a single machine which is continuously available from time $t = 0$ and can process at most one job at at time. The jobs are also available from $t = 0$ and require uninterrupted processing times $p_*, p_1, p_2, \ldots, p_n$. In addition to processing time p_i, two numbers l_i and u_i are associated with each J_i from the set $\mathcal{J} = \{J_1, J_2, \ldots, J_n\}$. These numbers are assumed to satisfy the inequalities $0 \leq l_i \leq u_i$, and they serve to define a fuzzy number whose membership function $D_i : \mathbf{R} \to [0,1]$ is defined as follows: If $l_i < u_i$, then

$$D_i(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < l_i, \\ \dfrac{x - l_i}{u_i - l_i} & \text{if } l_i \leq x \leq u_i, \\ 1 & \text{if } u_i < x, \end{cases} \tag{1}$$

and if $l_i = u_i$, then

$$D_i(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < l_i, \\ 1 & \text{if } x \geq u_i. \end{cases} \tag{2}$$

Furthermore, we assume that the feasibility of schedules is restricted by the following requirements:

- Jobs $J_1, J_2, \ldots, J_n$ must be processed in the interval $[0, T]$ where $T = \sum_{i=1}^{n} p_i$.
- Job J_* must be processed last.
- For each $J_i \in \mathcal{J}$, the time between the completion time of J_i and the starting time of J_* must be at least l_i time units.

It follows that each feasible schedule can be represented by an ordered pair (π, B) where π is a permutation of the set $\{1, 2, \ldots, n\}$ representing the processing order of jobs from $\mathcal{J}$ and B is the starting time of processing J_* such that

$$B \geq \max_{1 \leq i \leq n} \left(l_{\pi(i)} + \sum_{j=1}^{i} p_{\pi(j)} \right). \tag{3}$$

To evaluate feasible schedules we use three performance measures: the makespan, the minimum degree of satisfaction with given fuzzy precedence constraints, and the minimum degree of satisfaction with time delays. The values of these performance measures are denoted by $v_1(\pi, B)$, $v_2(\pi, B)$, and $v_3(\pi, B)$, respectively, and they are defined as follows.

The makespan $v_1(\pi, B)$ of schedule (π, B) is calculated by

$$v_1(\pi, B) = \max \left\{ \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \sum_{j=1}^{i} p_{\pi(j)} \right\}, B + p_* \right\}.$$

From (3), we have

$$v_1(\pi, B) = B + p_*.$$

To simplify the notation, we assume without loss of generality that $p_* = 0$.

To calculate the minimum degree of satisfaction with fuzzy precedence constraints, we assume that the following type of fuzzy precedences are specified; see [1, 3] for more details. For each ordered pair (J_i, J_j) of different jobs from $\mathcal{J}$, a positive number $\mu(i, j)$ less than or equal to 1 is given such that if $\mu(i, j) < 1$, then $\mu(j, i) = 1$. The value $\mu(i, j)$ expresses the degree of satisfaction or desirability of processing job J_i before job J_j; the higher number represents higher degree of satisfaction. If $\mu(i, j) = \mu(j, i) = 1$, then the jobs are independent in the sense that no preference between the two possible orders exists.

Using the family $\{\mu(i, j)\}$, we define the minimum degree of satisfaction with fuzzy precedence constraints by

$$v_2(\pi, B) = \min_{1 \leq i < j \leq n} \mu(\pi(i), \pi(j)).$$

Note that this performance measure does not depend on B.

As already mentioned, the degree of satisfaction with time delay between J_i and J_* is given by D_i, and the minimum degree of satisfaction with time delays is given by

$$v_3(\pi, B) = \min_{1 \leq i \leq n} D_{\pi(i)}(d_{\pi(i)}(B, \pi)),$$

where $d_{\pi(i)}(B, \pi) = B - \sum_{j=1}^{i} p_{\pi(j)}$.

We say that a schedule (π, B) *dominates* a schedule (π', B') if

$$\begin{aligned} v_1(\pi, B) &\leq v_1(\pi', B'), \\ v_2(\pi, B) &\geq v_2(\pi', B'), \\ v_3(\pi, B) &\geq v_3(\pi', B'), \end{aligned}$$

and at least one of these inequalities is strict: and we say (π, B) and (π', B') are *equivalent* if

$$\begin{aligned} v_1(\pi, B) &= v_1(\pi', B'), \\ v_2(\pi, B) &= v_2(\pi', B'), \\ v_3(\pi, B) &= v_3(\pi', B'). \end{aligned}$$

The problem we are interested in is to find a suitable description of the set of nondominated feasible schedules. We solve this problem by proposing a polynomial time algorithm for finding a set of nondominated schedules that represent the whole set (usually uncountable) of nondominated feasible schedules.

3 Problem Solution

First we introduce some more notation. For each function D_i defined by (1) or (2), we define its inverse $D_i^{-1} : [0, 1] \to [l_i, u_i]$ by

$$D_i^{-1}(\alpha) = \alpha u_i + (1 - \alpha) l_i.$$

Suppose the processing order of jobs from $\mathcal{J}$ and the minimum degree of satisfaction with time delays are specified by a permutation π of $\{1,2,\ldots,n\}$ and $\alpha \in [0,1]$. Then, the schedule with the minimum makespan can be represented by $(\pi, B(\pi,\alpha))$, where

$$B(\pi,\alpha) = \max_{1\le i\le n}\left(D_i^{-1}(\alpha) + \sum_{j=1}^{i} p_{\pi(j)}\right).$$

It follows from the linearity of D_i^{-1} that $B(\pi,\cdot)$ is a piecewise linear function. Moreover, for each permutation π of $\{1,2,\ldots,n\}$,

$$B(\pi,\alpha) < B(\pi,\alpha')$$

whenever $0 \le \alpha < \alpha' \le 1$, because each D_i^{-1} is strictly increasing.

Now the main idea and stages of the algorithm can be described as follows:

STAGE 1. *Initialization:*

1. *For $1 \le i,j \le n$ with $i \ne j$, let*

$$\alpha_{ij} = \frac{(l_i - l_j)}{(u_j - l_j) - (u_i - l_i)}.$$

Arrange all α_{ij} which are from the open interval $(0,1)$ in nondecreasing order and rename the resulting q different values so that

$$0 < \beta(1) < \beta(2) < \cdots < \beta(q) < 1.$$

Let $\beta(0) = 0$ and $\beta(q+1) = 1$.

2. *Arrange all $\mu(i,j)$ from the open interval $(0,1)$ in nonincreasing order and rename the resulting k different values so that*

$$0 < \nu(1) < \nu(2) < \cdots < \nu(k) < 1.$$

Let $\nu(k+1) = 1$.

3. *For $1 \le s \le k+1$, construct a precedence graph $G_s = (\mathcal{J}, A_s)$ such that $(J_i, J_j) \in A_s$ if $\mu(i,j) = 1$ and $\mu(j,i) < \nu(s)$.*

Now consider the problem to find a permutation π which minimizes the makespan with the following conditions:

- The minimum degree of satisfaction with the fuzzy precedence constraints is at least $\nu(s)$.
- The minimum degree of satisfaction with time delays is exactly $\alpha \in [0,1]$.

This problem can be solved by applying the Lawler algorithm [2] to the problem with cost function $f_i(\cdot,\alpha)$ for each job J_i defined by

$$f_i(x,\alpha) = x + D_i^{-1}(\alpha) \quad \text{for } 1 \le i \le n,$$

and the precedence graph G_s. The Lawler algorithm returns a permutation π such that

$$\max_{1\le i\le n} f_{\pi(i)}\left(\sum_{j=1}^{i} p_{\pi(j)}, \alpha\right) = B(\pi,\alpha),$$

is minimized, and the schedule $(\pi, B(\pi,\alpha))$ satisfies $v_2(\pi, B(\pi,\alpha)) \ge \nu(s)$ and $v_2(\pi, B(\pi,\alpha)) = \alpha$.

Notice that, for each $1 \le t \le q+1$, there exists a permutation σ_t of $\{1,2,\ldots,n\}$ such that

$$f_{\sigma_t(1)}(x,\alpha) \le f_{\sigma_t(2)}(x,\alpha) \le \cdots \le f_{\sigma_t(n)}(x,\alpha).$$

for all $\alpha \in [\beta(t-1), \beta(t)]$, since $D_i^{-1}(\alpha) \ne D_j^{-1}(\alpha)$ for any $i \ne j$ and for any $\alpha \in (\beta(t-1), \beta(t))$. Essentially, the permutation obtained from the Lawler algorithm depends only on σ_t and the precedence graph G_s, and thus, the Lawler algorithm returns the same permutation for all $\alpha \in [\beta(t-1), \beta(t)]$. The time complexity of the Lawler algorithm is $O(n \log n)$.

STAGE 2. *For $1 \le s \le k+1$ and $0 \le t \le q+1$, run the Lawler algorithm with cost function $f_i(\cdot, \beta(t))$ and precedence graph G_s. Denote the resulting permutation by $\pi_{(s,t)}$.*

Now at least one schedule from each equivalence class of nondominated feasible schedules can be represented by $(\pi_{(s,t)}, B(\pi_{(s,t)},\alpha))$ for some $\alpha \in [\beta(t-1), \beta(t)]$. The next step is to find efficient method to exclude schedules which can be dominated, and to do it in such a manner that exactly one schedule of each equivalence class remains undeleted.

To see how this can be realized efficiently, observe the following facts. For $1 \le s \le k+1$, any two schedules from

$$\bigcup_{1\le t\le q+1} \{(\pi_{(s,t)}, B(\pi_{(s,t)},\alpha)) \mid \alpha \in [\beta(t-1), \beta(t))\}$$

do not dominate each other, since for $1 \leq t < t' \leq q+1$ and $\alpha \in [\beta(t-1), \beta(t))$ and $\alpha' \in [\beta(t'-1), \beta(t'))$, we have $\alpha < \alpha'$ and

$$B(\pi_{(s,t')}, \alpha') > B(\pi_{(s,t')}, \alpha) \geq B(\pi_{(s,t)}, \alpha).$$

Also notice that

$$\begin{aligned} B(\pi_{(s,t)}, \alpha) &\leq B(\pi_{(s',t)}, \alpha), \\ v_2(\pi_{(s,t)}, B(\pi_{(s,t)}, \alpha)) &\leq v_2(\pi_{(s',t)}, B(\pi_{(s',t)}, \alpha)), \end{aligned}$$

whenever $1 \leq s < s' \leq k+1$, since G_s is a subgraph of $G_{s'}$. Therefore, $(\pi_{(s,t)}, B(\pi_{(s,t)}, \alpha))$ with $\alpha \in [\beta(t-1), \beta(t)]$ is dominated by or equivalent to $(\pi_{(s',t')}, B(\pi_{(s',t')}, \alpha'))$ with $\alpha' \in [\beta(t'-1), \beta(t')]$ if $s \leq s'$ and $\alpha = \alpha'$ (i.e., $t = t'$). Therefore by finding all $\alpha \in [\beta(t'-1), \beta(t')]$ such that $B(\pi_{(s,t)}, \alpha)) = B(\pi_{(s',t)}, \alpha))$, we can exclude schedule $(\pi_{(s,t)}, B(\pi_{(s,t)}, \alpha)))$ which is dominated by or equivalent to some schedule $(\pi_{(s',t)}, B(\pi_{(s',t)}, \alpha))$. It can be done in $O(n^2)$ for each pair of s and s' with $s < s'$.

STAGE 3. *For* $1 \leq t \leq q+1$ *and for* $1 \leq s < s' \leq k+1$, *exclude schedule* $(\pi_{(s,t)}, B(\pi_{(s,t)}, \alpha))$ *with* $\alpha \in [\beta(t-1), \beta(t)]$ *which is dominated by schedule* $(\pi_{(s',t)}, B(\pi_{(s',t)}, \alpha))$

Therefore, the problem of finding a set of nondominated feasible schedules which contains exactly one schedule from each equivalent class of nondominated feasible schedule can be solved in polynomial time. A straightforward implementation leads to an $O(n^8)$-time algorithm. However, this complexity can obviously be improved.

References

[1] Ishii, I. and Tada, M., "Single machine scheduling problem with fuzzy precedence relation", *European Journal of Operational Research 87*, 284-288, 1995.

[2] Lawler, E.L., "Optimal sequencing of a single machine subject to precedence constraints", *Management Science* 19, 544-546, 1973.

[3] Levner, E. and Vlach, M., "Single-machine scheduling with mixed precedence constraints", *Journal of the Operations Research Society of Japan* 42(3), 330-341, 1999.

[4] Wikum, E.D., Llewellyn, D.C., and Nemhauser, G.L., "One machine generalized precedence constrained problems", *Operational Research Letters* 16, 87-99, 1994.

TB3−3

Generalized Concavity in Location Theory

Ramík Jaroslav and Vlach Milan
Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract

The paper is devoted to application of T-quasiconcave functions in location problems. Based on satisfaction functions an alternative approach to the classical location problem is formulated which allows for incorporating crisp or fuzzy information based on expert judgements. Two numerical examples are investigated.

1 Introduction

Motivated by use of quasiconcave functions in economics, particularly in location problems, we introduce a generalization of quasiconcavity of functions that map the space of real n-vectors into the unit interval $[0,1]$. The generalization is based on properties of triangular norms. For each triangular norm T such a generalized quasiconcave function is called T-quasiconcave.

In the first part we show that T-quasiconcave functions defined in [5] and [6] may be characterized by classical quasiconcave property on the real line, see [1]. By a t-norm T applied to T-quasiconcave functions we obtain again a T-quasiconcave function. Introducing the concept of t-conorm we obtain another tool for creating T-quasiconcave functions.

The second part of the paper is devoted to application of T-quasicocave functions in the location problem. Based on satisfaction functions - membership functions of fuzzy sets - an alternative approach to classical location problem is formulated. Two numerical examples are presented, one with a single supplier, the other with two competing suppliers. New approach allows for incorporating crisp or fuzzy information based on expert judgement.

2 Properties of T-quasiconcave functions

Let X be a convex subset of $\mathbf{R}^n$, let $\mu : \mathbf{R}^n \to [0,1]$ and $x, \bar{x} \in X$, $x \neq \bar{x}$. Define a set

$$L_X(x,\bar{x}) = \{z \mid z(x-\bar{x}) + \bar{x} \in X,\ z \in \mathbf{R}^1\}, \quad (1)$$

and function $\mu_{x,\bar{x}} : \mathbf{R}^1 \to [0,1]$ by

$$\mu_{x,\bar{x}}(z) = \mu(z(x-\bar{x}) + \bar{x}) \ . \quad (2)$$

Evidently, $L_X(x,\bar{x})$ defined by (1) is a convex subset of $\mathbf{R}^1$, i.e. an interval.

Let $X \subset \mathbf{R}^n$ be a convex set, the function $\mu : \mathbf{R}^n \to [0,1]$ is *normalized*, if $[\mu]_1$ is nonempty, where $[\mu]_\alpha = \{x \in \mathbf{R}^n | \mu(x) \geq \alpha\}$ for $0 < \alpha \leq 1$ is called *upper α-level set*. In [5] T-quasiconcave functions are defined as follows: A real function $\mu : \mathbf{R}^n \to [0,1]$ is called *T-quasiconcave on X* if

$$\mu(\lambda x + (1-\lambda)y) \geq T(\mu(x), \mu(y)),$$

for every $x, y \in X$, $x \neq y$ and $0 < \lambda < 1$. The following propositions explain how T-quasiconcavity is related to the usual quasiconcavity, i.e. the particular case of $T_0 = \min$.

The proofs of the following propositions can be found in [5].

Proposition 1 *Let T be a t-norm, X be a convex subset of $\mathbf{R}^n$, and $\mu : \mathbf{R}^n \to [0,1]$ be normalized. If μ is T-quasiconcave on X, then $\mu_{x,\bar{x}}$ is quasiconcave on $L_X(x,\bar{x})$ for every $\bar{x} \in [\mu]_1$, and every $x \in X$, $x \neq \bar{x}$.*

This necessary condition is also sufficient in the following sense:

Proposition 2 *Let X be a convex subset of $\mathbf{R}^n$, and let $\mu : \mathbf{R}^n \to [0,1]$ be normalized. If $\mu_{x,\bar{x}}$ is quasiconcave on $L_X(x,\bar{x})$ for every $\bar{x} \in [\mu]_1$, and every $x \in X$, $x \neq \bar{x}$, then there exists a t-norm T such that μ is T-quasiconcave on X.*

Proposition 3 *Let X be a convex subset of $\mathbf{R}^n$, and let $\mu_i : \mathbf{R}^n \to [0,1]$, $i = 1,2$, be T-quasiconcave on X. Then*

$$\varphi(x) = T(\mu_1(x), \mu_2(x)) \quad (3)$$

is T-quasiconcave on X.

Proposition 4 *Let S be a t-conorm, X be a convex subset of $\mathbf{R}^1$, and let $\mu_i : \mathbf{R}^1 \to [0,1]$, $i = 1,2$, be normalized and quasiconcave on X such that $[\mu_1]_1 \cap [\mu_2]_1 \neq \emptyset$. Then $\psi : \mathbf{R}^1 \to [0,1]$ defined for $x \in X$ by*

$$\psi(x) = S(\mu_1(x), \mu_2(x)) \quad (4)$$

is quasiconcave on X.

The assumption $[\mu_1]_1 \cap [\mu_2]_1 \neq \emptyset$ is essential for validity of the above proposition, see Example 12 in [5]. The following proposition is an n-dimensional version of the previous one.

Proposition 5 *Let T be a t-norm, S be a t-conorm, X be a convex subset of $\mathbf{R}^n$, and let $\mu_i : \mathbf{R}^n \to [0,1]$, $i = 1,2$, be normalized and T-quasiconcave on X such that $[\mu_1]_1 \cap [\mu_2]_1 \neq \emptyset$. Let $\mu : \mathbf{R}^n \to [0,1]$ be defined by*

$$\mu(x) = S(\mu_1(x), \mu_2(x)). \tag{5}$$

Then $\mu_{x,\bar{x}}$ is quasiconcave on $L_X(x,\bar{x})$ for every $\bar{x} \in [\mu_1]_1 \cap [\mu_2]_1$, and every $x \in X$, $x \neq \bar{x}$.

Proposition 5 may easily be extended to more than two T-quasiconcave functions $\mu_i : \mathbf{R}^n \to [0,1]$, $i = 1,2,...,m$ satisfying condition $[\mu_1]_1 \cap ... \cap [\mu_m]_1 \neq \emptyset$.

Moreover, if in Proposition 5 $[\mu_1]_1 = [\mu_2]_1 \neq \emptyset$, then, by Proposition 2, $\mu(x)$ defined by (5) is T-quasiconcave on $X \subset \mathbf{R}^n$. The above proposition gives a method for creating new T-quasiconcave function on $X \subset \mathbf{R}^n$, from the original T-quasiconcave functions on $X \subset \mathbf{R}^n$ by using a t-conorm.

3 T-quasiconcave functions in location problem

A classical problem in location theory consists in location p suppliers to cover given demands of q consumers in such a way that total shipping costs are minimized, see e.g. [3]. Consider the following mathematical model:

Let $I = \{1,2,...,q\}$ be the set of q consumers located on the plane $\mathbf{R}^2$ in the points $\mathbf{c}_i$ with coordinates $\mathbf{c}_i = (u_i, v_i) \in \mathbf{R}^2$, $i \in I$. Each consumer $i \in I$ is characterized by a given nonnegative demand b_i - an amount of products, goods, services, etc. By $J = \{1,2,...,p\}$, the set of suppliers (i.e. producers or facilities) covering the demands of individual consumers, is denoted. The distance of consumer $i \in I$ located at (u_i, v_i) and producer $j \in J$ at (x_j, y_j) is denoted by $d_{ij}(x_j, y_j)$ and defined by $d_{ij}(x_j, y_j) = d((u_i, v_i), (x_j, y_j))$, where d is an appropriate distance function (e.g. Euclidean distance). The shipping cost between i and j depends on the location of consumer i, on the distance $d_{ij}(x_j, y_j)$ of consumer i to suplier j, and, on the amount of goods z_{ij} transported from j to i. These characteristics can be expressed by the value $f_i(d_{ij}(x_j, y_j), z_{ij})$ of a cost function $f_i : [0,+\infty) \times [0,+\infty) \longrightarrow \mathbf{R}^1$, $i \in I$, that is nondecreasing in both variables. The total cost of the shipment of goods from all producers to all consumers is defined as the sum of the individual cost functions $\sum_{i=1}^{q} \sum_{j=1}^{p} f_i(d_{ij}(x_j, y_j), z_{ij})$. The problem is to find locations of suppliers (x_j, y_j) and transported amounts z_{ij} for all consumers and suppliers such that the requirements of the consumers are covered and total shipping cost is minimal. The mathematical model of the above location problem can be formulated as follows:

minimize

$$\sum_{i=1}^{q} \sum_{j=1}^{p} f_i(d_{ij}(x_j, y_j), z_{ij}) \tag{6}$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{p} z_{ij} \geq b_i, \ i \in I, \tag{7}$$

$$z_{ij} \geq 0, (x_j, y_j) \in \mathbf{R}^2, \ i \in I, \ j \in J. \tag{8}$$

Problem (6)-(8) is a constrained nonlinear optimization problem with $2p + pq$ variables x_j, y_j, z_{ij}. We assume that functions f_i have the following simple form:

$$f_i(d_{ij}(x_j, y_j), z_{ij}) = \alpha_i . d_{ij}(x_j, y_j) . z_{ij}, \tag{9}$$

where $\alpha_i > 0$ are constant coefficients, and distance function d_{ij} is defined as follows

$$d_{ij}(x_j, y_j) = ((u_i - x_j)^\beta + (v_i - y_j)^\beta)^{\frac{1}{\beta}}, \tag{10}$$

where $i \in I$, $j \in J$ and $\beta > 0$. Problem (6)-(8), even in simple form with (9) and (10), is difficult to solve numerically because of its nonlinearity which brings numerous local optima.

Here, we adopt an alternative formulation, namely, we assume, that optimal allocation of the given number of facilities - suppliers - depends not only on the distances and transported amounts, but also on some other factors. We consider the objective function as a utility or satisfaction function μ, such that $\mu : \mathbf{R}^{2p} \times \mathbf{R}^q \to [0,1]$. In such a case $\mu((x_1, y_1), ..., (x_p, y_p), b_1, ..., b_q) = 0$ denotes the total dissatisfaction (or, zero utility) with location $(x_j, y_j) \in \mathbf{R}^2$, $j \in J$, and supplied amounts $b_i, i \in I$. On the other hand, $\mu((x_1, y_1), ..., (x_p, y_p), b_1, ..., b_q) = 1$ denotes the maximal total satisfaction (or, maximal utility) with location $(x_j, y_j) \in \mathbf{R}^2$, $j \in J$ and supplied amounts. Within the framework of fuzzy set theory, the concept of satisfaction is understood as a fuzzy set on the universal set of all locations $(x_j, y_j) \in \mathbf{R}^2$ of the p suppliers $j \in J$ and supplied amounts $b_i, i \in I$, defined by the membership function $\mu : \mathbf{R}^{2p} \times \mathbf{R}^q \to [0,1]$. Then all relations and influences are incorporated in the shape of the membership function.

Depending on the required amount b_i, an individual consumer $i \in I$ may express his satisfaction with the supplier $j \in J$ located at (x_j, y_j) by membership grade $\mu_{ij}(x_j, y_j, b_i)$, where membership function $\mu_{ij} : \mathbf{R}^2 \times \mathbf{R}^q \to [0,1]$ satisfies condition $\mu_{ij}(u_i, v_i, b_i) = 1$, i.e. the maximal satisfaction is equal to 1, provided that the facility $j \in J$ is located at the same place as the consumer $i \in I$.

The individual satisfaction expressed by the membership function $\mu_i : \mathbf{R}^{2p} \times \mathbf{R}^q \to [0,1]$ of the consumer $i \in I$ with the amount b_i, and with

suppliers located at $(x_1, y_1), (x_2, y_2), ..., (x_p, y_p)$, is defined by the satisfaction of the location of the facility with maximal membership grade, i.e.: $\mu_i((x_1, y_1), ..., (x_p, y_p), b_i)$

$$= \max\{\mu_{i1}(x_1, y_1, b_i), ..., \mu_{ip}(x_p, y_p, b_i)\}. \quad (11)$$

The supplier $j \in J$ with the maximal grade of satisfaction $\mu_{ij}(x_j, y_j, b_i)$ will cover the required amount b_i. If there are more such suppliers, then they share amount b_i equally. The formula (11) can be generalized by using t-conorm S as follows:

$$\begin{aligned} & \mu_i((x_1, y_1), ..., (x_p, y_p), b_i) \quad (12) \\ = \; & S(\mu_{i1}(x_1, y_1, b_i), ..., \mu_{ip}(x_p, y_p, b_i)). \end{aligned}$$

Moving the location point of a supplier along the line from a location (x, y) toward the location site of consumer i at $\mathbf{c}_i = (u_i, v_i)$, it is natural to assume that satisfaction grade of consumer i is increasing, or, at least non-decreasing, provided that b_i is constant. This assumption results in T-quasiconcavity requirement of membership functions μ_{ij} on $\mathbf{R}^2$. On the other hand, with the given location (x_j, y_j) of supplier j, satisfaction grade $\mu_{ij}(x_j, y_j, b)$ is nonincreasing in b.

We obtain $\mathbf{c}_i = (u_i, v_i) \in [\mu_{i1}]_1 \cap ... \cap [\mu_{ip}]_1$, therefore, by Proposition 5, individual satisfaction μ_i of consumer i, defined by (12), is quasiconcave on $L_X(\mathbf{c}_i, \mathbf{c})$ for every $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^2$, $\mathbf{c} \neq \mathbf{c}_i$.

Total satisfaction (or, utility) with locations $(x_j, y_j) \in \mathbf{R}^2$, $j \in J$, and required amounts b_i, $i \in I$, is defined as a minimal satisfaction of the individual satisfaction grades, or, more generally, the value of t-norm T, i.e.: $\mu((x_1, y_1), ..., (x_p, y_p), b_1, ..., b_q)$

$$= T(\mu_1(x_1, y_1, b_1), ..., \mu_q(x_q, y_q, b_q)). \quad (13)$$

Now, we have the problem of optimal location called *maximum satisfaction problem* :

(**L**) maximize (13)
subject to (12) and $(x_j, y_j) \in \mathbf{R}^2$, $j \in J$.

We illustrate the above approach in the following two numerical examples.

Example 1.

Consider the location problem with $q = 3$ consumers denoted by $I = \{1, 2, 3\}$, located at $(u_1, v_1) = (0, 1)$, $(u_2, v_2) = (0, 2)$, $(u_3, v_3) = (3, 0)$, with the required amounts $b_1 = 10$, $b_2 = 20$, $b_3 = 30$.

Let us consider the problem of finding optimal location of a single facility, i.e. $p = 1$.

First, solve the classical problem (6) - (8) with $\alpha_i = 1$, $i = 1, 2, 3$, $\beta = 2$. Then the problem to solve is to minimize the cost function "amount · distance":

minimize $f(x, y) = 10(x^2 + (1 - y)^2)^{\frac{1}{2}} +$

$$20(x^2 + (2 - y)^2)^{\frac{1}{2}} + 30\left((x - 3)^2 + y^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

subject to $(x, y) \in \mathbf{R}^2$.

The optimal location of the facility has been found as $(x^C, y^C) = (3, 0)$, the minimal cost is $f(x^C, y^C) = 103.73$.

Applying the alternative approach, we assume that the individual satisfaction of consumer i, located at $\mathbf{c}_i = (u_i, v_i)$ with location of the production facility at (x, y) and with demand b_i, is given by the following membership (satisfaction) function:

$$\mu_i(x, y, b_i) = \frac{1}{1 + b_i((x - u_i)^2 + (y - v_i)^2)^{\frac{1}{2}}}.$$

We shall investigate the problem with two different t-norms.

First, we consider $T_0 = \min$, then we solve the maximum satisfaction problem:

maximize $\mu_M(x, y, 10, 20, 30) =$

$$\min\{\mu_1(x, y, 10), \mu_2(x, y, 20), \mu_3(x, y, 30)\}, \quad (14)$$

subject to $(x, y) \in \mathbf{R}^2$.

The optimal location of the facility has been found as $(x^M, y^M) = (1.8, 0.8)$ with the optimal membership function value $\mu_M(x^M, y^M, 10, 20, 30) = 0.023$. Comparing with the optimal solution of the classical problem, here the membership function value is $\mu_M(x^C, y^C, 10, 20, 30) = 0.013$. On the other hand, the cost is $f(x^M, y^M) = 104.64$.

Second, we consider the product t-norm $T_1(u, v) = u \cdot v$. We solve the maximum satisfaction problem:

maximize $\mu_P(x, y, 10, 20, 30) =$

$$\mu_1(x, y, 10) \cdot \mu_2(x, y, 20) \cdot \mu_3(x, y, 30) \quad (15)$$

subject to $(x, y) \in \mathbf{R}^2$.

The optimal location of the facility has been found as $(x^P, y^P) = (0, 1)$ with the optimal membership function value $\mu_P(x^P, y^P, 10, 20, 30) = 0.0005$. Moreover, we get $\mu_p(x^P, y^P, 10, 20, 30) = 0.0004$ and $\mu_P(x^M, y^M, 10, 20, 30) = 0.00002$, and the cost of this solution is $f(x^P, y^P) = 114.87$. The results are summarized in the following table.

	x	y	f	μ_M	μ_P
1.	3.0	0.0	103.7	0.01	0.00041
2.	1.8	0.8	104.6	0.02	0.00002
3.	0.0	1.0	114.9	0.01	0.00050

In the above table we can see differences between the results of the individual problems. In Row 1., the results of solving the classical problem (6)-(8) are displayed. In Row 2., the solution of maximum satisfaction problem (14) is presented, in Row 3, the results of the same problem (15) with the product norm and conorm are given. Depending both on input information and decision-making reguirements different locations of the facility may be optimal.

Example 2.

Consider the same problem as in Example 1 with $p = 2$, i.e. with two facilities to be optimally located.

Again, we begin with the classical problem (6) - (8) with $a_i = 1$, $i = 1,2,3$, $\beta = 2$. Then the problem to solve is to minimize the cost function "amount · distance":

minimize $f(x_1, y_1, x_2, y_2, z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}, z_{31}, z_{32}) =$

$$z_{11}(x_1^2 + (1-y_1)^2)^{\frac{1}{2}} + z_{12}(x_2^2 + (1-y_2)^2)^{\frac{1}{2}} +$$
$$z_{21}(x_1^2 + (2-y_1)^2)^{\frac{1}{2}} + z_{22}(x_2^2 + (2-y_2)^2)^{\frac{1}{2}} +$$
$$z_{31}((x_1-3)^2 + y_1^2)^{\frac{1}{2}} + z_{32}((x_2-3)^2 + y_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

subject to

$$z_{11} + z_{12} = 10, z_{21} + z_{22} = 20, z_{31} + z_{32} = 30,$$
$$(x_j, y_j) \in \mathbf{R}^2,\ z_{ij} \geq 0,\ i = 1,2,3,\ j = 1,2.$$

The optimal solution, i.e. the locations of the facilities and shippment amounts have been found as $(0,2,3,0,10,0,20,0,0,30)$, whereas the minimal cost is

$$f(x_1^c, y_1^c, x_2^c, y_2^c, z_{12}^c, z_{21}^c, z_{22}^c, z_{31}^c, z_{32}^c) = 10.0.$$

Applying our alternative approach, the individual satisfaction of consumer $i \in I$ located at (u_i, v_i) with location of the facility at (x_j, y_j), $j \in J = \{1,2\}$, and with demand b_i, is given by the following membership (satisfaction) function:

$$\mu_{ij}(x_j, y_j, b_i) = \frac{1}{1 + b_i((x_j - u_i)^2 + (y_j - v_i)^2)^{\frac{1}{2}}}.$$

Particularly, for individual consumers $i = 1,2,3$ and producers $j = 1,2$, we obtain the membership functions:

$$\mu_{1j}(x_j, y_j, 10) = \frac{1}{1 + 10(x_j^2 + (y_j - 1)^2)^{\frac{1}{2}}},$$
$$\mu_{2j}(x_j, y_j, 20) = \frac{1}{1 + 20(x_j^2 + (y_j - 2)^2)^{\frac{1}{2}}},$$
$$\mu_{3j}(x_j, y_j, 30) = \frac{1}{1 + 30((x_j - 3)^2 + y_j^2)^{\frac{1}{2}}}. \quad (17)$$

Now, we investigate the problem with two different t-norms and t-conorms.

First, we consider $T_0 = \min$, $S_0 = \max$. Following (**L**) we solve the maximum satisfaction problem:

maximize $\mu_M((x_1, y_1), (x_2, y_2), 10, 20, 30) =$

$$\min\{\max_{j \in J}\{\mu_{1j}(x_j, y_j, 10)\}, \max_{j \in J}\{\mu_{2j}(x_j, y_j, 20)\}, \max_{j \in J}\{\mu_{3j}(x_j, y_j, 30)\}\}$$

subject to $(x_1, y_1, x_2, y_2) \in \mathbf{R}^4$.

Again, the optimal locations of the facilities has been computed as $(x_1^m, y_1^m, x_2^m, y_2^m) = (3,0,0,5/3)$ with the optimal membership value $\mu_M((x_1, y_1), (x_2, y_2), 10, 20, 30) = 0.130$. Notice that membership functions (17) are all T_0-quasiconcave on $\mathbf{R}^4$ and, by Proposition 5, μ_M is also T_0-quasiconcave on $\mathbf{R}^4$.

Second, we consider $T_1(u,v) = u \cdot v$, $S_1(u,v) = u + v - u \cdot v$. Again, by (**L**) we solve the maximum satisfaction problem:

maximize $\mu_P((x_1, y_1), (x_2, y_2), b_1, b_2, b_3) =$

$$\prod_i(\mu_{i1}(x_1, y_1, b_i) + \mu_{i2}(x_2, y_2, b_i) - \mu_{i1}(x_1, y_1, b_i) \cdot \mu_{i2}(x_2, y_2, b_i)),$$

subject to $(x_1, y_1, x_2, y_2) \in \mathbf{R}^4$.

The optimal locations of the facilities have been found as $(x_1^p, y_1^p, x_2^p, y_2^p) = (3,0,0,2)$ with the optimal membership value $\mu_P(x_1^p, y_1^p, x_2^p, y_2^p, 10, 20, 30) = 0.119$, being the same as the optimal solution of classical problem (16). The results are summarized in the following table.

	x_1	y_1	x_2	y_2	f	μ_M	μ_P
1.	3.0	0.0	0.0	2.0	10.0	0.090	0.119
2.	3.0	0.0	0.0	1.67	13.3	0.130	0.022
3.	3.0	0.0	0.0	2.0	10.0	0.090	0.119

In the above table we can see the differences between the results of the individual problems. Solving classical problem we obtain the same results as in the maximum satisfaction problem with the product t-norm T_1 and t-conorm S_1. Notice again, that membership functions (17) are T_1-quasiconcave on $\mathbf{R}^4$ and by Proposition 5 μ_P is T_1-quasiconcave on $\mathbf{R}^4$, too.

References

[1] M. Avriel, W.E. Diewert, S. Schaible and I. Zang, *Generalized concavity.* Plenum Press, N.Y., London, 1988.

[2] R. Bellmann and L. Zadeh, Decision making in fuzzy environment, *Management Science 17*, 4 (1970), 141–164.

[3] Z. Drezner and E. Zemel, Competitive location in the plane, *Annals of Operations Research*, Vol. 40 (1992), p. 173-193.

[4] B. Schweizer and A. Sklar, *Probabilistic metric spaces*, North Holand, New York, 1983.

[5] J. Ramik and M. Vlach, Concepts of generalized concavity based on triangular norms, submitted to *Journal of Statistics and Management Systems.*

[6] J. Ramik and M. Vlach, Generalized concavity based on the triangular norm and its use in fuzzy optimization, Proc. of the EUROFUSE Conference, Budapest 1999, p. 111-122.

Tel: 0761 51 1243
Fax: 0761 51 1149
E-mail: [Ramik,Vlach]@jaist.ac.jp

TB4−1

外部近似と切除平面を用いた最大リグレット最小解の計算法について

On Computation Methods for a Minimax Regret Solution Based on Outer Approximation and Cutting Planes

乾口 雅弘　松本 幸一　谷野 哲三
Masahiro INUIGUCHI　Kouichi MATSUMOTO and Tetsuzo TANINO

大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract: In this paper, we deal with linear programming problems with single convex polytope objective coefficent vectors. To such a problem, minimax regret solution has been proposed as a reasonable solution. To obtain a minimax regret solution, we should solve non-concave problems sequentially. For the nonconcave problems, many approaches are conceivable. We discuss the application of an outer approximation method and a cutting plane method specially designed for in bilinear programming problems. In order to compare the efficiency of the several methods, we compare the solution algorithms by a numerical experience.

1. はじめに

本研究では，目的関数の係数ベクトルが不明確で，その取りうる範囲が凸多面体で表された線形計画問題の最大リグレット最小解の計算法について考察する．最大リグレット最小解は，係数の変動に対する最適値からの最大の乖離をできるだけ小さくする合理的な解として提案されている [1]．最大リグレット最小化問題は，非凹なリグレット最大化問題を含んでいるので，容易に解くことができない．従来，可能的最適端点をすべて列挙することにより解く 2 段階アプローチや，2 レベル計画法を適用して解く方法が提案されている [2]．また，リグレット最大化問題が凸最大化問題であることに着目し，この問題に外部近似法を適用した計算方法が提案されている [2]．本研究では，リグレット最大化問題が双線形計画問題であることに着目し，この問題に対して切除平面法を用いた手法 [3] を適用するとともに，切除平面の有効性について考察する．

2. 不明確な係数をもつ線形計画問題と最大リグレット最小化

目的関数の係数が不明確である次の線形計画問題を考える．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad \boldsymbol{\gamma}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \\ &\text{subject to} \quad \boldsymbol{x} \in X = \{\boldsymbol{x} \mid A\boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{0}\} \end{aligned} \tag{1}$$

ただし，A は $m \times n$ 行列であり，$\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_n)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{b} = (b_1, b_2, \ldots, b_m)^{\mathrm{T}}$ である．また，X は有界であるとする．$\boldsymbol{\gamma}$ は可能性変数ベクトルであり，その取りうる範囲 Γ は次のように表される．

$$\Gamma = \{\boldsymbol{c} = (c_1, c_2, \ldots, c_n)^{\mathrm{T}} \mid D\boldsymbol{c} \leq \boldsymbol{g}\} \tag{2}$$

ここで，D は $p \times n$ 行列であり，$\boldsymbol{g} = (g_1, g_2, \ldots, g_p)^{\mathrm{T}}$ である．ただし，Γ は有界であると仮定する．

問題 (1) では，目的関数の係数ベクトルが不明確で，凸多面体 Γ 内にあることだけわかっている．一般に，Γ 内のすべての係数ベクトルに対して最適となる必然的最適解は存在しない．そこで，必然的最適性からの乖離をできるだけ小さくする最大リグレット最小解 [1][2] を考える．最大リグレット最小解は次の最大リグレット最小化問題を解くことにより求められる．

$$\underset{\boldsymbol{x} \in X}{\text{minimize}} \ \max_{\substack{\boldsymbol{c} \in \Gamma \\ \boldsymbol{y} \in X}} (\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}) \tag{3}$$

問題 (3) の解法として，次の緩和法に基づいたアルゴリズムが提案されている [1]．

アルゴリズム (緩和法)

Step 1. $\boldsymbol{c}^0 \in \Gamma$ について，$\max_{\boldsymbol{x} \in X} (\boldsymbol{c}^0)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}$ の最適解 $\boldsymbol{z}^0$ を求める．

Step 2. $r^0 = 0$，$k = 1$，$\boldsymbol{x}^0 = \boldsymbol{z}^0$ と設定する．

Step 3. $\boldsymbol{x}^0$ に対するリグレット最大化問題，

$$\max_{\substack{\boldsymbol{c} \in \Gamma \\ \boldsymbol{y} \in X}} (\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^0) \tag{4}$$

を解き，最適解を $(\boldsymbol{c}^k, \boldsymbol{z}^k)$ とし，最適値を r^k とする．

Step 4. $r^k \leq r^0 + \varepsilon$ ならば終了する．このとき，最大リグレット最小解は $\boldsymbol{x}^0$ となる．

Step 5. 緩和問題，

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad r \\ &\text{subject to} \quad (\boldsymbol{c}^j)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z}^j - (\boldsymbol{c}^j)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \leq r, \\ &\qquad\qquad\qquad\qquad j = 0, 1, 2, \ldots, k \\ &\qquad\qquad A\boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{5}$$

を解き，$(\boldsymbol{x}^0, r^0)$ を得られた最適解 $(\boldsymbol{x}^*, r^*)$ により更新し，$k = k + 1$ として Step 3 へ戻る．

ここで，$\varepsilon > 0$ は許容誤差である．Step 3 のリグレッ

ト最大化問題 (4) は，非凹計画問題となる．そこで，この部分に対して、従来，2 段階アプローチ，2 レベル計画法によるアプローチ，外部近似法によるアプローチが提案されている [2].

3. 切除平面法によるアプローチ

リグレット最大化問題 (4) は変数 $\boldsymbol{c}, \boldsymbol{y}$ に関する双線形計画問題である．このことから，双線形計画法を適用することが考えられる．双線形計画法として，Sherali と Shetty の方法 [3] が最も効率的であると考えられている．この Sherali と Shetty の方法は，2 種類の切除平面に基づく方法で，有限回の反復で最適解が求められる．まず，2 種類の切除平面について説明する．

3.1. 選言的切除平面

X の端点でない端フェイス，あるいは，X の退化した端点を削除するのに用いられる切除平面である．

X を表す制約条件にスラック変数を加え，すべて等式制約条件に変形する．今まで生成された切除平面で実行可能な集合 Q とし，基底に入る変数を制限したシンプレックス法 [3] により，Q に関する X の端フェイスと端フェイス上の点 $\boldsymbol{y}^0 = (y_1^0, y_2^0, \ldots, y_{n+m}^0)$ を求める．$y_r^0 > 0$, $r = 1, 2, \ldots, n+m$ となる添え字 r の集合を B_N とし，$\boldsymbol{y}^0$ における非基底変数の添え字集合を Z とする．ある $r \in B_N$ に対して Q のスラック変数のみが新たに基底に入るという条件の下で，次の問題を解く．

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & y_r \\ \text{subject to} & \boldsymbol{y} \in X \cap Q \end{array} \tag{6}$$

最後のシンプレックスタブローを用いると，適当に係数 a_rj を 0 とすることにより，y_r の正準形を次のように書くことができる．

$$y_r + \sum_{j \in Z} a_{rj} y_j + \sum_{j \in S_r} a_{rj} y_j = b_r \tag{7}$$

S_r を Q のスラック変数で非基底となっている変数 y_j の添え字集合とする．すべての $j \in Z$ に対して，$a_{rj} \leq 0$ となる $r \in B_N$ を除いた B_N の部分集合を B_N^* とすると，次の切除平面は現在の端フェイスを除くために有効となる．

$$\begin{aligned} &\sum_{j \in Z} \left\{ \max_{r \in B_N^*} (a_{rj}/b_r) \right\} y_j \\ &+ \sum_{j \in S_N^*} \left\{ \max_{r \in B_N^*} (a_{rj}/b_r) \right\} y_j \geq 1 \end{aligned} \tag{8}$$

ここで，$S_N^* = \cup_{r \in B_N^*} S_r$ である．さらに，式 (8) を $\sum_{j \in Z \cup S_N^*} \alpha_j^* y_j \geq 1$, $a_{rj}/b_r = \alpha_{rj}$, $j \in Z \cup S_N^*$ とおき，$r \in B_N^*$ に対して γ_r を次のように定義する．

$$\gamma_r = \min_{j : \alpha_{rj} > 0} \left\{ \frac{\alpha_j^*}{\alpha_{rj}} \right\} \tag{9}$$

これらを用いると，有効性を失うことなく，式 (8) の切除平面を次のように強化できる．

$$\sum_{j \in Z \cup S_N^*} \left[\max_{r \in B_N^*} \{\gamma_r \alpha_{rj}\} \right] y_j \geq 1 \tag{10}$$

3.2. 負方向延長極切除平面

目的関数値に基づき，より深い切除平面を生成するために用いる．まず，局所最適端点を求める．求められた局所最適端点における次のパラメトリック問題を考える．

$$\begin{aligned} \text{PAR1}: \quad & \hat{\lambda}_j = \sup\{\lambda \mid \varphi_j(\lambda) \leq \alpha\}, \\ & \varphi_j(\lambda) = \max_{\boldsymbol{c} \in \Gamma} \phi(\bar{\boldsymbol{y}} - \boldsymbol{e}^j \lambda, \boldsymbol{c}) \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \text{PAR2}: \quad & \tilde{\lambda}_j = \sup\{\lambda \mid \bar{\varphi}_j(\lambda) \leq \alpha\}, \\ & \bar{\varphi}_j(\lambda) = \min_{\boldsymbol{c} \in \Gamma} \phi(\bar{\boldsymbol{y}} + \boldsymbol{e}^j \lambda, \boldsymbol{c}) \end{aligned} \tag{12}$$

ここで，

$$\phi(\boldsymbol{y}, \boldsymbol{c}) = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{y} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}^0 \tag{13}$$

であり，$\boldsymbol{e}^j$ は隣接端点から局所最適端点へ向かうベクトルである．また，α は最大リグレットの暫定値を示している．$\varphi_j, \bar{\varphi}_j$ が λ に関して区分的に線形であり，凸であることから，この問題は，ニュートン法を用いて解くことができる．このとき，負方向延長極切除平面は

$$\bar{\lambda}_j = \begin{cases} \hat{\lambda}_j & \text{if } \hat{\lambda}_j \neq +\infty \\ \tilde{\lambda}_j & \text{if } \hat{\lambda}_j = +\infty \end{cases} \tag{14}$$

を用いて，次のように与えられる．

$$\sum_{j \in J} (y_j / \bar{\lambda}_j) \geq 1 \tag{15}$$

ここで，y_j ， $j \in J$ は非基底変数である．

3.3. アルゴリズム

以上の二つの切除平面に基づいた次のアルゴリズムが考えられる．

アルゴリズム (切除平面法によるアプローチ)

Step 1. $Q = \mathbf{R}^n$，局所最適値 $\alpha = -\infty$ とする．

Step 2. Q に関する X の端フェイスを決定する．もし，存在しなければ，現在の最良解を最適解として終了する．もし，存在し X の端点でなければ Step 3 へ行く，X の端点なら Step 4 へ行く．

Step 3. B_N^* を求める．もし，$B_N^* = \{\emptyset\}$ ならば，現在の最良解を最適解として終了する．そうでなければ，求められた端フェイスを削除する選言的切除平面を式 (10) により生成する．この切除平面を Q に加え，Step 2 へ戻る．

Step 4. X のこの端点からはじめて局所最適端点を求め，必要ならこの局所最適端点を用いて現在の

最良解とその値を更新する．求めた局所最適端点でのパラメトリック問題 PAR1，もしくは PAR1 の解が $+\infty$ となるなら PAR2 を解く．ある隣接端点に対して $\hat{\lambda}_j = 0$ が成立するならば Step 3 へ戻る．すべての隣接端点に対して $\hat{\lambda}_j = +\infty$ となるならば，現在の最良解を最適解として終了する．また $\tilde{\lambda}_j = 0$ となる j が存在するならば，y_j 項を除いた式 (15) で表される通常の極切除平面を生成し，Q に加え，Step 2 へ戻る．その他の場合は，負方向延長極切除平面を式 (15) により生成し，Q に加え，Step 2 へ戻る．

4. 外部近似と切除平面を用いたアプローチ

$\boldsymbol{y} \in X$ が固定されたとき，最大リグレットを出力する関数を f とすると，$f : X \to \boldsymbol{R}$ は

$$f(\boldsymbol{y}) = \max_{\boldsymbol{c} \in \Gamma} (\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{y} - \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}^0) \tag{16}$$

で表される．関数 $f : X \to \boldsymbol{R}$ は凸関数となり，外部近似法によるアプローチが提案されている [4]．

切除平面においては，最適解が存在しない制約領域を積極的にカットすることにより計算効率化を図っているが，上界値に関する情報が得られないため，終了条件を満たすまでかなりの時間を要することがある．一方，外部近似法においては，常に上界値情報が得られるものの，最適解が存在しない制約領域をカットすることがないため，無駄な端点列挙を行うことがある．そこで，相反する性質をもつ二つのアプローチを融合した解法を考察する．基本的には，外部近似法に負方向延長極切除平面を加えることにより実現でき，次のアルゴリズムが得られる．

アルゴリズム
(外部近似と切除平面を用いたアプローチ)

Step 1. $p = 0$ として，$X \subset Y_0$ となる集合 Y_0 を求める．また，$r^1 = r^0$ とする．

Step 2. Y_p での可能的最適解集合 $\Pi B(Y_p)$ を求める．

Step 3. すべての $\boldsymbol{y} \in \Pi B(Y_p)$ について $f(\boldsymbol{y})$ を評価し，最大の $f(\boldsymbol{y})$ を与える $\boldsymbol{y}$ を $\boldsymbol{y}^p$ とし，$f(\boldsymbol{y}^p) = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y}^p - \boldsymbol{x}^0)$ なる $\boldsymbol{c} \in \Gamma$ を $\boldsymbol{d}^p$ とする．

Step 4. もし，$f(\boldsymbol{y}^p) \leq r^1$ ならば，現在の r^1 を与える解を最適解とし，終了する．また，$\boldsymbol{y}^p$ が X の点ならば，r^1 を必要ならば更新して，現在の r^1 を与える解を最適解とし，終了する．

Step 5. 線形計画問題

$$\underset{\boldsymbol{y} \in Y_p \cap X}{\text{maximize}}\, \boldsymbol{d}^{p\mathrm{T}} \boldsymbol{y} \tag{17}$$

の最適解 $\boldsymbol{\omega}^p$ を求める．$\boldsymbol{\omega}^p$ が X の端点であれば Step 6 へ，そうでなければ．Step 8 へ進む．

Step 6. $\boldsymbol{\omega}^p$ よりはじめて，$X \cap Z$ での局所最適端点 $\boldsymbol{y}_l$ を求める．$f(\boldsymbol{y}_l) \geq r^1$ ならば，$r^1 = f(\boldsymbol{y}_l)$ と更新する．

Step 7. 局所最適端点 $\boldsymbol{y}_l$ において負方向延長極切除平面を生成し，それにより生成される領域を Z とする．もし，$\boldsymbol{y}^p \notin Z$ ならば，Step 8 へ，そうでなければ Step 9 へと進む．

Step 8. $\boldsymbol{\omega}^p$ でアクティブな制約条件により定められる集合を Z に加える．

Step 9. $Y_{p+1} = Y_p \cap Z$ として，Step2 に戻る．

このアルゴリズムにおいて，各反復において次のいずれかが成立するので有限回の反復により解くことができる．

1. X の端点が少なくとも 1 つが，外部近似された凸多面体の外部，あるいは端点となる．
2. X の新たなフェイスが外部近似された凸多面体の境界となる．

5. 数値実験

リグレット最大化問題 (4) に対して，2 段階アプローチ，2 レベル計画法，外部近似法，切除平面法，外部近似と切除平面を併用した方法の計算効率性を比較する．決定変数の数 ($\boldsymbol{x}$ の次元 n)，X の制約条件の数 (A の行の数 m)，Γ の制約条件の数 (D の行の数 p) が異なるいくつかの場合について，それぞれ 10 個の問題を発生させ，計算機実験により最大リグレット最小解が求められるまでの計算時間 (CPU Time, 秒) を計測した．その結果を表 1 に示す．なお，切除平面法を用いる際，各部分問題の最適解への収束に要する無駄な時間を削減するため，切除平面を 10 回加える毎に暫定値が r^0 より大きいか否かを判定し，大きい場合は暫定解を用いて緩和法のアルゴリズムに復帰している．また，許容計算時間を 1200 秒とし，それ以上要する場合は計算不能とした．平均値は計算可能であった数を表 1 の ( ) 内に示している．

表 1 より，(n, m, p) が比較的小さい場合には，2 段階アプローチと外部近似法が効率的となり，(n, m, p) が十分大きい場合には，外部近似法が最も効率的となることがわかる．

外部近似と切除平面を併用した方法より，外部近似法が効率的になっているのは，リグレット最大化問題を外部近似法により続けて解く際，前回に外部近似した最後の制約集合がそのまま適用でき，端点の列挙を初めからやり直す必要がなくなるためと考えられる．そこで，切除平面法を除く各方法において最初のリグレット最大化問題を解くのに要する時間を $(n, m, p) = (10, 30, 30)$ の場合に計測した．その結果を表 2 に示す．表 1 の場合と同様に 10 題の問題を解いている．

表 2 が示すように，外部近似と切除平面を併用した方法が最も効率的であることがわかる．このことにより，リグレット最大化問題を単独で解く場合には，外部近似と切除平面を併用した方法が有効であると考えられる．

表 1: 最大リグレット最小解の計算時間

n	m	p	アプローチ	平均	最大値	最小値
5	10	10	2 段階	0.019	0.05	0.01
			2 レベル計画	0.465	0.85	0.20
			外部近似法	0.026	0.05	0.01
			切除平面法	0.065	0.11	0.02
			外部＋切除	0.055	0.14	0.02
		15	2 段階	0.023	0.05	0.01
			2 レベル計画	0.532	1.07	0.15
			外部近似法	0.023	0.04	0.01
			切除平面法	0.109	0.56	0.03
			外部＋切除	0.047	0.14	0.01
	15	10	2 段階	0.045	0.09	0.02
			2 レベル計画	0.887	1.69	0.40
			外部近似法	0.032	0.07	0.02
			切除平面法	0.110	0.36	0.02
			外部＋切除	0.051	0.09	0.02
		15	2 段階	0.053	0.16	0.02
			2 レベル計画	2.227	6.65	0.82
			外部近似法	0.050	0.14	0.01
			切除平面法	0.545	3.73	0.05
			外部＋切除	0.108	0.40	0.03
10	20	20	2 段階	3.633	6.72	0.94
			2 レベル計画	149.180	423.43	61.08
			外部近似法	3.252	6.86	0.87
			切除平面法	265.407 (7)	1200+	0.67
			外部＋切除	8.365	37.23	0.67
		30	2 段階	4.034	8.50	0.68
			2 レベル計画	244.668	522.04	79.37
			外部近似法	4.136	10.51	0.80
			切除平面法	1.986	2.79	0.81
			外部＋切除	7.228	20.75	1.49
	30	20	2 段階	14.262	90.59	1.30
			2 レベル計画	451.433 (8)	1200+	113.84
			外部近似法	6.463	21.55	0.54
			切除平面法	11.301 (9)	1200+	1.51
			外部＋切除	21.250	51.16	0.71
		30	2 段階	9.650	43.76	2.23
			2 レベル計画	452.196	823.88	240.64
			外部近似法	6.531	27.91	2.18
			切除平面法	4.224 (8)	1200+	2.36
			外部＋切除	15.566	43.39	2.36

6. おわりに

本研究では，目的関数の係数ベクトルが不明確で，その取りうる範囲が凸多面体で表された線形計画問題の最大リグレット最小解の計算法について考察した．リグレット最大化問題が双線形計画問題であることに着目し，切除平面法に基づくアプローチを適用し，また外部近似と切除平面を用いたアプローチを考案した．また，従来法である 2 段階アプローチ，2 レベル計画法，外部近似法と，今回取り上げた切除平面法および，外部近似と切除平面を併用した方法の計算時間を数値

表 2: リグレット最大化問題の計算時間

n	m	p	アプローチ	平均	最大値	最小値
10	30	30	2 段階	6.457	31.02	1.41
			2 レベル計画	117.721	214.58	57.92
			外部近似法	3.558	15.94	1.36
			外部＋切除	2.509	9.12	0.83

実験により比較し，外部近似法が最大リグレット最小解を計算するにあたり有効であることが明らかになった．一方，部分問題であるリグレット最大化問題を単独で解く場合には，外部近似と切除平面を併用した方法が最も有効であることが示された．

参考文献

[1] M. Inuiguchi and Y. Kume: Minimax Regret in Linear Programming Problems with an Interval Objective Function, in G. H. Tzeng,H. F. Wang,U. P. Wenard P. L. Yu (Eds.), *Multiple Criteria Decision Making*, New York, NY: Springer-Verlag, 1994, pp.65-74.

[2] M. Inuiguchi, H. Higashitani and T. Tanino: On Computation Methods of the Minimax Regret Solution for Linear Programming Problems with Uncertain Objective Function Coefficients, *Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* Vol.3, 1999, pp.979-984.

[3] H. D. Sherali and C. M. Shetty: A Finitely Convergent Algorithm for Bilinear Programming Problems Using Polar Cuts and Disjuntive face cuts, *Mathmatical Programming*, Vol.19, 1980, pp.14-31.

[4] 乾口，東谷，谷野: 目的関数の係数ベクトルが凸多面体で表された線形計画問題における可能的最適端点の列挙，日本ファジィ学会誌，Vol.12, No.1, 2000, pp.169–175.

［連絡先］ 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
電子情報エネルギー工学専攻
乾 口 雅 弘
Tel. 06-6879-7787 Fax. 06-6879-7939
E-mail: inuiguti@eie.eng.osaka-u.ac.jp

TB4−2

下位問題の目的関数が不明確な2レベル線形計画問題とその解法

Linear Two-level Programming Problems with Single Imprecise Follower's Objective Functions and Its Solution Method

乾口 雅弘　　有澤 政義　　谷野 哲三
Masahiro INUIGUCHI, Masayoshi ARISAWA and Tetsuzo TANINO

大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract: In this paper, we discuss linear two-level programming problems with single imprecise follower's objective functions. Because of the imprecision of the follower's objective function coefficients, the leader cannot predict the follower's reaction but a set of possible reactions. Based on the max-min strategy, we formulate such a problem as a max-min problem with a non-convex feasible set. Analizing the problem, we show that the optimal solution exists in the vertex set of the original feasible set. Some solution algorithms based on the Kth-Best approach are proposed and compared the computational efficiency by a numerical experiment.

1. はじめに

本研究では，下位レベルの意思決定者の目的関数の係数が不明確な場合の2レベル線形計画問題について考察する．この場合，下位レベルの目的関数の係数が明確にわからないため，上位レベルの決定に対する下位レベルの反応が正確に予測できない．しかし，係数の取りうる範囲がわかっているので，可能な反応の集合が求められる．そこで，上位レベルの意思決定者にとって最悪の状態を最良にするmax-min決定基準に従い，問題を非凸制約集合上でのmax-min問題として定式化する．このmax-min問題を解析し，最適解が元の制約条件の頂点集合内に存在することを示す．また，Kth-Best法に基づいたいくつかの解法を提案し，計算機実験により計算効率性を比較検討する．

2. 下位の目的関数が不明確な2レベル線形計画問題

本研究では，下位レベルの目的関数の係数が不明確である2レベル線形計画問題を考える．この問題は次のように形式的に記述される．

$$\begin{aligned} \underset{\boldsymbol{x}\geq\boldsymbol{0}}{\text{maximize}} \quad & \boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \\ & \boldsymbol{y} \ \text{solves} \\ & \quad \underset{\boldsymbol{y}\geq\boldsymbol{0}}{\text{maximize}} \quad \boldsymbol{c}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \\ & \quad \text{subject to} \quad A_1\boldsymbol{x}+A_2\boldsymbol{y}\leq\boldsymbol{b} \end{aligned} \tag{1}$$

ただし，$\boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^p$, $\boldsymbol{y}\in\mathbf{R}^q$, $\boldsymbol{c}_1\in\mathbf{R}^p$, $\boldsymbol{c}_2\in\mathbf{R}^q$, $\boldsymbol{b}\in\mathbf{R}^m$, $A_1\in\mathbf{R}^{m\times p}$, $A_2\in\mathbf{R}^{m\times q}$ で，$\boldsymbol{c}_3\in\mathbf{R}^q$ は不明確なパラメータである．$\boldsymbol{c}_3\in\Gamma=\{\boldsymbol{c}\in\mathbf{R}^q\mid G\boldsymbol{c}\leq\boldsymbol{g}\}$ となることが知られている．また，制約集合 $S=\{(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\mid A_1\boldsymbol{x}+A_2\boldsymbol{y}\leq\boldsymbol{b},\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}\geq\boldsymbol{0}\}$ は有界で，空でないと仮定する．さらに，$X(S)=\{\boldsymbol{x}\mid\exists\boldsymbol{y}\geq\boldsymbol{0};A_1\boldsymbol{x}+A_2\boldsymbol{y}\leq\boldsymbol{b}\}$, $Y(\boldsymbol{x})=\{\boldsymbol{y}\geq\boldsymbol{0}\mid A_2\boldsymbol{y}\leq\boldsymbol{b}-A_1\boldsymbol{x}\}$ と定義する．

このような問題では，上位レベルの意思決定者が $\boldsymbol{x}$ を選んだ際の，下位レベルの意思決定者の合理的反応は一意には決まらず，集合となるため，上位レベルの意思決定者は下位レベルの決定を完全に予測することができない．この合理的反応集合は下位問題に関する可能的最適解集合 [1] となり，$\Pi S(\boldsymbol{x})$ と記され，次のように定義される．すなわち，$\boldsymbol{x}\in X(S)$ のとき，

$$\Pi S(\boldsymbol{x})=\bigcup_{\boldsymbol{c}_3\in\Gamma} S(\boldsymbol{c}_3,\boldsymbol{x}) \tag{2}$$

と定められる．ただし，$S(\boldsymbol{c}_3,\boldsymbol{x})=\{\boldsymbol{y}^*\mid\boldsymbol{c}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^*=\max_{\boldsymbol{y}\in Y(\boldsymbol{x})}\boldsymbol{c}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\}$ である．

従来，$\boldsymbol{x}$ に対する合理的反応集合が単集合である，あるいは，合理的反応集合内で下位意思決定者が上位意思決定者に対して友好的に振る舞うという仮定のもとで，2レベル線形計画問題の Stackelberg 解の計算法が議論されてきた．しかし，問題 (1) では，真の合理的反応集合が特定できないので，従来の Stackelberg 解の概念をそのまま適用することはできない．そこで，本研究では，max-min 決定基準に基づき，下位レベルの意思決定者が $\Pi S(\boldsymbol{x})$ 内の任意の戦略を取った場合の上位レベルの最悪の目的関数値を考え，この最悪値を最良にする解を求める問題として，問題 (1) を取り扱う．すなわち，

$$\max_{\boldsymbol{x}\in X(S)}\ \min_{\boldsymbol{y}\in\Pi S(\boldsymbol{x})}[\boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}] \tag{3}$$

なる問題を取り扱う．

$\boldsymbol{x}\in X(S)$ が与えられたとき，$\boldsymbol{y}\in S(\boldsymbol{c}_3,x)$ であるための必要十分条件は，

$$\begin{aligned} & A_2\boldsymbol{y}\leq\boldsymbol{b}-A_1\boldsymbol{x},\ -A_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_1+\boldsymbol{v}_2=-\boldsymbol{c}_3 \\ & \boldsymbol{v}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{b}-A_1\boldsymbol{x}-A_2\boldsymbol{y})+\boldsymbol{v}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}=0 \\ & \boldsymbol{y},\ \boldsymbol{v}_1,\ \boldsymbol{v}_2\geq\boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{4}$$

となる $\boldsymbol{v}_1\in\mathbf{R}^m$, $\boldsymbol{v}_2\in\mathbf{R}^q$ が存在することである．$\boldsymbol{c}_3\in\Gamma$ であるから，問題 (3) は次の2レベル計画問題と等価になる．

$$\underset{\boldsymbol{x}\in X(S)}{\text{maximize}} \quad \boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}$$

$\boldsymbol{y}, \boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2$ solves,

$$\begin{aligned} &\underset{\boldsymbol{y},\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2}{\text{minimize}} && \boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \\ &\text{subject to} && \boldsymbol{v}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{b}-A_1\boldsymbol{x}-A_2\boldsymbol{y})+\boldsymbol{v}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}=0 \\ & && G(A_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_1-\boldsymbol{v}_2)\le \boldsymbol{g} \\ & && A_1\boldsymbol{x}+A_2\boldsymbol{y}\le \boldsymbol{b} \\ & && \boldsymbol{y},\ \boldsymbol{v}_1,\ \boldsymbol{v}_2\ge \boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{5}$$

3. 問題の性質

本節では，$\boldsymbol{x}\in X(S)$ に対し下位問題 (5) の目的関数値を与える関数 φ が区分的線形な凸関数であることを示し，問題 (3)(問題 (5)) の最適解が S の頂点に存在することを示す．

問題 (5) の下位問題の最適値関数について，次の定理が成立する．

定理 1. $\varphi(\boldsymbol{x})=\min_{\boldsymbol{y},\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2}\{\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\mid \boldsymbol{v}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{b}-A_1\boldsymbol{x}-A_2\boldsymbol{y})+\boldsymbol{v}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}=0,\ \boldsymbol{y}\in Y(\boldsymbol{x}),\ (\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2)\in U\}$ とすると，$\varphi(\boldsymbol{x})$ は区分的線形で連続な凸関数である．ただし，$U=\{(\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2)\mid G(A_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_1-\boldsymbol{v}_2)\le \boldsymbol{g},\ \boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2\ge \boldsymbol{0}\}$ である．

証明. 各成分が 0 または 1 の値をとる 2^m 個の m 次元ベクトル $\boldsymbol{w}_1^i\in\mathbf{R}^m$, $i=1,2,\ldots,2^m$ および 2^q 個の q 次元ベクトル $\boldsymbol{w}_2^j\in\mathbf{R}^q$, $j=1,2,\ldots,2^q$ を考える．$\boldsymbol{w}_1^i,\boldsymbol{w}_2^j$ に対して，$U^{ij}=\{\forall(\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2)\in U\mid v_{1k}>0,\text{ if } w_{1k}^i=1, v_{1k}=0,\text{ if } w_{1k}^i=0,\ k=1,2,\ldots,n, v_{2l}>0,\text{ if } w_{2l}^j=1, v_{2l}=0,\text{ if } w_{2l}^j=0,\ l=1,2,\ldots,q\}$ を考える．さらに，$U^{ij}\neq\emptyset$ に対して，$S^{ij}=\{(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\mid \boldsymbol{v}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{b}-A_1\boldsymbol{x}-A_2\boldsymbol{y})+\boldsymbol{v}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}=0,\ A_1\boldsymbol{x}+A_2\boldsymbol{y}\le\boldsymbol{b},\ (\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2)\in U^{ij},\ \boldsymbol{x},\ \boldsymbol{y}\ge\boldsymbol{0}\}$ を考えると，

$$\begin{aligned} S^{ij}=\{(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\mid\ & \boldsymbol{a}_{1k}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{a}_{2k}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}=b_k,\text{ if } w_{1k}^i=1, \\ & \boldsymbol{a}_{1k}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{a}_{2k}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\le b_k,\text{ if } w_{1k}^i=0, \\ & k=1,2,\ldots,m, \\ & y_l=0,\text{ if } w_{2l}^j=1, \\ & y_l\ge 0,\text{ if } w_{2l}^i=0,\ l=1,2,\ldots,q\} \end{aligned} \tag{6}$$

となる．ただし，$\boldsymbol{a}_{1k},\boldsymbol{a}_{2k}$ はそれぞれ行列 A_1, A_2 の第 k 行を表し，b_k はベクトル $\boldsymbol{b}$ の第 k 成分である．また，明らかに，$S^{ij}\subseteq S$ であるので，S の有界性より，S^{ij} は有界となり，S^{ij} の頂点集合を $V(S^{ij})$ とすれば，$V(S^{ij})$ は有限集合となる．$X(S^{ij})=\{\boldsymbol{x}\mid\exists\boldsymbol{y};(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in S^{ij}\}$ と定め，S^{ij} を用いると，線形計画問題の基本定理より，φ は次のように変形される．

$$\begin{aligned} \varphi(\boldsymbol{x}) &= \min_{\substack{i,j:U^{ij}\neq\emptyset\\ \boldsymbol{x}\in X(S^{ij})}} \min_{\boldsymbol{y}}\{\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\mid(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in S^{ij}\} \\ &= \min_{\boldsymbol{y}}\left\{\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\ \middle|\ (\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in\bigcup_{\substack{i,j:U^{ij}\neq\emptyset\\ \boldsymbol{x}\in X(S^{ij})}} V(S^{ij})\right\} \\ &= \min_{\boldsymbol{y}}\left\{\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\ \middle|\ (\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in \mathrm{co}\left(\bigcup_{i,j:U^{ij}\neq\emptyset} V(S^{ij})\right)\right\} \end{aligned} \tag{7}$$

ただし，X を集合とするとき，co$X$ は集合 X の凸包を意味する．$\bar{S}=\mathrm{co}(\cup_{i,j:U^{ij}\neq\emptyset}V(S^{ij}))$ は凸多面体であるので，適当な行列 H_1, H_2, 適当なベクトル $\boldsymbol{h}$ により，$\bar{S}=\{(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\mid H_1\boldsymbol{x}+H_2\boldsymbol{y}\le\boldsymbol{h}\}$ と表せる．したがって，この表現と線形計画問題の双対性より，

$$\varphi(\boldsymbol{x})=\max_{\boldsymbol{z}\ge\boldsymbol{0}}\{(H_1\boldsymbol{x}-\boldsymbol{h})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z}\mid -H_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z}=\boldsymbol{c}_2\} \tag{8}$$

となり，φ は区分的線形で連続な凸関数となることがわかる． (証明終)

関数 φ を用いると，問題 (5) に対する最適な $\boldsymbol{x}$ は次の凸最大化問題 [2] を解くことにより求められる．

$$\begin{aligned} &\underset{\boldsymbol{x},\boldsymbol{w}}{\text{maximize}} && \boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\varphi(\boldsymbol{x}) \\ &\text{subject to} && A_1\boldsymbol{x}+A_2\boldsymbol{w}\le\boldsymbol{b} \\ & && \boldsymbol{x}\ge\boldsymbol{0},\ \boldsymbol{w}\ge\boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{9}$$

問題 (5) の最適解は S の頂点にあることが次のように証明できる．

定理 2. 問題 (5)(問題 (3)) の最適解は S の頂点にある．

証明. 定理 1 の証明で定義した凸多面体 $\bar{S}$ を用いると，問題 (5) は次の通常の 2 レベル線形計画問題と等価になる．

$$\begin{aligned} &\underset{\boldsymbol{x}\ge\boldsymbol{0}}{\text{maximize}} && \boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \\ & && \boldsymbol{y}\text{ solves} \\ & && \quad\underset{\boldsymbol{y}\ge\boldsymbol{0}}{\text{maximize}} \quad -\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \\ & && \quad\text{subject to}\quad H_1\boldsymbol{x}+H_2\boldsymbol{y}\le\boldsymbol{h} \end{aligned} \tag{10}$$

2 レベル線形計画問題の最適解は，制約集合の頂点に存在することが知られている [3] ので，問題 (10) の最適解は $\bar{S}$ の頂点集合 $V(\bar{S})$ 内に存在する．一方，S の頂点集合を $V(S)$ とすると，定理 1 の証明における $V(S^i)$ $(U^i\neq\emptyset)$ について，$V(S^i)\subseteq V(S)$ となることに注意すると，$V(\bar{S})=\cup_{i:U^i\neq\emptyset}V(S^i)\subseteq V(S)$ となり，問題 (10) の最適解，すなわち，問題 (5) の最適解は S の頂点に存在することになる． (証明終)

4. Kth-Best 法に基づく解法

定理 2 から，S の頂点について Kth-Best 法 [3] を用いた頂点列挙アルゴリズムが考えられる．

アルゴリズム 1

Step 1. $k\leftarrow 1$ とする．線形計画問題

$$\underset{(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in S}{\text{maximize}}\ \boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \tag{11}$$

を解き，その解を $(\boldsymbol{x}^1, \boldsymbol{y}^1)$ とする．$T=\emptyset$，$M=\{(\boldsymbol{x}^1, \boldsymbol{y}^1)\}$ とする．

Step 2. $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}^k$ に固定した下位問題

$$\underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}}\{\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \mid \boldsymbol{y} \in \Pi S(\boldsymbol{x}^k)\} \tag{12}$$

の最適解 $\tilde{\boldsymbol{y}}$ を求める．$\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{y}}=\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^k$ であればアルゴリズムを終了する．最適解は $(\boldsymbol{x}^k, \boldsymbol{y}^k)$ となる．

Step 3. M^k を $(\boldsymbol{x}^k, \boldsymbol{y}^k)$ に隣接し，かつ，$\boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \leq \boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^k+\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^k$ を満たす頂点 $(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$ の集合とする．$T \leftarrow T \cup \{(\boldsymbol{x}^k, \boldsymbol{y}^k)\}$，$M \leftarrow (M \cup M^k) \backslash T$ とする．

Step 4. $k \leftarrow k+1$ とし，$\boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}^k+\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^k=\max\{\boldsymbol{c}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \mid (\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \in M\}$ となる $(\boldsymbol{x}^k, \boldsymbol{y}^k)$ を選択し，Step 2 へ戻る．

Step 2 における問題 (12) は可能的最適解集合上での線形関数の最小化問題であるので，容易に解くことができない．文献 [4] と同様に，$Y(\boldsymbol{x})$ 上で Kth-Best 法を適用し，問題 (12) を解く方法も考えられるが，2 重に Kth-Best 法を適用すると探索すべき頂点数が飛躍的に増大し，計算効率が大きく損なわれる．

5. 内部近似法

前節にあげたアルゴリズム 1 の Step 2 において，問題 (12) は必ずしも解かれる必要はなく，$\boldsymbol{y}^k$ が問題 (12) の解であるか否かを判定できれば十分である．そこで，問題 (12) における $\boldsymbol{y}^k$ の実行可能性，局所最適性，大域的最適性を順次評価する方法を考察する．実行可能性 [1]，局所最適性については，シンプレックス法を用いることにより比較的容易に判定できるので，全体としての計算コスト削減につながる．大域的最適性の評価はそれほど容易でないが，いくつかの手法が考えられる．たとえば，可能的最適端点列挙法 [5] を用いる方法や，内部近似法 [2] に基づく方法が考えられる．もちろん，Kth-Best 法に基づく方法もある．ここでは，紙面の制限を考慮して，後の数値実験において最も効率的になった内部近似法に基づく解法を述べる．

$\boldsymbol{x}^k=\boldsymbol{x}$ とすると，問題 (12) は次のように表記できる．

$$\underset{\boldsymbol{y}}{\text{minimize}}\{\boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \mid \boldsymbol{y} \in Y(\boldsymbol{x}) \backslash \mathrm{int}W(\boldsymbol{x})\} \tag{13}$$

ただし，$W(\boldsymbol{x})=\{\boldsymbol{y} \mid \boldsymbol{c}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \leq \max_{\boldsymbol{z} \in Y(\boldsymbol{x})} \boldsymbol{c}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z},\ \forall \boldsymbol{c}_3 \in \Gamma\}$ である．いま，線形計画問題 $\underset{\boldsymbol{y} \in Y(\boldsymbol{x})}{\text{minimize}}\, \boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}$ の解を $\boldsymbol{y}^0$ とする．このとき，$\boldsymbol{c}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^0=\max_{\boldsymbol{z} \in Y(\boldsymbol{x})} \boldsymbol{c}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z}$ となる $\boldsymbol{c}_3 \in \Gamma$ が存在すれば，明らかに $\boldsymbol{y}^0$ は問題 (12) の最適解となる．そうでないとき，$\boldsymbol{y}^0$ を与える基底形式において，非基底変数ベクトルを $\boldsymbol{u}(\in \mathbf{R}^q)$，基底形式の右辺ベクトルを $\tilde{\boldsymbol{b}}(\in \mathbf{R}^m)$，基底形式における $\boldsymbol{u}$ の係数行列を $B(\in \mathbf{R}^{m \times m})$ とすると，

$$B\boldsymbol{u} \leq \tilde{\boldsymbol{b}},\ \boldsymbol{u} \geq \boldsymbol{0} \tag{14}$$

と表せる．このとき，$\boldsymbol{y}$ は $\boldsymbol{u}$ のアフィン変換を用いて，$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{y}^0+\xi\boldsymbol{u}$ と書ける．ただし，$\xi \in \mathbf{R}^{q \times q}$ は定数行列である．この変換を用いると，問題 (12) は次のようになる．

$$\begin{array}{ll} \underset{\boldsymbol{u}}{\text{minimize}} & \boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y}^0+\xi\boldsymbol{u}) \\ \text{subject to} & \boldsymbol{u} \in \bar{Y}(\boldsymbol{x}) \backslash \mathrm{int}\bar{W}(\boldsymbol{x}) \end{array} \tag{15}$$

ただし，$\bar{Y}(\boldsymbol{x})=\{\boldsymbol{u} \mid B\boldsymbol{u} \leq \tilde{\boldsymbol{b}},\ \boldsymbol{u} \geq \boldsymbol{0}\}$，$\bar{W}(\boldsymbol{x})=\{\boldsymbol{u} \mid \boldsymbol{c}_3^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y}^0+\xi\boldsymbol{u}) \leq \max_{\boldsymbol{z} \in Y(\boldsymbol{x})} \boldsymbol{c}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z},\ \forall \boldsymbol{c}_3 \in \Gamma\}$ である．このとき，$\tilde{\boldsymbol{b}} \geq \boldsymbol{0}$ であるので，$\boldsymbol{0} \in \mathrm{int}\bar{W}(\boldsymbol{x})$ が成り立つ．$\varepsilon>0$ を十分小さい数として

$$\bar{Y}^d(\boldsymbol{x})=\bar{Y}(\boldsymbol{x}) \cap \{\boldsymbol{u} \mid \boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y}^0+\xi\boldsymbol{u}) \leq \boldsymbol{c}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^k-\varepsilon\} \tag{16}$$

と定義すると，$\boldsymbol{y}^k$ が問題 (12) の大域的最適解であるための必要十分条件は

$$\bar{Y}^d(\boldsymbol{x}) \subset \mathrm{int}\bar{W}(\boldsymbol{x}) \tag{17}$$

となる．集合 $\bar{W}(\boldsymbol{x})$ を陽に求めることは繁雑で容易ではないので，$\bar{W}(\boldsymbol{x})$ を近似した凸多面体列 $P_1 \subset P_2 \subset \cdots \subset \bar{W}(\boldsymbol{x})$ を考え，逐次，$\bar{Y}^d(\boldsymbol{x}) \subseteq P_k$ を評価する内部近似法に基づく解法を提案する．この方法は次のようになる．

アルゴリズム 2

Initalization. $\bar{Y}^d(\boldsymbol{x})$, $\bar{W}(\boldsymbol{x})$ を構成する．$\boldsymbol{0}$ から $\mathbf{R}^q$ の基底単位ベクトル $\boldsymbol{e}_i$ 方向への半直線と $\bar{W}(\boldsymbol{x})$ の境界集合 $\partial\bar{W}(\boldsymbol{x})$ との交点 $\mu^i\boldsymbol{e}_i$ をそれぞれ求め，$\boldsymbol{t}^0=(\frac{1}{\mu^1}, \frac{1}{\mu^2}, \cdots, \frac{1}{\mu^q})^{\mathrm{T}}$ とする．$j \leftarrow 1$ とし，$N_1=\{\boldsymbol{t}^0\}$, $V_1=\emptyset$, $P_1^o=\mathbf{R}_-^q+\{\boldsymbol{t}^0\}$ として初期化する．

Step (a). すべての $\boldsymbol{t} \in N_j$ について

$$\nu(\boldsymbol{t})=\max_{\boldsymbol{u}}\{\langle \boldsymbol{t}, \boldsymbol{u} \rangle \mid \boldsymbol{u} \in \bar{Y}^d(\boldsymbol{x})\} \tag{18}$$

を計算する．$\nu(\boldsymbol{t})<1$ である $\boldsymbol{t}$ を N_j より除去する．V_j，N_j がともに空ならば，$\boldsymbol{y}^k$ は問題 (12) の最適解となり，アルゴリズムを終了する．

Step (b). $V_j \leftarrow V_j \cup N_j$ とする．$\nu(\boldsymbol{t})$ を最大とする V_j の要素 $\boldsymbol{t}^j$ について，

$$\boldsymbol{u}^j \in \arg\max_{\boldsymbol{u}}\{\langle \boldsymbol{t}^j, \boldsymbol{u} \rangle \mid \boldsymbol{u} \in \bar{Y}^d(\boldsymbol{x})\} \tag{19}$$

を求める．

Step (c). $\boldsymbol{u}^j \in \partial\bar{W}(\boldsymbol{x})$ であるか調べる．$\boldsymbol{u}^j \in \partial\bar{W}(\boldsymbol{x})$ ならば，$\boldsymbol{y}^k$ は問題 (12) の最適解でないので，アルゴリズム 1 に復帰する．$\boldsymbol{u}^j \notin \partial\bar{W}(\boldsymbol{x})$ ならば，$\boldsymbol{0}$ から $\boldsymbol{u}^j$ 方向への半直線と $\partial\bar{W}(\boldsymbol{x})$ との交点 $\theta^j\boldsymbol{u}^j$ を計算する．

Step (d). P_j^o に切除平面

$$P_{j+1}^o=P_j^o \cap \left\{\boldsymbol{t} \;\middle|\; \langle \boldsymbol{t}, \boldsymbol{u}^j \rangle \leq \frac{1}{\theta^j}\right\} \tag{20}$$

を加える．P_{j+1}^o の頂点集合のうち，切除平面に

よって新たに生成された頂点集合を N_{j+1}，その他の頂点集合を V_{j+1} とする．$j \leftarrow j+1$ として Step (a) に戻る．

アルゴリズム2について若干補足する．アルゴリズム2では，凸集合 P_j を用いるかわりにその極集合 $P_j^\circ = \{\boldsymbol{t} \mid \langle \boldsymbol{t}, \boldsymbol{u} \rangle \leq 1,\ \forall \boldsymbol{u} \in P_j\}$ を考えている．Step (c) において，$\theta^j \boldsymbol{u}^j$ は $\bar{Y}^d(\boldsymbol{x})$ および P_j の要素ではない．よって，次回の反復では

$$P_{j+1} = \mathrm{co}(P_j \cup \{\theta^j \boldsymbol{u}^j\}) \tag{21}$$

を考える．$\boldsymbol{0} \in P_j$ であるから，Step (d) の式 (20) を用いることで，式 (21) の P_{j+1} の極集合 P_{j+1}° を構成できる [2]．なお，$\boldsymbol{0}$ から $\boldsymbol{u}^j$ 方向の半直線と $\partial \bar{W}(\boldsymbol{x})$ の交点 $\theta^j \boldsymbol{u}^j$ は，次の線形計画問題

$$\begin{aligned} \underset{\boldsymbol{v},\tau}{\text{maximize}} \quad & \tau \\ \text{subject to} \quad & A_2(-G^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v} + \boldsymbol{y}^0 + \xi\tau\boldsymbol{u}^j) \leq \boldsymbol{b} - A_1\boldsymbol{x} \\ & -G^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v} + \boldsymbol{y}^0 + \xi\tau\boldsymbol{u}^j \geq \boldsymbol{0} \\ & -\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v} \geq 0,\ \boldsymbol{v} \geq \boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{22}$$

の最適値 θ^j で与えられる．$\theta^j = +\infty$ のとき，θ^j をどのように与えても $P_j \subset P_{j+1}$ となるので，この場合 θ^j に十分大きい正数により定める．

6. 数値実験

計算機実験により4解法の計算速度を比較し，その有効性を検討する．上位変数 $\boldsymbol{x}$ の次元を $p = 5$ に固定し，下位変数 $\boldsymbol{y}$ の次元を $q = 5, 6, 7, 8$，制約条件数を $m = 5, 10, 15$ とした問題を10題ずつランダムに生成し，その平均 CPU 時間 (秒) を比較した．表1に実験結果を示す．ただし，解法1は文献 [4] と同様に問題 (12) を Kth-Best 法で解く方法，解法2は $\boldsymbol{y}^k$ の実行可能性，局所最適性のテストを行い，局所的最適であった場合に Kth-Best 法を用いて大域的最適性を判定する手法，解法3は $\bar{Y}^d(\boldsymbol{x})$ に可能的最適端点列挙法 [5] を用いた大域的最適性判定法で，解法4は内部近似法を用いた大域的最適性判定法である．表1から明らかなように，解法1は他の解法に比べ大きく劣っている．これより，$\boldsymbol{y}^k$ の実行可能性，局所最適性を導入する有効性が確認できる．また，内部近似法を用いた解法が平均的に良好であった．これは，探索する頂点が他の解法と比べ少なくてすむこと，$\nu(\boldsymbol{t})$ の計算に再最適化手法が適用できることなどが考えられる．

表 1: 実験結果 (単位 : sec by PentiumIII, 700MHz)

m	q	解法 1	解法 2	解法 3	解法 4
5	5	0.18	0.06	0.05	0.02
	6	0.62	0.15	0.14	0.07
	7	1.99	0.49	0.44	0.18
	8	4.33	0.75	1.45	0.26
10	5	2.85	1.30	1.52	0.75
	6	13.96	5.83	9.38	3.22
	7	68.25	14.88	13.85	5.37
	8	259.84	49.89	45.07	19.22
15	5	22.59	12.93	10.88	7.53
	6	111.60	46.77	35.69	30.37
	7	580.03	219.10	305.33	128.17
	8	4100.08	953.10	667.05	596.11

7. おわりに

本研究では，下位レベルの意思決定者の目的関数の係数が不明確な場合の2レベル線形計画問題の解概念を max-min 決定に基づいて定義し，この解を求める問題について議論した．問題の性質を調べ，凸最大化問題や通常の2レベル線形計画問題に変形できることを示すとともに，最適解が元の制約条件の頂点に存在することを示した．また，Kth-Best 法に基づいた，いくつかの解法アルゴリズムを提案し，計算機実験により，内部近似法に基づく解法が平均的に良好であることを示した．

参考文献

[1] M. Inuiguchi and M. Sakawa, "Possible and necessary optimality tests in possibilistic linear programming problems," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 67, pp. 29–46 (1994).

[2] R. Horst and H. Tuy, *Global Optimization: Deterministic Approaches, Third, Revised and Enlarged Edition*, Springer-Verlag, Berlin (1995).

[3] J. F. Bard, *Practical Bilevel Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1998).

[4] I. Nishizaki and M. Sakawa, "Solution concepts and their computational methods in multiobjective two-level linear programming problems," *Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 3, pp. 985–990 (1999).

[5] 乾口，東谷，谷野，"目的関数の係数ベクトルが凸多面体で表された線形計画問題における可能的最適端点の列挙，" 日本ファジィ学会誌，Vol. 12, No. 1, pp. 169–175 (2000).

［連絡先］ 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
電子情報エネルギー工学専攻
乾 口 雅 弘
Tel. 06-6879-7787 Fax. 06-6879-7939
E-mail: inuiguti@eie.eng.osaka-u.ac.jp

TB4−3

可能性線形計画問題における最適解の考察

Optimal Solutions for Possibilistic Linear Programming Problem

井田 正明
Masaaki IDA
京都大学大学院 情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

Abstract In this paper, we consider linear programming problem with uncertain coefficients restricted by possibilistic distribution. Considering the properties of optimal feasible solution for the problem with uncertain objective function coefficients, we argue some related conventional linear programming problems, and propose the decision making process for possibilistic linear programming problem.

1 はじめに

本論文では線形計画問題において目的関数の係数が可能性分布によって規定される可能性線形計画問題を考察する．この問題に対して2つのファジイ解（可能的最適解および必然的最適解）を考えることができる．ここでは，これら最適解の性質および従来からの数理計画法の中でなされてきた係数が不確かである線形計画問題に関する研究との関係を考察する．これにより解（およびグレード）の計算法を考察する．また，可能性線形計画問題に対する意思決定プロセスを提案する．

1.1 可能性線形計画問題

可能性線形計画問題はつぎのように表される．

$$\max \{\boldsymbol{c}\boldsymbol{x} \mid A\boldsymbol{x} \leqq \boldsymbol{b}, \boldsymbol{x} \geqq \mathbf{o}, \quad \boldsymbol{c} \in \widetilde{C}, A \in \widetilde{A},\ \boldsymbol{b} \in \widetilde{B}\} \tag{1}$$

ここで $A = (a_{ij})$ は $m \times n$ 行列，$\boldsymbol{b} = (b_1, \ldots, b_m)^T$，$\boldsymbol{c} = (c_1, \ldots, c_n)$ である．不確かさのため A, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$ の要素はそれぞれ可能性分布により制限される可能性変数である．可能性分布のグレードを固定すると可能性変数の範囲はクリスプな領域に制限され，つぎの線形計画問題となる．

$$\max \{\boldsymbol{c}\boldsymbol{x} \mid A\boldsymbol{x} \leqq \boldsymbol{b}, \boldsymbol{x} \geqq \mathbf{o}, \quad \boldsymbol{c} \in C', A \in A',\ \boldsymbol{b} \in B'\} \tag{2}$$

C', A', B' は領域であり，このような問題は従来より数多く研究されてきている（たとえば，不確かさをともなう A, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$ の要素に関する multiple parametric 問題とみなすこともできる）．

1.2 可能性目的関数

本稿では，目的関数の係数の不確かさが可能性分布 $\pi_c(\boldsymbol{c})$ によって表される可能性計画問題を取り扱う [1]．この場合には実行可能基底解 $\boldsymbol{x}^*$ に対して，つぎの2種類の最適性（可能的最適性，必然的最適性）の度合いを考えることができる．

$$\mu_{\Pi_c}(\boldsymbol{x}^*) = \sup\{\pi_c(\boldsymbol{c}) \mid \boldsymbol{c} \in R\} \tag{3}$$

$$\mu_{N_c}(\boldsymbol{x}^*) = \inf\{1 - \pi_c(\boldsymbol{c}) \mid \boldsymbol{c} \notin R\} \tag{4}$$

ここで $R = \{\boldsymbol{c} \mid \boldsymbol{c}_N - \boldsymbol{c}_B B^{-1} N \leqq 0\}$ である（B, N はそれぞれ基底および非基底）．

必然的最適性は係数の変動に対するロバストな最適性を示すものであり，$\mu_{N_c}(\boldsymbol{x}^*)$ の値が大きいほど解として望ましいものであるが，必ずしも $\mu_{N_c}(\boldsymbol{x}^*) > 0$ となる $\boldsymbol{x}^*$ は存在しない．しかしながら，$\mu_{\Pi_c}(\boldsymbol{x}^*) = 1$ となる $\boldsymbol{x}^*$ は有界であれば存在するため，$\mu_{N_c}(\boldsymbol{x}^*) > 0$ となる実行可能解が存在しない場合には，$\{\boldsymbol{x}^* \mid \mu_{\Pi_c}(\boldsymbol{x}^*) = 1\}$ となる実行可能解集合の中からなんらかの基準で最も望ましい解を選択することになる．

2 可能的最適解

Soyster は線形計画問題の係数の分布が領域により与えられる問題 (Inexact programming) を考察した．とくに目的関数の係数集合 C' が閉凸集合で表される場合について，保守的な立場から最適解を考えた．問題はつぎのように表現される [2]．

$$\max \{\min_{\boldsymbol{c} \in C'} \boldsymbol{c}\boldsymbol{x}\} \text{ s.t. } A\boldsymbol{x} \leqq \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{x} \geqq \mathbf{o} \tag{5}$$

この問題は双対問題を考えることにより解を求めることが可能である．

また，これとは逆に Bard [3] は楽観的な観点からつぎのような問題と最適解を考えた．

$$\max_{\boldsymbol{x}}\{\max_{\boldsymbol{c}\in C'} \boldsymbol{cx}\} \text{ s.t. } \boldsymbol{Ax} \leqq \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{x} \geqq \boldsymbol{o} \qquad (6)$$

C' が凸多面体である場合には，この問題の双対問題を考えることにより，既存のアルゴリズムで解けることが知られている．

本稿で対象とする問題では，まず $C' = \{\boldsymbol{c} \mid \pi_c(\boldsymbol{c}) = 1\}$ となる係数集合を定める．係数の分布を制限するファジィ数が三角型である場合には，集合 $\{\boldsymbol{c} \mid \pi_c(\boldsymbol{c}) = 1\}$ はひとつの要素しかもたない．つぎに，上述のいずれかのアプローチにより可能性最適解のひとつを選択する．さらに，ひとつの可能性最適解を得たのちは，その解（最適基底）が $\mu_{N_c}(\boldsymbol{x}^*) > 0$ となり得るかの検討を行う．レベル集合 $[C]_1$ が凸多面体である場合には，実行可能基底の必然的最適性のチェックは多面体領域内のすべての $\boldsymbol{c} \in [C]_1$ に対して $\boldsymbol{c}_N - \boldsymbol{c}_B B^{-1} N$ を調べる必要はなく，多面体の端点に関して調べ，その中のひとつでも正のものがあれば，必然的に最適でないと判定される．

3 必然的最適解

通常の感度解析に対し，Tolerance approach は A, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$ の係数の同時独立な変動を考えるものである [4]．この節では，Tollerance approach を必然的最適性の度合いの計算への適用を考える．ここでは，$\boldsymbol{c}$ に関してつぎの拡張問題を考える．

$$\boldsymbol{c} \in \hat{C} + \gamma G,\ \gamma \in \Gamma \qquad (7)$$

ここで $\hat{C}, \Gamma$ は凸領域であり，また次式を満たす有限で非負の数 τ は allowable tolerance とよばれる．

$$\boldsymbol{c} \in \hat{C} + \gamma G,\ \gamma \in \Gamma,\ \ ||\gamma||_\infty \leqq \tau \ \Rightarrow\ \boldsymbol{c} \in R^* \qquad (8)$$

最大 tolerance τ^* は $\sup\{\tau \mid \tau \text{ satisfies } (8)\}$ である．

ここで，C に関し，レベル集合がつぎのような台形型のファジィ数である場合を考える．

$$[C]_{1-h} = \{\boldsymbol{c} \mid \hat{c_i}^{(L)} - w_i h \leqq c_i \leqq \hat{c_i}^{(U)} + w_i h\} \qquad (9)$$

この場合は，

$$\tau^* = \min_{jk} \tau_j^k$$

$$\tau_j^k = \frac{\hat{\boldsymbol{c}}_B^k B^{-1} N_{\cdot j} - (\hat{\boldsymbol{c}}_N^k)_j}{|(\boldsymbol{w}_N)_j| + \sum_{i=1}^{m+n} |(\boldsymbol{w}_B)_i (B^{-1})_{i\cdot} N_{\cdot j}|} \qquad (10)$$

となる（$\hat{c}^k$ は矩形領域 $\{\boldsymbol{c} \mid \hat{c_i}^{(L)} \leqq c_i \leqq \hat{c_i}^{(U)}\}$ の端点）．これより $\mu_N(\boldsymbol{x}^*)$ の値を求めることができる．また，一般にレベル集合が凸多面体である場合にも同様に $\mu_N(\boldsymbol{x}^*)$ の値を求めることが可能である [5]．

4 意思決定

以上の結果をまとめると，意思決定プロセスは以下のようになる [5]．

Step 1. 集合 $\{\boldsymbol{c} \mid \pi_{\tilde{c}}(\boldsymbol{c}) = 1\}$ を求める．

Step 2. 可能的最適性に関して決定の基準を定め，Inexact programming の手法により，可能的最適解をひとつ求める．

Step 3. 必然的最適解が存在するか（$\mu_N(\boldsymbol{x}^*) > 0$）を調べる．

Step 4. 必然的最適解があれば，Tolerance approach の手法により，必然的最適性の度合いを計算する．

参考文献

[1] Inuiguchi, M and Sakawa, M.: Possible and Necessary Optimality Test in Possibilistic Linear Programming Problems, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 67, pp. 29-46, 1994.

[2] Soyster, A. L.: A Duality Theory for Convex Programming with Set-Inclusive Constraints, *Oper. Res.*, Vol. 22, pp. 892-898, 1973.

[3] Bard, J. F. and Chatterjee, S.: Objective Function Bounds for the Inexact Linear Programming Problem with Generalized Cost Coefficients, *Computer and Oper. Res.*, Vol.12, No.5, pp. 483-491, 1985.

[4] Wendell, R. E.: The Tolerance Approach, in T. Gal and H. J. Greenberg (eds.) *Advances in Sensitivity Analysis and Parametric Programming*, Chapter 5, Kluwer Academic Pub., 1997.

[5] Ida, M.: Optimal Basis of Possibilistic Linear Programming Problem, *Proc. of AFSS 2000*, 2000.

[問い合わせ先]
〒 606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学大学院 情報学研究科 システム科学専攻
井田 正明
Tel: 075-753-5241, Fax: 075-753-5042
E-mail: ida@i.kyoto-u.ac.jp

TB5−1

オントロジーを用いた検索エンジンの提案
Proposal of search engine using ontology

田島正憲 神田和幸 大塚和彦 高木友博
Masanori TAJIMA/Kazuyuki KANDA/Kazuhiko OOTSUKA/Tomohiro TAKAGI
明治大学 理工学部 情報科学科
Dept of Computer Science, School of Science and Technology, Meiji University.

Abstract In the net, we always use search engines to search the purpose information from huge information. But the most of present search engines can not get the information along with user's intention because it uses estimation only based on the keywords matching, which requires words to match. In this paper, we propose the system which expand the meaning of the keywords input by a searcher and find new keywords using ontology. As a result, this system comes to be albe to provide the intended information. We also show usefulness of proposed method in comparison with commercial search engine.

1 はじめに

現在,さまざまな検索エンジンがインターネット上に存在する．そして巨大なデータベースから，検索者は容易に自分の検索目的の情報を得られるように思われる．ところが実際には余計な検索結果（ゴミ）が多く含まれるため，本当に欲しい情報を手に入れることは困難である.そこで,本研究ではオントロジーを検索エンジンの中に組み込むことによって，検索者の意図を補完した検索結果を得ることを試みた.

2 オントロジーとは

(1)オントロジーの定義

オントロジーとは，「既存の知識ベースに潜んでいる対象世界に関する暗黙の概念を明示化したもの」である.

(2)メリット

① 対象とする世界における共通認識が得られる語彙を提供していること.
② 概念の意味定義,概念間に存在する基本的な関係や制約があること.
③ 標準化,すなわち，オントロジーの一般性,共通性,形式性を目指していること.
④ 設計者の意図がはっきりと明らかにされているため，知識の再利用が可能であること.

(3)オントロジーの構造

一般的なオントロジーの概念は,概念の名前，スーパークラス，リンク（is-a,part-of)，辞書的定義，属性，関連を持つ.

3 システムの概要

以下に本検索エンジンにおける処理の流れを示す.

① 検索者がキーワードをブラウザに入力.
② ブラウザは検索者から受け取ったキーワードをオントロジー部に渡す.
③ オントロジー部は受け取ったキーワードを本提案のオントロジーによって語彙を拡張し，新しいキーワード（ここでは拡張キーワードとする）と活性値を結果として，エンジン部に渡す.
④ ビジュアル部はオントロジーからデータを受け取り内部処理により拡張キーワードの関係をビジュアルで検索者に表示する.
⑤ エンジン部はオントロジーから受け取った拡張キーワードと活性値をデータベース内のデータと照合し，マッチするものがあればそのデータを tf・idf 法を用いて計算し，一つのデータの評価値を出す．またこの処理はデータベース内の各データすべてに行う.
⑥ 拡張キーワードに対するデータベース内のデータの評価値をすべて計算した結果，評価値の一番高いデータを検索者が望んでいるデータに近いものとし，ソートし検索結果として，ブラウザに返す.
⑦ 検索者はそのブラウザに表示された検索結果をもとにその結果内に表示されている URL をクリックし，自分の目的のページを選びジャンプする.

図1に本検索エンジンにおける処理の流れ図を示す.

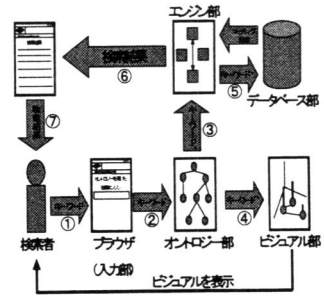


図1：本検索エンジンの処理の流れ

4 各部の説明

1.1 オントロジー部

図2に示すように，このオントロジーシステムでは，ある入力キーワードが与えられた時に，そのキーワー

ドに関係する概念を抽出し，その概念の活性値を求める．図２の中央の概念間の矢印は，上位・下位概念の関係を表す．

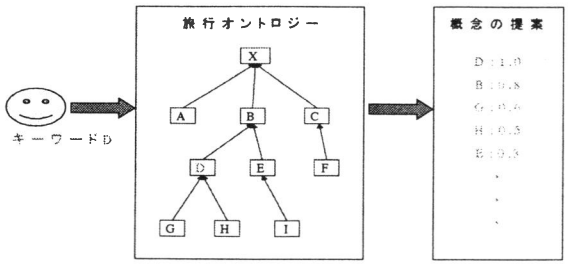


図２：オントロジーシステム

また入力キーワードが二つの場合，活性値の計算は個々に行い，最後にANDとORの場合に分けて活性値の計算を行う．計算式は図３に示す.また図中の X，Y はそれぞれ Keyword－X，Keyword－Y から求められた活性値を表す．

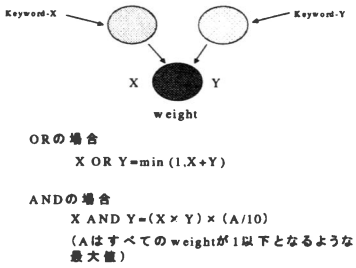


図３：ANDとORの活性値の計算方法

今回本研究では，オントロジーの対象空間を「旅行」関係にし，オントロジーの作成を行った．

この旅行オントロジーでは,概念，スーパークラス,リンク強度，関連を扱っている．関連とは分類学上全く関係のない概念が実際に関係をもつ場合に利用する．例えば,「温泉」と「熱海」の関係が関連である．

この旅行オントロジーを利用してキーワード拡張した結果を表 1 に示す．表中の語句はキーワードをオントロジーにより処理された拡張キーワードである．また表中にある数値は入力されたキーワードに対する拡張キーワードの活性値である．

表１：オントロジーの実行結果

(1) 旅行					
旅行	旅行代理店	トラベル	娯楽	日本旅行業協会	パック
1.000	0.700	0.650	0.600	0.600	0.500
(2) 温泉と長野のAND処理結果					
野沢	乗鞍高原	白馬	戸狩	オリンピック	登別
0.983	0.933	0.600	0.593	0.114	0.067
(3) 春と観光のOR処理結果					
花見	春	観光	娯楽	国際観光振興会	日本観光協会
1.000	1.000	1.000	0.660	0.620	0.600

（１）「旅行」をオントロジーによってキーワード拡張した結果である．結果として「旅行」に関係する概念が抽出されている.またこの結果に現れた概念は,他の知識表現やシソーラスでも抽出可能である．

（２）「温泉」と「長野」を本検索エンジンの AND 検索にかけるためにオントロジーによってキーワードを拡張した結果である．この結果では，旅行目的と地域からそれに当てはまる地名を導き出している．オントロジーのメリットとして,オントロジーでは具体的な地名は抽出されるが，シソーラス（Thesaurus）ではこのような具体的な地名は抽出されない．フレーム（Frame）の場合では，関連を扱っていないので，上位にこのような地名が抽出されない．また，セマンティックネットワーク（Semantic Network）では，このような例を構築することは可能であるが,汎用性に乏しく,知識の再利用が難しいということがあげられる．

（３）「春」と「観光」を本検索エンジンの OR 検索にかけるためにオントロジーによってキーワード拡張した結果である．この結果で注目されるのが,「春」と「観光」から「花見」という概念が抽出されることである．これは，オントロジーに常識や連想を組み込むことが可能であることを示している．表１の例からも小さな領域ではあるが,入力キーワードを限定すればある程度の有用性を示せる．このように，フレームやセマンティックネットワークなどの知識表現やシソーラスのさまざまな問題点を考察し，解決することを目指すことがオントロジー研究の本質であり，メリットとなっている．

1.2 インターフェース部

インターフェース部では,オントロジー部から受け取ったデータを視覚的に表示し，ユーザーが入力したキーワードをオントロジーによってどのような拡張キーワードが結果として出力されたかを理解しやすいように表現することを目的としている．

ここでは，オントロジー部からデータを受け取り，パラメータとして，X 軸に階層値，Y 軸に活性値を与え表示する．

図４に表示例に示す．

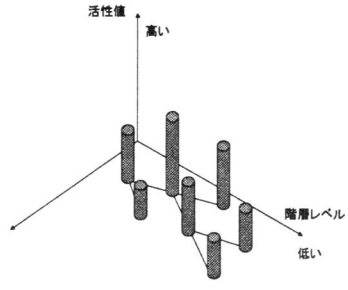


図４：表示例

1.3 エンジン部

1.3.1 インデクサー

① ファイル A というの HTML 文書を形態素解析し，名詞とタグのみをファイル A１に書き込む．（形態素解析部の処理）

② 次にファイルＡ１の中にある同じ名詞の出現回数を

カウントし，その結果をファイル A2 に書き込む．（カウント部の処理）

③ このファイル A2 がデータベースに格納され，検索の際に照合されるものとなる．

インデクサー部における文書の処理の過程を図 5 に示す．

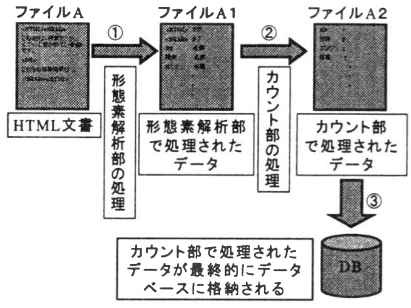


図 5 ：インデクサーの流れ

1.3.2 評価値

① オントロジーの処理結果とリスト処理されたファイル A との内容を照合しマッチする単語を見つける．

② マッチした単語の出現回数にオントロジー部で求めた活性値をかけて評価値 1 とする．

③ それぞれの単語に対する idf 値をそれぞれの評価値 1 にかけてた後，すべての評価値 1 を合計したものを評価値 2 とする．

④ 評価値 2 をファイルの総単語合計数 Y で割りその結果を評価値 3 とする．この結果が最終的なそのファイルの評価値として算出される．

ここで tf・idf 法について説明すると，tf 値はある文書中の単語の数をその文書中のそう単語数で割ったものを表す．idf 値はすべての文書に対してその単語がいくつの文書に含まれていたかを表す．つまり希少度を表す．この図中で見ると②から④までの計算が tf・idf 法である．

評価値算出の例を図 6 に示す．

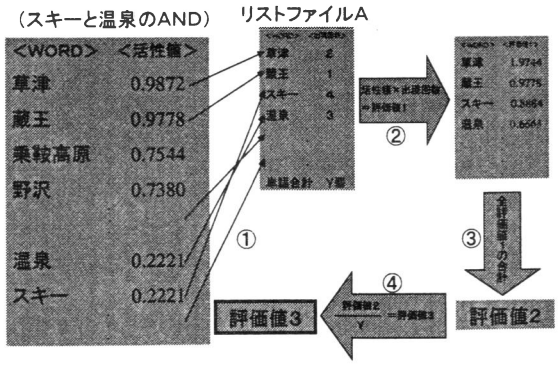


図 6 ：評価値算出手順

5 実行結果と評価

「冬」と「スポーツ」の AND 検索の結果を以下に示す．

また、下記に表示されている図 7 は冬とスポーツという二つのキーワードをオントロジー部で処理し拡張キーワードと活性値をビジュアル部で処理した結果の出力例である．

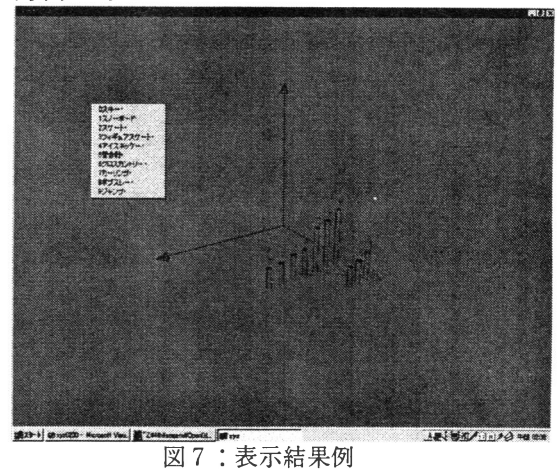


図 7 ：表示結果例

＜本検索エンジン検索結果内容＞
<1>蔵王スキー場ホームページ
<2>プリンスホテルスキー情報
<3>スキージャーナル
<4>丹後観光ホームページ
<5>草津国際スキー場
<6>中部スキーメーリングリスト

＜商用検索エンジン G の検索結果内容＞
<1> 検索エンジン LYCOS ホームページ
<2> 検索エンジン goo ホームページ
<3> 冬ならではのスポーツ情報
<4> 冬のスポーツ前のウォーミングアップ情報
<5> モータースポーツ
<6> 子供スポーツクラブ（スキー）

本検索エンジンと商用検索エンジン G に同じキーワードを入力し実行した結果を見ると G では，やはり冬とスポーツが単純に入っているホームページを検索結果としていると考えられ内容が一定していない．しかし本提案の検索エンジンではスキー場に関する情報が検索結果としてリストアップされている．本検索エンジンの検索結果としてマッチした結果にスケートのような他のスポーツが現れていないが，これはオントロジーのデータベースにスキーに関連したものを多く登録したためにこの様な結果が生じた．

これはオントロジーのデータベースを追加することでこのような偏りは解消できる．

このようにオントロジーを用いて入力したキーワードを拡張し更に評価値を用いる事によって，検索者の意図を補完した検索結果を得る事ができる．

また今回はインターフェース部については実際に検索エンジンのシステムとは組みあわさってはいないが今後のシステム開発においては検索エンジンシステムとインターフェース部を統合し、さらにユーザーのニーズにも対応できる検索エンジンにしていく方針である．

6 今後の課題

オントロジー構造とリンク強度のユーザの視点の変化によってどのように知識を上手く表現するべきか，又キーワード拡張の範囲をどうするかについて．

パラメーターの取り方についてはオントロジーのツリー構造を見せることを優先的に考慮して行ったが，パラメーターの取り方に工夫を加えれば，視覚的にもさらにわかりやすい表示方法をとれる可能性もある．

カウント部での処理がタグを考慮に入れず，名詞の出現回数だけカウントしているために最終的な評価値が完全にもそのページに一致していない．そのためタグの関係も考慮に入れて，新たに値を計算する必要がある．

7 参考文献

[1]馬場 肇，“日本語全文検索システムの構築と活用”

[2]“goo”，<http://www.goo.ne.jp>

[3]松本，“日本語形態素解析ソフト茶筅取り扱い説明書”

[4]Stuart Russell・Peter Norvig，“エージェントアプローチ人工知能”

[5]溝口，池田，北村，“オントロジー工学基礎論”，特集「オントロジーの基礎と応用」投稿論文，第14巻6号

[6]溝口，“オントロジー研究の基礎と応用”，人工知能学会誌 ,Vol.14 No.6

[7]“Stanford KSL Network Services”，<http://www-ksl-svc.stanford.edu:5915/>

[8]Adam Farauhar,Richard Fikes and James Rice，“The Ontolingua Server:a tool for collaboratice ontology construction ”,46,707-727(1997)

[9]Kuhanandha Mahalingam and Michael N.Huhns，”A Tool for Organizing Web Information”，Computer June，(1997)

[10]“大阪大学産業科学研究所”，<http://www.ei.sanken.osaka-u.ac.jp/japanese/>

[11]“Java Ontology Editor”，<http://www.engr.sc.edu/research/CIT/demos/java/joe>

[12]古崎晃司,来村徳信,池田満,溝口理一郎,“分散型オントロジー構築・利用環境の開発”，人工知能学会全国大会論文集，VOL.11th,PAGE 245-248，(1997)

[13]Nancy J.Yeager,Robert E.McGrath，“Webサーバ完全技術解説”

[問い合わせ先]
〒214-8571
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学 理工学部 情報科学科
ヒューマンインターフェース研究室
田島 正憲
Tel:044-934-7469
Fax:044-932-7912

TB5−2

距離型ファジィ推論法を用いたWWW情報検索

WWW Information Search with Distance-type Fuzzy Reasoning

加藤　高志
Takashi Kato
北海道大学大学院
Graduate Shool of Engineering
Hokkaido University

王　碩玉
Shuoyu Wang
高知工科大学
Kochi University
of Technology

土谷　武士
Takeshi Tsuchiya
北海道大学大学院
Graduate Shool of Engineering
Hokkaido University

Abstract :I would propose the WWW information retrieval with distance-type fuzzy reasoning method for supporting thinking of key words which is troublesome part for users.To define distance, I use tree structure of the dictionary.With distance-type fuzzy reasoning method, this system creates key words from the inputted sentence.And it supported users by presenting the key words.

1 はじめに

WWW上の情報資源は増加の一途をだどっており、利用者の幅も広がっている。より簡便にWWW上の情報を利用できるようにする事は、これからのネットワーク社会において重要である。そのため、情報を利用しやすくするために検索エンジンをトップページに置くところが増えてきている。

WWW上での情報検索は、現状では主にテキスト検索であり、一般的には全文検索に代表されるキーワードを用いた検索が利用されている。全文検索は、一般的なキーワード検索に比べ、

・データ作成者側がキーワードを用意する必要が無い

・文章中の言葉全てがキーワードになる

という長所があるが、

1．検索者自身が検索したい事柄に関するキーワードを発想する必要がある。

2．文章中にキーワードが含まれている必要がある

などの問題がある。

このうち1は、全文検索に限らずキーワードを用いる検索ならば全てに言える事だが、キーワードを発想するということについて、ある程度の慣れ、言い方を変えればある程度の熟練が必要とされ、初心者が適切なキーワードを発想するのが難しいということが言える。

また、2に関しては、意図的な隠語、または用語の違いによって検索できない問題がある。1との関連もあるが、検索者側が言葉を間違う、または、知らない場合、求める情報が得られないことがある。（例：キーワード『GIF規格書』では見つからないが、『GIF仕様書』ならば見つかるという場合など）

このような問題点について、本稿では、距離型ファジィ推論法[1]を利用する事でキーワードの発想支援を行い、利用者の手助けをすることを目指す。

2 自然言語の扱い

距離型ファジィ推論法は直接法のファジィ推論法であり、適合度としてファジィ集合同士の距離を用いる。そのため、それを自然言語に適用するには言葉同士の距離が定義できなければならない。本稿では言葉を比較可能にするに当たって、分類語彙表形式のデータを利用する事とし、『分類語彙表』[フロッピー版][2]を利用した。

分類語彙表では、単語がその語彙によって分類されており、図1に示すようなツリー構造を持っている。

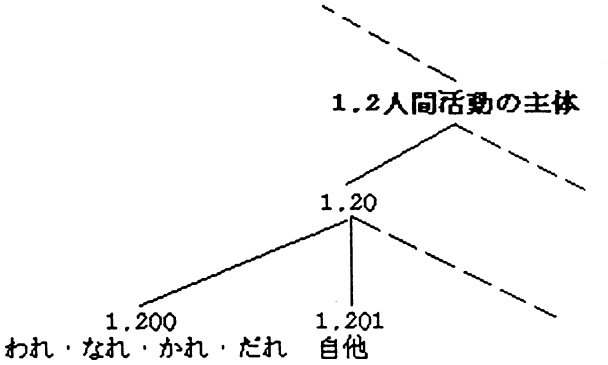


図1：分類語彙表の構造

この、分類語彙表の構造を利用して、以下の定義を満たす距離関数を次のように設定する。

距離関数の定義：

実数全体の集合をR，Rを全体集合としてRにおけるファジィ集合の全体をF（R）とする。A，B⊂F(R)において関数dが、

$$d(A,B)\geqq 0\ ;\ d(A,B)=0 \Leftrightarrow A=B \qquad (1)$$

$d(A,B)=d(B,A)$ (2)

$d(A,B)\leqq d(A,C)+d(C,B), \forall C \subset F(R)$ (3)

の3つの条件を満たすとき、dをF(R)上の距離関数であるという。(詳しくは文献[1]を参照されたい。)

距離関数の設定:

ツリー構造においてそれぞれの枝の長さは同じく*l*であるとする。このとき、節点a,b間の距離dはaからbまで、ツリーの枝に沿って到達した場合の枝の数をxとおくと、

$d(a,b)=l \cdot x$ (4)

と定義できる。

(例:図1の場合、1.200から1.201までの距離は*l=1*として、*d=2*)

この、関数dが距離関数の定義を満たす事は明らかである。

3 アルゴリズム

さて、以上のように準備した後、以下のようにしてキーワードの発想支援を行う。

全体の流れは以下のようになっている。

1.利用者が検索する事柄について文章を入力する。

↓

2.入力文に対して単語分割を行って単語に分け、分類語彙表を参照して分類番号を導き出す。

↓

3.推論エンジンに単語に対応した分類番号の組を入力し、出力の分類番号を得る。

↓

4.番号から分類語彙表を引き、単語群を利用者に提示する。

そして、この提示された単語群を利用してユーザーはキーワードを発想する。これにより、何もない状態からキーワードを発想するよりも容易にキーワードを導き出す事が可能であると考えられる。

上記の流れの中、1や2、4に関してはすでにある種の方法が確立されており、それを利用する事で容易に実現できる。ここでは本手法の特徴である推論エンジン部について述べる。

3.1 推論エンジン

推論エンジンでは、分類語彙表の分類番号の組を前件部、同じく分類番号を後件部としたルールベースをもとに推論を行う。以下はm入力1出力で、ルール数がnである推論について説明する。また、実際に利用するルールがシングルトンであるから文献[1]での距離型簡略化推論法を利用する。

1.まず、(4)式に基づいて前件部a^{ij}と与えられた事実a^iとの距離$d_{ij}(a^{ij},a^i)$を計算し、次に(5)式によりd_i～d_nを計算する。(i=1,2,…,n.j=1,2,…,m)

$$d_i = \sum_{j=1}^{m} d_{ij}(a^{ij},a^i) \quad (5)$$

2.後件部をb_i(i=1,2,…,n)として、(6)式により、推論結果を得る。

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[b_i \prod_{j=1,j\neq i}^{n} d_j\right]}{\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1,j\neq i}^{n} d_j} \quad (6)$$

4 シミュレーション

簡単のため、入力文を2～3単語からなる単純な文章(例:「GIFについて」など)とし、出力は名詞のみとしてシステムを組み、その特性を見る。その結果については当日示す。

5 終わりに

本稿では、WWW全文検索におけるキーワード発想において、距離型ファジィ推論法を用いて発想支援を行う事が可能である事を示した。

今回の手法では、キーワードの絞込みや、全文検索でのもう一つの問題点である「当たりすぎ」(ヒット件数が数万件に及ぶ事がある)に対する考慮がなされていない。

今後は、こうした事を踏まえて本稿での手法をより使いやすいものにして行く必要がある。

参考文献

[1]王 碩玉、土谷 武士、距離型ファジィ推論法 Part 1-距離型ファジィ推論法の提案-、第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.9-12、1996

[2]国立国語研究所編、分類語彙表、秀英出版、1964

[問い合わせ先]

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻

制御情報工学講座制御工学分野

加藤 高志

Tel: 011-706-6761

FAX: 011-706-7890

E-mail: tkato@ctrl.coin.eng.hokudai.ac.jp

TB5−3

ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムの情報検索への応用

Information retrieval by rubber string type associative memory algorithm

田中一成
Kazunari TANAKA
北海道大学大学院
Graduate School of Engineering, Hokkaido University

王碩玉
Syouyu WANG
高知工科大学
Kochi University of Technology

土谷武士
Takeshi TSUCHIYA
北海道大学大学院
Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Abstract : Rubber string type associative memory algorithm was proposed. The algorithm has the following three main characteristics. (1) The associative algorithm is very easy. (2) Orthogonality of the characteristic pattern vector is unnecessary. (3) The stability of association is theoretically guaranteed. We improve and apply the algorithm for information retrieval.

1 はじめに

連想記憶は憶えた知識を単なるアドレス式で検索するだけではなく，たとえば友人の写真を見ると，名前を想起して，そしてその人の性格や人柄などを連想するといった高度な機能を指している．

連想記憶には，

1. 関連のある記憶を直接並列に想起する
2. 個々の事例を独立に記憶させるのではなく何らかの類似性を保った記憶方法をとる
3. 入力情報の不完全性，歪みへの耐性がある
4. 多事例の統計的な相違点を抽出して類別する，汎化能力があるが，必要に応じて個々の区別も行える

などの性質があり[1]，情報検索に応用することにより，想起や発想の支援など，人に尋ねる感覚で検索できるデータベースを構成できるのではないかと考えられる．

人間の持つ優れた連想記憶機能を再現しようとする研究は昔から行われてきたが，これらのモデルは本質的にプロトタイプパターンを表す諸ベクトルがお互いに一次独立であることを必要としている．ゴムストリング型連想記憶アルゴリズム[2][3]では，以上の条件を必要とせず，記憶できるプロトタイプパターンの数を必要に応じて任意に決定できるなどの利点がある．本報告の目的はこのアルゴリズムを情報検索に応用することである．

2 情報の扱い

自然言語には意味の曖昧さ，一つの言葉がいくつかの意味を持つなど座標軸上に配置するには扱いにくい性質がある．そこでまず，これらの性質が比較的少ない名詞を対象として取り上げ，条件として求める性質を与えて，情報検索を行うことを目指す．

まず，物の持つ性質を数値化し，表を作る．物の性質には，物理量として客観的に測定できるものもあれば，人の主観によるものもあるが，身の周りにあるものであれば個人個人の持つ知識や経験である程度妥当な値を入れることができると思われる．性質の多くは専用の計測機器やアンケートなどを用いることにより，正確な情報を得ることが可能である．

次に，性質それぞれに対して一つの座標軸を対応させ，各項目を空間の形で表す．例えば，白あんと黒のこしあんの二種類のまんじゅうについて，硬さ，大きさ，あんの色という性質についての情報がある場合の空間は図1のようになる．ただし，物の性質には例えば色，大きさ，重さ，形など様々なものがあるが，これらをそのままの値で配置しては検索結果への影響に偏りができることになる．そこで，各座標軸の基準

値に対する割合を計算し，この値を用いて空間に配置する．

また，物によって比較すべき性質が異なり，全てを一つの空間に配置した場合，ベクトルの多くの成分がゼロになるなど無理が生じる．そこで，用意すべき座標軸の種類が近いグループに分け，それぞれのグループに対して一つの空間を用意する．つまり，まんじゅうは菓子の空間，Tシャツは衣類の空間に配置される．こうすることにより物の性質を表す各成分の値のほとんどを有効にできると共に，データベースを構成する際には，グループ毎で比較的小規模にデータを分散して蓄えることができる．さらに，想起の計算も並列に処理できる．

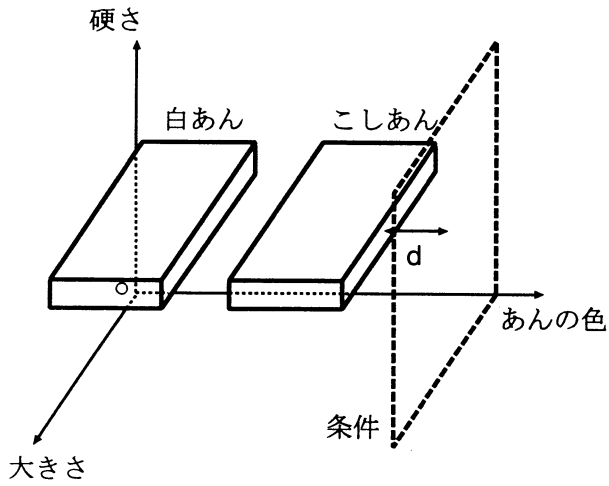


図 1: 入力空間の例

3 ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムの応用

ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムは，入力空間と出力空間に対になるプロトタイプを配置しておき，入力空間に与えられた刺激に対応する出力空間の一点を想起するものであり，そのままでは，条件による検索アルゴリズムとしては用いられない．そこで，いくつかの工夫を施すことにする．

3.1 入力空間

検索時に用いられる入力空間に対する刺激は，プロトタイプパターンと同じ次元とは限らず，ユーザの求めるいくつかの条件で，通常，プロトタイプパターンの次元より低次元であると考えられる．例えば，先ほどの菓子の空間にあんの色についての条件が加えられた時には，図1の様に平面の形で入力空間に表われる．そこで，刺激とプロトタイプパターンとの距離を図1のdのように，与えた条件によってできる直線や平面との距離として定義する．この直線や平面は軸に平行であるため，距離計算が複雑になることは無く，次元を落した形になる．

プロトタイプ$p_i(i = 1, 2, ..., L)$と刺激sとの距離d_iの計算は以下の様に行う．

$$d_i = \left\{ \sum_{j=1}^{N} {w_j}^2 {d_{ij}}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

$$d_{ij} = \begin{cases} |p_{ij} - s_j| & (x_j\text{軸に対する条件が与えられている時}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

ただし，$j = 1, 2, ..., N$は次元を表す．

w_jは，それぞれの条件に対する重要度を表し，検索条件と共に，ユーザーが与える．

3.2 出力空間

条件検索を行う場合，入力した条件に合うデータが複数あるのが一般的である．そこで，出力空間として図2のように，情報を蓄えた空間とは別に，蓄えている項目の数と同じ次元を持つ空間を用意する．一つのプロトタイプに対して，一つの座標軸を用意するといった形のモデルにすることによって，それぞれのプロトタイプが独立に計算され，複数のプロトタイプを同時に想起できるようになる．まんじゅうの例で言うなら白あんの軸とこしあんの軸の二次元空間となる．

k_iは，

$$k_i = \frac{1}{d_i} \tag{2}$$

として計算され，

このとき，出力されるベクトルは，

$$Y = (y_1, y_2, \ldots, y_L)^T \tag{3}$$

$$y_i = \frac{1}{d_i k_{oi} + 1} \tag{4}$$

となり，$d_i \to 0$の時には$y_i \to 1$，$d_i \to \infty$の時には$y_i \to 0$となる．

k_{oi}は，それぞれのデータの想起のされやすさに関するパラメータとして扱うことができ，データ毎の質的な差が無い場合には全てのiに対して等しくしておけば良い．もし，まんじゅうとしては白あんよりこしあんの方が一般的ならば，k_{o1}をk_{o2}に比べて小さくしておくと，白あんよりこしあんが出力され易くなる．

出力されたベクトルは，検索の条件に一致するプロトタイプに対する成分が１となり，それ以外はそれぞれの距離に応じて０～１までの値をとることになる．

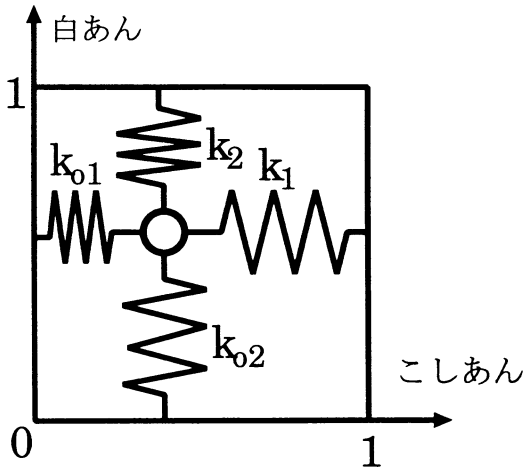


図 2: 出力空間の例

4 抽象化能力

ここでは，抽象化能力として，いくつかの項目をまとめて一つのものとして扱うことを考える．例えば，これは，白あんのまんじゅうとこしあんのまんじゅうをまとめて，まんじゅうとして扱うことを指す．

4.1 得られる利点

抽象化能力を実現する目的は以下の通りである．

1. ユーザの要求に合わせて抽象的な返答ができる．例えば，手土産として何がいいかと尋ねた時にどこの店のなんと言うお菓子と細かく分類された大量の項目を出力するのではなく，まんじゅうとかケーキなどと言った大雑把な項目を挙げることが出来る．

2. 情報を入力する際，上位の項目の性質を継承する事によって，一々全ての性質を示す手間が省ける．まんじゅうと言えばわざわざ和菓子だと断る必要は無い．ただし，特殊な物なら特に指定する事も出来る．

3. 空間を分割するのではなく、同一空間上で抽象化を行うので、いくつかの基準によって分類できる．例えば，菓子全体を和菓子洋菓子と分けるほかにも，作り方によっても分類してツリーを作ることができる．

4. 刺激から遠い項目についてはまとめて計算を行うことができるため，アルゴリズムの高速化が期待できる．

4.2 抽象化能力の実現

本アルゴリズムにおいて，抽象化能力を実現する方法として，物理学の世界で計算の高速化に用いられるツリー法[4]の考え方を応用する．ただし，この場合，抽象化能力の実現が目的であるので，空間を等分割するのではなく，意味的に分割していく．白あんのまんじゅうがまんじゅうであり，こしあんのまんじゅうもまんじゅうであると与えられたなら，両方の空間を内包する空間としてまんじゅうの空間を作る．つまり，まんじゅうという大きな空間の中に白あんとこしあんの空間が含まれることになる．このようにして空間を作成することにより，次に入ってくる情報についてまんじゅうと断ることがなくてもまんじゅうの性質を持っていたならまんじゅうと推測することが出来る．この時，これらの関係は，図3に示すようなツリー構造となる．ツリーの上にあるほど抽象化された項目であり，先端に近くなるほど具体化されていることになる．本来のツリー法とは異なり，各ノードから出る枝の数に制限がない．

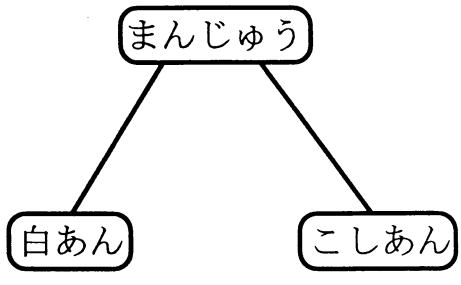


図 3: ツリーの例

5 想起

情報を検索するときには，図4に示すようにそれぞれの空間に検索の条件を与え，各空間から返される結果を基に情報を提示する．図4は，衣類と食器に対して，”和風のもの”，組になるもの”という条件で検索を行った場合の例である．必要に応じて，抽象的な空間内で検索を行った後，検索を行う空間を選択したり，同一空間内であっても，出力する抽象レベルを指定する事によって，求める答えを得ることが出来ると思われる．検索の条件に対して重要度を与えることが出来，これにより求める情報がより見つかり易くなる．

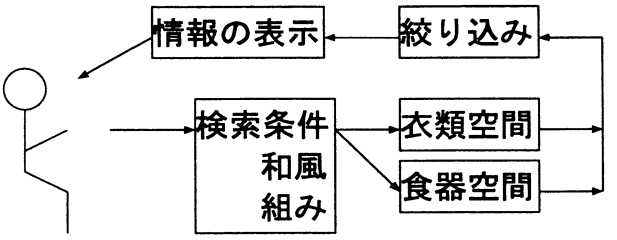


図 4: システム構成

6 シミュレーション

以上を基にしてシミュレーションを行った結果を示す．今回は，贈り物の検索を想定し，身の周りを大雑把に分類する抽象的な空間，衣類の空間，菓子の空間，食器の空間を作成した．

まず，抽象的な空間において，どのような種類の物がいいかを決める．結婚祝，快気祝，お中元，お歳暮についての条件を予めシステムに憶えさせ，これらの項目を選択し，出力を得る．結婚祝を選択した場合，実用性，大きさなどといった条件について自動的に値を与え検索を行う．これにより得られた結果を表1に示す．この結果はだいたい一般的な物であると思われる．快気祝，お中元，お歳暮においても一般的な結果が得られた．

表 1: 結婚祝についての結果（第一段階）

条件	実用性	１００
	大きさ	５０ｃｍ
	寿命	１０年
	使用場所	家の中
	相場	５０００円
結果	衣類，食器，家電，文具，調理器，家電本，時計，商品券	

さらに，得られた結果から食器と衣類を選んだ事を想定して，この二つの空間について条件を与えて検索し，より具体的な出力を得る．このとき与えた条件と検索結果を表2に示す．湯呑み、椀などありがちな物の他，浴衣，じんべえ，どてらなど，ちょっと意外に感じるような結果も得られた．結婚祝としてペアのパジャマを贈るというような事はあるそうで，そう考えるとそれほどおかしな結果ではないと思われる．じんべえなどは普段目にする機会も少なく、思いつきづらい物であり，それだけにかえって心に残るお祝いとなるかもしれない．このように、性質によって検索するので、時に少し変わった提案が出来るのがこのシステムをこれまでの検索アルゴリズムと区別する利点であると考える．

表 2: 結婚祝についての結果（第二段階）

条件	和風	１００
	組	2
	使用場所	家の中
	派手さ	0
結果	湯呑み，椀，浴衣，じんべえ，どてら	

7 おわりに

ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムを用いて情報を検索する手法について述べ，実際にプログラムを作成して，本手法によって情報検索が行えることを示した．

しかし，条件をすべて数値で与えるというのは人の感覚にそぐわない，どのような基準で空間を分けるのかということがはっきりしていないなど問題点について，これから考えられなくてはならない．

参考文献

[1] 角田 達彦：連想記憶モデルの現状と動向，情報処理，Vol.36，No.1，pp.89-96 (1995)

[2] 王 碩玉，河田 耕一，土谷 武士：連想記憶アルゴリズムの一提案，システム制御情報学会論文誌，Vol.11，No.7，pp.411-413 (1998)

[3] 王，河田，土谷，水本:距離型ファジィ推論法 Part9-ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムの提案，第１４回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.81-84(1998)

[4] 牧野淳一郎：ツリー法の原理
http://grape.astron.s.u-tokyo.ac.jp
/~makino/papers/fmm_preprint/node3.html

[問い合わせ先]
〒０６０－８６２８ 札幌市北区北１３条西８丁目
北海道大学大学院 工学研究科
システム情報工学専攻 制御情報工学講座
制御工学分野 田中 一成
Tel：０１１－７０６－６７６１
Fax：０１１－７０６－７８９０
E-mail：tanaka@ctrl.coin.eng.hokudai.ac.jp

TC1−1

トーラス状自己組織化マップの学習とその特徴

The characteristics of the torus Self Organizing Map

伊藤正博　　三好力　　増山博
Masahiro ITO　Tsutomu MIYOSHI　Hiroshi MASUYAMA
鳥取大学　工学部　知能情報工学科
Department of Information and Knowledge Engineering ,
Faculty of Engineering , Tottori University

Abstract Self Organizing Map (SOM) is a kind of neural networks, that learns the feature of input data by competitive learning and shrinking its neighborhood set. In case of learning with same data, however, the size of the clusters are different because of the size of neighborhood set, that neighborhood sets in edge of the map are smaller than the one in center. So we use torus map to avoid the difference of neighborhood sets, and compare with conventional method.

1　はじめに

近年、ニューラルネットワーク[1]と呼ばれる分野が注目されている。その中でコホーネンの自己組織化マップ(self organizing map)は、競合学習により、高次元のデータをその特徴を保ったまま2次元のマップに写像する。しかし、学習を行う際マップの端によって近傍領域の面積が変化し、それにより学習回数のばらつき具合に違いが表れてしまう。そこで、近傍領域の面積がマップの場所によって変化しない手法を提案し、従来の一般的な手法と比較した。

2　自己組織化マップ

コホーネンの自己組織化マップは、学習によって格子状に並んだノードを多次元の入力データの特徴を持った特徴マップに自己組織化する。それによってデータ同士の関係が2次元平面上の距離として表され、視覚的に理解しやすいという特徴をもっている。

自己組織化マップの学習方法は、学習させたいデータを入力し、そのデータとの距離が最小のノード（勝利ノード）とその近傍領域にあるノードの重みをデータに近づくように更新する。これを繰り返すことによってマップが自己組織化されていく。

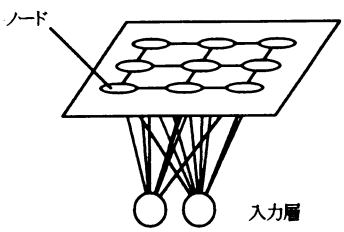


図1 自己組織化マップのモデル

3　学習における問題点と解決手法

自己組織化マップの学習を行うとき、図2にあるようにマップの端で近傍領域が途切れ面積が変化する。これによりマップの中心付近にあるノードの学習回数のばらつき具合に比べて、マップの隅の方にあるノードの学習回数はばらつきが大きくなってしまう。これでは入力データ同士の相互関係をマップ上の距離として表すという自己組織化マップの特徴がマップの場所によって変わってしまい不都合である。また、入力データが同じであってもマップの場所によってそのデータが影響を及ぼす領域の大きさが変わってしまう。そして、これにより学習後の領域の大きさに違いが現れる恐れがある。そこで、これらの問題を解決するためマップをトーラス状の結合とするトーラス状自己組織化マップを提案する。これにより、図3にあるように近傍領域の面積がマップの端で途切れる事による変化をせず、どのノードも近傍領域の面積は同じである。よって、近傍領域の面積が変化する事による学習回数のばらつき具合の違いを生じないと言え、また、1つのデータが影響を与える領域の大きさが変わらないため、学習後の領域に影響を及ぼす恐れが無くなり直感的にも正しいと言える。

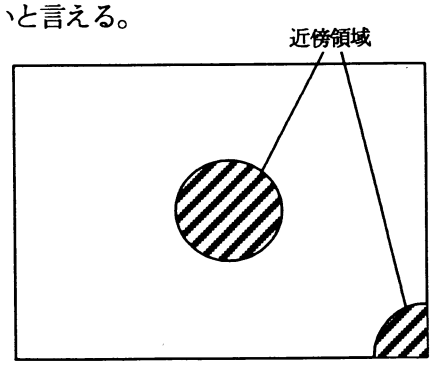


図2　マップの端による近傍領域の変化

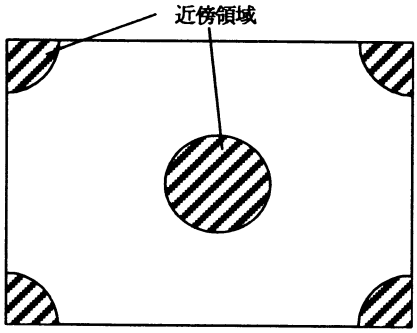


図3　トーラス状自己組織化マップの近傍領域

4　トーラス状マップの学習アルゴリズム

1　初期化

全てのノードの重みを乱数で初期化する。近傍領域を全てのノードが入るよう設定する。学習を繰り返す回数を決定する。

2　データ入力

3　データとノードの重みの距離を計算

4　勝利ノードを探す

5　重みの更新

勝利ノードと近傍領域にあるノードの重みを更新する。近傍領域は学習が進むにつれ減少させる。また、近傍領域がマップの端まで来た場合、トーラスでは反対側へと広がることになる。

6　2～5を繰り返す

設定した回数に達したら終了する。

5　実験・結果

これから示す結果は実験を行った中の1つである。以下にそれぞれのマップのクラス分布、各クラスのノード数、反応しないノード数を示す。

5クラス　3次元　1クラスのデータ80　マップの大きさ　10×10

クラス分布										クラス分布									
0	1	1	1	0	4	4	0	2	2	1	1	1	1	1	0	4	4	4	4
0	1	1	1	1	0	0	2	2	2	1	1	1	1	1	0	4	4	4	4
0	1	1	1	1	0	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0	4	4	4	4
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	4	4	4	4
0	5	5	5	5	0	3	3	3	3	0	0	1	0	5	5	0	4	4	4
0	5	5	5	5	0	3	3	3	3	2	2	2	0	5	5	5	0	0	0
0	5	5	5	0	4	0	3	3	3	2	2	2	2	0	5	0	3	3	3
0	5	5	5	0	4	4	0	3	3	2	2	2	2	2	0	3	3	3	3
2	0	0	0	4	4	4	4	0	0	2	2	2	2	2	0	3	3	3	3
2	1	1	0	4	4	4	0	2	2	2	2	2	2	0	3	3	3	3	3

クラス1のノード数	13
クラス2のノード数	14
クラス3のノード数	13
クラス4のノード数	12
クラス5のノード数	14
反応しないノード数	0

クラス1のノード数	20
クラス2のノード数	21
クラス3のノード数	16
クラス4のノード数	19
クラス5のノード数	6
反応しないノード数	4

図4　実験結果

図4は、左側がトーラス状自己組織化マップについて、右側が従来の一般的な自己組織化マップについての結果である。クラス分布を示しているが、この時、0はどのクラスにも属していないノードを表しておりクラス間の境界である。その他の数字はクラスを表している。次に各クラスのノード数が示されている。これにより、各クラスがマップ上でどの程度の領域を占めているのかが分かる。反応しないノード数とは学習後の動作を調べたものであり、いずれかのクラスに属しているにもかかわらず、学習したクラスに属したデータを入力しても、1度も勝利しなかったノードの数を調べたものである。

学習を終えた自己組織化マップにおけるそれぞれのクラスの面積は、均一であるという事が理想である。なぜなら、どのクラスのデータも平等に同じ回数を学習させたからである。実験結果を見ると、トーラス状自己組織化マップの方が面積最大のクラスと最小のクラスのノード数の差が小さくなっている。これより、トーラス状自己組織化マップの方が従来の自己組織化マップより、それぞれのクラスの領域の大きさが均等になるよう改善されている事が分かった。また、トーラス状のマップの方が学習後データに反応しないノード数の値が小さくなる傾向が現れた。これより、トーラス状自己組織化マップの方が正しく反応せず無駄になったノードの数が少なく、正しくデータ同士の相互関係を表す事が出来るよう改善されている事が分かった。

6　まとめ

従来の一般的な自己組織化マップでは、マップに端があることによって近傍領域が途切れてしまい近傍領域の面積が場所により違っていた。また、それにより1つのデータが影響を及ぼす領域の大きさが違うなど不都合な事が起こっていた。そこで、マップに端の無いトーラス状自己組織化マップを提案し、その性質を調べるために従来の一般的な自己組織化マップとの比較を行った。その結果、トーラス状自己組織化マップによってクラス毎の面積の大きさと、学習後の動作の2点において改善された事が分かった。

参考文献

［1］　八名和夫，ニューラルコンピューティング入門，海文堂出版，１９９３

［問い合わせ先］
〒680-8552
鳥取市湖山町南4-101
鳥取大学工学部知能情報工学科
伊藤正博
Tel: 0857-31-5221
Fax: 0857-31-0879
E-mail: ito@ike.tottori-u.ac.jp

TC1−2

入出力関係の変化に適応する自己組織化関係ネットワーク

Self-Organizing Relationship Network Adapting for Change of Input/Output Relationship

○堀尾恵一　　山川 烈
Keiichi Horio　　Takeshi Yamakawa

九州工業大学情報工学部制御システム工学科
Department of Control Engineering and Science, Kyushu Institute of Technology

Abstract: In this paper, an adaptive self-organizing relationship (ASOR) network, which is extension of the self-organizing relationship (SOR) network, is proposed. The SOR network proposed by the authors can obtain the desired I/O relationship by using the I/O vector pairs of the target system and their evaluations. In order to control the convergence and the restart of the learning, the necessity measure of the learning is employed. The effectiveness of the proposed ASOR network is verified by applying it to adaptive control system.

1 はじめに

自己組織化マップ (Self-Organizing Map:SOM) は，1982年にKohonenにより提案されたニューラルネットワークである [1][2]. SOMは入力層と競合層の2層から構成され，競合層がもつ重みベクトルは，入力層に与えられる多くの入力ベクトルの分布を学習により近似することができる. この特徴に着目して，著者らは自己組織化関係 (Self-Organizing Relationship:SOR) ネットワークを提案した [3]. SORネットワークは入力層，出力層，競合層から構成され，対象とするシステムの望ましい入出力関係を競合学習により獲得することができる. 学習時には，対象システムの入出力ベクトル組をそれぞれ入力層と出力層に与え，競合層から勝者ユニットと近傍ユニットを決定する. 与えられた入出力ベクトル組の関係の評価値に基づき勝者および近傍ユニットの重みベクトルを更新する. 評価値を重みの更新に反映することにより，SORネットワークは対象システムの望ましい入出力関係の分布を近似する. また，学習後のSORネットワークに入力ベクトルを提示すると，それに対応した望ましい出力ベクトルが生成される. これまでにSORネットワークをコントローラの設計に適用して良好な結果を得ている [3].

しかしながら，学習の収束や学習用ベクトルの獲得などの必要性から，望ましい入出力関係が時間ともに変化するシステムに，SORネットワークを適用することは困難であった. 本研究では，SORネットワークの現在の状態を判断し，学習必要性の尺度を算出し，適応的に学習の収束および再学習を行なう適応自己組織化関係 (Adaptive SOR:ASOR) ネットワークを提案する.

負荷が時間とともに変化するDCモータの位置決め制御に提案するASORネットワークを適用し，その有効性を示す.

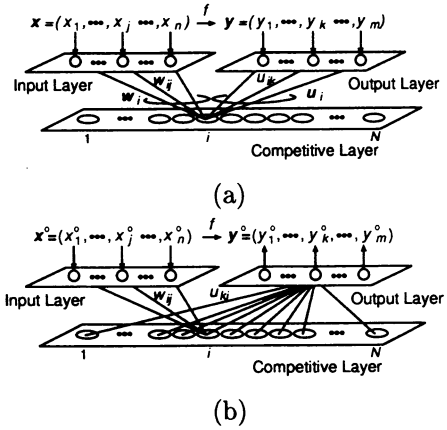


図 1: 自己組織化関係ネットワークの構成と信号の流れ. (a) 学習モード. (b) 実行モード.

2 自己組織化関係ネットワーク

SOMが入力ベクトルの分布を近似することができることに着目し，対象とするシステムの望ましい入出力関係の分布を抽出しようとするのがSORネットワークの基本的な考え方である. SORネットワークの構成を図1に示す. SORネットワークは，入力層，出力層，競合層から構成され，それぞれの層は，n, m, N 個のユニットをもつ. 競合層上の i 番目のユニットは，重みベクトル $\mathbf{w}_i = (w_{i1}, \cdots, w_{ij}, \cdots, w_{in})$, $\mathbf{u}_i = (u_{i1}, \cdots, u_{ik}, \cdots, u_{im})$ を介して，入力層と出力層の全てのユニットと結合している. SORネットワークの処理は，学習ベクトル (入出力ベクトル組) とその評価に基づき重みベクトルの調整を行なう学習モードと，獲得された重みベクトルを用いて入出力関係を生成する

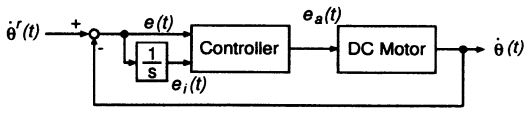


図 2: DC モータのフィードバック制御系.

実行モードに分けられる.

学習モードでは，学習ベクトルとして，対象とするシステムの入出力ベクトル組 $\mathbf{I} = (\mathbf{x}, \mathbf{y})$ を入力層と出力層にそれぞれ提示する．また，その入出力ベクトル組に対する評価も同時にネットワークに提示する．この評価は，評価関数等により算出されることもあれば，ユーザにより主観的に決定されることもある．ここでは，評価値 E は -1 から 1 の値であるとし，1 が最も評価が良く，-1 が最も評価が悪いものとする．SOR ネットワークに提示された学習ベクトルに対して，最も距離が近い重みベクトル $\mathbf{v}_c = (\mathbf{w}_c, \mathbf{u}_c)$ をもつ競合層ユニットを勝者ユニットとし，その近傍に位置するユニットを近傍ユニットとする．勝者ユニットおよび近傍ユニットの重みベクトルは以下の式により更新される.

$$\mathbf{w}_i^{new} = \mathbf{w}_i^{old} + \begin{cases} E\alpha(t)(\mathbf{I} - \mathbf{v}_i) & E \geq 0 \\ E\beta(t)\exp(-\parallel \mathbf{I} - \mathbf{v}_i \parallel)\mathbf{sgn}(\mathbf{I} - \mathbf{v}_i) & E < 0, \end{cases} \tag{1}$$

ここで，$\alpha(t)$，$\beta(t)$ は学習係数であり，学習が進むとともに減少する．この更新式は，評価が良い $(E \geq 0)$ 学習ベクトルには重みベクトルを近づけ，評価が悪い $(E < 0)$ 学習ベクトルからは重みベクトルを遠ざけることを意味する．この学習により，重みベクトルは望ましい入出力関係を示す領域に分布される.

学習後の SOR ネットワークは，重みベクトルを固定して，望ましい入出力関係を生成する実行モードとして動作する．入力ベクトル $\mathbf{x}^o$ が入力層に提示されると，競合層の各ユニットがもつ重みベクトル $\mathbf{w}_i$ と入力ベクトルとの類似度 z_i が次式により算出される.

$$z_i = \exp(-\gamma \parallel \mathbf{x}^o - \mathbf{w}_i \parallel), \tag{2}$$

ここで，γ は類似度の度合を決定するパラメータである．SOR ネットワークの出力値 y_k^o は，次式により算出される.

$$y_k^o = \frac{\sum_{i=1}^{N} z_i u_i}{\sum_{i=1}^{N} z_i}. \tag{3}$$

式 (3) は，競合層と出力層間の重みベクトル u_i の，適合度 z_i に関する重みつき平均を意味している.

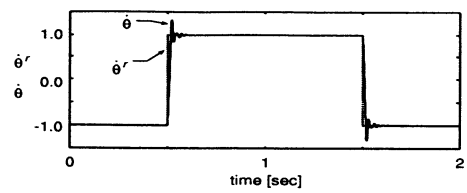


図 3: PI コントローラにより制御した場合のモータシャフトの角速度と目標値.

例として，図 2 に示す DC モータのフィードバック制御系のコントローラを SOR ネットワークにより設計する．図中 $\dot{\theta}(t)$ と $\dot{\theta}^r(t)$ は，それぞれモータシャフトの角速度とその目標値である．コントローラへの入力は，$\dot{\theta}(t)$ と $\dot{\theta}^r(t)$ の誤差 $e(t)$，およびその積分 $e_i(t)$ であり，コントローラからの出力はモータへの供給電圧 $e_a(t)$ である．つまりコントローラは 2 入力 1 出力のシステムであり，その望ましい入出力関係を SOR ネットワークにより獲得する．ここで用いたモータの特性は以下の式で表される.

$$e_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b \tag{4}$$

$$e_b = K_b \dot{\theta} \tag{5}$$

$$T = K_T i_a \tag{6}$$

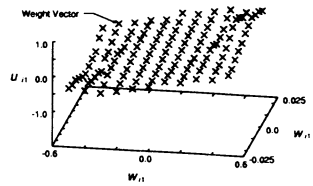
$$J_m \dot{\theta} + b_m \dot{\theta} = T \tag{7}$$

ここで，e_a，L_a，i_a，R_a，e_b は，供給電圧，電機子インダクタンス，電機子電流，電機子抵抗，逆起電力電圧である．また，θ，T，J_m，b_m は，モータシャフトの位置，モータトルク，モータと負荷の等価慣性モーメント，等価摩擦粘性係数である．K_b，K_T は係数である．図 3 に，PI コントローラにより制御された場合の $\dot{\theta}(t)$ と $\dot{\theta}^r(t)$ の時間変化を示す．PI コントローラの出力 $e_{a,PI}(t)$ は次式により決定される.

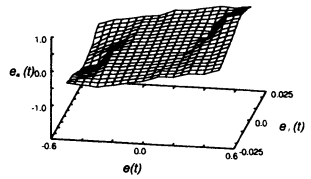
$$e_{a,PI}(t) = K_P e(t) + K_I e_i(t) \tag{8}$$

ここで，K_P と K_I はパラメータであり，それぞれ 1.4 と 6.4 とした．図 3 から，PI 制御による場合はオーバーシュートが大きく，振動的になっていることがわかる．SOR ネットワークの学習ベクトルとその評価値を獲得するために，PI コントローラの出力にノイズを加えて，その際のモータの応答を観測する．モータの応答から次式により t 時刻のコントローラの入力 $(e(t), e_i(t))$ と出力 $(e_a(t))$ の関係の評価値 $E(t)$ を次式で求める.

$$E(t) = \sqrt{e(t)^2} - \sqrt{e(t+1)^2} \tag{9}$$



(a)



(b)

図 4: 学習後の SOR ネットワーク．(a) 重みベクトルの配置．(b) 実行モードによる入出力特性．

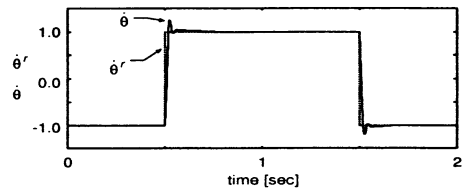


図 5: SOR ネットワークにより制御した場合のモータシャフトの角速度と目標値．

この式は，次時刻で誤差が減少している場合は評価値が正，誤差が増大している場合は評価値が負になることを意味する．

獲得された学習ベクトルとその評価値を用いて SOR ネットワークの学習を行なう．学習において，競合層ユニットの数は 121 (11×11) 個，学習回数は 300 回とした．また，学習係数 $\alpha(t)$ と $\beta(t)$，および近傍の範囲は，それぞれ初期値を 0.2，0.1，5 として学習終了時に 0 になるように一定速度で減少する．学習後の SOR ネットワークの重みベクトルの配置を図 4(a) に示す．この重みベクトルを用いて SOR ネットワークの実行モードで入出力関係を生成する．このとき，式 (2) のパラメータ γ は 30 とした．そのときの入出力特性を図 4(b) に示す．この SOR ネットワークの実行モードをコントローラとして実験を行なった．そのときの $\dot{\theta}(t)$ と $\dot{\theta}^r(t)$ の時間変化をを図 5 に示す．PI コントローラと比較して，SOR ネットワークによる場合は，オーバーシュートが少なく，振動を抑えていることがわかる．

しかしながら，学習を収束させるために，学習係数や近傍の範囲を小さくする必要があるので，望ましい入出力関係が動的に変化するシステム，上述の例ではモータの負荷が変動するような場合には適用ができないという問題点がある．

3 適応 SOR ネットワークの提案

本論文では，対象とするシステムの望ましい入出力関係が変化した場合に，再学習を行なうことで，再度望ましい入出力関係を獲得する適応 SOR ネットワークを提案する．適応 SOR ネットワークでは，実行モードと学習モードを繰り返し行なう．まず，実行モードにより入力ベクトルに対する出力ベクトルを算出する．その後，生成された入出力関係の評価を行ない，必要に応じて学習を行なう．ここで，t 時刻における学習必要性 $nec(t)$ は，次式で求められる．

$$nec(t) = nec(t-1) + \begin{cases} E(t)\eta_+ & E(t) \leq 0 \\ E(t)\eta_- & 0 < E(t), \end{cases} \quad (10)$$

ここで，η_+ と η_- は変化量を決定するパラメータである．学習係数 $\alpha(t)$ と $\beta(t)$，近傍の範囲 $N_c(t)$ は学習必要性に応じて，それぞれ式 (5)，(6)，(7) で決定される．

$$\alpha(t) = \alpha_0 \cdot nec(t), \quad (11)$$

$$\beta(t) = nec(t-1) - nec(t), \quad (12)$$

$$N_c(t) = N_{c0} \cdot nec(t), \quad (13)$$

ここで，α_0 と N_{c0} は，学習係数および近傍の範囲を決定するパラメータである．学習係数 $\alpha(t)$ および近傍の範囲 $N_c(t)$ は，学習必要性が大きくなるに従い大きくなる．また，学習係数 $\beta(t)$ は学習必要性が小さくなる際に大きくなるようにした．これは，学習が収束する段階で斥力を効かせることで微調整を行なうことを可能にするためである．また，学習必要性が大きい場合，つまり現在の SOR ネットワークの状態が良くない場合は，実行モードにより得られた出力ベクトルの各要素にノイズを加えることで，望ましい入出力関係を示す領域を検索する機能を取り入れる．ノイズとしては，一様乱数を用いて，その範囲は次式により決定される．

$$N_{noise}(t) = N_{noise0} \cdot nec(t), \quad (14)$$

ここで，N_{noise0} はノイズの範囲を決定するパラメータである．

4 シミュレーション

提案した ASOR ネットワークの有効性を示すために，2 章で述べた DC モータの負荷が変動する場合を考える．ここでは，実験時間を 50 秒として，25 秒の時点で負荷が 10 倍になったことを仮定している．

図 4 に示した重みベクトルを用いて，従来の SOR ネットワークにより制御を行なった際の $\dot{\theta}(t)$ と $\dot{\theta}^r(t)$

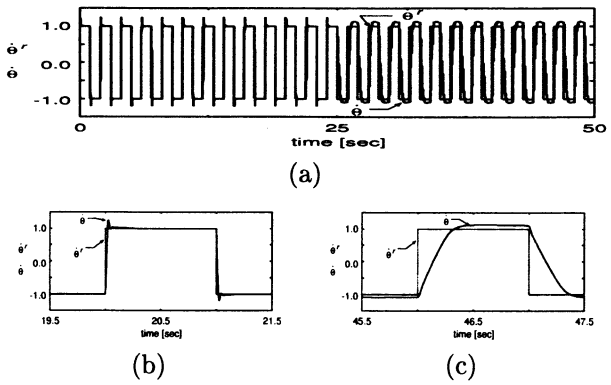


図 6: 従来の SOR ネットワークにより制御された場合のモータシャフトの角速度および目標値. (a) 実験開始直後から 50 秒. (b) 実験開始後 19.5 秒から 21.5 秒. (c) 実験開始後 45.5 秒から 47.5 秒.

を図 6 に示す. 25 秒を過ぎ，負荷が変更されてからは，立上りおよび収束が遅くなっていることがわかる.

次に適応 SOR ネットワークをコントローラとした実験を行なう. 実験において，式 (10) の η_+ と η_- はそれぞれ 0.01 と 0.05，式 (11)，式 (13)，および (14) の α_0，N_{c0}，N_{noise0} はそれぞれ 1.0，100.0，1.0 とした. このときの $\dot{\theta}(t)$ と $\dot{\theta}^r(t)$ を図 7 に示す. ここで，$\dot{\theta}^r(t)$ は，図 6(a) のものと同様でる. 図 7(a) は，実験開始直後から 50 秒までのを示している. 図 7(b) は，実験開始後 19.5 秒から 21.5 秒までを示している. 図 7(c) は，25.5 秒から 27.5 秒までを示している. 負荷が 10 倍に変動したので立上りが遅く、誤差が収束するまでに時間がっかり，従来の SOR ネットワークと同様の応答を示している. 図 7(d) は，45.5 秒から 47.5 秒までを示している. 適応アルゴリズムにより負荷の変動に適応して，オーバーシュートを抑え，早い収束を実現している. また，このときの学習必要性 $nec(t)$ の変化を図 8 に示す. 学習必要性は，25 秒で負荷が変動てから大きくなり，適応が進むにつれ小さくなっていることがわかる.

5 おわりに

本論文では，対象とするシステムの望ましい入出力関係の変化に対し，学習の収束と再学習を適応的に行なう適応 SOR ネットワークを提案した. 提案した手法では，現在の適応 SOR ネットワークの状態を評価して，学習必要性を算出する. それを学習係数や近傍の範囲等に反映することで，学習の収束と再学習を制御することを可能とした. シミュレーションにより，提案手法が対象システムの望ましい入出力関係の変化に

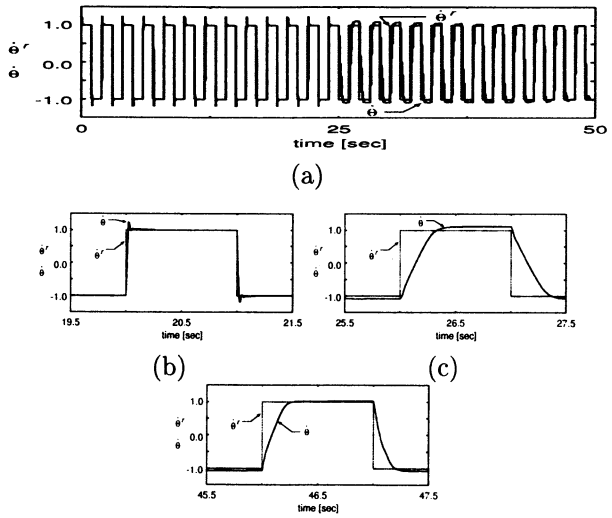


図 7: 適応 SOR ネットワークにより制御された場合のモータシャフトの角速度および目標値. (a) 実験開始直後から 50 秒. (b) 実験開始後 19.5 秒から 21.5 秒. (c) 実験開始後 25.5 秒から 27.5 秒. (d) 実験開始後 45.5 秒から 47.5 秒.

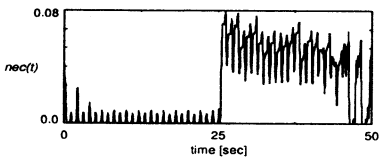


図 8: 学習必要性 $nec(t)$ の時間変化

適応可能であることを示した.

参考文献

[1] T. Kohonen, "Self-organized formation of topologically correct feature maps," *Biol. Cybern.*, Vol.43, pp.59-69, 1982.

[2] T.Kohonen, *Self-organization and associative memory*, Second edition, Berlin: Springer-Verlag, 1988.

[3] T. Yamakawa and K. Horio, "Self-Organizing Relationship (SOR) Network," *IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science*, Vol.E82-A, No.8, pp.1674-1678, 1999.

[問い合わせ先]
堀尾 恵一
〒 820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4
九州工業大学大学院 情報工学研究科
Phone: 0948-29-7712(山川教官室), Fax: 0948-29-7742
E-mail: horio@tsuge.ces.kyutech.ac.jp

TC1−3

重みの更新情報を用いたSOMの動的プルーニング

Dynamic pruning of SOM by using updating information of weights

内野 英治 Eiji Uchino
川村 正樹 Masaki Kawamura
長田 和寛 Kazuhiro Nagata

山口大学理学部自然情報科学科
Department of Physics, Biology and Informatics
Faculty of Science, Yamaguchi University

Abstract: This paper proposes a dynamic pruning of SOM (Self Organizing Map)by using the updating information of each unit. Concretely, the unit with low contribution to learning is removed from the map dynamically by a self-judgment of each unit, which imitates the apoptosis of cell. This enables SOM to map the input space accurately with a small number of units. Further, with use of the method proposed, the input space with discontinuous distribution of data can be learned correctly.

1 はじめに

自己組織化アルゴリズムは多数の学習データを少数のユニットで表現する情報圧縮の働きがある。本研究では、自己組織化アルゴリズムで得られるマップを効率良く、より少数のユニットで表現することを目的とした。

入力データに対し、従来の自己組織化アルゴリズムでは、入力信号空間に不連続性があるデータを適切に学習させることは困難であった。そこで、効率良くマップの量子化を行う方法として、各ユニットの学習の更新情報をもとにユニットの削除を行う動的削除法をここでは提案する。

本手法では、学習に対する貢献度の低いユニットを削除の対象とする。本手法の特徴は、競合層上の各ユニットが独立に、かつ自己判断に基づき死滅を決定する点である。これは、競合層全体で更新の度合が少ないユニットが、競合層上の全てのユニットの更新情報との比較により削除されるのではなく、更新度合の最小値を全体から探索する必要はない。

本報告では、まず自己組織化アルゴリズムへのユニットの動的削除法の導入について説明する。続いて本手法を用いた結果を述べ、従来の自己組織化アルゴリズムとの比較を行う。

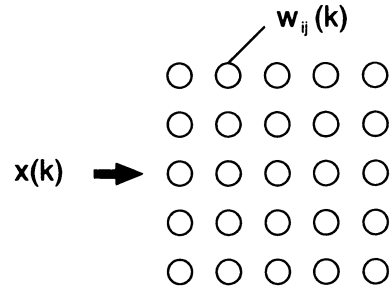


図 1: 入力データと競合層

2 SOM競合層ユニットの動的削除法

本章では、競合層ユニットの動的削除法を導入した自己組織化アルゴリズムを説明する。

S 次元の入力データ $x(k) \in R^s$ を用意し、2次元状に $l \times m$ 個の競合層ユニットを配置する。各ユニットは、図1に示されるように、参照ベクトル $w_{ij}(k) \in R^s (i = 1, 2, ..., l), (j = 1, 2, ..., m)$ を持つ。

入力データ $x(k)$ に最も近いユニットを発火ユニット (p, q) とする。最大学習回数を T とし、T を区間 $(I_1, I_2, ..., I_N)$ に分割する。競合層上の各参照ベクトルの初期値 $w_{ij}(0)$ を乱数を用いて初期化を行い、学習は以下の手順で行う。

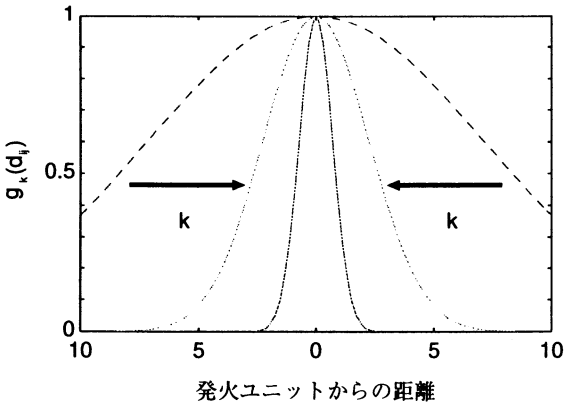


図 2: $g_k(d_{ij})$ を横から見た様子

(1) 設定した学習区間 I_n において、各学習サイクルごとに、入力データと距離が最も近い競合層上の発火ユニット (p,q) と、その近傍のユニットを、次式により更新する。

$$\Delta w_{ij}(k) = \alpha(k)\, g_k(d_{ij})\,(x(k) - w_{ij}(k)) \quad (1)$$

ここで、$\alpha(k)$ は学習係数であり、学習の経過と共に単調減少する。d_{ij} は発火ユニット (p,q) と更新ユニット (i,j) とのユークリッド距離 $d_{ij} = \sqrt{(i-p)^2 + (j-q)^2}$ を表す。また、$0 < g_k(d_{ij}) \leq 1$ は近傍更新係数であり、発火ユニット (p,q) を頂点にとったガウス型関数を示す。これは学習の経過と共に、その勾配を大きくしていく。

さて、ここで、$g_k(d_{ij})$ は競合層上の各ユニットが持つ重み付き更新回数と定義し図 2 に示す。これは、発火ユニットを (p,q) としたとき、$g_k(d_{pq}) = 1$ となり、発火ユニット (p,q) の 1 回の更新に対し、本手法では、近傍領域ユニット (i,j) における更新回数を $g_k(d_{ij})$ と定義する。すなわち、発火ユニットの 1 回の更新に対し、これは一種の重み付き更新回数となっており、発火ユニットから遠ざかるにつれ更新の度合 (重み付き更新回数) は少ないと考える。

(2) 設定された学習区間 I_n において、各ユニットの重み付き更新回数 $g_k(d_{ij})$ の平均 μ_{ij} と分散 σ_{ij}^2 を計算する。これらの情報をもとにユニットの削除を行う。この基準については第 3 章で議論する。

(3) 学習回数が T になるまで (1)～(2) を繰り返す。

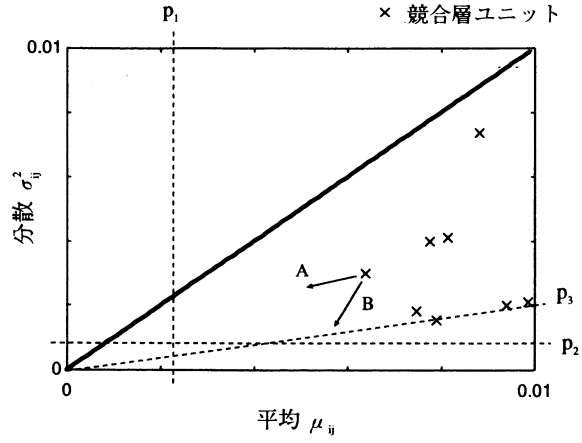


図 3: 各ユニットの重み付き更新回数の平均と分散の割合

3 ユニットの削除の定義

本章では、削除の対象となる競合層ユニットの判定方法を説明する。設定された学習区間 I_n において、更新の度合が少ないユニットを削除の対象とする。

学習区間 I_n での各ユニットの重み付き更新回数の平均 μ_{ij} と分散 σ_{ij}^2 の関係を図 3 に示す。学習区間 I_n において更新の頻度が高いユニットは、平均 μ_{ij} と分散 σ_{ij}^2 はほぼ等しい値をとる。これに対し、更新の頻度が低いユニットは、学習区間 I_n において重み付き更新回数の値が少ないと考えられることから、分散 σ_{ij}^2 の値は小さくなることが分かる。また、学習の経過に従い $g_k(d_{ij})$ の勾配を大きくしていくので、全体的に平均 μ_{ij} と分散 σ_{ij}^2 の値は小さくなる。よって、学習の経過に従い、更新の頻度の高いユニットの平均 μ_{ij} と分散 σ_{ij}^2 の対応関係は図 3 の矢印 A の方向へ動くことになり、更新の頻度の低いユニットは矢印 B の方向へ動くことになる。

ここでユニットの削除を行うにあたり、平均 μ_{ij} に関して削除判定定数を設けた場合 (p_1)、または分散 σ_{ij}^2 に関して削除判定定数を設けた場合 (p_2) について考えてみる。これらの場合では、学習の経過に伴う平均 μ_{ij} と分散 σ_{ij}^2 の対応関係より、更新の頻度の高いユニットも削除の対象となり、的確にマップを作成できないことがある。よって、効率よくユニットの削除を行うために削除判定定数を変動させる必要がある。しかし削除判定定数を動的に求めることは困難である。

そこで本研究では、各ユニットが持つ重み付き更新回数 $g_k(d_{ij})$ の分散 σ_{ij}^2 を平均 μ_{ij} で正規化した値 $r_{ij}(= \sigma_{ij}^2/\mu_{ij})$ を削除の判定に用いる。図 3 において r_{ij} は

各ユニットの平均 μ_{ij} と分散 σ_{ij}^2 の対応関係の傾きとして p_3 で表される。よって、これは更新の頻度の低いユニットのみを削除の対象としていることから、不変的な削除判定定数を用いる条件として有効であることがわかる。

4 シミュレーション実験

本実験では、入力データを $(x_1, x_2) \in R^2$ とし、図4に示すように、$3 \leq x_1 < 7$ の範囲で不連続性を持たせた一様分布とする。図5は、x_1 軸方向の入力データの分布を示す。

競合層ユニットが持つ参照ベクトルを $w_{ij}(k) \in R^2$ とし、競合層グリッド幅を $l = m = 11$ とする。学習係数 $\alpha(k)$ と近傍更新係数 $g_k(d_{ij})$ を次式で与える。

$$\alpha(k) = 0.5\exp\left(-10^{-4}k\right) \quad (2)$$

$$g_k(d_{ij}) = \exp\left(-\gamma(k)\, d_{ij}^2\right) \quad (3)$$

$$d_{ij}^2 = (i-p)^2 + (j-q)^2 \quad (4)$$

ここで、$\gamma(k)$ は次式を用いた。

$$\gamma(k) = 10\left(1 - \exp\left(-10^{-4}k\right)\right) + \varepsilon \quad (5)$$

$$\varepsilon = 10^{-2} \quad (6)$$

また (p, q) は発火ユニットの競合層上での位置を示し、(i, j) は更新されるユニットの競合層上での位置を示す。最大学習回数 T を 100,000 回、競合層ユニットの除去が行われる各区間 I_n における学習回数を 1000 回とし、削除判定定数の値は $p_3 = 10^{-3}$ とする。

図6は入力データに対し、従来の自己組織化アルゴリズムを適用した学習結果である。x_1 軸方向のユニット数の分布を図7に示す。このように、従来の自己組織化アルゴリズムでは、入力信号空間に不連続性があるデータを適切に学習させることは困難であることが分かる。

図8に本研究で提案したユニットの動的削除法を用いた学習結果を示す。x_1 軸方向のユニット数の分布を図9に示す。図より、本手法を用いることで、不連続性を持つ入力データに対しても、入力データの分布が的確に学習されていることが分かる。

5 おわりに

本研究では、不連続な入力データを忠実に表現するマップを作成するため、各ユニットの学習の更新情報

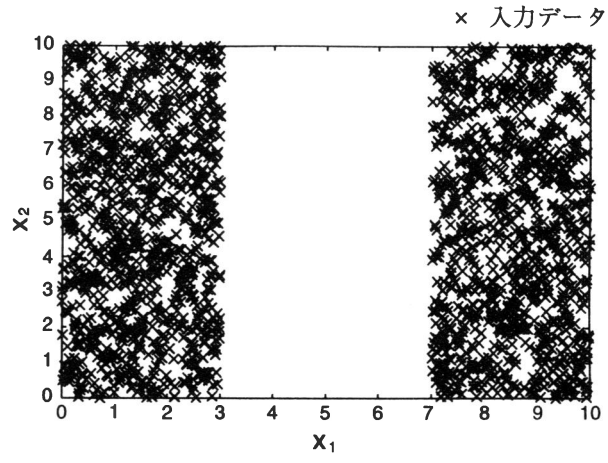


図 4: 不連続性を持つ入力データ空間

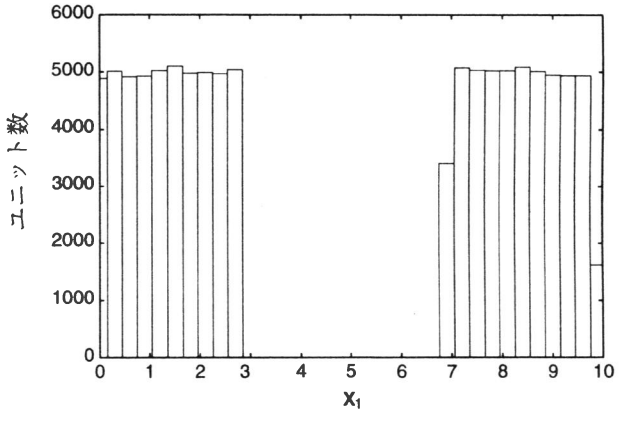


図 5: 入力データの x_1 軸方向の分布

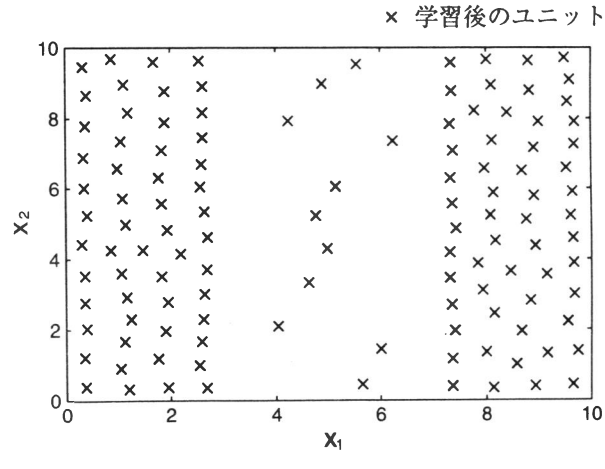


図 6: 従来の自己組織化アルゴリズムによる学習結果

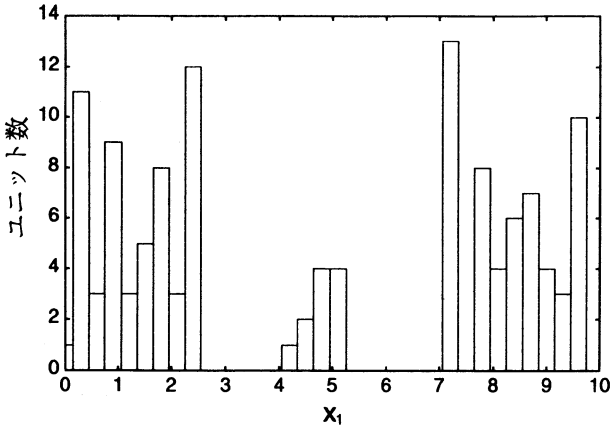


図 7: 従来の自己組織化マップの x_1 軸方向のユニット数の分布

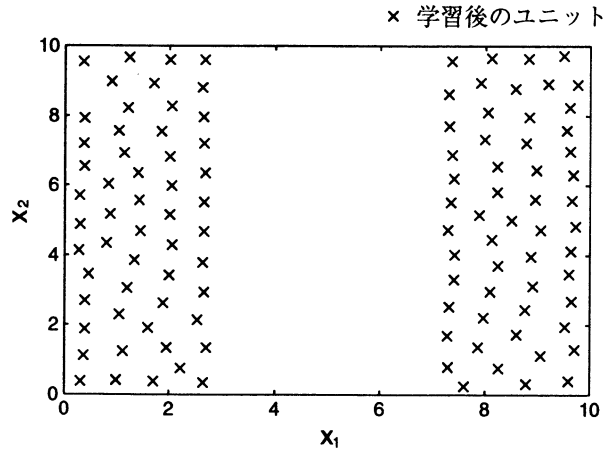


図 8: 動的削除法を導入した本手法による学習結果

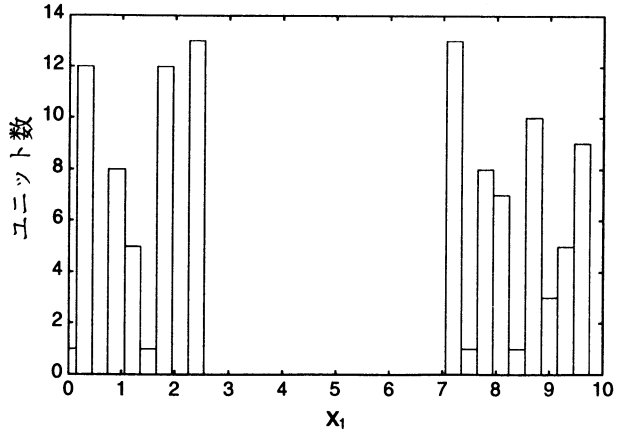


図 9: 動的削除法を導入した場合の x_1 軸方向のユニット数の分布

をもとにユニットの動的削除を行った。本手法では、ユニットを削除する際、競合層ユニット全体の更新情報をもとに削除を行うのではなく、各ユニット個別の判断で削除が行われるよう、各ユニットに独自性を持たせた手法を提案した。これにより、各ユニットはグローバルな情報を知ることなく、ローカルな独自の判断のみで死滅を決定することができる。

今後の研究課題としては、ユニット個別の判断による削除法の応用として、生体における細胞死 (アポトーシス) の働きを模擬した自己組織化アルゴリズムについて研究していく予定である。

参考文献

[1] T. Kohonen, "Self-Organization and Associative Memory," Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1987.

[2] T. Kohonen, "Self-Organizing Maps," Springer-Verlag, Berlin, 1995.

[3] H. Ritter, T. Martinetz and K. Schuiten, "Neural Computation and Self-Organizing Maps: An Introduction," Addison-Wesley, Reading, Mass., 1992.

[4] 石川真澄, "ニューラルネットの忘却付き構造学習," 日本ファジィ学会誌, Vol.9, No.1, pp.2-9, 1990.

[問い合わせ先]
内野英治
〒 753-8512 山口県山口市吉田 1677-1
山口大学 理学部 自然情報科学科
Phone/Fax: 083-933-5699, Fax: 083-933-5768
E-mail: uchino@sci.yamaguchi-u.ac.jp

TC2−1

自己組織化マップの追加学習後における ラベルに関する考察

A Consideration on the labels of Self-Organizing Map after refresh learning

道端正裕　　三好力　　増山博
Masahiro MITIHATA, Tsutomu MIYOSHI, Hiroshi MASUYAMA

鳥取大学　工学部
Faculty of Engineering, Tottori University

Abustruct: Kohonen's Self-Organizing Map (SOM) is a kind of neural networks that learns the feature of multi dimension data without supervision. Although it is difficult for SOM to apply the data that goes with changing, the authors have proposed the way that works automatic refresh learning by input data feature, in case that the feature of input data have been changed from learning data. However automatic refresh learning has difficulty that users have to put labels on map every time after learning. In this paper, we prpose "Semi-automatic labeling on SOM map" that detect the label's position of new feature map from the label on former map.

1　はじめに

近年、人工知能の研究において複数の属性からなる入力データの分類を行うため、入力データの特徴を自動的に抽出する方法が研究されている。このような手法の中にKohonenの自己組織化マップ(Self-Organizing Map：SOM)がある。従来SOMは入力データの性質の傾向が動的に変化していく場合にはその変化に対応できず適用が難しかったが、SOMは教師無しによって学習を行うので入力データの性質が変化していった場合、その変化を検出し、かつ変化するデータに対して適応的および自動的に追加学習を施し、その変化に対応してマップを再編成させることにより、そのようなデータの性質が動的に変化していく場合においても適用していけることが[1]によって実証された。しかしこの際、マップが学習によって変化するためにそのノードに固定されているラベルは新しいマップに対応しなくなり、追加学習のたびにラベルを付け直さなければならない。そこで、この手間を省くために元のマップにつけられたラベルの代表となるデータから新しいマップ上でのラベルの位置を自動的に検出するシステムを提案する。

2　自己組織化マップ(SOM)

自己組織化マップ（SOM）は、ニューラルネットワークをモデル化したもののひとつで、教師無し競合強化学習及び近傍学習により、ある分布に従う入力データの特徴を抽出し、その分布を近似した特徴マップを生成する。マップの多くは２次元平面（１次元のもの等もある）に表示されるため、同じ様な特徴をもつデータはマップ上の近い位置に出力される。よって、データがマップのどの位置に出力されたかにより、どのデータと類似した特徴をもつかということがわかるので、視覚的にも理解しやすい。

SOMのネットワークは、入力層と、2次元平面上に出力ノードが格子状に配置された出力層の２層からなり、入力層はすべての出力ノードと結合している。各々の出力ノードには入力データと対応した、すなわちn次元の入力ベクトルにはn次元の結合ベクトルが格納されており、入力ベクトルと１番近い結合ベクトルをもつ出力ノードと、その近傍にある出力ノードの結合ベクトルをその入力ベクトルに近づけていく。このような動作を繰り返すことにより、次第に同じような特徴をもつデータ同士が集まった領域がつくられていく、すなわちマップが自己組織化されていき、入力ベクトルの特徴を反映したマップが生成される。

2.1　SOMの学習アルゴリズム

SOMの学習アルゴリズムを要約すると以下のようになる。

- 学習データにもっとも近い結合ベクトルを持つノードを探す。
- 勝利ノードおよびその近傍領域にあるノードについて、学習データと結合ベクトルの距離を学習率に応じて減少させ、学習データとの近似度を増加させる。
- 学習率は初め高く保ち（0.8 程度）無秩序なマッ

プを粗く構成させる。そして時間と共に減少させることによりマップを細かく調整していく。この細かい調整にはマップ粗く構成させる時間の10倍から100倍かかり、最終的には学習率を0.1以下にまで減少させる。同様に近傍領域も時間とともにサイズを減少させ、結合ベクトルが更新される領域を狭めていく。

2.2 ラベル付け

SOMは学習終了後、ラベルを人手でつけなければならない。

その作業の内容としては、ラベルの代表となるデータが勝利するノードをそのラベルの代表点とする。代表点とならなかったノードのラベルは、各ノードと代表データとのマッチ度を調べ、一番マッチ度の高いデータのラベルをそのノードのラベルとする。このとき、マッチ度にはしきい値をもうけ、どのラベルにも属さないノードも存在するようにした。

2.3 適応的追加学習

SOMは、学習終了後、学習データにもとづいた、すなわち学習データと同じ特徴を持つデータに関しては、適切なクラスタリングを行う。しかし、入力データが、学習データとは異なった特徴をもつようなデータに変化すると、そのデータは適切なクラスタリングがされるとは限らず、適正な分類が行われなくなってくる。入力データの特徴が動的に変化した場合、下記のような事柄が異常として出力結果に現れてくる。

(1)勝利ノードにおける入力データと、結合ベクトルとの距離が異常に離れている。
(2)異常に多い頻度で勝利するノードが存在する。
(3)全く勝利しないノードが、正常の範囲以上に多い。

よって、入力データの特徴がゆるやかに変化していくような場合において、上記の3点のような異常を検出した際、それをデータの特徴が変化したものとして捉え、変化したデータをもとにした追加学習を自動的に行い、マップを再構成して特徴変化後のデータに対しても期待通りのクラスタリングを行うシステム、つまり適応的自動追加特徴学習システムによりデータの動的な変化にもSOMを適用していけることがわかった。[1]

2.4 追加学習とラベル付けの問題点

追加学習を施したマップはSOMの学習の特徴でもある競合および近傍学習によって元のマップとは当然違ったものになる。したがってそのノードに固定されているラベルは新しいマップに対応しなくなり、元のマップにつけられていたラベルは当然付け替えなければならなくなる。これはせっかく追加学習を自動的に行えたにも関わらず大きな手間となってしまう。

3 追加学習後のラベル付け

ここで、動的な変化がないデータに対しては元のマップにつけられたラベルをつけたノードのデータから新しいマップ上のノードのラベルの位置を自動的に検出でき、また、変化したデータ、つまり追加学習によって新しく学習されたデータに関してはそのことが検出することができる様なシステムができれば上記のような問題点を解決出来ると考えた。そのアルゴリズムを以下に示す。

(1) 追加学習の際、マップが粗方生成されたと考えられる学習率が0.1以下になってから勝利した回数を各ノードについて数えておく。(図5.4参照)
(2) 追加学習後、元のマップにつけられていたラベルの代表点データと新しいマップの各ノードの結合ベクトルとのマッチ度を計算し、一番マッチ度の高いラベルがそのノードのラベルとする。ただしそのマッチ度が一定以上低い場合はラベルはつかないものとする。つまりそのクラスのデータは変化したと考える。(図5.6参照)
(3) (1)と(2)により、新しいマップにはデータが変化したクラスはラベルが付けられず、マップ上ではラベルの付けられていない空白の領域として表示されるので、その領域に変化したクラスについて新しいラベルをつければよい。

これにより変化していないデータにつけられていたラベルについては新しいマップの位置および領域が検出され、変化したデータに対してはその領域が空白になることから新しいラベルを付けることが必要であることを提示される。よって、データの変化したクラスがわかり、また変化していないクラスには同じラベルが付くのでクラスとラベルの関係を調べ、ラベル付けを行う手間が省ける。つまり追加学習後のラベル付けはデータの変化したクラスのラベルだけでよく、ラベル付けの簡単化につながる。

4 実験

実験は適応的追加学習を行うSOMについて、上記においてのべたような手法により追加学習後、適切にラベルの位置を検出することができるかどうかを検証した。

ここで、出力マップのサイズは10×10、つまり出力ノード数が100個、初期の学習回数は1000回とし、そして追加学習の際の学習回数は100回とした。

4.1 実験データ

使用したデータは3次元空間において、中心とその周りにばらつく点の集合と想定した。このとき、そのばらつきとして、分散が0.1の正規乱数を発生させた。

クラスが3つに分類されるようなデータを、学習データとして各クラス50個、計150個。評価用データとして各クラス500個、計1500個を用意した。

表4.1および図4.1に各クラスの中心の推移を示す。このとき、データCだけが2つに分かれてステップごとに変化していくようにした。

表4.1 実験データ2の中心の変化の推移

	step 0	step 1	step 2	step 3	step 4
A	(2.0, 0.0, 0.0)	(2.0, 0.0, 0.0)	(2.0, 0.0, 0.0)	(2.0, 0.0, 0.0)	(2.0, 0.0, 0.0)
B	(0.0, 0.0, 0.0)	(0.0, 0.0, 2.0)	(0.0, 0.0, 2.0)	(0.0, 0.0, 2.0)	(0.0, 0.0, 2.0)
C	(2.0, 2.0, 2.0)	(2.0, 2.0, 1.5)	(2.0, 2.0, 1.0)	(2.0, 2.0, 0.5)	(2.0, 2.0, 0.0)
		(1.5, 2.0, 2.0)	(1.0, 2.0, 2.0)	(0.5, 2.0, 2.0)	(0.0, 2.0, 2.0)

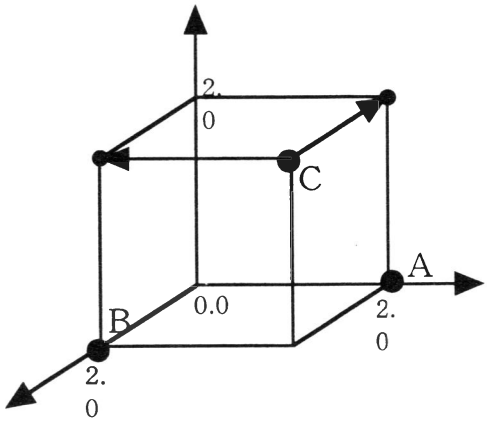


図4.1 実験データ2の中心の変化の推移

5 結果，考察

図5.1は学習後のマップにstep 0のデータを入力したとき、図5.2は同じマップにstep4のデータを入力したとき、そして図5.3は追加学習をした後のマップにstep4のデータを入力したときのそれぞれ勝利頻度のグラフである。x-y平面は特徴マップに相当し、z軸が勝利頻度を表している。図5.1はどのクラスもある程度まんべんなく出力しており正常な結果だといえる。図5.2は出力頻度に大きな偏りがみられ、適切なクラスタリングができていないことがわかる。それが図5.3ではまんべんなく出力されるようになっており、これらより適応的に追加学習がされることがわかる。

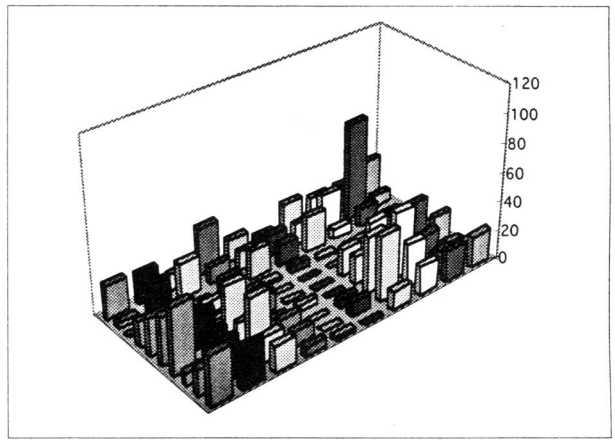


図5.1

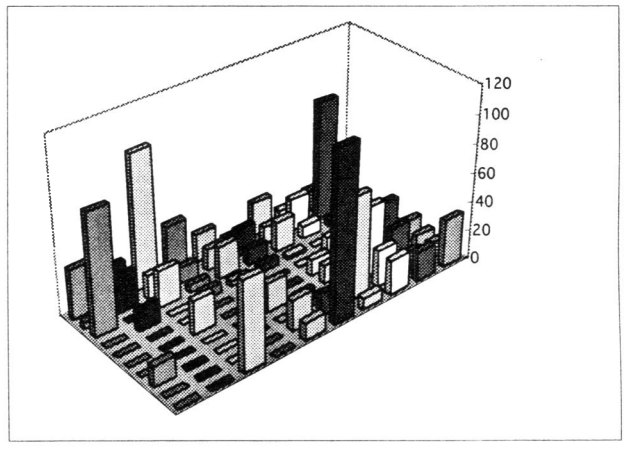


図5.2

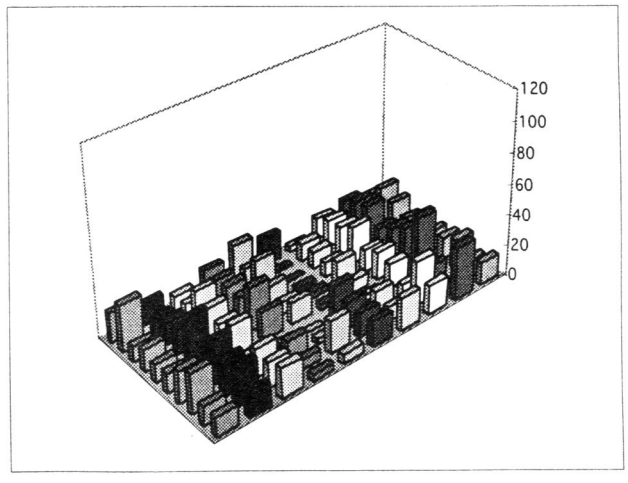


図5.3

図5.4は追加学習中の、マップが粗方生成されてからの勝利頻度のグラフで、ラベル付けのときに領域を判別するのに用いた。

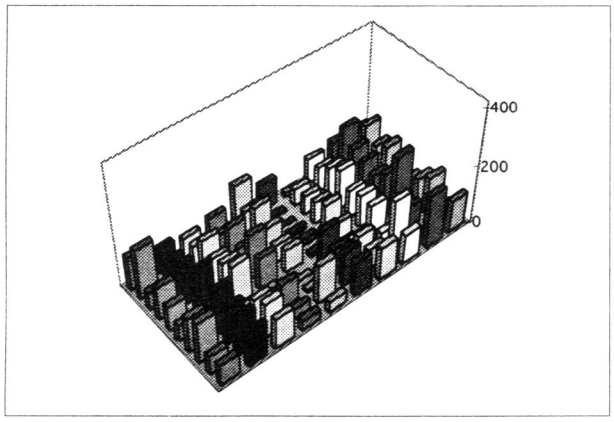


図5.4

図5.5は初めの特徴マップにつけたラベルである。－ はラベル付けされなかった空白部分をあらわし、＃は勝利頻度が少い、各クラスの境界線を表している。図5.6は追加学習後に自動的につけたラベルの図である。データの変化していないクラス(AとB)については自動的にラベル付けされており、空白の部分に変化したクラスについてラベル付けをすればよい。さらに変化したデータは２つのクラスに分かれたことがわかり、２つのクラスについてラベル付けをしなければならないことがわかる。

B B B B B － ＃ ＃ － －
B B B B B B ＃ ＃ A A
B B B B B － ＃ A A A
－ B B B － ＃ ＃ A A A
＃ ＃ － ＃ ＃ ＃ － A A A
＃ ＃ ＃ － ＃ ＃ ＃ A A A
＃ － C C C C ＃ A A A
－ C C C C C － ＃ A A
C C C C C C ＃ ＃ A A
C C C C C C C ＃ － A

図5.5

－ ＃ B B B B B B B －
－ ＃ B B B B B B B B
－ － ＃ B B B B B B B
－ － － ＃ B B B B B ＃
－ － － － ＃ ＃ ＃ ＃ ＃ A
＃ － ＃ ＃ A A － A － A
＃ ＃ － ＃ A A A A A A
－ － － ＃ A A A A － A
－ － － － A A A － － A
－ － － － ＃ A A A A A

図5.6

6 結論

本研究ではSOMに追加学習を施した後におけるラベルの位置の自動検出システムを提案した。これは追加学習後のマップの変化に伴うラベルの付け替え作業の半自動化を目的としたものである。これにより変化していないデータにつけられていたラベルについては新しいマップの位置および領域が検出され、変化したデータに対してはその領域が空白になることから新しいラベルを付けることが必要であることを提示される。これより、データの変化したクラスがわかり、また変化していないクラスのラベル付けの手間が省ける。つまり追加学習後のラベル付けはデータの変化したクラスのラベルだけでよいといったメリットがある。

今後の課題としては、クラスの境界を表すときのしきい値の設定を経験的に妥当と考えられる値に決めているが、クラス数が変化するとき空白部分での境界線は重要となってくるのでこれから十分実験および考察が必要と考えている。

参考文献

[1] 道端正裕　三好力　増山博　著　：「自己組織化マップの適応的自動特徴学習に関する考察」15th Fuzzy System Symposium , Osaka, pp.309-310 1999.

[2] T.コホネン　著　徳高平蔵　岸田悟　藤村喜久朗　訳　：「自己組織化マップ」　シュプリンガーフェアラーク東京　1996

[3] R.ヘクト.ニールセン　著　袋谷賢吉　訳　：「ニューロコンピューティング」　トッパン　1992

[4] 徳高平蔵　岸田悟　藤村喜久朗　著　：「自己組織化マップの応用　多次元の２次元可視化」海文堂出版株式会社　1999

[問い合わせ先]
〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101
鳥取大学 工学部 知能情報工学科
道端 正裕
Tel: 0857-31-5221
Fax: 0857-31-0879
Email:mitihata@ike.tottori-u.ac.jp

TC2−2

ＳＯＭを用いた新たな関数近似手法の提案

A New Approximation Technique of Functions Using SOM

伊藤則夫 *　　白木渡 **
Norio ITOU*　　Wataru SHIRAKI**

* (有) シー・エー・イー　　** 香川大学
*C.A.E Corporation　　**Kagawa University

For design and construction of structures, it is required to get various geotechnical data on foundation. Generally, investigations using boring are done, and geotechinical characterizations of foundation are obtained at boring spots. As the number of boring is restricted for reasons cost and time, it is very hard to estimate the spatial distribution of geotechnical characterizations using such a few of boring data.

In this study, the estimation problem of spatial distribution is considers to be an approximation problem of function. A new approximation algorithm of function using SOM is proposed. The efficiency is shown by numerical example.

1　まえがき

土木構造物の設計・施工に先立って、地盤物性値の正確な分布推定が必要となる。そのために、ボーリングなどの調査が実施され、地盤内部の情報が収集される。しかし、経済的理由等から広い建設用地に比べるとわずかな点の情報しか得られず、建設用地全体における地盤物性値分布を推定するためには専門家の経験や知識に頼ることになる。

著者らはこれまで、ニューラルネットワーク手法を用いて地盤物性値の分布を簡単に推定できる手法を開発する研究を行っている。これまでの研究[1]では、ＢＰ法およびＳＯＭ[2]を用いて地盤の透水性を評価する指標であるルジオン値の分布推定を行った。

この研究において、著者らはＢＰ法がこの種の問題には不向きであることを確認した。また、一方で、ＳＯＭを用いることでかなり正確な物性値の分布推定が行えることがわかった。しかし、ＳＯＭのみでは任意位置での推定物性値を直接求めることができないという問題点もまた明らかとなった。

著者らは、物性値の分布推定問題を空間上の曲面を表す関数の近似問題と捉え、ＳＯＭを関数近似問題に適するような改良を加えた新しいアルゴリズムを考案した。本論文においては、著者らが考案した拡張ＳＯＭを提案するとともに、既知の三次元曲面の補間問題によりこのアルゴリズムの有効性を示す。また、さらに、このアルゴリズムにより、地盤の透水性を示す指標であるルジオン値の分布推定を行い、実務レベルの問題への適用を図る。

2　拡張ＳＯＭのアルゴリズム

本論文で提案する拡張ＳＯＭは、ＳＯＭにカウンタープロパゲーションネットワーク（Counter Propagation Network:以後ＣＰＮと呼ぶ）のアルゴリズムを導入したものである。

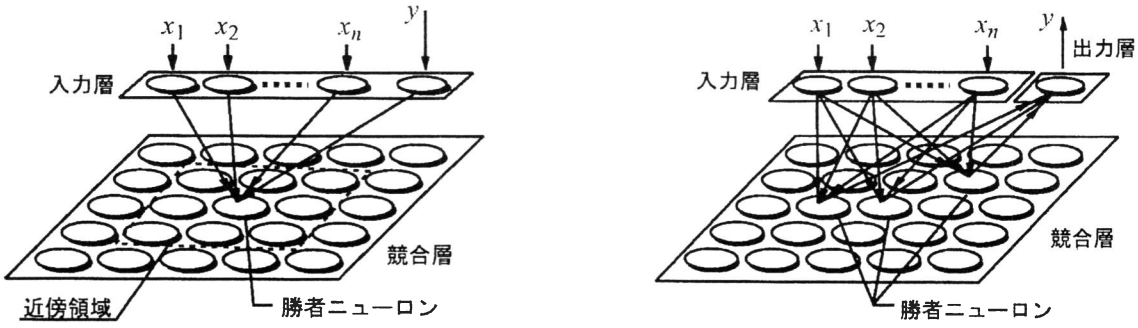
拡張ＳＯＭは図１に示すような入力層と競合層からなる２層構造である。そして、既知の情報を学習する学習モードと、これを用いて未知のデータを評価する補間モードでは動作が異なっている。

入力ベクトルの次元を n とし、式 (1) に示した関数の補間を行うものとする。

$$y = f(\mathbf{X}) = f(x_1, x_2, \cdots, x_j, \cdots, x_n) \qquad (1)$$

この場合には、拡張ＳＯＭの入力層には $n+1$ 個のニューロンを設ける。

学習モード（図 1(a)）では入力ベクトル $\mathbf{X}$ を入力層の $1 \sim n$ 番目のニューロンに入力し、$n+1$ 番目のニューロンには期待出力 y を入力する。そして、競合層上のすべてのニューロンに対して式 (2) で表される一致値を計算し、一致値が最小であるニューロンを一つだけ



(a) 学習モード　　(b) 補間モード

図 1: 拡張ＳＯＭの信号の流れ

選択して、これを勝者ニューロンとする。

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (x_j - u_{ij})^2 + (y - u_{i\cdot n+1})^2} \qquad (2)$$

ここで、d_i は競合層のニューロン i への一致値、u_{ij} は競合層のニューロン i と入力層のニューロン j を結ぶ重みである。

勝者ニューロンを選択した後、勝者ニューロンおよび近傍ニューロンに対して結合重みの更新が行われる。この過程は、通常のＳＯＭの学習方法と何ら変わることはない。

補間モード（図 1(b)）においては、学習モードでは期待出力 y を入力していた $n+1$ 番目のニューロンが出力層に変化する。

補間位置におけるベクトル $\mathbf{X}$ を入力層の 1〜n 番目のニューロンに入力し、一致値 d_i を計算する。このとき式 (2) の根号内第 2 項 $(y - u_{i\cdot n+1})^2$ は考慮しない。そして、一致値の低い順に N_{win} 個の勝者ニューロンを選択する。さらに、式 (3) によって競合層からの出力応答 Z_i を求め、式 (4) を用いて入力ベクトルに対応した補間値 Y′ を得る。

$$Z_i = \frac{1}{d_i} \Big/ \sum_{j=i}^{N_{win}} \frac{1}{d_j} \qquad (3)$$

$$y' = \sum_{i=i}^{N_{win}} u_{i\cdot n+1} \cdot Z_i \qquad (4)$$

補間モードの式 (3) および式 (4) がＣＰＮのアルゴリズムをとり入れたものである。

3　例題による補間性能の評価

あらかじめ形がわかっている多項式の補間問題にＢＰ法および拡張ＳＯＭを適用し、補間性能の評価を行う。例題とするのは式 (5) に示す多項式であり、図 2 はこの多項式を図示したものである。

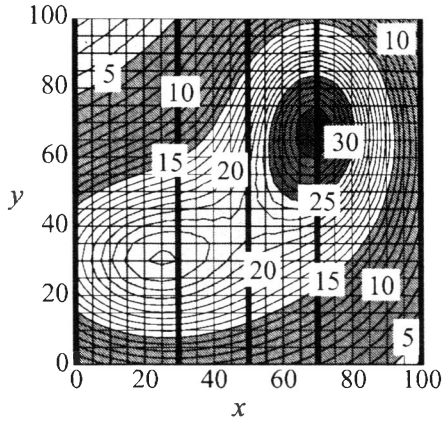


図 2: 三次元補間モデル

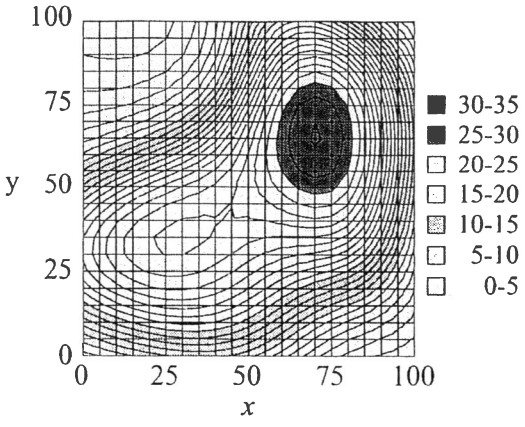
$$Z = \frac{30000}{2(x-70)^2 + (y-70)^2 + 1000} + \frac{50000}{(x-20)^2 + 2(y-30)^2 + 2000} - 5 \qquad (5)$$

補間モデルとして、ボーリング調査で得られるデータ分布を考慮し、$x = 0, 30, 50, 70, 100$ の位置で y 方向に 2 刻みに 255(5×51) 点のサンプル点を用意した (図 2 の太線位置)。補間により求めるのは x, y のそれぞれ 5 刻みに 441(21×21) 点とする。

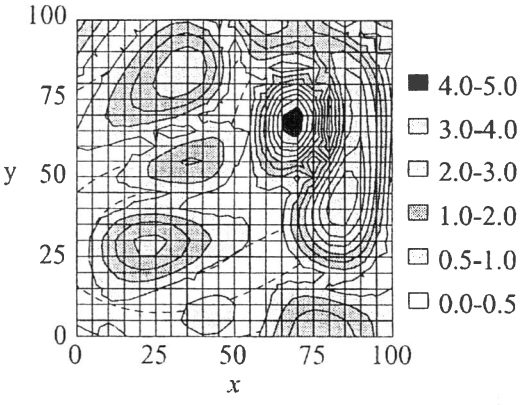
各アルゴリズムによる補間結果を図 3 に示している。

図 3(a)、図 3(b) はＢＰ法を用いて補間を行ったものであり、図 3(c)、図 3(d) は拡張ＳＯＭを用いて補間を行ったものである。

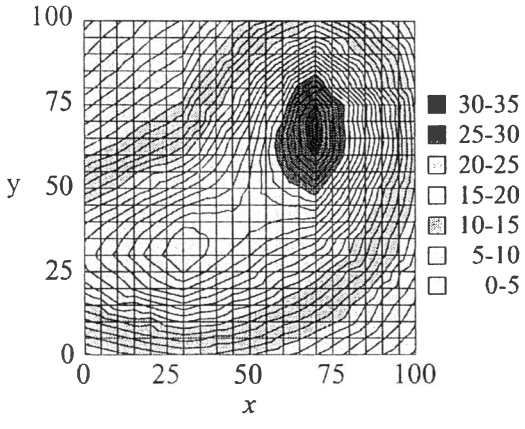
図 3(b) および図 3(d) からＢＰ法の補間誤差が拡張ＳＯＭに比べて大きいことがわかる。ことに曲面の勾配が大きい補間範囲の右側で大きな誤差が目立っており、サンプル点が与えられている $x = 70$ の位置でも補



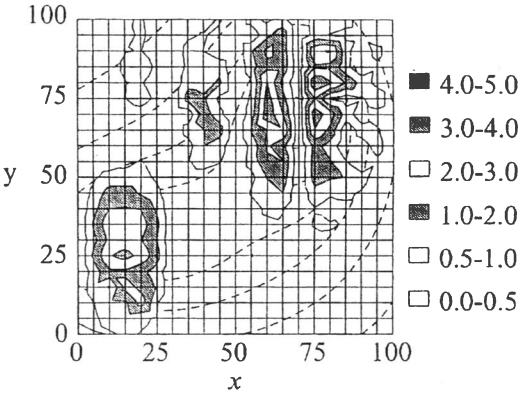
(a) ＢＰ法による補間



(b) ＢＰ法による補間誤差



(c) 拡張ＳＯＭによる補間



(d) 拡張ＳＯＭによる補間誤差

図 3: 三次元曲面の補間

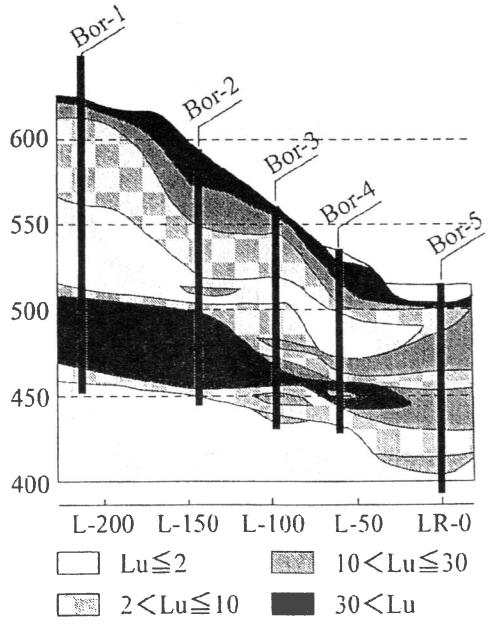


図 4: 専門家によるルジオン値の分布推定図

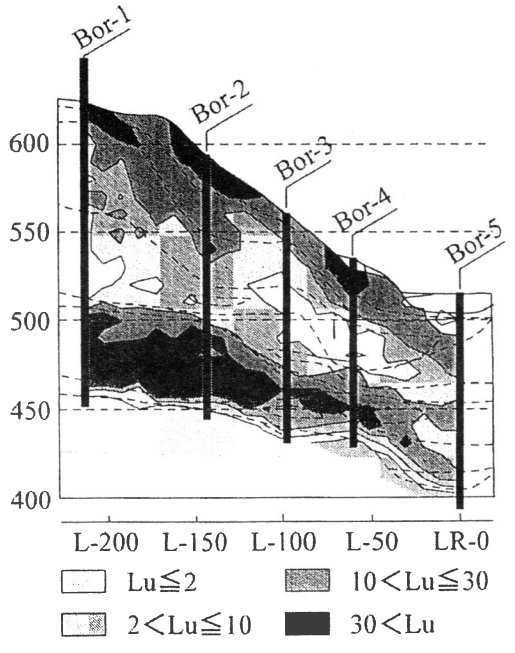


図 5: 拡張ＳＯＭよるルジオン値の分布推定図

間誤差は小さくなっていない。これは、サンプル点が密に与えられたため、入力 x, y はあまり変わらないにもかかわらず教師値 Z が大きく変化するデータを同時に学習する、すなわち、矛盾したデータを学習することになったためと考えられる。

拡張ＳＯＭの場合には非常に誤差が少なく、精度高い補間ができていることがわかる。

4 拡張ＳＯＭを用いたルジオン値分布の推定

実際の地盤物性値の分布推定問題として、ダム立地地点の地質評価問題を扱うことにする。

例題として選んだダムサイトにおいては、ダム軸を中心として幅 $100m$、長さ $500m$ の範囲にわたって多くのボーリング調査が実施されている。本研究では、この調査で得られた測定値を用いて、遮水性の評価に直接的にかかわるルジオン値の分布推定を行うものとする。

推定を行うのは左岸側の水平方向に $210m$、深さ方向に $200m$ の範囲とし、5 本分のボーリングデータを使用した。図 4 は例題として選んだ範囲で実施されているボーリング調査個所、および専門家が推定したルジオン値の分布を示したものである。それぞれのボーリング深さは約 100〜$200m$ であり、ルジオン値はボーリング孔を利用して深さ方向に $5.0m$ ごとに測定されているので測定値はボーリング 1 本あたり 20〜38 点分得られている。標高 450〜$500m$ 付近のかなり深い位置に 30 ルジオン以上の高透水性ゾーンの存在が推定されているのがこの地点の特徴である。

拡張ＳＯＭの学習には測定位置の X, Y 座標およびその位置で測定されたルジオン値を用いる。ただし、測定されたルジオン値は 0〜4,600 程度と幅広いため、その常用対数値を用いることとした。

こうしてルジオン値の推定を行ったのが図 5 である。ただし、補間を行う際の勝者ニューロンの数は 3 個としている。

深い位置に推定されている高ルジオン値の領域、地表面近くの様子などが良くとらえられている。

Bor-2 付近の地表部では、専門家の推定に比べて高ルジオン値領域が深く推定されている。この位置における計測データでは実際に高いルジオン値が観測されており、拡張ＳＯＭではこの値を反映して推定を行っているが、専門家はカメラによって観察した孔内の様子を考慮に入れて、観測値の一部を無視した分布推定を行っている。Bor-2 付近の相違はこのために生じたものである。

5 結論

本論文において、著者らはＳＯＭとＣＰＮを組み合わせた新しいアルゴリズムである拡張ＳＯＭを提案した。そして、多項式の補間問題を通してその補間性能を客観的に評価した上で、このアルゴリズムをボーリングデータを用いたルジオン値の分布推定問題に応用し、良好な結果を得た。

本論文で提案したアルゴリズムは、地質区分や地盤の強度定数など他の地盤物性値の分布推定にも応用できる。また、地盤問題にこだわらず、騒音や汚染の分布など曲面補間あるいは関数近似問題としてとらえることができるさまざまな問題へも同様に応用が可能である。

参考文献

[1] 伊藤, 白木, 安田:自己組織化特徴マップを用いた地盤性状の空間分布推定法, 構造工学論文集, Vol.45A,pp.487-492,1999,3

[2] T.Kohonen 著, 徳高, 岸田, 藤村 : 自己組織化マップ, シュプリンガーフェアラーク東京,1996,5.

[3] R. ヘクト・ニールセン著, 袋谷賢吉 : ニューロコンピューティング, トッパン,1992,8.

[問い合わせ先]

〒 680-8064
鳥取県岩美郡国府町分上 2-210
（有）シー・エー・イー　伊藤　則夫
Tel:0857-26-6410、Fax:0857-21-0831
E-mail:itou@cae.co.jp

TC2−3

質的情報分析へのＳＯＭの適用方法についての考察
SOM application to the qualitative information analysis

多田薫弘
Kunihiro Tada
マインドウエア
Mindware

Abstract It is difficult to formulate "What should we deal with for the analysis from the observed countless phenomenon? " in the qualitative investigation to search new business opportunities and potential needs, and so on. When taking a viewpoint, i.e. an interest with one of the equivocal interpretation, " as the link of what characteristics (properties) am I seeing things ", SOM should be able to analyze the structure. I am groping the method which evaluate the proper-ness of the interest using SOM, and the dialectic method as it discovers a new interest.

1 はじめに

本研究における「質的情報分析」とは，（たとえばマーケティング調査の初期段階で行われるインタビュー調査やグループインタビューなどの）質的調査（定性的調査）から，調査全体の＜問題設定＞や＜仮説＞を創造するための情報分析のことをいう．また，企業の＜戦略＞も広い意味で仮説であり，戦略の立案もまた質的情報分析である．

観察される無数の事実から何を仮説の要素として取り上げるかは，論理的に導かれるのではなく、むしろ，その方法は弁証法(dialectic)と呼ぶべきものである．

ここで質的調査における弁証法を，「**情報の中の暗黙な要素を明るみに出し，それを注意深く対話的に比較することにより，当初の思いなしを修正し，より高度な解釈を再構築すること**」とする．そして，SOM（自己組織化マップ）を質的調査・情報分析のための弁証法を支援するツールとして捉え，その適用方法を考える．

2 KJ法とデータ対話型理論

質的調査における弁証法的な情報分析としては，すでに川喜田二郎の「KJ法」や，B.G.グレイザー+A.L.ストラウスの「データ対話型理論」(grounded theory) などがある．どちらも共通しているのはデータを類似性でもってグループ分け（カテゴリー化）して，カテゴリーとその特性の連関構造を記述することによって，仮説を創造するということである．

両者の違いは，KJ法では図解を用いるが，データ対話では樹状図によって概念を階層化すること．そして，KJ法ではカード間の比較の基準となる特性は暗黙のままグループ編成が行われるが，データ対話では特性が明示化されることを重視する．

KJ法は，カードを繰り返し比較し，動かすことによって，思考のプロセスを忠実にトレースしようとした．それは思想としては慧眼であるが，素朴な筆記用具だけを使って，それを忠実に実行するのは不可能である．

とくにKJ法では，「目からウロコが落ちたという感じになるまでグループ編成をせよ」という．しかし，それはあまりに主観的な評価基準である．

一方，データ対話型理論は，調査者が関心を持った話題について，できるだけ多くの特性を明示化し，それを多くの話題の中で比較していくことで，カテゴリーを定立していく．そして，カテゴリーの品質を保つために「理論的飽和」という基準が設けられている．それは「あるカテゴリーに関連するデータにいろいろあたってみても，そのカテゴリーの諸特性をそれ以上発展させることができない状態」とされる．しかし残念ながら，データ対話でのその判断も，やはり主観的に行うしか方法がない．

これら従来の方法では，カテゴリーの品質が客観的には判断できない．したがって，針小棒大な仮説の妥当性を吟味することはとても難しい．

3 概念調査とSOM

新しい技術的可能性や環境変化（経済的・制度的・世相的など）が現れ始めた初期の時点では，それについての完全な情報などあり得ない．完全な情報をもとにして，客観的にその変化を変化として説明できるようになった時点では遅すぎる．現実的にマネジメントに要求されるのは，的確にして迅速な判断であって，「真実の裁定」ではない．

そこで，素朴な客観性を重視する一般の調査を＜事実調査＞と呼び，弁証法的な方法によりカテゴリーを問い，新しい問題を発見，あるいは仮説を創造する調査を＜概念調査＞と呼んで，明確に区別することにする．

概念調査は，断片的な情報をもとにして，できるだけ早い時点で，新しい変化に応じた解釈カテゴリーを発見することを目標とする．

概念調査は，そのために継続的な情報ウォッチングをベースにするが，そこに現れてくるデータは日々移ろい往く．一定の指標だけをフォローしていたらよいというわけには行かない．これまで注目していた特性項目に新たな項目を加えたり，またある特性項目は注目されなくなったりという具合に，調査の対象範囲や視点がどんどん変わって行く．

概念調査では，明示化のために，データ対話型理論の方法をほぼ支持する．すなわち，観察された事物についての分析者の＜関心＞を，事物とその特性の＜連関＞という形で明示化する．特性の連関からカテゴリーが自己定立され，カテゴリーどうしの関係や，カテゴリーと諸特性の関係を考察することが，すなわち仮説の創造である．

KJ法やデータ対話型理論では，このカテゴリー化の過程で，調査者（分析者）の恣意的な判断で都合のよいカテゴリー化をする「ごまかし」が入り込む余地があった．そこで，概念調査に自己組織化マップ（SOM）を適用することにより，この過程をより明示的に行うことができると考えられる．さらには視覚化されたSOMをもとにして，KJ法のような図解を作成することも可能と予想される．

未来に関する調査の場合，実証なくして調査だけで仮説を完全に証明するのは不可能であるが，SOMを使えば，仮説のもととなるカテゴリー化の品質は判断できそうである．

4 マトリックス分析への適用

概念調査は移ろい往く＜関心＞を明示化しようとするので，データ項目そのものが変動する．
そこで，まず定常的なデータからSOM利用の経験を積みながら，漸進的に分析手法を確立させていく方針をとる．

SOMではデータ間の類似性によって，マップ上のノードが順序づけされる．類似性は，ある場合には＜競合関係＞として捉えられるし，またある場合には＜ひとまとめにされるべき同一のグループ＞として捉えられる．

企業での戦略立案や各種企画においては，そのような状態を分析しようとするマトリックスが数多く存在する．しかしながら，従来，データをマトリックス状にまとめるだけで終わっていることが多い．ＳＯＭが適用できそうなマトリックス分析にはたとえば以下のようなものがある．

- 会社格付け
- 提携関係の分析
- 製品戦略の競合分析
- 製品特性分析（製品競合分析）
- 用途市場分析
- ニーズ・シーズ分析
- 機能分析（機能結合法）

例として，製品特性分析を以下に示す．なお，SOMを作成するツールとしては，Eudaptics社のViscovery SOMineを使用した。

製品特性分析

図1は，代表的な情報工学・電子工学雑誌の記事内容に関する主観評価からSOMを作成したものである．

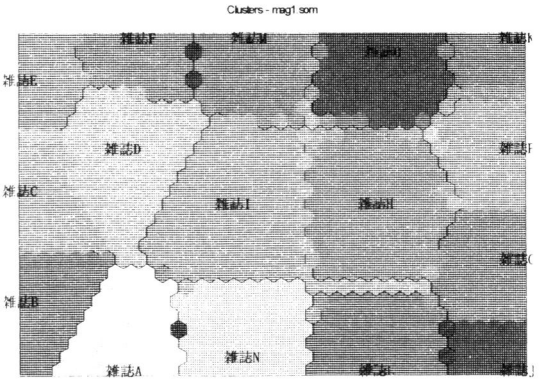


図1: 競合雑誌マップ

左の方のクラスタは，強力な取材力を武器に豊富な内容を提供している雑誌であり，右の方は雑誌の対象領域を狭く設定しているか，専門家からの投稿論文のみに頼っている雑誌である．雑誌 P は，右の方に位置する中の一つで，ひしめく競合雑誌の中で特色を出すのに苦慮している．

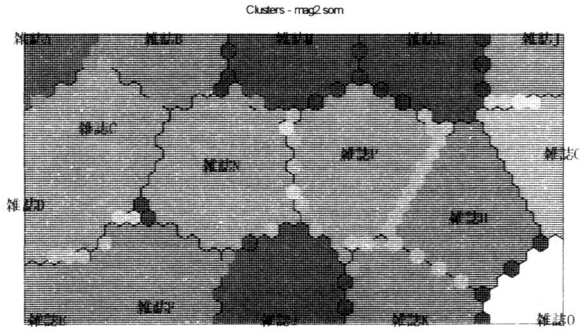


図 2: 主要な特性成分を強調した競合雑誌マップ

図 1 は 38 項目の特性データをもとにしているが，そのすべてを同じ優先度で作成している．そこで前節で述べたように成分マップの分布状態から主要な成分を定め，主要な成分の優先度を高めて図 2 のマップを作成した．

これで見ると雑誌 P は，有力雑誌 N とまともに競合していることがわかる．

雑誌の既存方針の上での改善，マイナーチェンジを考える場合には，このマップの自社（自誌）の周辺で，進出したい方向のポイント（ノード）を決め，**Viscovery SOMine** 上でそのノードの成分値を調べることで，どの項目をどのように増減させればよいかを検討できる．

雑誌 P の場合は，売上の状況から判断して，より抜本的に，これまでの総合的な守備範囲を見直してより専門分化されたところに戦略領域を求めるか，あるいはこれまでと違った“切り口”へ編集方針を転換することが求められている．

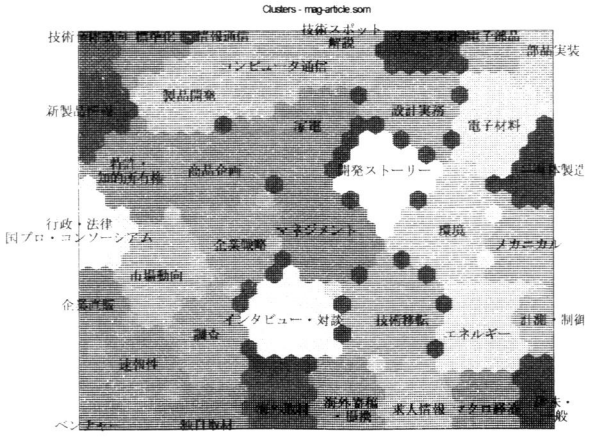
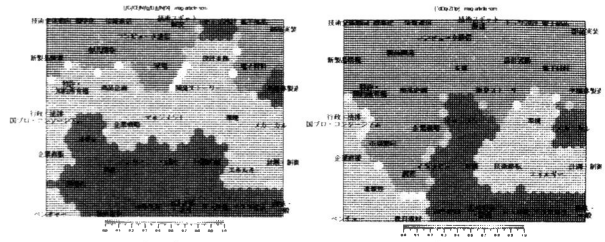


図 3: 競合雑誌の特性マップ

図 3 は，もとのデータの行と列を入れ替えて，特性項目（記事内容）を分類したマップである．これもきれいに体系化されていて驚かされる．

図 4 は，図 3 の成分マップで，（a）が雑誌Pで，（b）が雑誌Nである．このようなマップをもとに新たな戦略を検討することができる．



（a）　（b）

図 4: 成分マップによる競合雑誌のベンチマーク

5 技術トピックのＰＳ分析

概念調査にさらに一歩近づくために「技術トピックのＰＳ分析」への SOM の適用を検討する．ＰＳ分析とは，技術トピック・セミナーの企画等で，多くのトピック・テーマから優先的なテーマを効率的に選別するモデルである．

Ｐは Phase（段階）で，「その技術テーマの開発が，どの段階まで進んでいるのか」であり，Ｓは Structure（構造）で，「そのテーマがオピニオンとして普及するために，どのような作用が期待されるか」である．

ＰとＳには，それぞれ１１個，計２２個の特性（プロパティ）がある．図５は，１９９９年の１１月の新聞スクラップから抜き出したトピックを表 1 の各成分とウエートづけで作成したＳＯＭである．

表１　PS 分析の特性項目とウエートづけ

Ｐ：開発段階		Ｓ：普及構造	
発見・理論	1	開発ブーム	1
構想・アイデア	1	特殊ユーザーへの普及	1
開発着手	2	デファクト標準	2
開発プロジェクト	2	置き換え	2
ブレイクスルー	3	脅威	3
キーデバイスの開発	3	規制または緩和	3
試作・実験	3	業界ピラミッド	3
デジュール規格	3	公共的設備への採用	3
システム導入	3	広範な製品への組込	3
実用化・量産	1	大衆化	1
改良性能向上	1	副次的需要	1

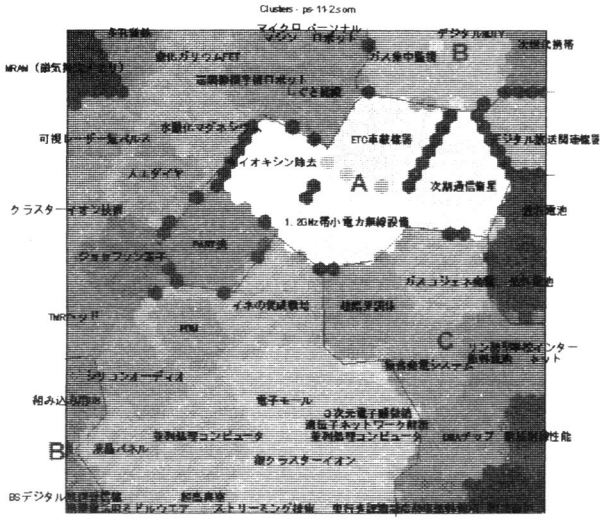


図 5: ウエートづけを行ったＰＳ分析のＳＯＭ

6 概念調査

ＰＳ分析は，過去の経験から得られた特性項目を固定して，それによって情報を分類するが，概念調査ではそのような有効な特性項目自体を探索する．図 6 は，新たな特性によってトピックを分類した概念調査 SOM である．図 7 は，その特性項目のＳＯＭである．図 8 は，図 9 の歪みを表示したマップである．右上隅の部分はマップが強く曲がっているので，今のところ，そこにある特性項目は無効である．

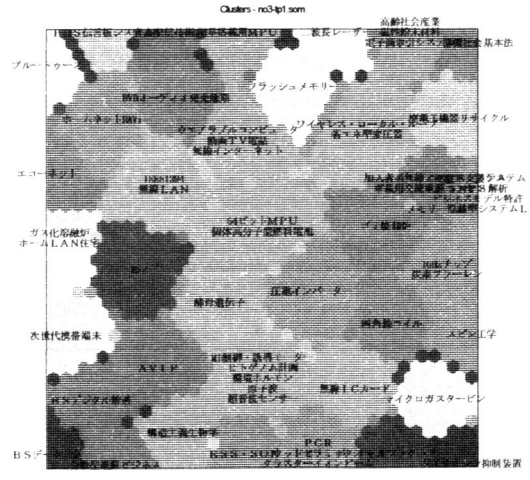


図 6: 概念調査のトピック・マップ

7 まとめ

概念調査の初期段階では，データ間の連関が拡散的であるが，これを継続していくことによって，さらにクラスタ（カテゴリー）が明確になり，また変化していくものと予想される．今後は，その過程を経時的に観察する方法と，「カテゴリーの理論的飽和」を判定する方法を経験的に確立して行きたい．

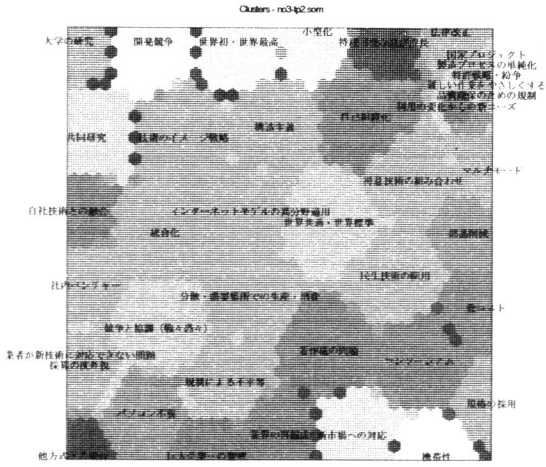


図 7: 概念調査の特性項目マップ

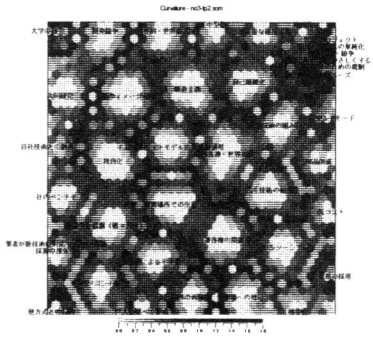


図 8: 曲率マップ

参考文献

[1]川喜田二郎，“川喜田二郎著作集 5—KJ 法・混沌をして語らしめる”，中央公論社，東京，1996.
[2]B.G.グレイザー+A.L.ストラウス，後藤隆・大出春江・水野節夫訳，“データ対話型理論の発見”，新曜社，東京，1996.
[3]徳高平蔵・岸田悟・藤村喜久郎，“自己組織化マップの応用”，海文堂，東京，1999.

[問い合わせ先]
〒761-8032
香川県高松市鶴市町 2049-34
合資会社マインドウエア
多田薫弘
Tel. 087-881-5741
Fax.087-881-5791
E-mail:tada@mindware-jp.com

TC3−1

ファジィSOMによる自律行動体の行動様式の類別化法

Classifying Method on Behavior Pattern of Autonomous Actors by using Fuzzy-SOM

宮下雄一郎　平松久佳　玉野和保　浅野敏郎
Yuichiro Miyashita　Hisayoshi Hiramatsu　Kazuho Tamano　Toshiro Asano
広島工業大学　工学部
Hiroshima Inst. of Tech.

Abstract　A method based on Self-Organizing feature Map (SOM) for classifying behavior patterns of autonomous actors has been proposed.　This paper shows that the method has been able to display a classified behavior of gold fishes after a shock was applied.　The pattern of behavior is calculated using five-dimensional input vectors formed from animated picture. This classifying method is improved so that the displaying map may be not influenced by initial conditions.　In this case, the Euclidean distance on competing layer is arranged by the fuzzy inference.　The new SOM is useful to analyze acts of the athlete in sports and refugees in an accident, because this method can deal with animated picture.

1　はじめに

複数の自律移動ロボットや生産機械で構成される生産工場や、複数の人が協調しながら共同作業しているシステムにおいては、多くの場合その行動制御は経験的に扱われている。自律行動体を構成要素にもつ生産システムを効率化、地震、火災などの非常時において人の集団を安全かつスムーズに誘導する場合、道路や交差点における交通の解析、また団体で行われるスポーツ、特にサッカーやラグビー、バスケットボールなどでプレーヤーやボールの位置関係における戦術の解析など、自律行動体の行動を高効率的に制御するためには、これらを実時間解析できる手法が必要である。行動体が複数で協調分散しながら行動するシステムの解析には、画像処理が有効である。本研究はこのような対象における自律行動体の時系列行動様式を画像処理により類別化できる手法を確立しようとするものである。本報告ではファジィルールを加え初期値に依存の少ないファジィSOMのアルゴリズムを提案し、それを用いて自律行動体の時系列行動様式の類別化を行った。そして、動画像を用いた時間的な変化の中で自律行動体がどのように類別化されるか解析し、その行動の意味やパターンの解析を行った。事例として、外部刺激に対する魚の時系列行動様式の変化が類別化できたことを報告する。

2　ファジィSOMによる自律行動体の行動様式の類別化法

2.1　提案するファジィSOMアルゴリズム

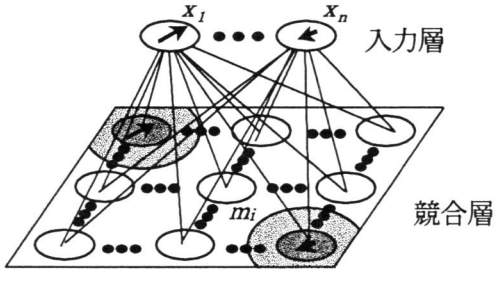


図1　自己組織化マップ

Kohonen の自己組織化マップ(Self-Organizing Map)は、多次元情報をニューラルネットワークによる情報処理によって2次元にマップする方法である。（図1）SOMの学習は次式で表される。

$$m_i(t+1) = m_i(t) + h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)]$$

入力層の入力ベクトル $x(t)$を競合層に入力し、入力ベクトルと全ユニットの参照ベクトルのユークリッド

距離を求める。ベクトル $x=(\xi_1, \xi_2 \cdots \xi_n)$ と、$y=(\eta_1, \eta_2 \cdots \eta_n)$ のユークリッド距離は以下の式で表される。

$$d_E(x,y)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\xi_i-\eta_i)^2}$$

求めたユークリッド距離が最小となるようなユニットを選び、その回りに近傍領域を定義する。近傍領域内の参照ベクトルは式に従って入力ベクトルを学習し、更新される。式中の $h_{ci}(t)$ は学習係数で、学習率係数、近傍領域、から求められ、学習が進むと減少させる。

ここで自己組織化マップが学習する段階で、学習回数が進むにつれて近傍領域を徐々に狭めていくとベクトルの間隔が均一になるようにマップされていく。つまり、学習の初期段階では共通性のない、ユークリッド距離が離れている入力ベクトルは互いに反発しあって離れていくが、学習が進むにつれ近傍領域が狭くなるとその反発力がなくなり、今度はユークリッド距離が近いベクトル同士が反発して離れていってしまうことになる。この出力マップを適当なクラスタに自動で分けるためにマップに境界線を引くことは困難である。

そこで近傍領域を狭めないで、学習が終了するまでそのままの大きさで学習を進めていく。そうすることでユークリッド距離が離れているベクトルは最後まで反発しあって離れることになり、ユークリッド距離が近い、つまり似たようなベクトル同士で集団を形成することになり、クラスタリングが容易になる。本研究では効率的に学習を進めるために、近傍領域を狭めない方式を採用した。

学習する際の学習係数の決定は入力ベクトルと競合層の近傍領域内にあるユニットの参照ベクトルとのユークリッド距離を求め、ファジィルールにより決定する。ファジィルールとメンバーシップ関数を示す。

ルール：IF（入力ベクトルと近傍領域内の参照ベクトルのユークリッド距離が遠い）

THEN（学習係数を大きくする）

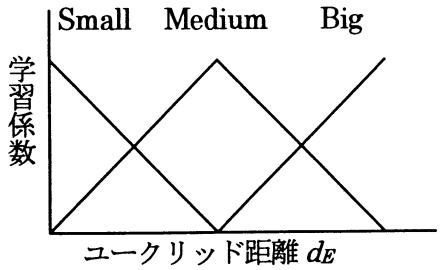


図2　メンバーシップ関数

学習係数は簡便法にももとづき、次式で表す。

$$h_{ci}=\frac{\sum_j\{\mu_j(d_E)\cdot h_j\}}{\sum_j \mu_j(d_E)}$$

ここで、$\mu_j(d_E)$ はユークリッド距離 d_E に対する距離の程度を表す j 番目のルールのメンバーシップを、h_j は、各ルール毎の学習係数を示す。ルール毎のメンバーシップ関数と学習係数値は、最適結果が得られるよう試行錯誤により定めた。ファジィ推論に基づきユークリッド距離に対する学習係数を調整することで、SOM による類別結果の初期値による依存性を少なくできる。

2．2　自律行動体の行動様式の類別化法

複数の自律行動体が行動している様子を移した2枚の連続画像から画像処理によって移動ベクトルを求める。それをSOMの入力ベクトルとし、その要素は、位置（x座標,y座標）、移動速度（長さ）、移動方向（角度）、時間の5次元の情報から成る。

入力ベクトルをSOMに入力し、競合層の各ユニットが持つ参照ベクトルの学習を繰り返す。全ての学習が終わると競合層を出力とする。この処理により複数の移動ベクトルが2次元にマップされる。その出力マップをもとに類似ベクトルを判断し、クラスタリングを行って自律行動体の行動様式の類別化を行う。

3　複数自律行動体の行動様式の類別化実験

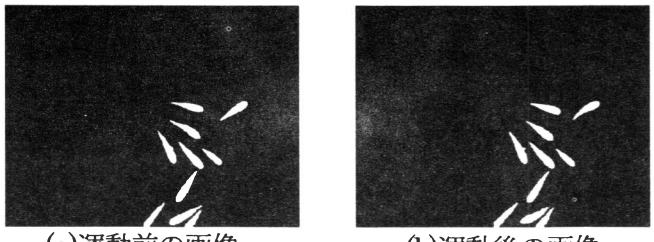
複数自律行動体の行動様式の類別化実験を行った結果を示す。ここでは自律行動体として 10 匹の魚を使用した。その理由として、魚は形状が滴下泪形で単純であり、一般に群れをなして行動し、外部刺激に対し敏感に反応することから本アルゴリズム検証に有効であることを判断して利用した。図3の2枚の画像から、移動ベクトルを求め、求めた画像を図4に示す。図の番号は各魚の識別番号を表している。

自己組織化マップの競合層は、縦10、横10の計100のユニットで構成され、各ユニットの参照ベクトルの初期値はランダムで初期化されている。全更新学習回数は100回とし学習率係数の初期値は0.2で近傍領域は7とする。得られた自己組織化マップを図5に示す。このマップの数字は魚の識別番号に対応している。

出力されたマップから各魚の移動ベクトルをクラスタリングし、図4の移動ベクトルに反映させる。図4中の()内の数字がクラスタの番号を示し、同じ番号なら同じクラスタにあることを表す。

図5を見ると位置、速さ、方向が似たようなベクトルは近い距離でマップされあまり似ていないベクトルは遠いところにマップされている。魚1はクラスタ(0)、魚2, 3, 4, 6はクラスタ(1)、魚5, 7はクラスタ(2)、魚8, 9, 10 はクラスタ(3)に属し、計4つのクラスタができているのが分かる。図4と比較しても直感と SOM の出力とが似ていることが分かる。

以上の実験結果から、自己組織化マップを使って自律行動体の運動様式を類別化できることが確かめられた。



(a)運動前の画像　　(b)運動後の画像

図3　魚の行動様式を写した画像

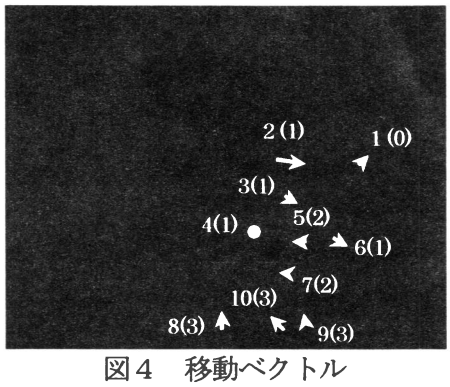


図4　移動ベクトル

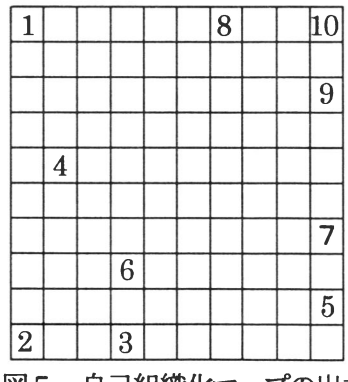


図5　自己組織化マップの出力

4　動画像を用いた自律行動体の時系列行動様式の類別化実験

次に動画像を用いて魚の時系列における行動様式の類別実験を行った。動画像には魚の行動様式を撮影した10コマの画像を使った(図6)。撮影の際4コマ目で外部刺激を与え、魚の行動の変化を類別化し本アルゴリズムの検証を行った。

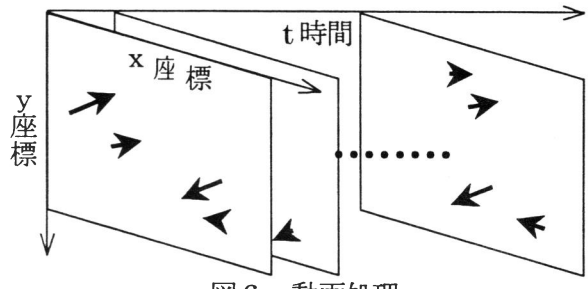


図6　動画処理

処理の流れは、最初の1コマ目と2コマ目の画像に画像処理を施し、魚の移動ベクトルを求め、順次移動ベクトルを求める。よって、9枚の移動ベクトル図ができ、90の移動ベクトルができる。この移動ベクトルの軌跡を図7に示す。図中の○印は移動ベクトルの始点を表している。外部刺激が与えられたことにより魚8, 9, 10は上の方にすばやく移動している。魚5, 7は殆ど動いからず、その他はゆっくりと移動している。

これらの移動ベクトル群を SOM の入力ベクトルとし、競合層は縦15横15とし、参照ベクトルをランダムで初期化する全更新学習回数Tは100回で学習率係数の初期値は0.2で近傍領域は10とし、SOM の出力マップからクラスタリングを行い、移動ベクトルの類別結果を表1(()内の数字はクラスタを表す)に示す。

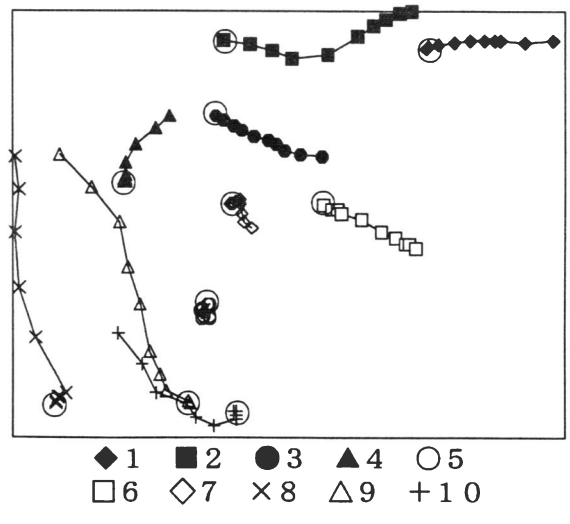


図7　ベクトル軌跡

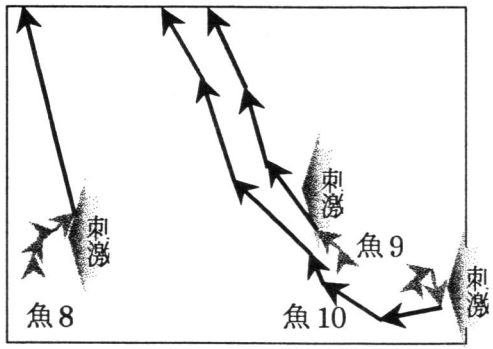


図８　移動ベクトル軌跡の拡大

図８は図７の移動ベクトル軌跡を一部拡大している。クラスタ(0), (1)を灰色のベクトルで表しその他は黒色で表した図である。魚8, 9, 10は初め殆ど動いていない。しかし、シーン３で外部刺激を受けることにより、驚き逃げようとして速さが増している。従って、初めはクラスタ(0)に属しているが外部刺激を与えられたことによりクラスタ(3)に変化し、その後もクラスタ(3)に属している。この結果からクラスタ(0)は殆ど動いていないベクトルが属し、速いベクトルはクラスタ(3)に属していることが分かる。

表１を見ると、シーンの1, 2, 3ではクラスタ(0)に属しているものが多い。それ以降ではクラスタ(3)が多い。これはシーン1, 2, 3では環境の変化がなく、シーン３で外部刺激が与えられたからと考えられる。魚5, 7は殆どがクラスタ(0)または(1)である。これは終始あまり動いていないからと考えられる。また、シーン１でクラスタ(3)に属しているのは魚8, 9, 10が近づいてきたからである。クラスタ(2)はある一定のスピードで動いているベクトルで構成され、魚の1, 2が属している。

表１　魚の時系列行動の変化をクラスタリングした結果

		魚の番号									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
シーン	1	(0)	(2)	(1)	(0)	(3)	(1)	(3)	(0)	(0)	(0)
	2	(2)	(2)	(1)	(3)	(1)	(1)	(0)	(0)	(0)	(0)
	3	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0)	(0)	(3)	(1)
	4	(2)	(2)	(1)	(1)	(0)	(1)	(1)	(0)	(3)	(3)
	5	(2)	(2)	(2)	(0)	(0)	(1)	(1)	(3)	(3)	(3)
	6	(2)	(2)	(1)	(3)	(1)	(1)	(1	(3)	(3)	(3)
	7	(2)	(2)	(1)	(3)	(1)	(1)	(0)	(3)	(3)	(3)
	8	(2)	(2)	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(3)	(3)	(3)
	9	(2)	(2)	(2)	(2)	(1)	(1)	(0)	(3)	(3)	(3)

以上のことから、外部刺激による環境の変化に対して、クラスタも変化することが検証できた。また複数自律行動体の時系列における行動様式を類別化でき、その行動の意味やパターンを解析することができた。

5　おわりに

本報告では提案した方法により複数の自律行動体の行動様式を動画像から類別化でき、状況の変化における自律行動体の行動の意味、パターンを解析することができた。これにより、本手法が時系列における人の行動や自律移動ロボットなどの行動様式や運動を解析することに適用できることが確かめられた。またファジィ推論にもとづきユークリッド距離に対する学習係数を調整することで、SOM による類別結果の初期値による依存性を少なくできた。

本研究は、広島工業大学「知能材料・機器研究センター」の画像処理設備を用いて行われたことを付記するとともに、あわせてその利用に関して受けた助成に謝意を表します。

参考文献

[1]徳高平蔵, 岸田悟, 藤村喜久郎: 自己組織化マップの応用, 海文堂出版(1999)

[2]T.Kohonen:Self-OrganizingMaps(Springer Series in Information Sciences, Volume 30, 1995): 自己組織化マップ: 徳高平蔵, 岸田悟, 藤村喜久郎訳, シュプリンガー・フェアラーク東京(1996)

[問い合わせ先]
〒731-5193
広島県広島市佐伯区三宅２丁目1-1
広島工業大学　工学部　電子工学科
玉野　和保
TEL 082-921-3121(ex.317)
FAX 082-923-2679
E-mail tamano@cc.it-hiroshima.ac.jp

TC3−2

SOMを用いた日本語意味マップの自己組織化
Self-Organizing Japanese Semantic Maps

馬 青　神崎 享子　村田 真樹　内元 清貴　井佐原 均
Qing Ma, Kyoko Kanzaki, Masaki Murata, Kiyotaka Uchimoto, and Hitoshi Isahara

郵政省通信総合研究所
Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications, Japan

Abstract

This paper shows that sematic maps of Japanese nouns consistent with our intuition can be self-organized with SOM by defining nouns as sets of adnominal constituents, the nouns being encoded by the newly proposed correlative coding method.

1　はじめに

単語を意味的類似性を距離とする連続した意味空間にマッピングする技術は用例に基づく機械翻訳や情報検索など数多くの自然言語処理課題に応用できる．これまで，英語などにおいて，単語の意味を連続的かつ可視的に表現できる意味マップ（つまり，意味空間にマッピングされた結果）を自己組織化によって自動構築する研究がいくつかなされてきた[（Kohonen, 1997）を参照]．しかし，これらの研究においては，自己組織化に用いるデータは単に目標単語と前後の2単語で構成される三つ組で構成され，言語構造を全く考慮していないものであった．また，日本語においては，英語と違う言語構造を考慮に入れて意味マップを構築しなければならないにもかかわらず，このような研究は系統的に行われていない．

本研究の目的は大規模な日本語名詞の意味マップを自己組織型神経回路網モデルSOM（Kohonen, 1997）を用いて構築することである（Ma et al., 2000）．研究の第一段階として，本稿は，共起する連体修飾要素の観点から，まず，意味マップの自己組織化に有効と思われる，連体修飾要素が名詞の具体的な内容を表すような名詞句を新聞から人手で収集し，その名詞句（66個の主名詞を含む7,852個の名詞句）を用いた意味マップ構築を試みた．そして，大規模意味マップの構築のためのデータ収集に自動化が不可欠という観点から，まだ小規模であるが，8年分の新聞から名詞及びそれと共起する形容詞と形容動詞を共起語の頻度の高いものから自動的に取り出して構成される名詞句（100個の主名詞を含む33,870個の名詞句）を用いた意味マップの構築を試みた．計算機実験の結果，我々の直観に合う意味マップの構築が可能であることが分かった．また，SOMの意味分類能力を客観的にみるため，分類結果に可視性や連続性のない，クラスタリング手法をベースラインモデルとしてとらえ，同じデータを用いた計算機実験を行った．その結果，分類能力においても，SOMはクラスタリング手法より劣らないことが分かった．

2　SOM

SOMは高次元入力を持つ2次元配列のノード（ニューロン）で構成され，以下に述べる自己組織化によって高次元データを2次元空間にその特徴を反映するようにマッピングすることができる．

入力 $x = [\xi_1, \xi_2, \cdots, \xi_n]^T \in \Re^n$ ならば，個々のノード i はそれぞれ参照ベクトル $m_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \cdots, \mu_{in}]^T \in \Re^n$ を持つものとする．但し，参照ベクトルの要素 μ_{ij} はノード i と入力要素 ξ_j の間の重みであり，自己組織過程において少しずつ修正される．具体的に，入力ベクトル x が与えられたとき，まず，その入力をすべてのノードの参照ベクトルと比較し，ユークリッド距離の一番短いノード（勝者ノード）を活性化する．即ち，勝者ノード c は以下のように選ばれる．

$$c = argmin_i\{||x - m_i||\} \tag{1}$$

そして，グローバルに自己組織化が行われるように，勝者ノードの近傍のノードも活性化させ，リラックス処理を行う．即ち，活性化されたすべてのノードに対し，それらの参照ベクトルを入力ベクトルに近付くように修正を行う．

$$m_i(t+1) = m_i(t) + h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)] \tag{2}$$

ここで，t は学習回数で，$h_{ci}(t)$ は例えば以下のように定義された近傍関数である．

$$h_{ci}(t) = \alpha(t) \cdot exp(-\frac{||r_c - r_i||^2}{2\sigma^2(t)}) \tag{3}$$

但し，$r_c \in \Re^2$ と $r_i \in \Re^2$ はそれぞれ勝者ノード c と近傍ノード i の位置ベクトルである．また，$\alpha(t)$ は学習率で，$\sigma(t)$ は近傍の大きさ（半径）である．これらは時間と共に単調に減少していく関数であり，例えば以下のようなものである．

$$\alpha(t) = \alpha(0)\frac{T - t}{T}, \tag{4}$$

$$\sigma(t+1) = 1 + (\sigma(t) - 1)\frac{T-t}{T} \qquad (5)$$

但し，$\alpha(0)$ は初期値で，T は総学習回数である．

学習は「整列」と「微調整」の二つのフェーズに分けて行われる．「整列」フェーズでは，$\alpha(t)$ と $\sigma(t)$ の初期値を共に大きく取り，時間と共に (4)(5) に従って減少して行く．ノードの配置の基本形はこのフェーズで形成される．一方，残りのフェーズでは $\alpha(t)$ と $\sigma(t)$ は小さい値のまま長時間をかけて初期フェーズで形成された基本形を微調整する．

自己組織化が終った後のマッピング処理は，単に入力 x に対する勝者ノードを選び出す [式 (1)] ことである．

3 意味マップの自己組織化

3.1 学習データ

SOM を用いて名詞の意味マップを自己組織化させるためには，名詞間の意味的な関係を反映できるような学習データが必要である．名詞は連体修飾要素と組になって名詞句として現れることが多く，名詞間の意味的関係はある意味ではどれだけ共通の連体修飾要素を持つかによって決まる．本稿では個々の名詞をそれと共起する連体修飾要素のセットを用いて定義し，そのセットを学習データとする．

連体修飾要素と主名詞の間には種々の関係が存在する．たとえば,「うれしい思い」の例では，連体修飾要素「うれしい」は名詞「思い」の具体的な内容を表す．一方,「太郎の思い」の例では,「太郎の」は「思い」の所有者を表す．連体修飾要素は名詞の属性として働く場合もある．例えば,「赤いリンゴ」の例では,「赤い」は「リンゴ」の属性である．これらの関係のうち，連体修飾要素が主名詞の具体的な内容を表すものは特に自己組織化にとって有効であると考えられる．なぜなら，主名詞の具体的な内容を表す連体修飾要素は主名詞と共通する意味要素を持っているからである（詳細は神崎ら，2000 を参照）．そのため，本稿では名詞の意味マップの構築に，まずこのタイプのデータを用いることにした．但し，このタイプのデータは自動抽出が困難で言語学の専門家に頼らなければならないため，データの収集にコストがかかる．そのため，本研究では，さらに形容詞と形容動詞を共起語とする名詞句という自動抽出可能なデータを用いた名詞マップの構築も試みることにした．

表 1は新聞から人手で収集した，連体修飾要素が名詞の具体的な内容を表すようなデータを示す．この表の 1 列目は被修飾名詞（主名詞）であり，2 列目は共起する連体修飾要素である．

3.2 符号化

前の節で述べたように，個々の名詞は共起する連体修飾要素のセットで定義する．例えば，表 1から「思い」を「思い＝｛うれしい，誇らしい，悲しい，気の毒な，$\cdots$｝」のように定義する．ここで，一般に ω 種類の名詞 $w_i(i = 1, \cdots, \omega)$ が存在し，それらの意味マップを構築

表 1: 収集されたデータの例

名詞	連体修飾要素
思い	うれしい，誇らしい，悲しい，気の毒な $\cdots$．
状態	曖昧な，安静の，危ない，$\cdots$．
観点	アカデミックな，教育的な，歴史の，$\cdots$．
$\vdots$	$\vdots$

すると仮定する．このような場合，名詞 w_i は以下のように連体修飾要素のセットで定義される．

$$w_i = \{a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \cdots, a_{\alpha_i}^{(i)}\} \qquad (6)$$

但し，$a_j^{(i)}$ は w_i と共起する j 番目の連体修飾要素で，α_i は w_i と共起する連体修飾要素の数である．このように定義された名詞を SOM が取り扱えるように符号化するために，英語の場合には「ランダムコーディング」法（詳細は Kohonen, 1997 を参照）が用いられた．しかし，この方法は本研究においてはあまり有効ではなかったため，以下に述べる新しい手法を導入した．

まず，表 2 に示す名詞間の相関行列を (6) の定義式を用いて求める．ここで，行列の要素 d_{ij} は名詞 w_i と w_j 間の意味的相関（あるいは意味的距離）を反映するものとする．

表 2: 名詞の相関行列

	w_1	w_2	$\cdots$	w_ω
w_1	d_{11}	d_{12}	$\cdots$	$d_{1\omega}$
w_2	d_{21}	d_{22}	$\cdots$	$d_{2\omega}$
$\vdots$			$\ddots$	
w_ω	d_{w1}	d_{w2}	$\cdots$	$d_{w\omega}$

次に，この行列を用いて名詞 w_i を以下のように符号化する．

$$V(w_i) = [d_{i1}, d_{i2}, \cdots, d_{i\omega}]^T \qquad (7)$$

ここで，$V(w_i) \in \Re^\omega$ は SOM の入力である（即ち，$x = V(w_i)$，$n = \omega$）．本研究では，要素 d_{ij} を以下のような計算式を用いて求めることにした．

$$d_{ij} = \begin{cases} \frac{(\alpha_i - c_{ij}) + (\alpha_j - c_{ij})}{\alpha_i + \alpha_j - c_{ij}} & \text{もし } i \neq j \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \qquad (8)$$

但し，α_i と α_j はそれぞれ w_i と w_j が共起する連体修飾要素の数で，c_{ij} は w_i と w_j に共通する連体修飾要素の数である．従って，要素 d_{ij} は名詞 w_i と w_j の間にどれだけ共通の連体修飾要素を持つかという意味での両名詞間の正規化された距離である．即ち，d_{ij} が小さければ，両名詞は意味的に近く，d_{ij} が大きければ，両名詞は意味的に遠い．

4 実験結果

データ：実験 1 では，毎日新聞から人手で収集した，連体修飾要素が名詞の具体的な内容を表すような名詞句を

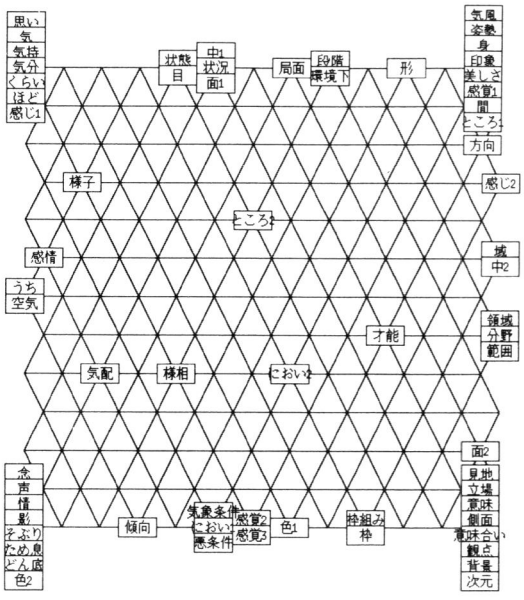


図 1(a): 自己組織化された意味マップ（実験 1）

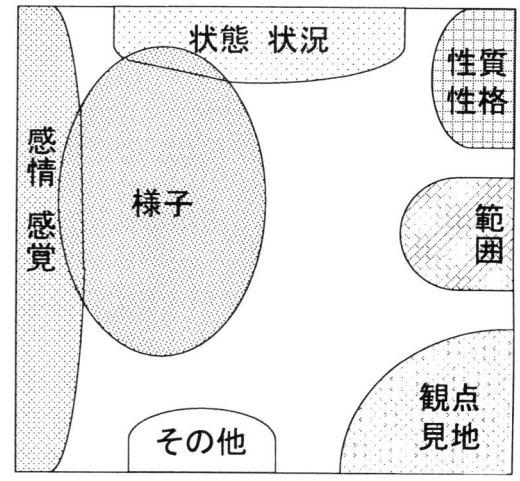


図 1(b): 意味マップに対応する意味グループ

用いた．名詞の種類 ω は 66，連体修飾要素ののべ総数 $\sum_{i=1}^{i=\omega} \alpha_i$ は 7,852，連体修飾要素の異なり総数は 4,998 であった．このうち，名詞「状態」の連体修飾要素の数（$\alpha_{\text{状態}} = 391$）がもっとも多く，名詞「中 2」[1]の連体修飾要素の数（$\alpha_{\text{中 2}} = 4$）がもっとも少なかった．また，名詞「思い」と「気持」がもっとも多く共通の連体修飾要素を持ち（$c_{\text{思い, 気持}} = 79$），多数の名詞が互いに共通する連体修飾要素を持たなかった．

実験 2 では，8 年分の毎日新聞から共起する形容詞と形容動詞の頻度順から自動的に集めた形容詞／形容動詞と名詞で構成されるような名詞句を用いた．名詞の種類 ω は 100，形容詞／形容動詞ののべ総数 $\sum_{i=1}^{i=\omega} \alpha_i$ は 33,870，形容詞／形容動詞の異なり総数は 4,023 であった．このうち，名詞「もの」と共起する形容詞／形容動詞の数（$\alpha_{\text{もの}} = 1870$）がもっとも多く，名詞「政治家」と共起する形容詞／形容動詞の数（$\alpha_{\text{政治家}} = 192$）がもっとも少なかった．また，名詞「もの」と「こと」に共通して共起する形容詞／形容動詞の数がもっとも多く（$c_{\text{もの, こと}} = 764$），名詞「活動」と「気分」に共起する形容詞／形容動詞がもっとも少なかった（$c_{\text{活動, 気分}} = 6$）．

SOM: 両実験においては，SOM への入力の次元 ω が異なってそれぞれ 60 と 100 に設定された以外は，すべてのパラメターを同じように設定した．SOM は 13×13 の 2 次元配列のノードで構成し，近傍の形状は六角形にした．整列フェーズにおいては，学習総回数 T を 10,000 に，学習率の初期値 $\alpha(0)$ を 0.1 に，そして，近傍の初期半径 $\sigma(0)$ を 13（即ち，SOM の直径に等しい）に設定した．微調整フェーズにおいては，学習総回数 T を 100,000 に，学習率の初期値 $\alpha(0)$ を 0.02 に，そして，近傍の初期半径 $\sigma(0)$ を 13 に設定した．

結果: 図 1(a) に実験 1 で得られた名詞の意味マップを示し，図 1(b) にこれを人手で意味的に七つのグループに分けた図を示す．例えば，左上から左下までの領域にマッピングされた名詞（思い，気，気持，気分，くらい，…，どん底，色 2）は基本的に「感情 感覚」を表すものと考えてよい．このグループはより詳細には直接感情を表すもの（思い，気，気持，気分，…，ため息，色 2）と感情の程度を表すもの（くらい，ほど，どん底）に分けられる．「感情 感覚」の領域には，左端中央に名詞「空気」が出現しているが，これは「気まずい空気」などのように「雰囲気」を表す名詞である．連体修飾要素からみると，「空気」は「感情 感覚」の名詞と共通の連体修飾要素を多く持つが，それだけではなく「様子」の領域の名詞（様子，空気，気配，様相）とも共通する連体修飾要素が多い（例えば「不穏な空気」）．従って，図 1(b) の意味グループの図では「様子」の領域の一部を「感情 感覚」の領域に重ねて図示している．また，同様の例として，名詞「様子」は「様子」の領域だけでなく，「感情 感覚」の領域（例えば「感激の様子」）や，「状態，状況」の領域（例えば「悪戦苦闘の様子」）とも連体修飾要素を共有している．実際，図 1(a) をみると，名詞「様子」の位置は，「感情 感覚」や「状態 状況」の領域に寄っていることが分かる．従って，「様子」の領域を「感情 感覚」の領域とだけでなく「状態 状況」の領域とも一部分重ねて図示した．

右下の領域にマッピングされた名詞（{ 面 2，見地，…，次元 } と { 枠組み，枠 }）は観点や見地などを表すものである．このグループにおいては，前者のセットと後者のセットの間の意味上の微妙な違いは異なる領域にマッピングされることによって表現されている．もちろん，分け方によってはこの二つの領域にマッピングされる名詞を二つのグループに分けることも可能である．しかし，この二つの領域が近接しているため，これらの中の名詞が意味的に近いという結果には変わりがない．似たよう

[1]添字は同じ単語の（連体修飾要素の観点からの）異なる意味を区別するために用いている．

表 3: クラスタリング手法による名詞の分類結果

クラス	名詞
1	うち 中 1 ところ 2 局面 段階
2	空気 姿勢
3	面 1 ところ 1
4	状態 状況
5	感情 色 2 念 情 感じ 1 気分 思い 気持 気 くらい ほど
6	意味合い 背景 側面 意味 観点 見地 面 2
7	次元 領域 才能 分野
8	そぶり 目 身 声 影 どん底
9	環境下 様相 形 域
10	感覚 1 気風 気配 傾向
11	枠 枠組み 立場 方向 範囲
12	感覚 2 色 1 におい 2
13	気象条件 悪条件
その他[3]	印象 様子 美しさ 感じ 2 ため息 感覚 3 中 2 におい 1

なことは「観点 見地」グループと「範囲」グループの間にも言える．この二つのグループの名詞は意味的に相似しているため，それぞれ隣同士の領域に位置するグループにマッピングされている．実際,「範囲」グループの名詞「分野」や「領域」は「観点 見地」グループに分類されてもおかしくない．今回は，これらを二つのグループに分けたが，いずれにせよこの二つのグループの中の名詞が意味的に近いという結果に変わりがない．このように，意味マップは意味の相似性を連続的に表現しているため，意味マップを用いれば，どの名詞がどのグループに分類できるかを知ることだけでなく，名詞同士が互いにどれぐらい意味的に近いかを知ることもできる．そして，名詞間の意味的相似を見る際にはそれらの名詞が同じグループに属するかどうかを考える必要はなく，また，その名詞がどのグループに分類すべきかが決まらない場合でも意味的な近さの比較が可能である．

以上に述べたように，自己組織化されたマップは全般的に我々の直観に合っていると言ってよい．うまく行かなかった例もあるが，本実験に限って言えばそれは基本的に訓練データのスパースネス問題に起因するものであった．その例として「その他」にマップピングされた名詞（傾向，気象条件，…，色 1）がある．訓練データを調べた結果，これらの名詞は他の名詞との間に共通する連体修飾要素が極端に少ないことが分かった．例えば，名詞「気象条件」は他の名詞との間に最も多い場合でも三つの共通の連体修飾要素しか持っていない．

SOM の性能を客観的に評価するために同じデータに対し，ボトムアップ式のクラスタリング手法を用いた分類実験を行った[2]．その結果，SOM を用いた手法は意味的分類を可視的連続的に表現できるだけでなく，分類能力においても従来のクラスタリング手法より劣らないことが分かった（表 3）．

[2]クラスタリングに用いる距離計算には (8) 式を用いた．

[3]本手法は階層型クラスタリング手法であるため，下位の層で分類されていないものは「その他」にした．

図 2 に実験 2 で得られた名詞の意味マップを示す．左上の領域にマッピングされた名詞は「時・場所など」を表すもの，左中央の領域は女性・政治家など「人物」を表すもの，そして，左下の領域は「気持」を表すものと考えてよい．また，一番右の上から下までの領域は一まとまりとして考えられ．この領域をさらに細かく見れば，下のほうになると,「意見 考え」に基づく「行動 展開 声」に関するものという意味的な連続性を考えることもできる．残りの部分は曖昧な部分が多いが，例えば下中央の領域は基本的にイメージ・作品・舞台といった「印象」に関するものと考えることができるし，上中央の領域は「トピック」と考えることができる．このように，曖昧なところがあってまとめにくい面もあるが，このマップも一応意味をなしていると考えてよいであろう．

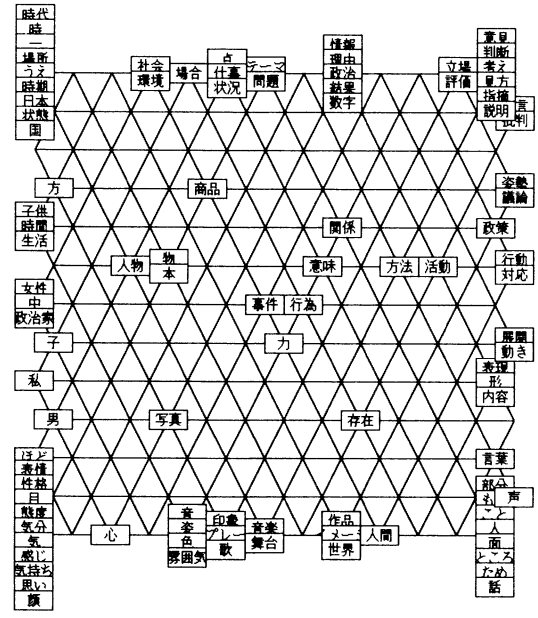


図 2: 自己組織化された意味マップ（実験 2）

5 結び

本稿は，共起する連体修飾要素の観点から SOM を用いた名詞の意味マップの自己組織化について述べた．計算機実験の結果，我々の直観に合う意味マップの構築が可能であることが分かった．今後は，対象とする単語の修飾要素だけでなく，係り先の単語を用いたより大規模な名詞の意味マップの構築を行う予定である．

参考文献

[1] Ma, Q., Kanzaiki, K., Murata, M., Uchimoto, K., Isahara, H.: Self-Organization Semantic Maps of Japanese Nouns in Terms of Adnominal Constituents, to appear in IJCNN'2000.

[2] 神崎 享子，馬 青，井佐原 均：形容詞的ふるまいをする「名詞＋の」について，言語処理学会第 6 回年次大会発表論文集，pp. 328-331, 2000.

[3] Kohonen, T.: Self-organizing maps, Springer, 2nd Edition, 1997.

TC3－3

Viscovery SOMineを用いた地方交付税交付金の配分構造の分析

An Economic Analysis of Government Transfers with Viscovery SOMiine

柴田 愛子　坂井 優　武光 広志　望月 怜美
Aiko Shibata　Yu Sakai　Hiroshi Takemitsu　Satomi Mochizuki
関西学院大学 総合政策研究科
Kwansei-Gakuin University

Abstract:
We try to analyze central government financial transfer to local government using Viscovery SOMine.

はじめに

自己組織化マップ(SOM)の理論に基づき作られた Viscovery SOMine を用いて地方交付税交付金、地方譲与税、国庫支出金の配分構造の分析を試みた。経済学的な数値データを難解で解釈する側にもある程度のスキルが必要な統計的手法よりも可視的で理解しやすく、かつ、汎用性の高い分析ツールとしてSOMに注目した。Viscovery SOMine を用いて3種類の経済データの分析を試みたが、今回は以下の分析のみを紹介する。[1]

都道府県単位で見る地方交付税交付金の配分構造

1．序

わが国では、全国自治体へ国税3税の32%を地方交付税交付金としてその財源に与えてきた。国税3税は、所得税、法人税および酒税である。平成元年より国税3税の他に消費税の24%、たばこ税の25%が追加された。地方交付税交付金は平成10年度には約18兆で、82兆の国の予算の22%にあたる。地方交付税交付金は自治省により、地方公共団体の財源不足額に応じて客観的基準に基づき算定されるとする。そして、以下の式がほぼ毎年、僅差で成り立つ。

地方交付税交付金（普通）＝基準財政需要額－基準財政収入額

基準財政需要額と基準財政収入額の算定基準は複雑で精緻な仕組みを持ち、地方交付税交付金は各地方公共団体にどのような基準で配分されているかが不明瞭である。そこで都道府県別データを用いてその基準を推定し検討する。

2．分析の背景

基準財政需要額と基準財政収入額が、人口と面積によってほぼ説明されるという仮説が1972，83年度の市町村データを用いて検証された。（貝塚、本間、高林、長峯、福間1986）つまり、地方交付税額は人口と面積という客観的指標によりほぼ推定されるとする。そして、Meyer and Naka(1998)は、政治的要因を1958年から1990年の県別時系列データを使用し考察した。そしてその結果として交付税配分に政治的要因があったとした。我々は1990年の単年度データを活用し、人口と面積という客観的指標に、さらに政治的要因を加え分析を行う。1990年の単年度データを分析した理由は、自民党単独政権の最後の第39回衆議院選挙1990年の結果を政治的要因指標とした為である。いわゆる「55年体制」が終わり連立政権が成立したのは1993年の第40回衆議院選挙である。

我々のモデルを構築する前に、貝塚他(1986)のモデルを都道府県データに置き換えて検証し、Meyer and Naka(1998)モデルを単年度データに置き換えて検証した。その結果、貝塚他(1986)とほぼ同じ結果を得た。しかし、Meyer and Naka(1998)の論文で主張される政治要因についての結果はほとんどえられなかった。なお我々は地方交付税交付金には地方債現在高も影響すると考え、一人当たり地方債現在高のデータを独立変数に追加した。通算6回以上当選の議員を有力議員とし、政治的要因を各都道府県内の選挙区ごとのデータをもとに作成した。それには、1990年2月18日の第39回衆議院選挙の結果を自民党の有力国会議員比率に使用した。そして、県会議員のデータは日本議員名鑑（1989）を使用し、さらに、これらの政治的要因が影響すると考えられる1990年の財政、統計データを利用した。Meyer and Naka 論文と同様、各選挙区を都会、非都会と分類しているほか、沖縄県のデータは除いて重回帰分析を行った。なお、都会、非都会の分類の詳細については文末注2を参照。

3．変数選択過程

我々が前項で重回帰分析に用いた変数に加えて経済学的に意味を持つと思われたものを複数加えてViscovery SOMineによるクラスタリングを試みた。しかし、あまりたくさんの変数を投入するとクラスタリングの画面がほぼ青一色に染まり、調整してみてもあまり意味のある変化が見られなかった。そこで要素平面を比較して、類似した傾向の変数を経済的に意味を持つ数個の変数に代表させることにした。この結果をフィードバックさせ我々ののモデルを構築したのである。このように自己組織化マップの利用は有意な変数を選択する有効な手段であるといえよう。

4．クラスタの意味付け、主成分分析との関連

前項のような理論と方法で変数を絞り込み、もう一度自己組織化マップを描いた。

自己組織化マップと主成分分析との関わりは、主成分得点と各都道府県のマップでの位置関係に現れてくる。主成分得点で都道府県に順位付けをして、順番に自己組織化マップ上のラベルを追っていく。第一主成分でも、第二主成分以下もほぼ同じ

ような傾向を示し、主成分得点順にほぼ規則的にマップ内を移動する。そうすると、自己組織化マップは、主成分の意味付けにも有効であると考えられる。

5．さらなる応用

さらに自己組織化過程で作られたノードを含め各クラスタの統計分析を行った。そして、自己組織化マップを使用したデータマイニングの有効性を示した.

<注1>

A．都道府県への地方交付税交付金の配分構造

B．ODAに関わる諸国の経済成長の分析

C．CVMによる天神崎環境評価の応用

Bは総務庁統計局のデータ及びODA白書各年度版を主に利用し、CはJR三田駅前で1999年12月15日、16日の両日にわたって行われた街頭アンケート調査の結果を分析した。しかし、本日の発表はAのみとし、他の発表は次のチャンスにゆずる。

<注2>

都会と非都会の区別はReed（1992）による。その著書で朝日新聞の大都市型、都市型、地方都市型、非都市型の4つの分類を継承し、全国の衆議院議員の選挙区を4分類した。Meyer and Naka（1998）は、この4分類をさらに2分類、つまり、大都市型と都市型を都会型、そして、地方都市型と非都市型を非都会型として分析に使用した。我々の論文では、このMeyer and Nakaの2分類を使用している。尚、『自民党ー長期支配の構造』（石川と広瀬1989 pp. 120-12）も参照。

参考文献

[1] 貝塚、本間、高林、長峯、福間「地方交付税の機能とその評価 Part I」『ファイナンシャル．レビュー』第2号、 1986年8月、pp. 6-28.

[2] 徳高平蔵、岸田悟、藤村喜久郎『自己組織化マップの応用』海文堂1999年2月

[3] 長峯純一「地方交付税の算定構造．配分構造に関する分析」
『関西学院大学総合政策学部研究会』Working Paper Series No. 16 1999年11月

[4] 林宜嗣 『地方財政』有斐閣 1999年9月

[5] 石川 真澄、広瀬道定『自民党ー長期支配の構造』東京、岩波書店 1989年

[6] Deboeck, Guidoand and Kohonen, Teuvo edited., Visual Explorations in Finance with Self-Organizing Maps, Springer-Verlag London Limited 1998
日本語訳 徳高 平蔵、田中雅博「金融・経済問題における可視化情報探索」
シュプリンガー・フェアラーク東京1999年7月

[7]Meyer, Steven A. and Naka, Shigeto, "Legislative influences in Japanese budgetary politics", Public Choice, 94: 267-288, 1998.

[8] Pindyck, Robert S. and Rubinfeld, Daniel L. Econometric Models and Economic Forecasts, 4th edition Irwin/McGraw-Hill International Editions, Boston 1997.

[9] Reed, Steven R., Japan Election Data-The House of Representatives 1947-1990, Center for Japanese Studies, The University of Michigan, Ann Arbor 1992.

データ

『日本議員名鑑』 全国議員録刊行会
1989年4月

『朝日選挙大観 ー第40回衆議院選挙 第16回参議院選挙ー』朝日新聞選挙本部編
1993年12月

『社会生活統計指標』総務庁統計局
http://www.stat.go.jp

『地方財政統計年報（各年度版）』地方財政調査研究会編（財）地方財務協会

『市町村別決算状況調（各年度版 CD-ROM付き）』地方財政調査研究会編（財）地方財務協会

[問い合わせ先]
〒669-1337
兵庫県三田市学園2-1
関西学院大学神戸三田キャンパス 総合政策研究科
柴田 愛子
Tel:0795-65-7633
Fax:0795-65-7605
E-mail:ashibata@ksc.kwansei.ac.jp

TC4−1

適応部分空間SOMとファジィテンプレートマッチングを用いた話者識別

Speaker Classification by Using Adaptive Subspace Self-Organizing Map and Fuzzy Template Matching.

山川 烈　　堀尾 恵一　　○久保田 良輔
Takeshi Yamakawa　Keiichi Horio　Ryosuke Kubota
九州工業大学情報工学部
Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract:
In this paper, we propose a modified learning algorithm of the adaptive subspace self-organizing map(ASSOM), in which the basis vectors of each unit are adjusted by using the information of the classes of the input vectors. The information of the classes of the input vectors are provided to each unit. The direction of updating the basis vectors is decided by the comparison the classes of the input vectors with that of each unit. This modified learning algorithm realizes that the boundaries among the classes are removed ambiguous, comparing with the traditional learning algorithm of ASSOM. Furthermore, we show the validity of the proposal method from the classifying simulation of the voice waveforms. The unknown speakers is distinguished by using fuzzy template matching.

1 はじめに

自己組織化マップ (Self-Organizing Map:SOM)[1][2]は，入力層と競合層から構成され，類似した入力ベクトル同士を競合層上の近い位置に写像する特徴を持っている．この特徴を利用して，パターン分類などの問題に数多く応用されている．しかし，SOMは1つのユニットが1つの結合重みベクトルによって表現されているから，入力パターンがずれている場合や回転している場合，それらを同じパターンとして認識できないという問題点を持つ．この問題点を克服したのが適応部分空間自己組織化マップ (Adaptive Subspace SOM:ASSOM)である [3]．ASSOMは，1つのユニットが，複数の基底ベクトルによって構成される1つの線形部分空間によって表現されているから，入力パターンがずれている場合や回転している場合でも，それらを同じパターンとして識別することができる．しかしながら，ASSOMは教師なし学習を行うから，パターン分類などに適用する際，場合によってはその境界が不明瞭になるという問題がある．

本論文では，入力ベクトルのクラス情報を教師信号として学習を行う改良型ASSOMを提案する．提案手法では，まず競合層ユニットにあらかじめクラスの情報が与えられる．入力ベクトルが提示された際に，そのクラスと競合層ユニットのクラスが異なる場合，基底ベクトルは入力ベクトルに対して直交化する方向に更新される．これによりクラス間の境界を明確に分類することが可能となる．また，ファジィ類似性測度を用いたテンプレートマッチングを用いて話者の識別を行い，その識別結果から提案手法の有効性を示す．

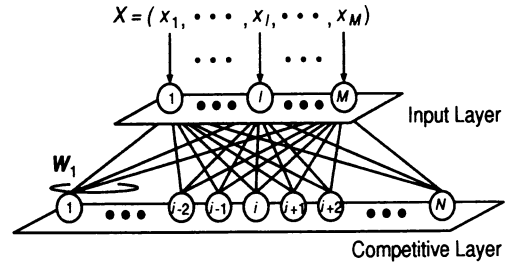


図 1: 自己組織化マップの構成.

2 適応部分空間自己組織化マップ

SOMの構成を図1に示す．SOMは入力層と競合層から構成され，それぞれの層はM個，N個のユニットを有している．競合層のi番目のユニットは，結合重みベクトル$\mathbf{w}_i$を介して入力層の全てのユニットと完全結合している．学習の際には，次の手順に従い結合重みベクトルを更新する．入力ベクトル$\mathbf{X}$が入力層に提示されると，入力ベクトルとのユークリッド距離が最も小さい結合重みベクトルをもつユニットが勝者ユニットに選ばれる．競合層上の勝者ユニットとその近傍に位置するユニット (近傍ユニット) の結合重みベクトルは，次式に従い更新される．

$$\mathbf{w}_i^{new} = \mathbf{w}_i^{old} + \alpha(k)(\mathbf{X} - \mathbf{w}_i^{old}), \qquad (1)$$

ここで，$\mathbf{w}_i^{new}$，$\mathbf{w}_i^{old}$は，それぞれ更新後，更新前の結合重みベクトルである．$\alpha(k)$は学習係数で，学習が進むとともに減少する．学習後のSOMでは，類似した結合重みベクトルをもつユニットは競合層上で隣接している．この特徴を利用して，パターン分類問題等に適用した研究が数多く報告されている．しかしながら，勝者ユニットを決定する際に，ユークリッド距離等の尺度を用いているので，位相がずれた入力ベクトルに

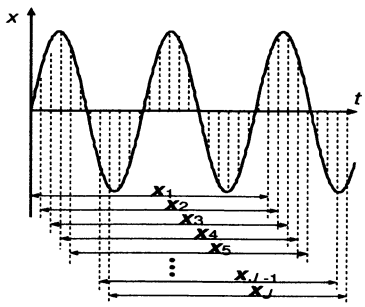


図 2: エピソード.

対しては適切な勝者ニットが決定されないという問題がある.

この問題点を改善する手法として，ASSOMが提案されている．従来のSOMでは，競合層上のユニットは単一の結合重みベクトルを有していたが，ASSOMでは，h個の基底ベクトル$\mathbf{b}_{im}$，$(m = 1, 2, \cdots, h)$で構成される線形部分空間を有している．図2に示す正弦波をASSOMで学習することを考える．図2の正弦波の一部が入力ベクトルとして与えられた際，それぞれのユニットが有する基底ベクトルで張られる平面に入力ベクトル$\mathbf{X}$を射影し，その射影されたベクトル$\hat{\mathbf{X}}$のノルムが最も大きいユニットを勝者ユニットとする．また，図2に示す正弦波を時系列信号とすると，信号内で入力ベクトル$\mathbf{X}$と近接するベクトルの集合を考え，この集合をエピソードと呼ぶ．エピソード内の全てのベクトルに対して，競合層上のそれぞれのユニットがもつ線形部分空間への射影ベクトル$\hat{\mathbf{X}}_j$ $(j = 1, \cdots, J)$を求め，そのノルムの和が最大になるユニットを代表勝者とする．つまり，代表勝者とはエピソード内のすべてのベクトルに対して最も適合度が高いユニットである．代表勝者とその近傍のユニットの基底ベクトルを次式により更新する．

$$\mathbf{b}_{im}^{new} = \prod_{j \in S} [\mathbf{I} + \alpha(k) \frac{\mathbf{X}_j \cdot \mathbf{X}_j^{\mathbf{T}}}{\| \hat{\mathbf{X}}_{ji} \| \| \mathbf{X}_j \|}] \mathbf{b}_{im}^{old}, \quad (2)$$

ここで，$\mathbf{b}_{im}^{new}$，$\mathbf{b}_{im}^{old}$は，i番目のユニットのm番目の基底ベクトルの更新後と更新前を表す．$\mathbf{I}$は単位ベクトルである．$\cdot$は内積を表す．$\hat{\mathbf{X}}_{ji}$は，j番目の入力ベクトルのi番目のユニットがもつ線形部分空間への射影ベクトルを表す．$\alpha(k)$は学習係数で，学習が進むとともに減少する．

ユニットに線形部分空間を採用し，エピソードという考え方を用いることで，位相のずれた入力ベクトルに対しても適当な勝者ユニットが決定される．

3 改良型適応部分空間自己組織化マップ

ASSOMは，SOMと同様に教師なし学習により競合層上のユニットの基底ベクトルを入力ベクトルに基づいて更新する．学習後の競合層ユニットでは，隣接しているユニットは類似した特徴を表す線形部分空間を構成している．しかし，それぞれの特徴間の境界が不明瞭になる場合もある．本研究では，競合層上に学習される特徴間の境界を明確にするために，競合層ユニットにあらかじめクラス情報を与え，競合層ユニットのクラスと入力ベクトルのクラスがを比較して基底ベクトルの更新に反映する新しい学習アルゴリズムを提案する．

L個のクラスを用意し．各クラスにはr個の信号が含まれている．また，競合層のi個のユニットをL個のクラスに分類する．改良型ASSOMの学習では，入力ベクトルと同時にそのベクトルがどのクラスに属するのかを教師信号として与える．勝者ユニットおよび代表勝者の決定法は，従来のASSOMと同様である．代表勝者およびその近傍のユニットの基底ベクトルが更新される際，入力ベクトルが属するクラスとそのユニットが属するクラスが同じであれば，そのユニットの基底ベクトルは式(2)に従い更新される．一方，入力ベクトルのクラスとユニットのクラスが異なる場合は，基底ベクトルは次式に従い更新される．

$$\mathbf{b}_{im}^{new} = \prod_{j \in S} [\mathbf{I} + \beta(k) \frac{\mathbf{v}_{jim} \cdot \mathbf{v}_{jim}^T}{\| \hat{\mathbf{X}}_{ji} \| \| \mathbf{v}_{jim} \|}] \mathbf{b}_{im}^{old}, \quad (3)$$

ここで，$\beta(k)$は学習係数で，学習が進むとともに増大する．$\mathbf{v}_{jim}$は，i番目のユニットのm番目の基底ベクトル$\mathbf{b}_{im}$を次式に従いエピソード内のj番目入力ベクトル$\mathbf{X}_j$に対して直交化したベクトルである．

$$\mathbf{v}_{jim} = \mathbf{b}_{im} - \frac{\mathbf{X}_j \cdot \mathbf{b}_{im}}{\mathbf{b}_{im} \cdot \mathbf{b}_{im}}, \quad (4)$$

式(2)の更新式は，i番目のユニットがもつ線形部分空間を入力ベクトルに近づける方向に更新することを意味し，式(3)の更新式は，線形部分空間を入力ベクトルに対して直交化するように更新することを表す．この学習により，提示された入力ベクトルと同じクラスに属する競合層のユニットの線形部分空間は入力ベクトルとの適合度が高くなり，逆に，提示された入力ベクトルと異なるクラスのユニットの線形部分空間と入力ベクトルとの適合度が小さくなる．これは，競合層上のクラス間の境界を従来のASSOMと比較して，より明確にすることを意味し，パターン分類等に適用する際には有効である．

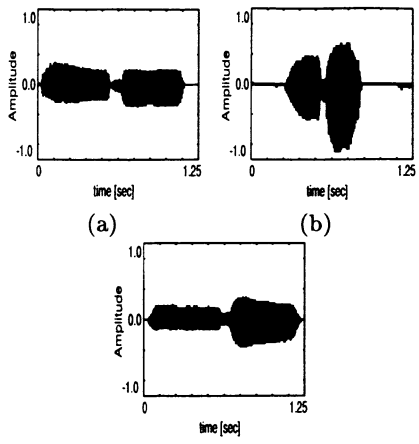


図 3: 学習に用いた音声波形 /i-nu/ の一例. (a) 話者 A. (b) 話者 B. (c) 話者 C.

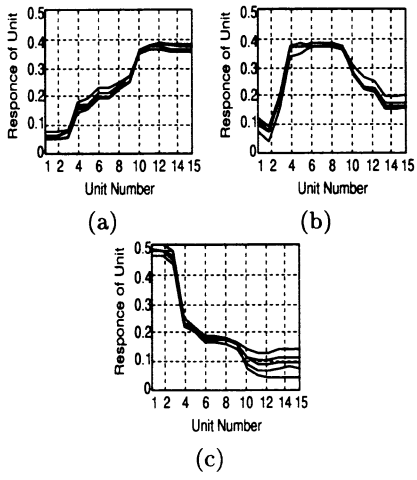


図 4: 従来の ASSOM における，それぞれの話者の音声信号に対する競合層ユニットの応答. (a) 話者 A. (b) 話者 B. (c) 話者 C.

4 シミュレーション

提案手法の有効性を示すために，3 人の話者 (A，B，C) の音声波形を分類するシミュレーションを行う．従来の ASSOM と改良型 ASSOM で学習し，話者 A，B，C に対するそれぞれのユニットの応答を比較し，クラス間の分類の明確さを検証する．3 人の話者に /i-nu/ と発音してもらい，その音声信号を周波数 8kHz でサンプリングした．それぞれの話者に，5 回ずつ発音してもらい，それらの音声波形で ASSOM，改良型 ASSOM の学習を行った．図 3 に，学習に用いた音声波形の一例を示す．学習では，入力層のユニット数 (入力ベクトルの次元) を 64，時間的に隣接した 16 個のベクトルを 1 つのエピソードとした．競合層のユニット数を 15 とし，改良型 ASSOM では，1 ～ 5 番目のユニットを話者 A，6 ～ 10 番目のユニットを話者 B，11 ～ 15 番目のユニットを話者 C のクラスとした．また，ある音声波形からランダムに入力ベクトルを選び基底ベクトルの更新を行うことを 15 個全ての波形にして対して行うことを 1 回の学習として，500 回行った．学習係数 $\alpha(k)$ は初期値 0.1 から学習終了時に 0 になるように減少させ，$\beta(k)$ は初期値を 0 として学習終了時に 0.2 になるように増大させた．

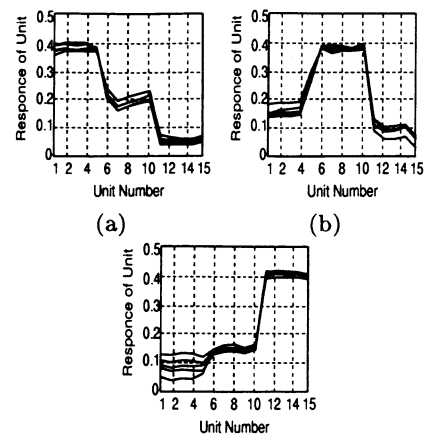


図 5: 改良型 ASSOM における，それぞれの話者の音声信号に対する競合層ユニットの応答. (a) 話者 A. (b) 話者 B. (c) 話者 C.

学習終了後の ASSOM および改良型 ASSOM に，学習に用いたそれぞれの音声信号を 64 点ずつきりとり入力する操作を，その信号全体に対して行い，各入力ベクトルに対する各ユニットの適合度の和，つまり入力ベクトルの各ユニットの線形部分空間への射影ベクトルのノルムの和を算出し，それをその波形に対する ASSOM の応答とした．各話者に対する従来の ASSOM の応答，改良型 ASSOM の応答を図 4，図 5 に示す．グラフの横軸はユニット番号，縦軸はそれぞれのユニットの応答を示す．図 4，図 5 より，提案手法と従来手法を比較すると，ユニット番号が 5 及び 10 付近におけるユニットの応答に違いが見られる．この違いから，提案手法が従来手法と比較してクラス間の境界を明確にしていることがわかる．

一般に，ファジィ分野において，メンバーシップ関数 $T_A(i)$ と $T_B(i)$ の類似性測度 S は式 (5) のように定義される．

$$S = \frac{\sum_i T_A(i) \wedge T_B(i)}{\sum_i T_A(i) \vee T_B(i)}. \tag{5}$$

ここで $\wedge$ は min 演算，$\vee$ は max 演算を意味する．本研究ではこの類似性測度を用いることにより，未知の話者が発した音声波形を識別する．あらかじめ図 4，図 5 に示す応答を，各話者のテンプレートとして用意しておく．ここでテンプレートには，それぞれのユニットにおける応答の 2 乗和を求め，その平方根が 1 にな

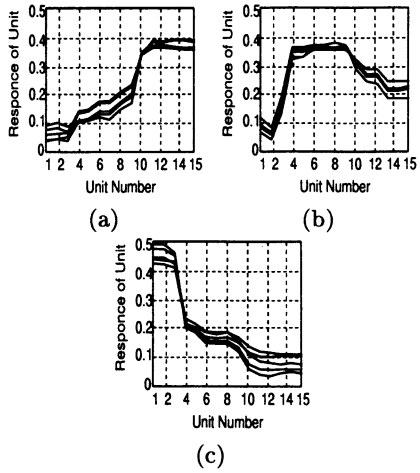


図 6: ASSOM における，それぞれの話者のテストパターンに対する競合層ユニットの応答 (a) 話者 A．(b) 話者 B．(c) 話者 C.

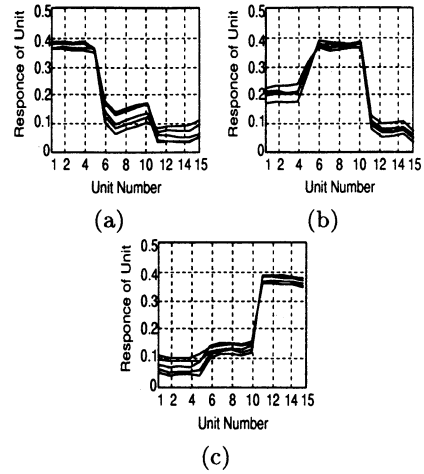


図 7: 改良型 ASSOM における，それぞれの話者のテストパターンに対する競合層ユニットの応答 (a) 話者 A．(b) 話者 B．(c) 話者 C.

るように正規化されている．未知の話者が発した音声信号（各 5 個のテストパターン）の応答と各話者のテンプレートとの類似度を式 (5) により算出する．図 6, 図 7 に，作成した各話者の 5 個のテストパターンを示す．1 つのクラスが未知の音声信号に対して，用意されたすべてのテンプレートとの類似性測度を算出し，各話者における類似性測度の平均値を求める．この平均値をクラスが未知の話者における音声信号と各話者との適合度とする．適合度が最大のクラスを話者として特定する．ここで 提案手法の識別性能を評価するため，識別正解率と識別結果の信頼度を次のように定義する．

$$\text{正解率} = \frac{\text{正しく識別した数}}{\text{全実験数}} \times 100(\%). \qquad (6)$$

$$\text{信頼度} = \frac{\text{正解の適合度}}{\text{正解以外クラス中の最大適合度}}. \qquad (7)$$

識別結果の信頼度はその値が大きいほど正解となるクラスの類似性測度が際立って大きいことを意味し，どの程度明確に正しい識別ができたかという指標になる．従って識別性能は識別正解率が 100 %に近いほど良く，識別結果の信頼度が大きいほど良いといえる．従来手法，提案手法ともに識別率は 100 %であったが，識別結果の信頼度の平均値を算出した際，従来手法が 1.53 であったのに対して提案手法は 2.06 と上がっている．このことから提案手法は従来手法と比較して競合層上における各クラス間の境界を明確にし，より高い信頼性をもつ識別結果を得ているといえる．

5 おわりに

本論文では，従来の ASSOM の分類の境界を明確にすることを目的とした改良型 ASSOM を提案した．提案した改良型 ASSOM の学習では，入力ベクトルと競合層ユニットに与えられたクラスの情報が異なる場合，基底ベクトルを入力ベクトルに対して直交化する方向に更新することで，各クラスの入力ベクトルを競合層上で明確に分離することが可能となった．また，提案手法を利用してファジィテンプレートマッチングを用いた話者の識別を行った結果，従来手法と比較して高い信頼性をもって識別することが可能となった．

参考文献

[1] T. Kohonen, “Self-organized formation of topologically correct feature maps,” *Biol. Cybern.*, Vol.43, pp.59-69, 1982.

[2] T.Kohonen, *Self-organization and associative memory*, Second edition, Berlin: Springer-Verlag, 1988.

[3] T. Kohonen, “Emergence of invariant-feature detectors in the adaptive-subspace self-organizing map,” *Biol. Cybern.*, Vol.75, pp.281-291, 1996.

[問い合わせ先]
〒 820-8502
福岡県飯塚市川津 680-4
九州工業大学情報工学部制御システム工学科
山川 烈
Tel: 0948-29-7712(山川教官室)
Fax: 0948-29-7742
E-mail: yamakawa@ces.kyutech.ac.jp

TC4−2

Randomized ハイパーコラムモデルを用いたジェスチャ認識
Gesture recognition using Randomized Hypercolumn

吉木裕一朗*, 津田竜一*, Tarek El.Tobely**, 鶴田直之*
Youichiro Yoshiki*, Ryu-ichi Tsuda*, Tarek El .Tobely**, Naoyuki Tsuruta*
*福岡大学大学院工学研究科, **九州大学大学院システム情報科学研究科
*Graduate School of Electronics Engineering, Fukuoka University
**Graduate School of Information Science, Kyusyu University

Abstract In this paper, we introduce Randomized Hypercolumn Model (RHCM) and mention about gesture recognition as its application. The hierarchical structure and the topographic mapping of HCM are useful for gesture recognition. Furthermore, randomization technique effectively shortens HCM's execution time.

1 はじめに

筆者らは、自己組織マップ (SOM)[3] を構成要素とする階層型ニューラルネットワークであるハイパーコラムモデル (HCM) をジェスチャ認識に応用する研究をしている。ここでは、実時間処理が重要な課題であり、SOMの高速化が必要不可欠である。本稿では、ジェスチャ認識の概要と、ランダマイズ法を用いたアルゴリズムの改良による処理の高速化について述べる。

2 ジェスチャ認識とその課題

2.1 ジェスチャ認識

ジェスチャ認識は、一般的に2つのステップからなる。

1. 離散状態への変換：時系列画像として与えられたジェスチャを離散的な状態の遷移に変換する。
2. 認識：入力された離散的な状態の時系列を、予めジェスチャのカテゴリに分類されている標本データと照合し、認識結果を出力する。

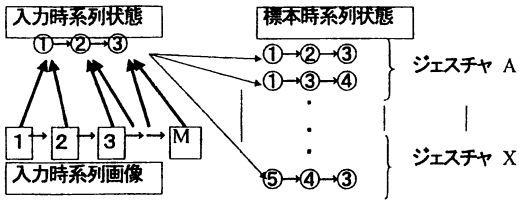


図 1: ジェスチャ認識の一般的な手法

1では、ベクトル量子化の手法を用いるものや画像認識の手法を利用するものがある。また、2では、有限オートマトンを用いるもの [1] や隠れマルコフモデルを用いるものがある。

2.2 ジェスチャ認識の課題

安定したジェスチャ認識を実現するためには、次の4つの点を満足する必要がある。

1. 「状態」を決める妥当な基準
2. 個人差や視点などに不変な「状態」の作り方
3. 身振りの即座に答える実時間処理
4. 動作主体が大きな移動に対する追跡

1について、「手を挙げる」といった概念は、人間にとっては理解しやすいものではあるが、ジェスチャを機械的に認識する上で適当な状態である根拠はない。実際のジェスチャで起こる動きの統計的な性質を利用するために、認識精度を基準としたベクトル量子化や画像認識の学習が用いられるべきである。

2について、ベクトル量子化は、状態を選択する際に個人差や視点の変化などを抽象化する基準が用いられないので、標本画像数が膨大になり現実的ではなくなる。この点に関しては、画像認識の手法が優れている。

3について、処理時間を軽減するためには、状態の変化を予測して照合に必要な候補を絞り込む方法が有力である。しかしながら、ベクトル量子化や画像認識の学習では、状態間の関係が得られず状態の予測が難

しい。これに対して、SOMでは、ジェスチャの変化の位相を保存することができるので、次状態の予測を有効に行うことができる(後述)。

4について、ジェスチャの主体が大きく移動する場合、主体が画像からはみ出さないよう、カメラの視線を動的に制御して主体を画像の中心でとらえることが必要になる。一般には、背景差分方式と呼ばれる画像処理を施して画像上の移動物体領域を抽出してカメラ制御を行う。しかし、複数の移動物体が存在する場合などには利用できず、一般性に欠ける。

SOMは、1と3の要件を満足するものの2と4を満足できない。これに対し、筆者らが提案するHCMは、多層構造による不変認識と選択的注意機構による領域分割[2]を用いて2と4の要件を満足することができる。

本稿では、2と4の要件が不用な特殊な状況では、ジェスチャ認識がSOMを用いて比較的良好に実現できることを示すことによって、HCMの応用の動機を明らかにする。

2.3 SOMを用いた基礎実験

2.3.1 ジャンケンポン画像のベクトル量子化

ジャンケンポン画像をSOMを用いてベクトル量子化した例を示す。用いた画像は160×120画素の濃淡画像である。5人の被験者から得られた872枚の画像を用い、ニューロン数を21として学習したところ表1に示すような標本画像を得た。但し、マップは環状のものを用いている。即ち、0番のニューロンと20番のニューロンが隣接する。被験者には「なるべく手の位置を変えずに」とお願いした。また、背景は単純背景、照明条件も全て一定である。

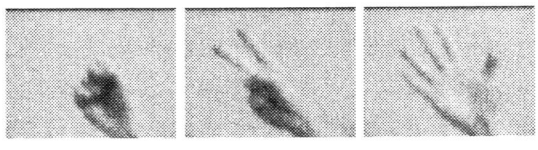


図2: 入力画像の例(左からグー、チョキ、パー)

表1: ジャンケンポン画像のベクトル量子化結果

標本番号	0〜2	3〜9	10〜12	13〜20
カテゴリ	チョキ	パー	チョキ	グー

表1から分かるように、「チョキ」が二つのニューロンクラスタに分割されたもののほぼ動作の位相を保存したマップが得られた。30フレーム/秒のビデオレートに対してジャンケンの手の動きは速く、「グー」「チョキ」「パー」の中間的な状態はあまり検出されなかった。人間の直感に合わせて「グー」「チョキ」「パー」の中間的な状態を均等に用意しても認識効果が上がらないことが分かった。

2.3.2 位相保存性を用いた次状態予測

処理を高速化するためには、現在の状態から遷移し得る状態を特定し、次状態を認識するために参照する標本画像を限定することが効果的である。図3は、2状態間の状態遷移表を示したものである。黒く塗りつぶされたマスは、学習データの中でその状態遷移が起こったことを示す。この表から次状態として起こり得る状態を特定できれば処理速度を向上することができる。

しかしながら、学習サンプル数が十分でない場合は遷移表は状態遷移が疎な表となってしまい、正確な予測ができない。また、サンプル数を増やすという解決法はジェスチャがより複雑で状態数が多くなる例題では現実的でなくなる。

これに対し、SOMでは、位相の保存性により類似した状態遷移は、状態遷移表上の近傍に表れるという性質があるので、これを利用して容易に学習の汎化効果を実現することができる。

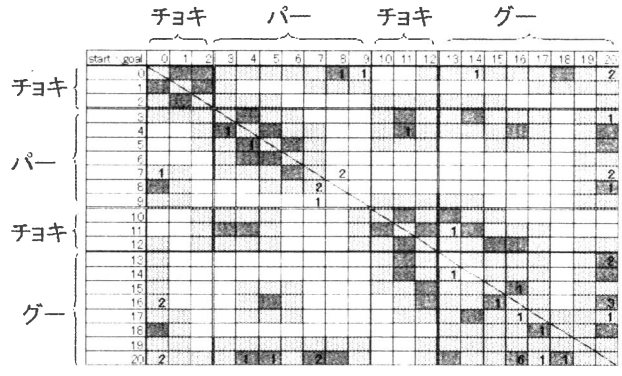


図3: 状態遷移表

表中、灰色に塗りつぶしたマスは、黒マスを一マスずつ拡張して得られた状態遷移である。表中の数字は、テスト画像中に含まれた状態遷移とその数である。この例では、テスト画像中に含まれた状態遷移の96%を黒マスと灰色マスでカバーすることができた。また、次状態の認識に用いる標本画像を黒マスと灰色マスの状態に限定することによって参照画像を62%に限定することができた。全体としてのジェスチャ認識率(ジャンケンポンの勝率)は80%以上であった。

3 ランダマイズ法によるSOMの高速化

本節では、アルゴリズムの改良(ランダマイズ)によるSOMの高速化について述べる。HCMをSOMを構成要素としているので、この高速化より直ちにHCMも直ちに高速化可能である。改良後のSOMとHCMをそれぞれランダマイズSOM(RSOM:Randomized SOM)、ランダマイズHCMと呼ぶ。

3.1 ランダマイズ法の概要

RSOMでは、入力画像と標本画像の全画素の中からランダムにn画素を選択し、それらの画素のみを用いて類似度計算を行う(n/全画素数を画素使用率と呼ぶ)。この処理を一次選択とする。一次選択では、間引き処理した分、処理時間は速くなるが誤った勝者を選択する可能性がある。それを、次に述べる二次選択でカバーする。位相保存性により、標本画像の順序関係が保たれているため、仮勝者の近傍に真の勝者がある可能性が高い。そこで、仮勝者の近傍の何枚かについて全画素数について類似度計算することによって、認識率の低下を防ぐ。

3.2 SOMの認識

SOMの認識は以下の3つのステップからなる。

1. 入力画像と、標本画像($i = 1, 2, .., M$)を入力する。(この処理時間を$\mathbf{C}_1$とする。)
2. 入力画像1枚と、全ての標本画像($i = 1, 2, .., M$)との類似度を全画素数についてユークリッド距離を用いて計算する。(この処理時間を$\mathbf{B}$とする。)

$$D = \sum_i (\mathbf{x}(t) - \mathbf{m}_i(t))^2. \tag{1}$$

   Dが最小となる標本画像cを求める。
3. 求めた標本画像cを勝者の標本画像として出力する。(この処理時間を$\mathbf{C}_2$とする。)

以下の認識過程に要する実行時間は

$$\text{実行時間} = \mathbf{C}_1 + \mathbf{B} + \mathbf{C}_2. \tag{2}$$

と表せる。

3.3 RSOMの認識

RSOMの認識は以下の4つのステップからなる。$\mathbf{C}_1$は入力部分、$\mathbf{B}_1$は一次選択部、$\mathbf{B}_2$は二次選択部、$\mathbf{C}_2$は出力部分である。

1. 入力画像と、標本画像($m = 1.2, ..., M$)を入力する。(この処理時間を$\mathbf{C}_1$とする)
2. N個の画素番号を選択し集合Rとする。入力画像と、全ての標本画像($m = 1, 2, ... M$)との類似度を集合Rについてユークリッド距離を用いて計算する。

$$D = \sum_{r \in R} (\mathbf{x}_r(t) - \mathbf{m}_r(t))^2. \tag{3}$$

   Dが最小となる標本画像pを求める。(この処理時間を$\mathbf{B}_1$とする)
3. 入力画像と、仮の勝者の標本画像pと近傍の標本画像に対して類似度を全画素数についてユークリッド距離を用いて計算する。

$$D = \sum_i (\mathbf{x}(t) - \mathbf{m}_i(t))^2. \tag{4}$$

   Dが最小となる標本画像cを求める。(この処理時間を$\mathbf{B}_2$とする)
4. 求めた標本画像cを勝者の標本画像として出力する。(この処理時間を$\mathbf{C}_2$とする)

ここで、

$$\text{画素使用率} = \frac{\text{ランダムに選ばれた画素数}\ (n)}{\text{全画素数}}. \tag{5}$$

とする。

以下の認識過程に要する実行時間は

$$\text{実行時間} = \mathbf{C}_1 + \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 + \mathbf{C}_2. \tag{6}$$

と表せる。ただし、

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_1' \times \alpha. \tag{7}$$

である。$\mathbf{B}_1'$はコンスタント時間(画素使用率が1の時の時間)、αは画素使用率である。

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_2' \times \beta. \tag{8}$$

である。$\mathbf{B}_2'$はコンスタント時間(近傍の枚数を1つもとらない時の時間)、βは近傍の範囲(近傍の標本画像数+1)である。

3.4 ランダマイズ法を用いた基礎実験

画像のサイズは 160 × 120 である。入力画像は学習に使用していない画像で、グー、チョキ、パーの 3 枚とし、３０枚の標本画像を用いて認識実験を行った。また、使用した計算機は CPU は $Alpha$ 21164A、クロック周波数 $600MHz$ である。

SOM および RSOM の処理時間は、100 回の認識処理を 1 回の試行とし、グー、チョキ、パーを入力とした時の 3 回の試行の平均とした。RSOM の画素使用率は 1、0.2、0.1、0.05、0.025、…、0.001、0.000052 を、近傍の範囲は、3、5、7 枚を用いた。

実行時間と正解率についての実験結果を図 4 と図 5 に示す。

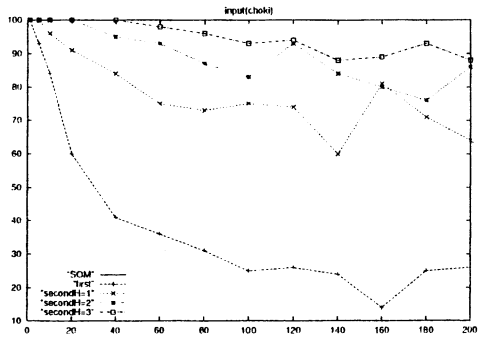


図 4: 入力画の正解率

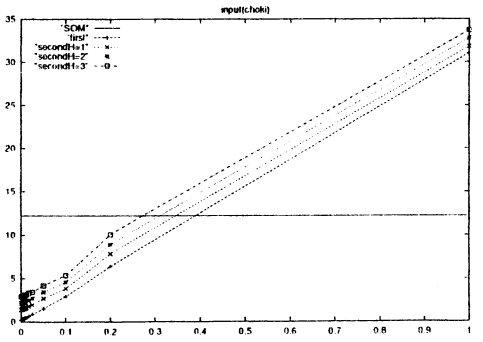


図 5: 入力画像の実行時間

この結果から、SOM の実行時間は式 (2) であるので

$$\text{実行時間} = \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2 + \mathbf{B} = 12.058 + 0.205. \quad (9)$$

で表され、1 枚あたり 0.121 秒で処理できた。それに対し、ランダマイズ法を用い認識率を低下させずに、一次選択部において使用する画素数、また、二次選択部において使用する標本画像を最も少なくしたした時の最適な実行時間は α が 0.05、β が 5 枚のときで、RSOM の実行時間は式 (6) であるので

$$\text{実行時間} = \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2 + \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 = 3.21 + 0.205. \quad (10)$$

と表される。また、ランダマイズ法による実行時間の式を最小 2 乗法を用いて導き出した結果

$$\text{実行時間} = (31.186 \times \alpha) + (0.418 \times \beta) - 0.008812. \quad (11)$$

と導くことができた。上式より 1 枚あたり、0.0321 秒で処理することができる。通常、ビデオでは 1 秒間に 30 フレーム処理することから、ランダマイズ法による処理でほぼ実時間処理が可能であるという結果を導き出した。

4 おわりに

本稿では、まず、安定したジェスチャ認識を実現するためには、次の 4 つの点を満足する必要があることを述べた。

1. 「状態」を決める妥当な基準
2. 個人差や視点などに不変な「状態」の作り方
3. 身振りの即座に答える実時間処理
4. 動作主体が大きな移動に対する追跡

次に、SOM が、1 と 3 の要件を満足することができることを示し、更にランダマイズ法によって 3 についてさらに改善することを示した。今後は、2 と 4 の要件を同時に満足し得るハイパーコラムモデルを用いたジェスチャ認識を実現し、その有効性を検証する。

参考文献

[1] 和田, 佐藤, 松山, " 選択的注視に基づく複数対象の動作認", 電子情報通信学会論文誌 vol. J82-D-2,pp. 1031, pp. 1041, 1999

[2] 鶴田, 谷口, 雨宮, " ハイパーコラムモデル:階層化自己組織マップとネオコグニトロンを統合した画像認識モデル", 信学論 vol.J81-D-II, No. 10, pp. 2288, pp. 2300, 1998

[3] T. コホネン, " 自己組織マップ", シュプリンガーフェアラーク東京株式会社, 1996

[問い合わせ先]
〒 814-0180
福岡市城南区七隈 8-19-1
福岡大学大学院工学研究科
鶴田 直之
Tel: 092-871-6631
Fax:092-865-6031
E-mail:tsuruta@tl.fukuoka-u.ac.jp

TC4−3

自己組織化マップ（SOM）の化学分析データへの適用

Application of Self-Organizing Maps(SOM) to Chemical Data Analysis

山田初幸，Kwaw Obu-Cann，藤村喜久郎，徳高平蔵，吉原一紘 (*)
Hatuyuki YAMADA,Kwaw Obu-Cann,Kikuo FUJIMURA,Heizo TOKUTAKA,
Kazuhiro YOSIHARA(*)
鳥取大学工学部電気電子工学科,
Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Tottori University,
(*) 金属材料研究所
National Reseach Institute for Metals

Abstract The SOM is being applied to chemical data analysis. In this study, the data mining capabilities of SOM are examined using data from Auger Electron Spectroscopy (AES) and X-ray Photoelectric Spectroscopy (XPS). The compositions of the unlabeled spectra whose compositions are unknown can be determined using the SOM method. This method has now been posted on the Internet.

1 はじめに

SOM法 [1] は多次元データを2次元平面に自動的に写像することにより今まで見えなかった情報を可視化できるところに特徴がある．従来の研究により SOM(Self-Organizing Maps :自己組織化マップ) の化学分野への応用から未知合金組成の同定にＳＯＭ法が有効であるかことが分かっている [1]．本研究では SOM を，オージェ電子分光法 (AES;Auger Electron Spectroscopy)，X線光電子分光法 (XPS:X-ray Photoelectron Spectroscopy) データに適応する．

2 SOMによる未知組成の同定

2.1 化学分析にSOM法を適用する意義及び目的

従来，化学分析にはスペクトルに含まれているピークのエネルギー位置，高さや半値幅，ピークの数などを決定しなければならなかった．そして今回使われる鉄ニッケルなどの合金でサンプルにない混合比のスペクトル波形を予測するのは困難である．SOM 法を用いることによって従来の方法を用いず波形の予測ができる．具体的には，以下のようなことが期待できうる利点としてあげられる．

- 学習に用いた入力データ以外のスペクトルを予測することができる．
- 未知のスペクトルからその合金の組成を予測できる．
- 2次元マップ (SOM) に写像する事によるデータの可視化と分類が可能．

2.2 組成分析

化学実験によく使用される AES，XPS のスペクトルデータから未知組成の同定を行う．

SOM は数個のデータからその間にあると思われるデータを内挿し低次元に蓄えることができる．この SOM マップからサンプルデータに最も近いユニット (Best Match Unit) を探し出しそのデータを引き出す．具体的には各ユニットとの誤差二乗和を計算し，最小のものを Best Match Unit としている．

入力データに組成情報を入れておくことにより，引き出した学習後のマップのデータから組成情報を読み取ることが出来る．つまり，入力データの組成情報が補間されることになる．

3　化学分析データへの適用

AES　オージェ電子分光法（AES）は，細かく絞った電子線を固体表面に照射し，発生するオージェ電子のエネルギーと強度を測定することにより，固体表面に存在する元素の種類と量を同定する方法である．

XPS　X線光電子分光法（XPS）は，固体表面に軟X線を照射し，光電効果により表面から飛び出す光電子のエネルギーと強度を測定することにより，表面に存在する元素の数と種類を同定する方法である．

3.1　データの前処理

SOM用の入力データとして以下の前処理を行なう．AESではスペクトルの高エネルギー側からバックグラウンドを引き，590eV～890eVのエネルギー範囲での信号値の最大値と最小値を用いて各エネルギーでの信号値を規格化する．XPSではAESの場合と違ってFeとNiの信号は異なったエネルギー範囲に存在する．FeのXPSデータとNiのスペクトルを用い，双方を感度係数で較正する．そしてNiのデータとFeのデータの規格化を行う．これをSOM_PAK[2]のデータ書式に準じたファイルにする．ファイルはテキスト形式で1行に各要素を記述する．

3.2　実験方法

図1に今回使用したAES，XPSのスペクトルデータグラフをまとめたものを示す．AES，XPSともにFeNi合金を用い，AESでは運動エネルギー1eVを1次元と考え320次元とした．またXPSでは，結合エネルギー0.05eVを1次元と考え550次元とした．これらを適用し2次元平面上へ可視化を試みる 図1に示される5つのスペクトルデータ（Fe100Ni0，Fe80Ni20，Fe50Ni50，Fe30Ni70，Fe0Ni100）をSOMを用いてマップ化し，そのマップの各ユニットの組成の度数分布を見る．また5つのデータの内，Fe80Ni20だけを抜き出した4つのデータを使ってマップを作りそのマップから得られるBest Match Unitとサンプルデータ（Fe80Ni20）を比較する．

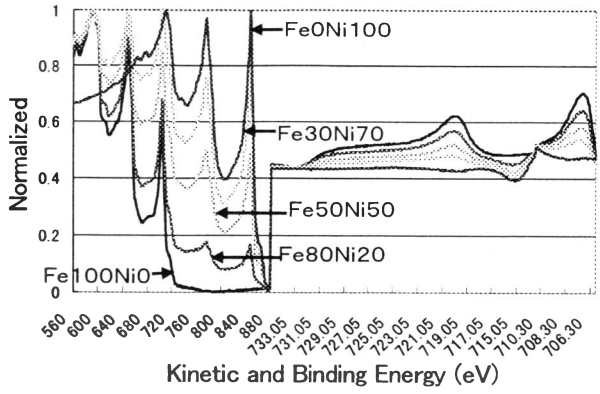


図1: FeNi合金のAES+XPSスペクトル波形図（Normalized; 規格化 Kinetic Energy; 運動エネルギー Binding Energy; 結合エネルギー）

3.3　結果及び考察

図2に5つ全てのデータを使ったSOMマップ，図3にその組成度数分布図，図4に5つの内1つのデータを抜き出し4つのデータでマップを作り，それにBest Match Unitを示した図(マップ中のWiner Numberは左上から247番目がBest Match Dataを示すことを意味している)，図5は抜き出したデータとBest Match Dataのスペクトルの比較図をそれぞれ示す．図2，図4より，SOM法によって多次元の化学分析データがマップ上で可視化できる事が分かる．また図5より学習した結果と比較すると，求めたいスペクトル情報をマップより簡単に抽出でき，組成比の情報も小さい誤差で抽出できた．よって未知の組成のデータを用いての組成の同定とスペクトル再現には非常に有効であった．

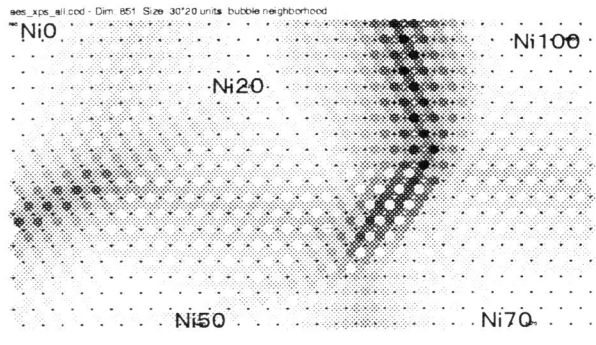


図2: FeNi合金のAES＋XPSスペクトルデータのSOMマップ

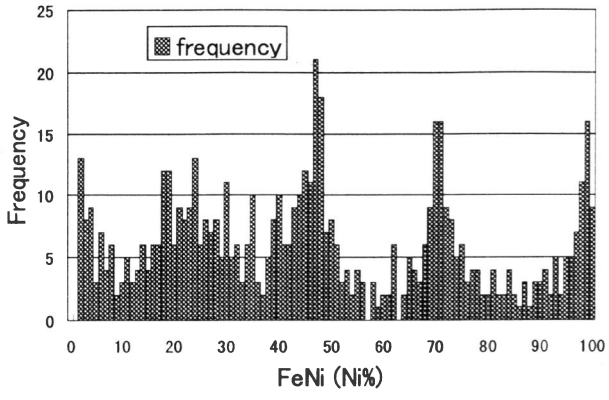


図 3: AES + XPS スペクトルデータから作られた SOM マップ上の各ユニットの組成度数分布図

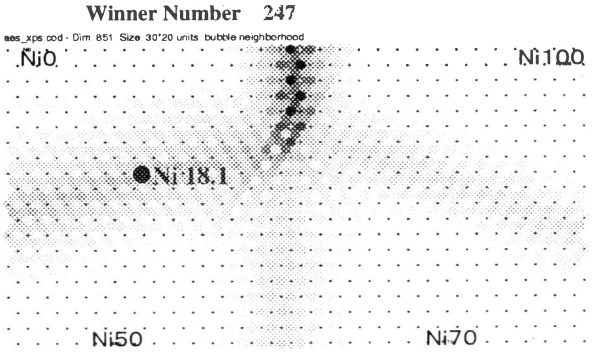


図 4: Fe80Ni20 を抜き出して作った AES + XPS スペクトルデータによる SOM マップ（●は Ni20 の Best Match Unit の位置する場所を示す）

4 インターネットを用いたスペクトル解析

ここでは，インターネット上でのスペクトル解析に使用する XPS のマップを作成した．

4.1 データについて

次の 4.2 で示す COMPRO にある標準データの元素周期律表からの XPS データを 69 個用い，結合エネルギー 1eV を 1 次元と考え 1000 次元のマップを作る．図 7に使用した XPS 元素の種類を，図 8に出来上がったマップを載せた．

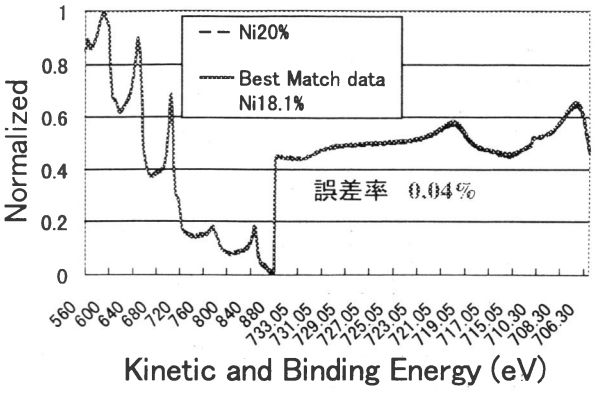


図 5: AES + XPS スペクトルデータ比較

4.2 COMPRO—Common Data Processing System

今回，データの作成，加工に使用したアプリケーション “COMPRO” は表面分析研究会 (SASJ–the Surface Analysis Society of Japan) において吉原一紘氏等によって開発された．これは AES と XPS のスペクトルデータを共有して，科学的なジャーナルで発行されるデータ処理手順を評価して，分析器を較正するソフトウェアである．ソフトに含まれるラウンド·ロビンデータ[1]を使って様々なスペクトルを得ることができる．図 6に COMPRO から得た XPS のスペクトルデータの一例を示す．

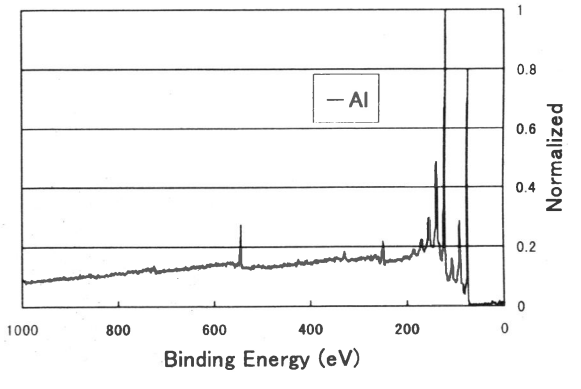


図 6: COMPRO からの XPS スペクトルデータの一例（Al）

[1]同一のサンプルを使ってのいろいろな研究所で得られた合金のスペクトル

Al	ArC	As	Au	BN
B	BaCO	Ba	Be	Bi
C	CaF	Ca	Cd	Ce
Zr	Co	Cr	CsCl	Cu
Dy	Er	EuO	Fe	Ga
Gd	Ge	Hf	Hg	Ho
In	Ir	KBr	KI	LiF
LiO	Lu	Mg	Mn	Mo
NaCl	Nb	Nd	Ni	P
Pb	Pd	Pt	Rb	Re
Rh	Ru	S	Sb	Sc
Se	Si	Sm	Sn	Sr
Ta	Tb	Ti	Tm	V
W	Y	Yb	Zn	

図 7: 69 個の XPS 元素の種類

4.3 まとめ

今回は，マップだけになったが最終的にはこれを使ったインターネット上での化学分析に発展させていこうと考えている．現在はまだ途中の段階で 2 種類の合金組成解析しか行えないのだが最後にホームページのアドレスと図 9にホームページのイメージを載せておく．

http://app6.ele.tottori-u.ac.jp/web_csom/

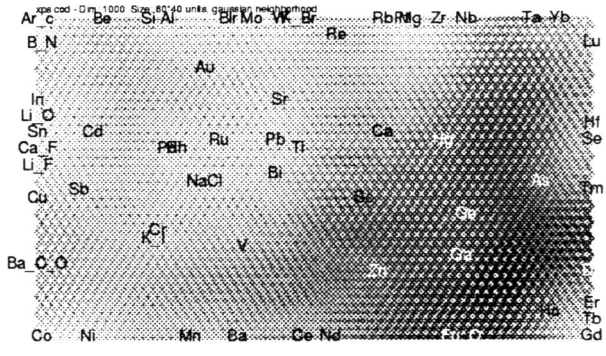


図 8: 69 個の元素を使った XPS データの元素 MAP

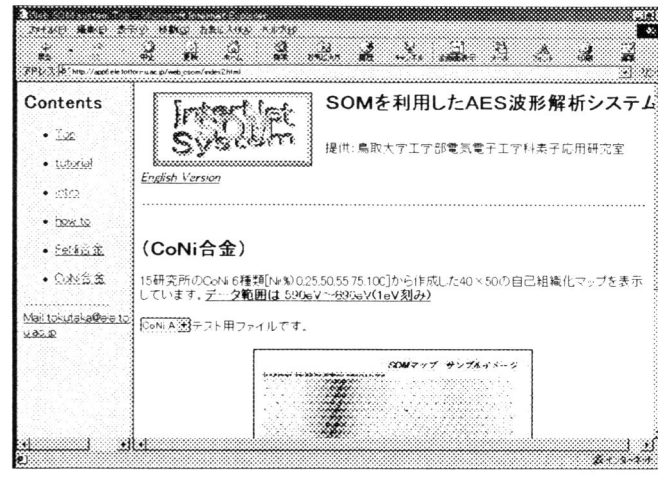


図 9: ホームページのイメージ

参考文献

[1] 徳高平蔵 岸田悟 藤村喜久郎，“自己組織化マップの応用—多次元情報の 2 次元可視化—”，海文堂， 1999.

[2] Teuvo Kohonen 徳高平蔵 岸田悟 藤村喜久郎，“自己組織化マップ”，シュプリンガー・フェアラーク，1996.

[問い合わせ]

〒 680-0945
鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101 番地
鳥取大学電気電子工学科
藤村喜久郎
TEL(0857)31-5243
FAX(0857)31-0880
E-mail fujimura@ele.tottori-u.ac.jp

TC5−1

ＳＯＭを用いた特徴的キーワードツリーによる文書ディレクトリ自動生成方式の検討

A study on Hierarchical Document Organization from discriminative keyword patterns of categorized documents using Self-Organizing Maps

窪野　哲光
Norimitsu KUBONO
東京電力
Tokyo Electric Power Co.

Abstract Documentation created and outputed by employee thorugh their works, which are essential information resource for Company Business Activity. So, with the aim of the development of new techniques to rapidly and accurately find the required information from amount of documentation, we resarched a self-organizing semantic maps based information organizer and visual exploration interface for text retrieval using SOM(Self-Organizing Maps) . The research theme on documentation clustering which belongs to learning without supervisor is automatic topic extraction and navigation along the hierarchical documentation organization. In this paper, we propose a new techniques on automatic topic extraction and navigation which is based on hierarchical document organization from discriminative keyword patterns of categorized documents using SOM and document encoding scheme and important keywords which is suitable for japanese natural language. Those topics are readable and understandable knowledge discoveried in document databases.

１．はじめに（問題意識）

大量の文書情報から所望する文書を迅速に得るための情報検索と，情報管理システムやハイパーリンクシステムの構築に必要となるキーワード付けやリンク付け等の人手による作業の低減を目的として，文書情報の組織化の検討を進めている．今までに，文書中に出現する重要語彙（単語，複合語＝未知語）の自動抽出によるキーワード検索と，キーワードを介した文書のブラウジングと，SOM(Self-Organizing Maps)を用いた文書集合の可視化自動分類の研究を進めてきた[1].

文書の自動分類の技術は，大別してクラシフィケーションとクラスタリングとの２種類がある．クラシフィケーションはカテゴライゼーションとも呼ばれ，既存の分類体系に文書を割り当てるものであり，分類は汎用的になる傾向があり，新トピックへの対応は難しい．また，学習教師例や分類キーワード等を人手で与える必要もある[2]．一方，教師なし学習のクラスタリングは，文書集合の構造を反映したクラスタに分けることであり，事前に分類すべきカテゴリや文書例が与えられているクラシフィケーションとは異なり，それぞれの類似文書がどのような話題に関するものか，また文書全体がどのような体系で分類されているのかといった情報も生成しなければならない[3].

SOM は入力データのベクトル空間の情報構造を客観的に可視化することにより，探索的データ分析や情報検索などの多くの応用への可能性を示している．しかし，インタフェースという観点から見ると，現時点では，クラスタへの最適なラベル付け，インタラクティブ性，視点の設定などに制約があるために，データ集合の概観を表示できるシステムにとどまっている．

SOM を用いた文書集合の自動分類の研究では，日本語を扱う際の文書特徴表現モデル（テキストコード化）が不十分[4]，クラスタへのラベル付けについては，他のクラスタにも頻出するキーワードが選択されることもあるため，各クラスタの特徴を十分に表しているとは言えない[4][5]，という問題点がある．分類された文書集合から，各クラスタを他のクラスタと識別する特徴的キーワードの自動抽出が必要である．

そこで，本稿では，自然言語処理を適用した日本語特有の複合語の自動抽出と重みづけを用いた文書特徴表現モデルと，SOM のベクトル量子化であるコードベクトルを用いて，各クラスタに含まれる文書集合を特徴づける重要語彙を自動的にかつ的確に抽出し，文書クラスタへの特徴的なラベル付けを行う．更に，それらを階層的に組合せた特徴的キーワードツリーというデータベースから獲得した知識を，人に理解しやすい文書ディレクトリで表現する方式を開発した．

2．関連研究（ラベル付け，文書の階層整理）

テキストマイニング手法の相関ルールを用いた，分類された文書集合のクラスタへの特徴的なラベル付け方式の提案がされている[6]．単独のキーワードでは十分に特徴づけできないクラスタに対しても，キーワードの組み合わせにより特徴づけることはできるが，２キーワードの相関関係のみの抽出でありキーワード集合間の関係の抽出がされていないこと，階層的分類までの検討はされていない．

同じように相関ルールを用いて，キーワード集合からキーワードの同値・階層関係を抽出し，これを用いて文書集合を階層ディレクトリとして整理する方式が提案されている[2]．本研究と研究動機は似ているが，同手法は静的な文書ディレクトリを生成するものであり，動的な可視化情報探索プロセスの支援を主眼とする本研究とは，目的および手法は異なる．

キーワードツリーを用いて，Web ブラウザのブックマークの自動整理を支援する提案がされている[7]．キーワード抽出方式と文書特徴表現モデルとキーワードツリーの生成方式が単純であるため，意味的には繋がりのないツリーが沢山できるという問題点がある．

3．システム構成

（１）文書特徴表現モデル部（特徴ベクトル生成）

詳細は別稿にゆずるが，テキスト・ワープロ文書を対象に，文書を特徴づける重要語彙（単語，複合語＝未知語）の自動抽出と重みづけを行い，文書をベクトル空間モデル方式[8]で表現する．この文書特徴表現ベクトルを SOM の入力ベクトルとして学習させる．

（２）ＳＯＭ学習部（計算サーバ）

SOM_PAK(Unix版)をWindows95/98/NT4.0上で利用できるようにmakefileし直すと共に，別のPC上にある情報探索インタフェースから対話的利用ができるようにWindows上の分散オブジェクト技術DCOM(Distributed Common Object Model)でカプセル化して組み込む．

（３）インタフェース部（対話的情報探索）

実用化開発済みの「ハイパーリンク型情報管理システム」上に実装し，管理と検索の統合化インタフェースを実現した．同システムの開発言語であるオブジェクト指向言語 Smalltalk の図形処理ライブラリを用いて，操作できる視覚的オブジェクトとしてマップを生成・表示し，対話的情報探索を行う．

4．システム機能とインタラクション

（１）文書分類マップ

SOM により自動分類された各クラスタ（コードベクトルの最大重み値を持つキーワードが同一であるセル群）に含まれる文書集合を特徴づける重要語彙を自動的にかつ的確に抽出し，各クラスタを他のクラスタと識別するキーワードによる特徴的なラベル付けを行う．クラスタ毎に色分けを行い，クラスタの直感的な理解（クラスタ数，学習計算の妥当性等）を支援することができる．このマップ上で，任意のセル群またはクラスタ群を選択指示し，それらに含まれる文書群の一覧表示と閲覧を行う．また，指定した任意のセル群またはクラスタ群を選択指示することで，利用者の視点に応じたマップの段階的詳細化を進めることができる．更に，文書集合から自動抽出されたキーワード集合に対して除去語を選択指示することで，その利用者にあった視点の設定を行うことができる．

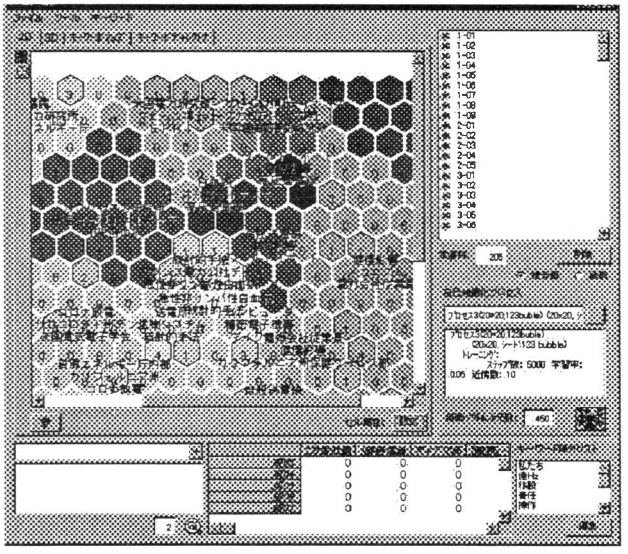


図１．文書分類マップ（２次元）の概観

クラスタ毎の特徴的なラベル付け方式について述べる．ベクトル量子化とは，多数または連続量のベクトルを数少ないベクトルで近似することによりデータ圧縮を行う方法であり，SOM では，出力層の各ニューロンのコードベクトルがベクトル量子化に相当する．SOM のベクトル量子化を知的で柔軟性のある内挿手法として評価する提案[9]がされており，SOM の今後の応用として注目に値する．本研究でも，最適なデータ圧縮のために SOM のコードベクトルに着目する．

まず，文書集合における語彙の偏りを表す統計モデルである tf*idf 法[8]を，複合語を重視した方式に拡張する．その計算方式をコードベクトル群の重みに適用することで，他のクラスタにも頻出するキーワードが選択されないように，各クラスタを他のクラスタと識別するキーワードによるラベル付けを与えることができる．キーワードは複合語であるため，分野や内容を特徴づける重要で具体的なラベル名となっている．

マップ上のラベルの最適配置も難しい問題であり，計算機幾何学で用いられる手法（例えば，多角形の重心，重なり判定など）では，同じラベル名を持つクラスタが分離された場合には対応できない．そこで，SOM のセルが格子状に配置されていることに着目し，セルに含まれる文書数の円周方向の分布により，最大の重みをもつセルをラベル位置として決定している．

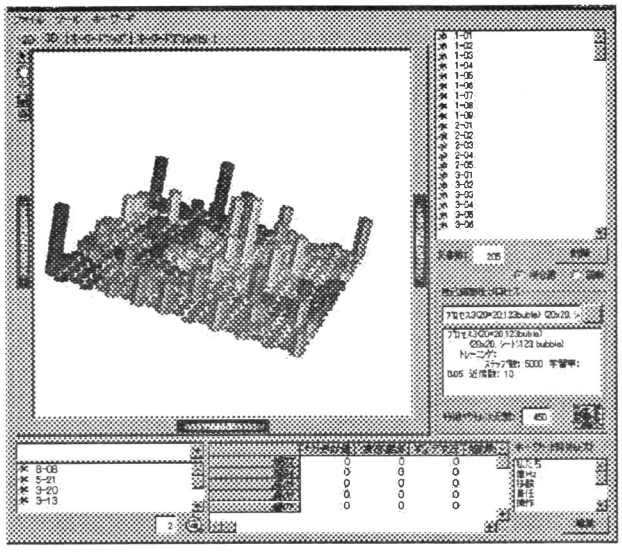


図２．文書分類マップ（３次元）の概観

３次元マップは，２次元マップの各セルに含まれる文書数を高さとするシリンダで３次元表示したものであり，クラスタ群の直感的な理解（クラスタ数，学習計算の妥当性等）を支援することができる．OpenGL ライブラリを用いて，３次元マップの拡大／縮小，回転などの高速表示を行うと共に，シリンダを選択指示することで，そのセルに含まれる文書群を一覧表示し閲覧することができる．

計算条件（入力ベクトル，マップの大きさ，学習条件等），学習結果（出力ベクトル，２次元／３次元マップ画像等）の保存と再利用，VRML ファイルへの変換・保存と再利用など，試行錯誤的なシミュレーションと探索的データ分析を支援している．

（２）文書ディレクトリ

文書情報検索における知識は文書データベースの中に存在するため，その情報構造を抽出し，可視化することは，情報探索を進める上で利用者にとって非常に有益である．データベースからの知識獲得（KDD:Knowledge Discovery in Databases）やデータマイニングの分野で知識をルールとして抽出する研究が活発であり，知識表現形式としては決定木や if ～ then ～ルールなどがよく利用される[10][11][12]．そもそも，文書特徴表現モデルのようなベクトルの場合には，決定木は精度が落ちるため適用できないという問題点がある[12]．また，決定木などは予測モデルとしては精度は高いが，大規模・多次元（多属性）の文書集合の知識の表現形態としては，複雑で大きな木は人にはとても理解できないという認知的な限界もある．人に理解できるルールを生成することが重要であるため，文書情報管理・検索で馴染みのある文書ディレクトリの分類階層的構造を知識の表現形式として与える．

知的で柔軟性のある SOM のコードベクトルに着目した，以下の２方式の検討を行い実装をした．

（ａ）ＳＯＭによるアプローチ

文書ディレクトリは，クラスタの階層の深さ，または，最下層のセルに含まれる文書数を指定し，上述した文書分類マップの段階的詳細化を一貫自動処理することで得られる．文書ディレクトリのラベル付けは，上述したクラスタ毎における特徴的キーワードをクラスタの階層にあわせたキーワードツリーを用いる．文書ディレクトリの階層を辿ることで，キーワードの AND 条件検索に相当する文書が一覧表示される．決定木や if ～ then ～ルールなどの知識表現と比較をして，階層が浅く，理解しやすい構造になっている．

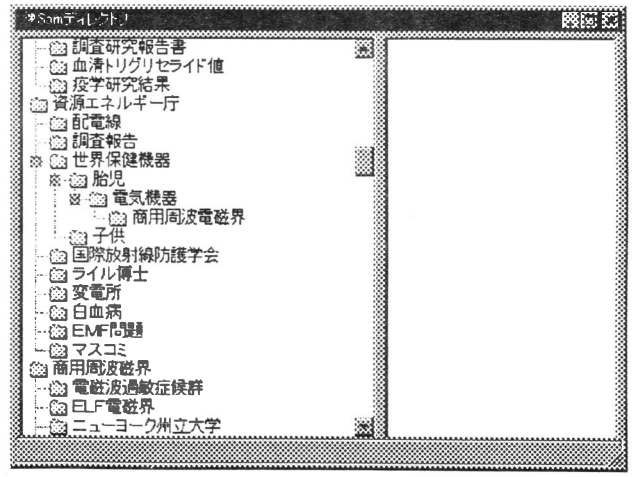


図３．文書ディレクトリの表示例

(b)グラフ理論によるアプローチ

SOM のコードベクトルは，文書集合の空間をデータ圧縮すると共に，文書が含まれないセルに対しても内挿を行う文書特徴表現ベクトルである．このコードベクトル集合を文書集合とキーワード集合の２部グラフと見なしてグラフ分割理論[13]を応用することで，キーワード集合からキーワードツリーを機械的に抽出することができる．２部グラフ理論を適用するためには，コードベクトルの重み値に閾値を与えて０／１行列に変換する必要がある．また，大規模な文書集合に対する見やすさを向上させるために，キーワードの個数を制限する必要がある（文書とのグラフ数の多い上位キーワード）．文書ディレクトリの階層を辿ることで，キーワードの AND 条件検索に相当する文書が一覧表示されるが，コードベクトルの重み値の閾値とキーワード個数の制約により，文書集合とキーワード集合の内容を動的に変えて見せることができるため，インタフェース分野で注目されているズーミングインタフェース，動的検索[14]も実現している．

知的で柔軟性のある SOM のコードベクトルに着目した２つの文書ディレクトリ自動生成方式は，一つは人間の生理学的知見に適していると言われる SOM によるアプローチであり，他方は工学的なグラフ理論によるアプローチである．生成された文書ディレクトリを比較検討すると，SOM によるアプローチの方が人に理解しやすい分類階層構造（水平方向の分類数，垂直方向の階層数，文書ディレクトリのラベルである特徴的キーワードツリー等）を与えていることが多い．今回の検討では，グラフ理論を用いたアプローチの方は，コードベクトルの重み値を閾値で０／１行列に置き換えたが，重みを考慮するグラフ理論を適用することで，より精度と認知性が向上すると思われる．

5．おわりに

電力流通設備に関するＱ＆Ａ集等の文書集合を題材として，利用者の情報活用という側面からの検証を進めている．今後の方向として，以下を計画している．

・文書ディレクトリ自動生成方式の精度向上

SOM によるアプローチとグラフ理論によるアプローチの両方式の比較検討を進め，精度向上を図る．

・他のデータマイニング手法との比較検討

トピック抽出を指向したリンク分析手法である KeyGraph[15]の提案がされており，キーワード連鎖・キーワードツリーという観点から比較検討を行う．

参考文献

[1]窪野：自己組織化ﾏｯﾌﾟ型情報検索ｲﾝﾀﾌｪｰｽの検討，第 15 回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑ ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ,Jun.1999

[2]津田：ﾃｷｽﾄﾏｲﾆﾝｸﾞを用いた文書のﾃﾞｨﾚｸﾄﾘ整理,日本ｿﾌﾄｳｪｱ科学会第 15 回全国大会,1998

[3]武田,野見山：ﾃｷｽﾄ情報の可視化を利用した情報検索,情報処理学会学会誌 Vol.41,No.2,Apl.2000

[4]銭,波多野,田中:３次元自己組織化ﾏｯﾌﾟに基づく文書のﾌﾞﾗｳｼﾞﾝｸﾞと検索,情報処理学会 DBS 研 104-6,1995

[5] K.Lagus,T.Honkela,S.Kaski,T.Kohonen: Self-organizing maps of document collections: a new approach to interactive exploration,Proceedings of KDD'96,,AAAI

[6]小中：分類された文書集合における特徴的なｷｰﾜｰﾄﾞﾊﾟﾀｰﾝの抽出,情報処理学会第 57 回全国大会,1998

[7]松塚：ｷｰﾜｰﾄﾞﾂﾘｰを用いたﾕｰｻﾞｰ適応型ﾌﾞﾗｳｻﾞの開発 http://www.aist-nara.ac.jp/~takesi-m/

[8]岸田：情報検索の理論と技術,勁草書房,1998

[9]神酒,大迫,山川:自己組織化ﾏｯﾌﾟの内挿機能を利用した新しい補間ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑの提案,第 15 回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑ ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ,Jun.1999

[10]Special issue on Knowledge Discovery,Communications of the ACM,Vol.42,No.11,1999

[11]S.Sestio,T.S.Dillon:Automated Knowledge Acquisition,PRENTICE HALL,1994

[12]月本：実践ﾃﾞｰﾀﾏｲﾆﾝｸﾞ,ｵｰﾑ社,1999

[13]杉原,伊理：２部ｸﾞﾗﾌの分割理論を利用した概念構造決定法,ｵﾍﾟﾚｰｼｮﾝｽﾞ･ﾘｻｰﾁ,Vol.23,No.8,1978

[14]増井：情報視覚化の最近の研究動向,情報学ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ,Jan.2000

[15]大澤,須川,谷内田：ｸﾞﾗﾌに基づくｷｰﾜｰﾄﾞ抽出法 KeyGraph のﾃﾞｽｸﾄｯﾌﾟ整理への転用,情報処理学会 ICA 研究会 112-2,1998

[問い合わせ先]

〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町４－１

東京電力（株）システム研究所 ＭＤＢグループ

窪野 哲光

Tel:045-613-5155(直) Fax:045-613-5199

E-mail: t0680033@pmail.tepco.co.jp

TD1−1

ファジィ理論的手法を用いたカラーネーミングシステム

A color-naming system using fuzzy set theoretical method

菅野 直敏
Naotoshi Sugano
玉川大学 工学部
Faculty of Engineering Tamagawa University

Abstract. A fuzzy system which vague colors can be expressed in words (usually adjectives) was considered in this study. The words (as color names) are consisting of a hue name with its modifier or only a hue name. This system can translate from input data in the hue system to color names (as the output). Triangular membership functions are applied to the hue angle, and conical membership functions are applied to the relationship between the lightness and the saturation. By regarding the membership function of tone modifier as a fuzzy relation between the lightness and the saturation, we can easily obtain a membership grade of target modifier as output fuzzy set from projection of input fuzzy set. Vague colors are indicated by about three modifiers with each grade. For a known hue name (e.g., red) this fuzzy system which can find out a few tone modifiers (e.g., dark, dull, deep, etc.) suitable for color names in common use is proposed in this paper.

1．はじめに

多種多様な色彩を我々の目は巧みにとらえて判断することができる．また「これは何色か」と聞かれたとき，我々は自分の知っている範囲内で修飾語を用いて簡単に表現することができる．しかし，色彩名を客観的に表現することは難しい．そこで，いろいろな色を形容詞で簡単に表現できるファジィ・カラーネーミングシステムを構築してきた[5)-9),11)]．色相名を決定する方法は鈴木ら[11)]によって提案されている．しかしトーン修飾語を獲得する問題はいかにトーン平面（等色相面）上にメンバーシップ関数を作るかである．ファジィ理論的手法を用いたトーン表現をもつカラーネーミング手法はまだ報告されていない．本研究では明度と彩度の関係に円錐形メンバーシップ関数を使用し，JIS 規格[1),2),3),4)]に近い色名にすることを考えた[13)-17)]．

2．色の表示

2．1 色相系

色は一般に色相（単色光の波長に相当するもの），明度（明るさ即ち光の強弱），および彩度（鮮やかさ即ち白みを帯びていない度合）の三要素によって規定される．色相系では HVC 系と HLS 系が使われる．

2．2 色と色名

色は有彩色と無彩色に大きく分けられる．無彩色は色みのない色のことで，有彩色はその他の色である．

色名は大きく系統色名と慣用色名に分けられる．系統色名はあらゆる色を系統的に分類して表現できるようにした色名，慣用色名は慣用的な呼び方で表した色名である．以下は JIS 規格に定められている系統色名である[1)]．

系統色名は(1)の基本色名に(2)の修飾語を付けたものとする．

(1)基本色名：有彩色の基本色名は赤，黄赤，黄，黄緑，緑，青緑，青，青紫，紫，または赤紫の何れかを用いる．無彩色の基本色名は白，灰色，または黒を用いる．

(2)明度と彩度に関する修飾語：有彩色には鮮やかな，明るい，こい，うすい，くすんだ，暗い，ごくうすい，明るい灰，灰，暗い灰，またはごく暗いの何れかを用いる．無彩色には灰色に限り「明るい」か「暗い」を用いる．

3．方法と結果

本研究では明度(L)と彩度(S)よりトーン修飾語を求めるのに，明度-彩度平面上で各修飾語に応じた円錐形のメンバーシップ関数を取る方法[9),10)]を使った．明度-彩度平面の修飾語は色み・明るい・こいの３つで表現されているので，円錐を密に組み合わせると正三角形に詰め込むことができる．トーン修飾語を求めるのに JIS で定められた等色相面図には円錐形のメンバーシップ関数が，すべての S,L 値をカバー出来ない場合がある．従って，等色相面図をスウェーデンのＮＣＳ(Natural Color System)[12)]のように正三角形で表すことを考えた．

ファジィルールを以下に示す（図１と図２の右下参照）．

ルール R^k (k=1, 2, ..., n)

R^1 : IF x is A_1 THEN y is B_1
R^2 : IF x is A_2 THEN y is B_2
・
R^k : IF x is A_k THEN y is B_k
・
R^n : IF x is A_n THEN y is B_n

ただし，$x=(x_1, x_2)$， $y=(y_1, y_2)$．ここで，k はルール番号，n はルール数，A_k と B_k は前件部と後件部のファジィ集合．x と y は入力と出力のベクトル，ルール R^k の前件部 A_k と後件部 B_k はそれぞれの平面上の領域を示しており，入力が A_k ならば出力は B_k である．これらのメンバーシップ関数は円錐形である．

図１は明度-彩度平面上の（各修飾語に応じた）ファジィ集合（A_1〜A_{21}）であり，その円錐形メンバーシップ関数の底面（円）を密に組み合わせたものであ

る．隣り合う底面（円）は互いの中心を通るようにしてある．また明度上の三角形のメンバーシップ関数は右から光があたったときの射影（L_1～L_{11}）であり，彩度上の三角形のメンバーシップ関数は下から光があたったときの射影（S_1～S_6）である．

図2は図1の円錐形メンバーシップ関数に対応した修飾語を並べたもので，領域を隣接する円で表した．このファジィ集合（B_1～B_{21}）は図1と同じメンバーシップ関数である．名前の付け方はJISのトーンを区分する修飾語（図4参照）とほぼ同じにしてある．相違点は無彩色の「灰色」，有彩色の「くすんだ」と「鮮やかな」をそれぞれ2つのメンバーシップ関数に割り当て，「ごく鮮やかな」を最大彩度[12]の修飾語とした．これらは平面上で広い範囲を占めるからである．

ここで色相（色あい）は赤が選ばれたとして説明する．「くすんだ」，「こい」および無修飾（基本色名のみ）の各円錐を考える．図3はクリスプ入力に対する修飾語の度合を示している．度合はメンバーシップ関数としての各円錐の中心とクリスプ入力との距離から求まる比をとることによりα，β，γを求めることができる．$\beta = (r-d)/r$．ここでrはメンバーシップ関数の底面（円）の半径，dは円の中心から入力までの距離である．ファジィ入力のときは距離比より求まったβの高さをもつ台形の角にファジィ入力の射影（三角形）の中心を合わせることにより簡単にβ'を求めることができる．α'とγ'は同様に求まる．

ここではほぼ「くすんだ赤」ということになるが，他にも「こい赤」や「赤」だけの名前が選ばれる．また4番目の「暗い赤」に入る可能性もあるが度合も小さいため，ここでは省略する．いちばん大きな度合αをもつ「くすんだ赤」，他にもβの「こい赤」やγの「赤」の名前が選ばれている．JISの表現では「くすんだ赤」だけであるが，ここでは①「くすんだ赤」，②「こい赤」，および③「赤」の順となる．

図4は楕円錐をHVC系の等色相面上の修飾語群に当てはめたシステムである．JISの22個の修飾語領域に合った楕円（楕円錐の底面）を与える．楕円は領域の3あるいは4の角を通るようにしてある．楕円と領域の縦横の比は一定である．各色相によってこれらの領域は異なる．有彩色は20の色相を11個の修飾語で表現し，例えば[トーン修飾語：暗い]＋[色相名：赤]→「暗い赤」となる．しかし無彩色も含めると，1つの色相に22個の違う楕円錐を作らなければならない，すなわちHVC系では約440種類（＝22楕円錐×20色相）のメンバーシップ関数が必要となる．もしも異なった楕円錐に対して同じ円錐を使えばこのシステムでは少なくとも22個のメンバーシップ関数だけで良いことが分かる．HVC系（図4）の代わりにHLS系（図5）を用いることにした．図5は同じ形の円錐でHLS系の等色相面上の修飾語群に当てはめたシステムである．

4．まとめ

既知の色相で明度と彩度の関係から系統色名（色のようすを示す組み立てた色名による適当な表現）に必要な修飾語を見つけるシステムを考えた．システムの特徴は *i)*明度-彩度平面上においてファジィ集合を各修飾語に応じた同一円錐形のメンバーシップ関数群で表し，有彩色と同じように無彩色も取り扱うことができる．*ii)*修飾語のメンバーシップ関数を明度と彩度のファジィ関係と考えるとメンバーシップ関数の射影の関係から修飾語の度合を簡単に得ることができる．

参考文献

1) 日本工業標準調査会編(1985)：日本工業規格 物体色の色名．日本規格協会
2) 川上(1992)：色のおはなし．日本規格協会
3) 日本工業標準調査会編(1993)：日本工業規格 色の表示方法 -三属性による表示-．日本規格協会
4) 平井(1993)：色をはかる．日本規格協会
5) 朝倉，高橋，菅野(1995)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑ．ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会 第5回ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ 講演論文集，pp. 120-121
6) 高橋，朝倉，菅野(1995)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑ．第11回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集，pp. 595-598
7) 菅野，鈴木，高橋(1996)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑⅡ．ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会 第6回ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ 講演論文集，pp. 32-33
8) 朝倉，高橋，菅野(1996)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑ．玉川大学工学部紀要 第31号 pp. 165-170
9) 朝倉，福沢，中田，菅野(1996)：ﾌｧｼﾞｨによる色彩表現．第12回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集 pp. 529-530
10) 井上，亀井，井上（1996）：遺伝的ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑと超円錐形ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数によるﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙ自動生成手法の提案．日本ﾌｧｼﾞｨ学会誌 Vol. 8 No. 6 pp. 1104-1115
11) 鈴木，高橋，菅野(1997)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑⅡ．玉川大学工学部紀要 第32号 pp. 97-104
12) Lars Sivik(1997): Color systems for cognitive research. In Color categories in thought and language, C. L. Hardin and Luisa Maffi, Ed., Cambridge University Press, New York, pp.163-193
13) 菅野(1999)：色名による色の表示方法のﾌｧｼﾞｨ理論的考察．日本ﾌｧｼﾞｨ学会 関東支部 特別ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ pp. 38-43
14) 菅野(1999)：色名による色の表示方法のﾌｧｼﾞｨ理論的考察．日本ﾌｧｼﾞｨ学会 第9回ｿﾌﾄｻｲｴﾝｽ・ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ pp. 135-138
15) 菅野(1999)：色名による色の表示方法のﾌｧｼﾞｨ理論的ｱﾌﾟﾛｰﾁ．第15回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集，pp. 757-760
16) N. Sugano(1999): A fuzzy set theoretical approach for color specification using color names, Proceedings of IEEE-SMC'99, vol. VI, pp.230-235
17) N. Sugano(2000): Color-naming system using fuzzy set theoretical method, Proceedings of AFSS2000 (to be appeared)

問合せ先
〒194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1
玉川大学工学部電子工学科　菅野 直敏
Tel:042-739-8402 Fax:042-739-8858
E-mail:sugano@eng.tamagawa.ac.jp

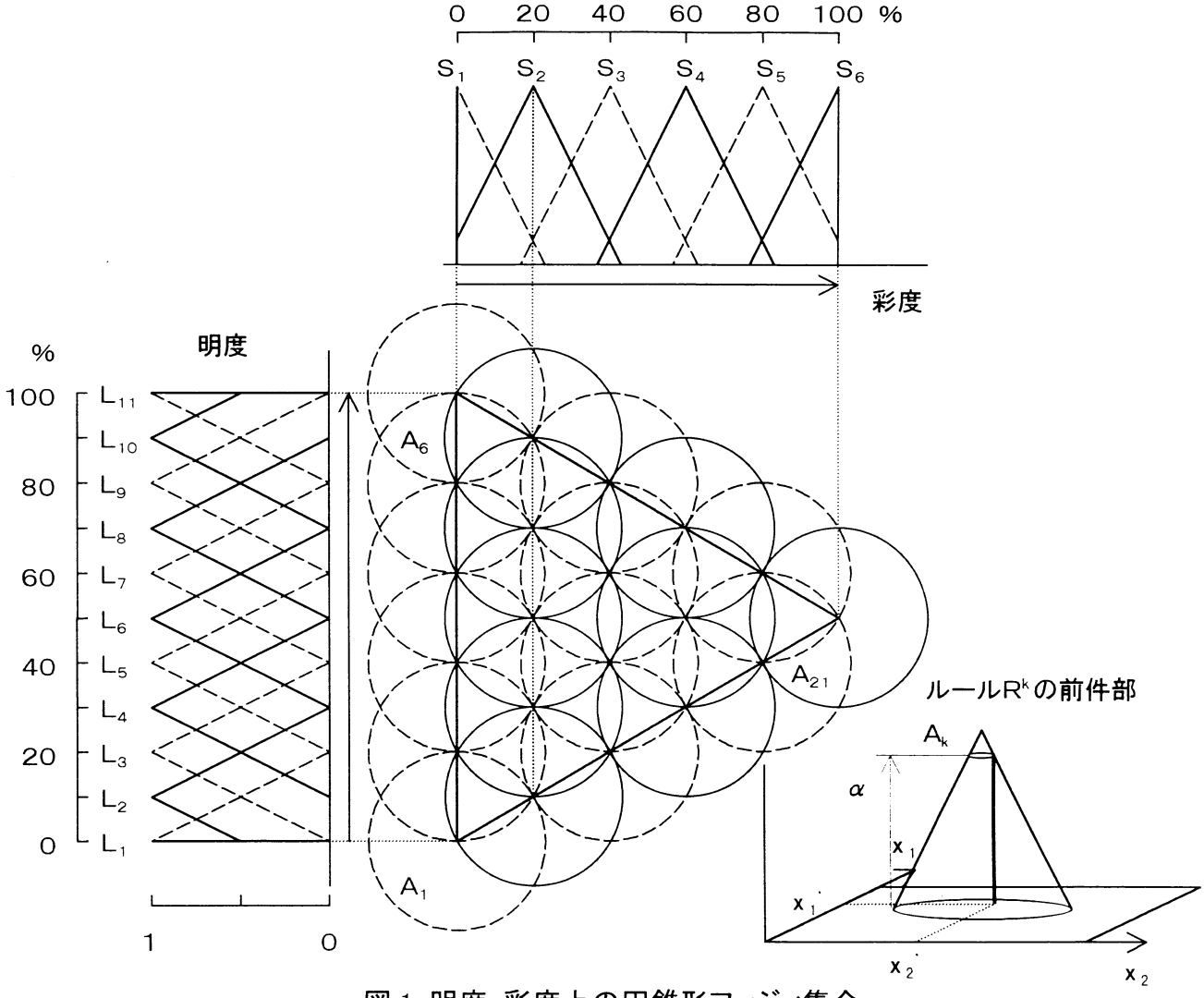


図 1 明度-彩度上の円錐形ファジィ集合

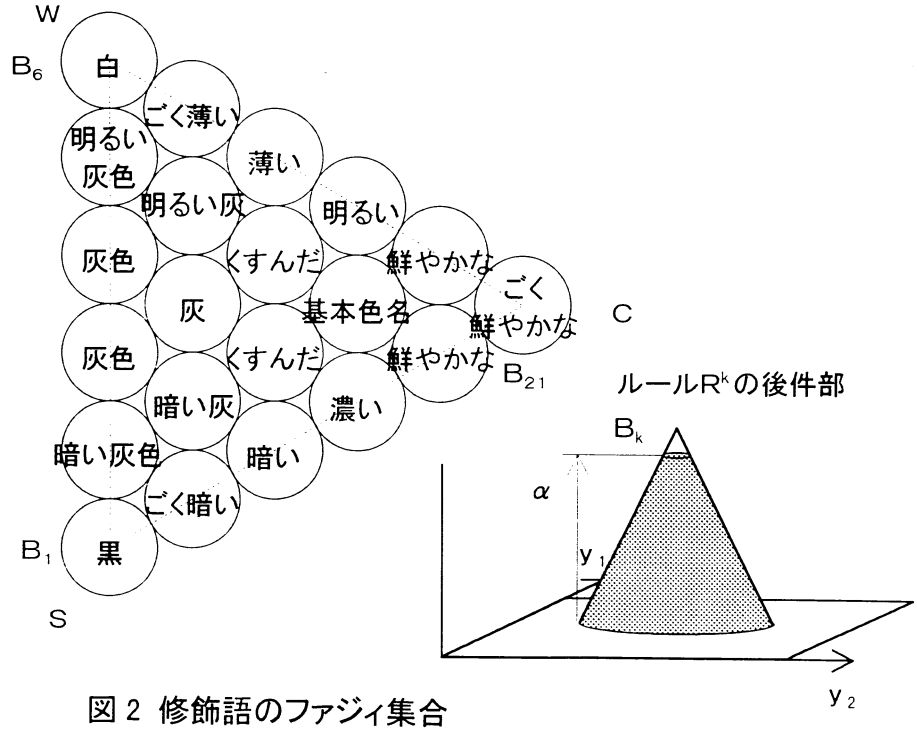


図 2 修飾語のファジィ集合

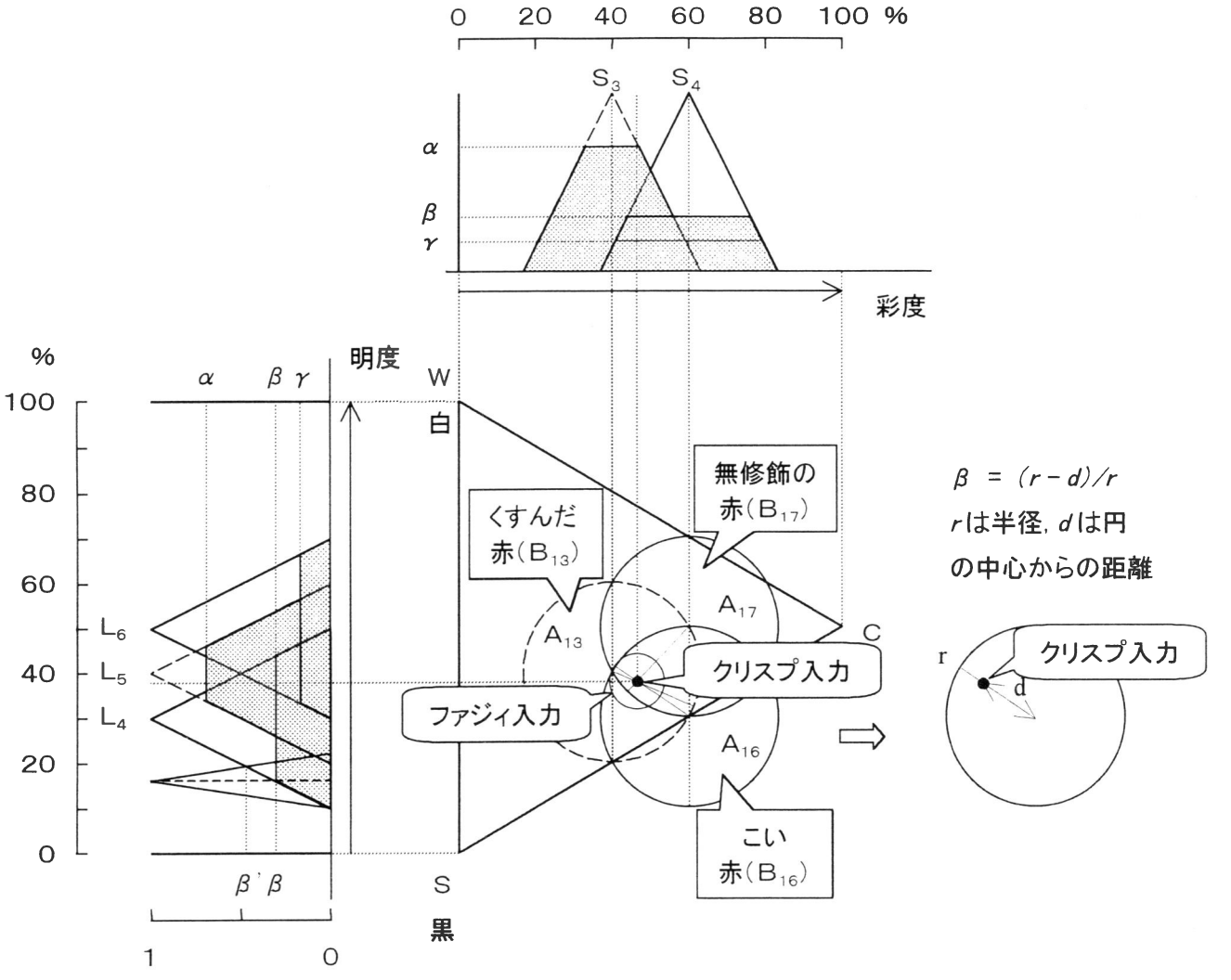


図 3 ファジィ入力に対する修飾語の度合

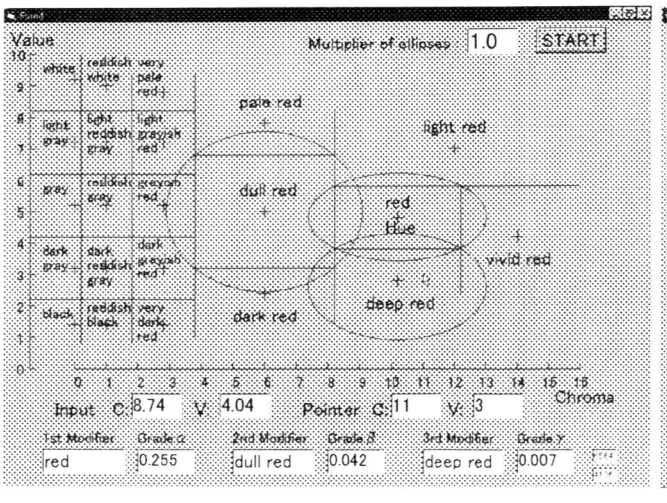


図 4 HVC 系の等色相面上の修飾語
メンバーシップ関数

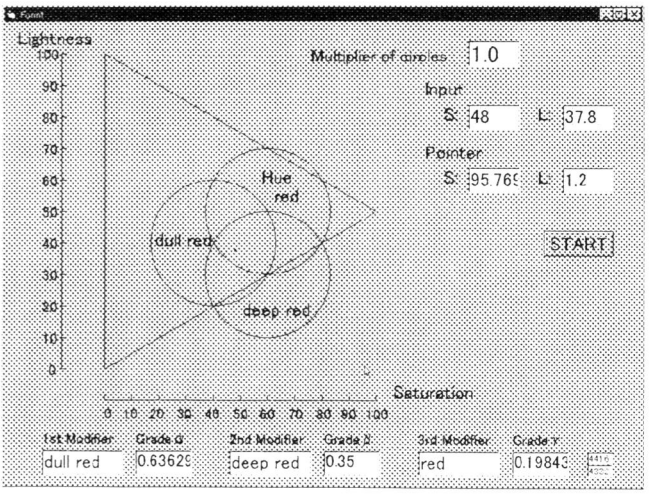


図 5 HLS 系の等色相面上の修飾語
メンバーシップ関数

TD1−2

主観的な色彩イメージの表現
Expression of Subjective Color Impressions

○川村 誠
Makoto Kawamura

筑波大学大学院工学研究科
Doctoral Program in Engineering
University of Tsukuba

鬼沢 武久
Takehisa Onisawa

筑波大学機能工学系
Institute of Engineering Mechanics & Systems
University of Tsukuba

Abstract: This paper proposes a method to construct the subjective model expressing color impressions, where color is considered as one piece of Kansei information. In this method, two kinds of relationships are considered in order to construct the subjective model of color impressions. One is the absolute relationship between color and the degree of its impressions. And the other is the relative relationship between degrees of color impressions. Two kinds of questionnaires, called the absolute judgment and the comparative judgment, are carried out in order to obtain these pieces of subjective information. Additionally, this paper proposes more practical method to construct a relative relationship since there are some problems in the method to construct a relative relationship as the view of practical use. The effectiveness of proposed methods are examined by some experiments.

1 はじめに

色彩は感性情報[1,2]の1つであると考えられ、人の感情に影響を与えている。人は色彩の持つこのような効果を明示的あるいは暗黙的に利用していることから、色彩はコミュニケーション手段の1つであると考えられる。したがって、色彩の持つ心理的な効果を表現することはさまざまな分野での利用が期待される。筆者らはこれまで、色彩の心理的な効果を表現するファジィモデルを客観的な知識を元にして構築してきた[3]。しかし、色彩が人に与える影響は色彩をみる人の主観に依存するものであるため、客観的な知識として扱うことは不自然であると考えられる。したがって、より柔軟に色彩の心理的な効果を扱うためには人の主観性を考慮する必要がある。

本稿では、ユーザ個人が持っている主観的な情報をアンケートによって獲得し、主観的な色彩イメージ表現モデルを構築する手法の提案を行う。さらに、提案手法の実用性に関する問題を解決するための手法の提案を行い、これらの手法を実験によって検証を行う。

2 色彩イメージ表現モデル

本稿では色彩を心理的な量として考える。このとき色彩は図1に示されるように色相、明度、彩度で構成されるHVC色空間上に表現することができ、明度と彩度から構成される色調の概念を導入することにより、色彩は色相と色調の2属性によって表現することができる[4−7]。この2属性で表現される色彩システムはHue & Tone Systemと呼ばれ、基本色130色(有彩色120色:10色相×12色調,無彩色10色)で構成されている。色彩と色彩イメージの関係をエキスパートの知識に基づいて図2に示されるようなファジィルールとして表現し、これらのルールをHue & Tone Systemに対して適用したファジィモデルをここでは色彩イメージ表現モデルと定義する。ここで、色彩イメージは暖冷(WC)感や軽重(SH)感などのような一般的に誰もが持っていると考えられるイメージを考慮している。本稿ではこの色彩イメージに対して主観性を考慮し、主観的な色彩イメージ表現モデルの構築を行う。

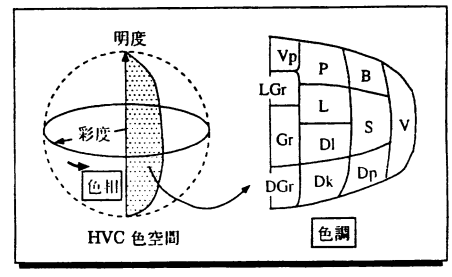


図1 色空間と色調

if Hue is *Yellow* **and** Tone is *Dark*
then WC is *Neutral* **and** SH is *Fairly Hard*

図2 色彩イメージに関するファジィルールの一例

3 モデルの構築手法

本稿では、ユーザの主観に合うようなモデルを直接構築する手法の提案を行う。ユーザの主観的な情報を獲得するために絶対判断と相対判断に対する2つのアンケート[8]が行われ、その結果得られる尺度情報をもとにファジィモデルが構築される。アンケートで掲示されるサンプルは、Hue & Tone Systemをもとにした図2の前件部を満足する基本色130色から選んで用いている。

3.1 絶対判断

本アンケートは2つの目的を持って行われる。1つは、ユーザが色彩イメージの程度を表現する場合、どのような言葉を用いるかを知ることである。もう1つは、暖冷感や軽重感を絶対的に判断する場合、何段階に分けて判断しているかを知ることである。前者の結果によって得られる色彩と程度の言葉の関係から、ファジィルールが

構成され(図 3)、後者の結果から尺度軸をファジィ集合に分割する際の分割数を知ることができる。

アンケートは、掲示されるサンプルに対してあるイメージを感じる程度を表 1 に示される言葉から選択する形で行われる。サンプルから中立的な感覚を受ける場合は、"どちらともいえない" を選択するものとする。

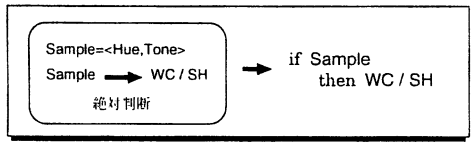


図 3 ファジィルールの構成

表 1 選択肢 (WC 感)

程度ラベル		出力
非常に	(extremely)	暖かい (冷たい)
かなり	(fairly)	暖かい (冷たい)
普通に	(moderately)	暖かい (冷たい)
やや	(slightly)	暖かい (冷たい)
ちょっと	(only a little)	暖かい (冷たい)
どちらともいえない (neutral)		

3.2 相対判断

本アンケートは基本色であるサンプルをイメージの尺度軸上に配置し、主観的尺度を構成することを目的とする。ここでは尺度軸上でのサンプル間の相対関係と順序関係が重要となるため、相対関係と順序関係、どちらも構成可能な尺度構成法の 1 つである Scheffé の一対比較法 [8,9] を用いる。

アンケートでは 2 つのサンプルが同時に並べられて掲示される。ここで、「一方のサンプルに比べてもう一方のサンプルはどの程度イメージを感じるか」という質問に対し、回答を 7 段階評価 (−3 ～ +3) で行う。この手続きを考えられる全てのサンプル組合せ (逆順含める) に対して行う。

3.3 ファジィモデルの構築

構築する目的のファジィモデルは図 2 に示した形式のファジィルールであり、ファジィルール自体は絶対判断のアンケート結果によって構成される。ここでは、絶対判断と相対判断の結果から得られる尺度情報を元に、尺度軸上にファジィ集合 (メンバーシップ関数) を構成するための手順を示す。なお、メンバーシップ関数の形状として三角型メンバーシップ関数を採用している。

1. 絶対判断の結果からサンプルと程度ラベルの対情報を構成する *(sample color, linguistic term)*
2. 相対判断の結果からサンプルとその尺度値の対情報を構成する *(sample color, measure value)*
3. 1),2) の結果から程度ラベルと尺度値の対情報を作成する *(linguistic term, measure value)*
4. 3) の対情報から各程度ラベルの尺度上における位置を平均値として求める
5. 各程度ラベルの尺度値を程度ラベルのメンバーシップ関数の頂点とし、隣り合うメンバーシップ値の和が 1 になるようにメンバーシップ関数が構成される。

以上の手順をまとめたものを図 4 に示す。

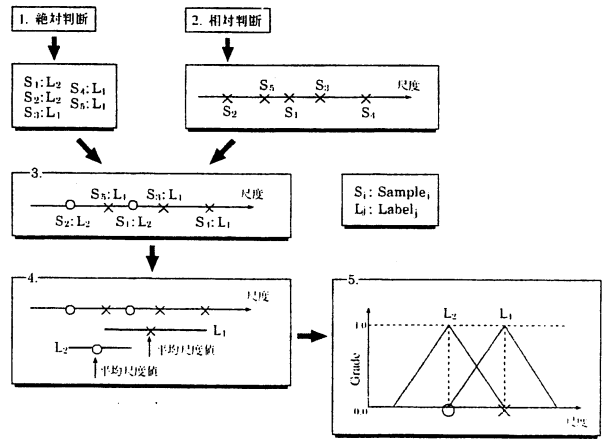


図 4 メンバーシップ関数構成手順

3.4 被験者実験

色彩の暖冷感に関して 11 名の被験者に色相が赤あるいは青の 12 色調のサンプルに対する主観的モデル構築を行った。図 5, 6、表 2, 3 に構築された主観的モデルの例を示す。

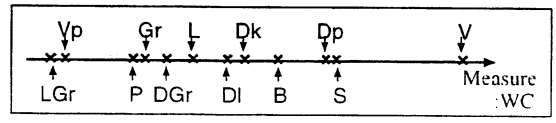


図 5 構成された尺度

表 2 構成されたファジィルール

Tone	V	B	S	Dp	P	L
Warm	P4	P2	P3	P1	P1	P1
Cool	–	–	–	–	–	–
Tone	**Dl**	**Dk**	**Vp**	**LGr**	**Gr**	**DGr**
Warm	P1	P0	–	–	P0	P0
Cool	–	–	N0	N0	–	–

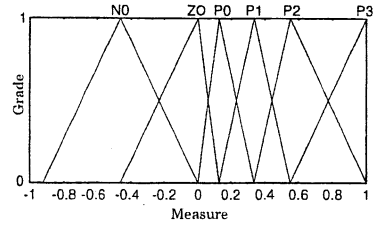


図 6 構成されたメンバーシップ関数

表 3 ラベルに対応する言語ラベル

ラベル	言語ラベル
N0	only a little
ZO	neutral
P0	slightly
P1	moderately
P2	fairly
P3	extremely

3.5 有効性の検証

提案手法の有効性を検証するために本手法で構築された主観的モデルとエキスパートの知識にもとづく客観的モデルとの比較実験を行う。客観的なモデルのファジィルールを表4に、メンバーシップ関数と対応する言語ラベルを図7、表5に示す。検証はサンプルに対する被験者と主観的モデルの評価のズレ、被験者と客観的モデルの評価のズレを比べることによって行われる。実験に用いたサンプルはランダムに生成される20色の赤あるいは青である。ここでズレは評価されたラベル間の距離として定義する。例えば、*extremely* と *fairly* のズレは1として考える。表6に被験者11名に対して実験を行った結果を示す。2つのモデルの差を検定するためにズレを得点とみたててスコアリングを行った。それぞれのモデルのズレに対する平均値と分散が表7である。Welchの手法[10]を用いて統計的に2つのモデルの差の検定を行った結果を以下に示す。

$$t_0{}^* = -4.42 \tag{1}$$

$$-t(\phi^*, 2\alpha) = -3.460 \tag{2}$$

$$\textbf{where } \phi^* = 0.548,\ \alpha = 0.05$$

$$\left.\begin{array}{rcll} |t_0{}^*| & \geq & t(\phi^*, \alpha) & \textbf{where } H_1 : \mu_A \neq \mu_B \\ t_0{}^* & \geq & t(\phi^*, 2\alpha) & \textbf{where } H_1 : \mu_A \geq \mu_B \\ t_0{}^* & \leq & -t(\phi^*, 2\alpha) & \textbf{where } H_1 : \mu_A \leq \mu_B \end{array}\right\} \tag{3}$$

この結果から $H_0 : \mu_A = \mu_B$ という仮説に対して有意水準5%で式(3)に示される $H_1 : \mu_A \leq \mu_B$ が成立し、H_0 が棄却されることがわかる。ここで μ は母平均を意味する。したがって、主観的モデルの方が客観的モデルに比べてズレが小さいことが確認され、本手法が有効であることが示された。

表4 客観的モデルのファジィルール

Tone	V	B	S	Dp	P	L
Warm	P4	P3	P4	P2	P2	P1
Cool	–	–	–	–	–	–
Tone	Dl	Dk	Vp	LGr	Gr	DGr
Warm	P0	P0	–	–	ZO	ZO
Cool	–	–	N0	P0	ZO	ZO

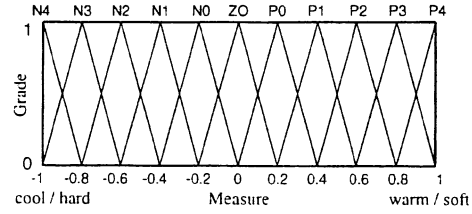


図7 客観的モデルのメンバーシップ関数

表5 ラベルに対応する言語ラベル

ラベル	言語ラベル
P4, N4	extremely
P3, N3	fairly
P2, N2	moderate
P1, N1	slightly
P0, N0	only a little
ZO	neutral

表6 被験者11名に対する実験結果

ズレ	0	1	2	3	4	5
主観的モデル	147	77	13	2	0	1
客観的モデル	106	77	29	17	8	3

表7 評価結果の平均と分散

モデル	平均 ($\bar{x}$)	分散 (s^2)
主観的モデル (A)	0.52	0.783
客観的モデル (B)	1.06	2.502

4 問題点とその解決手法

提案するモデル構築手法の有効性は確認されたが、本手法には実用性に関する問題がある。比較判断において用いられるSchefféの一対比較法はサンプル数を k とする場合、比較回数が ${}_kC_2 \cdot 2$ として計算される。したがってサンプル数が多い場合、アンケートに対する労力が非常に大きくなってしまう。この問題を回避するための改善手法の提案を行い、その有効性の検証を行う。

4.1 改善手法

改善手法ではサンプルをいくつかのグループにわけて尺度を構成し、それぞれの尺度を用いて全体の尺度が再構成される。改善手法の概念図を図8に示す。まずサンプルを適当な数のグループに分割し、それぞれのグループで一対比較法を行う。ただし、一対比較法で構成される尺度は絶対尺度ではなく相対関係を示しているため、それぞれの尺度は独立であると考えられる。したがって簡単につなぎ合わせることはできない。そこで、まず基準点を作るために各グループに同じ要素を1つ持たせることにする。この結果、各グループで構成される尺度に共通の点が存在することになる。次に各グループの尺度を共通の軸上に乗せるために、各尺度内の単位量の統一を行う。各グループの代表と基準点のサンプルからなるグループを新たに作り、このグループにおける尺度を構築する(この尺度を指標尺度とする)。指標尺度上では各グループの尺度の比が基準点から各代表までの距離という形で表現されることになる。最終的にこの比をもとにして一つの尺度が再構築される。現段階では、各グループの尺度において最大と最小を示すサンプルを代表として考慮し、再構成には線形写像を用いている。

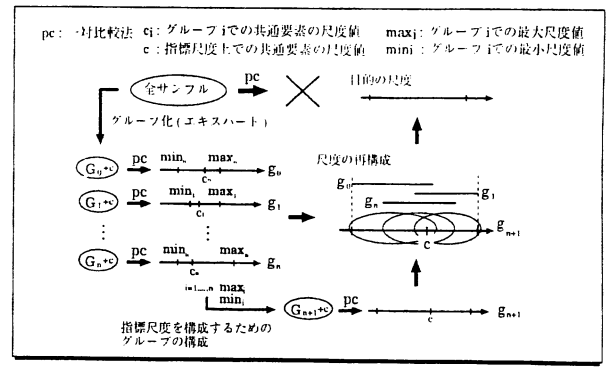


図8 改善手法の概念図

4.2 有効性の検証

改善手法の有効性を検証するために前節同様の比較実験をScheffé の一対比較法を用いた場合のモデルと改善手法を用いたモデルの間で行った。8 名の被験者に対する実験結果を表 8 に、前節同様のスコアリングを行った結果に対するそれぞれのモデルの平均、分散を表 9 に示す。Welch の手法を用いた検定結果を以下に示す。

$$t_0{}^* = 1.3 \tag{4}$$
$$t(\phi^*, \alpha) = 6.962 \tag{5}$$
$$t(\phi^*, 2\alpha) = 3.460 \tag{6}$$
$$\textbf{where } \phi^* = 0.548,\ \alpha = 0.05$$

この結果から、式 (3) に示される対立仮説が棄却される。したがって、Scheffé の一対比較法を用いた場合と改善手法を用いた場合の尺度は統計的に等しいと考えられる。更に、改善手法を用いて構築したモデル (A) と客観的なモデル (B) とのズレの検証を行った。それぞれのモデルに対するズレの平均と分散は表 7,9 の結果を用いるものとする。Welch の手法を用いた検定結果を以下に示す。

$$t_0{}^* = -0.501 \tag{7}$$
$$t(\phi^*, \alpha) = 0.0827 \tag{8}$$
$$t(\phi^*, 2\alpha) = 0.0411 \tag{9}$$
$$\textbf{where } \phi^* = 0.00651,\ \alpha = 0.05$$

この結果から $H_0 : \mu_A = \mu_B$ という仮説に対して有意水準 5% で式 (3) に示される $H_1 : \mu_A \leq \mu_B$ が成立し、H_0 が棄却されることがわかる。したがって、改善手法を用いた主観的モデルもまた客観的モデルに比べてズレが小さいことが確認される。また表 10 に示されるように、比較回数、浪費時間の点から改善手法と Scheffé の一対比較法の労力を比べてみると明らかに改善手法が労力が少なくてすむことが確認される。以上のことから改善手法が有効であり、実用性の観点から必要なものであることが確認された。

表 8 被験者 8 名に対する実験結果

ズレ	0	1	2	3	4	5
改善手法	73	73	12	1	0	1
Scheffé の方法	85	66	9	0	0	0

表 9 評価結果の平均と分散

手法		平均 ($\bar{x}$)	分散 (s^2)
改善手法	(A)	0.775	0.774
Scheffé の方法	(B)	0.525	0.424

表 10 改善手法と Scheffé の方法の労力の比較

手法	改善手法 (total)	Scheffé の方法
平均浪費時間 [s]	55.5(277.8)	591.1
平均比較回数	13.8(69.4)	132

5 まとめ

本稿では絶対判断、比較判断の 2 種類のアンケートを行って獲得される主観的な情報を利用することにより、主観的に色彩イメージを表現するファジィモデルの構築手法の提案を行った。構築される主観的モデルとエキスパートの知識にもとづく客観的モデルとの比較実験から、提案手法の有効性の確認を行った。さらに、本提案手法における労力に関する問題点を指摘し、その改善手法の提案を行った。改善手法と改善前の手法との比較実験からその有効性と労力の削減に関して検証を行い、改善手法の有効性と労力の削減を確認した。

参考文献

[1] 辻 三郎, 感性の科学 - 感性情報処理へのアプローチ -, サイエンス社, 1997

[2] M.Nagamachi, Kansei Engineering and Comfort, International Journal of Industrial Ergonomics 19, pp.79-80, 1997

[3] 川村・鬼沢, 主観を反映させた色彩イメージの表現, 第 14 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.847-850, 1998

[4] 千々岩英彰, 色彩学, 福村出版, 1983

[5] 福田邦夫・佐藤邦夫, 色彩デザイン入門, 鳳山社, 1971

[6] 下地一丸・鈴木正文, デザインへのアプローチ, 文化出版局, 1985

[7] Shigenobu Kobayashi, The Aim and Method of the Color Image Scale, COLOR research and application, Volume 6, Number 2, pp.93-107, 1981

[8] 神宮英夫, 印象測定の心理学 感性を考える, 川島書店, 1996

[9] 増山英太郎・小林茂雄, センソリー・エバリュエーション - 官能検査へのいざない -, 垣内出版株式会社, 1989

[10] 安藤貞一・松村喜高・二見良治, 技術者のための品質管理入門, 共立出版, 1981

問い合わせ先

〒 305-8573
茨城県 つくば市 天王台 1-1-1
筑波大学 機能工学系 鬼沢研究室
川村 誠
TEL： 0298-53-6188
FAX： 0298-53-5207
Email： kawamura@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

TD1−3

色彩調和を考慮した配色支援システム

Color Coordinate Supporting System Considering Harmony of Colors

徳丸 正孝　　村中 徳明　　今西　茂
Masataka TOKUMARU, Noriaki MURANAKA and Shigeru IMANISHI
関西大学 工学部
Faculty of Engineering, Kansai University

Abstract : Color design is very important for a product design. In this paper, we propose the system which aims to support such a color design. Proposed system is composed of four parts, such as the part which evaluates the harmony of colors, the color combination part, color combination image judging part, image word output part and lastly image comparison part. This paper mainly explains the part which evaluates the harmony of colors. First, the system requires the user to input a color which user prefers and an image word of combination of three colors, one of which is inputted by the user, and another two of which are automatically selected by the system. Next, the color which is in harmony with the color which the user inputs into the system is selected from the Munsell color database. Then, the system combines a color inputted by the user with the selected colors. Finally, the image of the color combination is evaluated and outputted the color combination whose image accords with the image word which the user inputs into the system.

1. はじめに

近年，製品のデザインにおいて色彩設計の重要性が高まっている．従来から製品のデザインが重視されてきたインテリアや服飾などは言うまでもなく，これまで機能性が重視されてきた家庭用電化製品やパソコンなどにおいてもデザインが重視されるようになり，実にカラフルな商品が登場している．我々にとって，身の回りのものがおしゃれになることは喜ばしいことであるが，もの選びが難しくなってきたこともまた事実である．色彩は単独で存在するものではなく，常に配色として我々の視界に存在する．身の回りの電化製品やインテリアがカラフルになるにつれ，全体の調和をとることがより難しくなるのである．このような配色計画を支援するために，本稿では色彩調和と配色イメージ判定を自動化するシステムを提案する．著者らは文献[1]において，入力された3色配色のイメージ分析を行い，Pretty，Chicなどのイメージ語を用いて配色イメージを表現するシステムを提案しているが，入力色の調和については考慮していない．配色を扱っている研究はさまざまなアプローチのものが報告されており[2]~[6]，絵画や服装のデータベースシステムに応用したものが報告されているが[4][5]，あらかじめ配色されたデータを処理するものや，ユーザが色を組み合わせるもので，調和判定のシステム化は行われていない．そこで本稿では，色彩調和の基礎知識である配色の色相構成と色調構成をファジィ集合化し，色彩調和のファジィルールを作成することで，3色配色の調和判定を行うシステムの構築を試みる．

2. 配色支援システム

2.1 システム概要

図1に提案システムの流れを示す．まず，ユーザは自分の求める配色の基本となる1色と，求める配色のイメージを入力する．提案システムは，ユーザが入力した色と，マンセルカラーデータベース内の全ての色の調和度を判定し，調和色のデータベースを作成する．次に，調和色データベースの任意の2色とユーザが入力した色を組み合わせて3色配色を

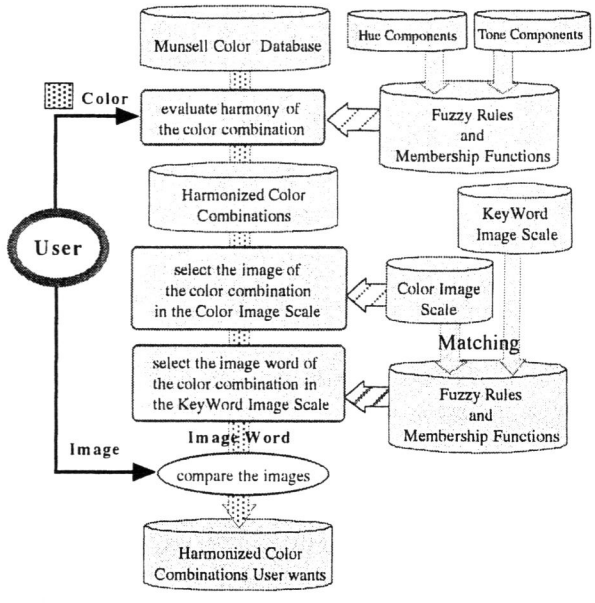


図1　提案システムの流れ

作成し，配色イメージ判定部において，各配色のイメージ判定を行う．そして，各配色のイメージとユーザが入力したイメージを照合することで，ユーザの求めるイメージに合った配色を出力している．色彩の調和判定部では，色相構成タイプと色調構成タイプがそれぞれファジィ集合で構成されており，両構成の組合せを色彩調和論に基づいてルール化し，ファジィ推論により調和の適合度を計算している．配色イメージ判定部では，日本カラーデザイン研究所の小林らが提案したカラーイメージスケールおよび言語イメージスケール[7]の知識に基づいてファジィルールを構築することで配色のイメージ判定を自動化している．本稿では，配色イメージ判定についての説明は省略するので，詳しくは文献[1]を参照されたい．

2.2 色彩調和論

本研究では，松田ら[9]がまとめた色相構成と色調構成の相関に基づく色彩調和論を参考にしている．これは，女子学生の衣服と，プリント服地の配色調査を9年間にわたって実施した結果を基にしてまとめられたもので，配色傾向を色相構成タイプと色調構成タイプの二つの観点から分類し，両タイプの相関により配色の調和を判定するものである．色相構成は，配色に用いられている色彩の色相環における分布に基づいて8個のタイプに分類される（図2）．色調構成は，配色に用いられている色彩の色調図における分布に基づいて10個のタイプに分類される（図3）．色調図は，縦方向が明度，横方向が彩度を表している．

2.3 色相構成のメンバーシップ関数

本節では，図2に示した色相構成のタイプをそれぞれファジィ集合として扱い，各タイプにおいてメンバーシップ関数を作成する．マンセル色票では，色相環を10個の代表色相（R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P, RP）で定義しており，さらに各代表色相はそれぞれ10等分され，1R~10R, 1YR~10YR...のように細分化されている．ここでは，1Rを1，10RPを100とする1~100の実数（6.5YRなどの修正色相も入力される）を用いて色相を定義する．ユーザが入力した任意の色相をh_uとするとき，各色相構成タイプのメンバーシップ関数は，台形型メンバーシップ関数を用いて図4のように定義される．au,al,bu,blは任意の整数である．これらの定数を変更することにより，調和判定の精度を任意に変更することが可能であるが，ここでは簡単のため，暫定的に全てのメンバーシップ関数は式(1)および(2)で定義されている．

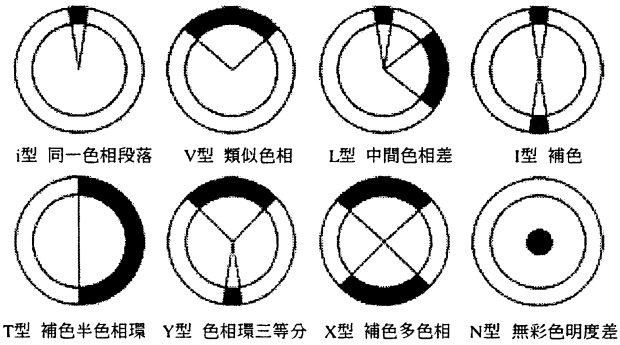


図2 色相の配色構成

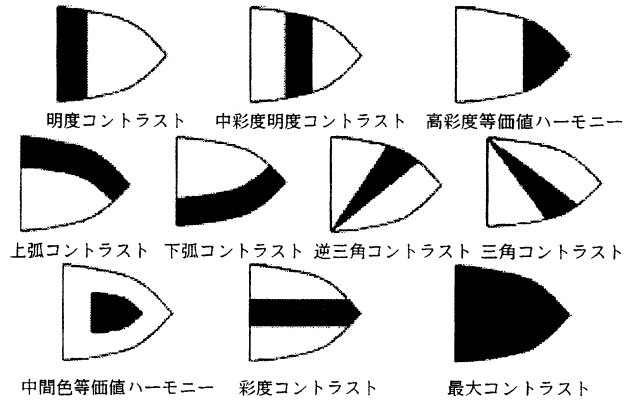


図3 色調の配色構成

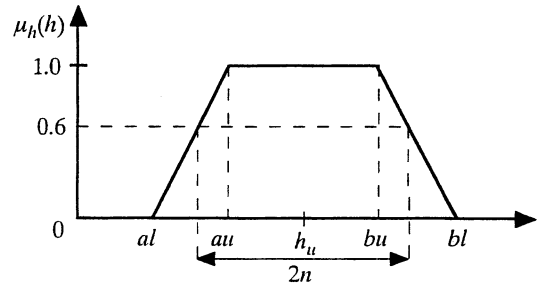
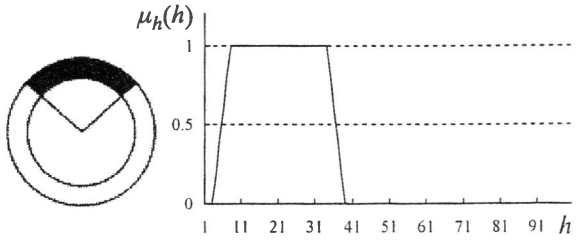


図4 色相構成のメンバーシップ関数の定義

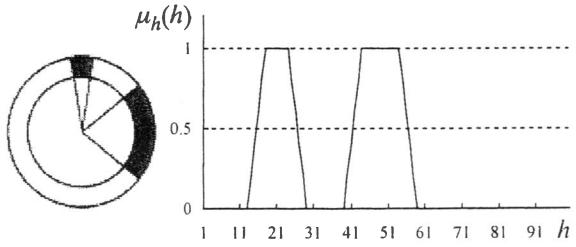
$$|au - al| = |bu - bl| = 5 \quad (1)$$

$$\mu_h(h_u+N) = \mu_h(h_u-N) = 0.6 \quad (N:\text{任意の定数}) \quad (2)$$

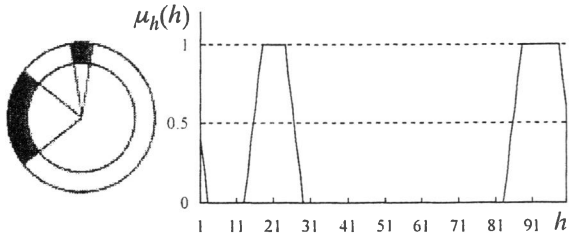
例として，1Yが入力された場合(h_u=21)のV型色相構成およびL型色相構成のメンバーシップ関数を図5に示す．L型およびT型の色相構成については，入力色の色相に対して左右非対称の形状になっているため，図5(b)および(c)に示すように，右向き，左向きの2種類のメンバーシップ関数を定義している．N型無彩色明度差のタイプについては，色相を用いず色調のみの扱いになるため，入力色が無彩色であるときに限り用いられるタイプとな



(a) V型



(b) L型（右向き）



(c) L型（左向き）

図5　色相構成のメンバーシップ関数

る.N型以外のタイプにおいても色調の配色構成によって無彩色のみの配色を得ることができることから，本研究ではN型無彩色明度差は用いていない.

2.4　色調構成のメンバーシップ関数

本節では，図3に示した色調構成のタイプをそれぞれファジィ集合として扱い,各タイプにおいてメンバーシップ関数を作成する.ただし，最大コントラストについては,全ての色調が含まれることから色調の特定が困難となるため,本研究では用いていない.従って，最大コントラストを除いた9個のタイプについてメンバーシップ関数を定義している.メンバーシップ関数の作成方法は，2.3で述べた色相構成のメンバーシップ関数と同様であるが,色調タイプでは色相タイプと異なり,明度軸と彩度軸の2次元で表されている.例として，数個の色調構成タイプのメンバーシップ関数を図6に示す.各タイプとも，彩度が16段階，明度が10段階で表記されるため，高彩度領域において，高明度および低明度の色彩についても集合に含まれることになる.しかし，マンセル色票においては，色相によって高彩度領域での明度の上限および下限が定まっているので,実際はこの領域への入力は存在しないことになる.上弧コントラスト及び下弧コントラストについては,最高明度と最低明度を結んだ直線で近似している.

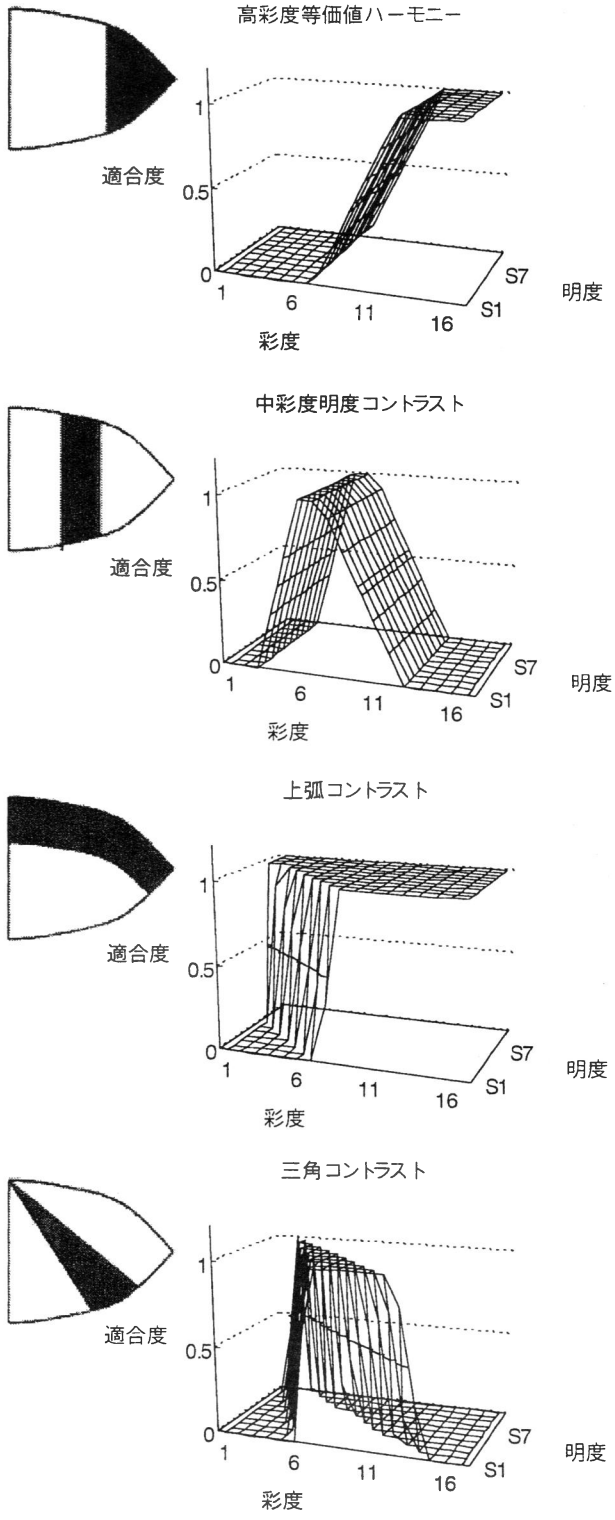


図6　色調構成のメンバーシップ関数

2.5 配色の調和判定

2.2で述べた松田らの色彩調和論では，色相構成と色調構成の相関を調査している．本システムでは，この色相構成と色調構成の相関をルール化し，ファジィ推論により配色調和度を求めている．本研究で用いているルールを以下に示す．

i型： 明度コントラスト
　　逆三角コントラスト
　　三角コントラスト
V型： 明度コントラスト
　　逆三角コントラスト
　　三角コントラスト
L型： 明度コントラスト
　　逆三角コントラスト
　　三角コントラスト
I型： 高彩度等価値ハーモニー
　　逆三角コントラスト
　　三角コントラスト
　　中間色等価値ハーモニー
T型： 明度コントラスト
　　中彩度明度コントラスト
　　高彩度等価値ハーモニー
　　上弧コントラスト
　　下弧コントラスト
　　逆三角コントラスト
　　三角コントラスト
　　中間色等価値ハーモニー
Y型： 高彩度等価値ハーモニー
　　逆三角コントラスト
　　三角コントラスト
　　中間色等価値ハーモニー
X型： 逆三角コントラスト
　　三角コントラスト

ユーザが入力した色C_uの色相，明度，彩度をそれぞれh_u,v_u,c_u，色相構成タイプのメンバーシップ関数を$\mu_h(h)$，色調構成タイプのメンバーシップ関数を$\mu_t(v,c)$，対象色彩C_iの色相，明度，彩度をそれぞれh_i,v_i,c_iとするとき，C_uとC_iの調和度$\mu_p(C_u,C_i)$は次式で示される．

$$\mu_p(C_u,C_i)=\mu_h(h_i)\wedge\mu_t(v_i,c_i)\wedge\mu_t(v_u,c_u) \quad (3)$$

3. 実験結果

システムの動作試験として，ユーザに幾つかの好みの色と，望みの配色のイメージをシステムに入力し，システムが提示する配色を調べた．まず，システムに入力する単色は任意の色彩であるが，希望の配色イメージについては，入力する単色自体のイメージと類似しているものを選択した．例えば，淡いピンク色（5R 8/6）を入力し，配色イメージとして”Pretty”を指定してシステムが提示する配色を調べた．この結果，T型中彩度明度コントラストおよびT型上弧コントラストにおいて，イメージ語との適合度の高い配色が得られた．提示された配色の中には，NCDの配色イメージワークなどの配色サンプルなどに掲載されている配色も存在し，主観評価ではあるが全体的に調和，イメージとも良好な結果が得られていると思われる．しかしながら，提示された配色パターンが262個と多く，類似した配色も多く見られるため，ユーザが効率的に配色を選択することは非常に困難であることがわかった．この問題を解決するためには，ユーザへの配色の提示方法を改善する必要がある．

次に，同じく淡いピンク色（5R 8/6）を入力するが，配色イメージとして，単色イメージとはかけ離れたイメージ語である”Modern”を指定してシステムが提示する配色を調べた．この結果，適合度は低くなるものの，T型下弧コントラストにおいて良好な配色が得られた．このことから，ユーザの要求するイメージに対するシステムの対応能力が高いことがわかった．

4. むすび

本稿では，色彩調和論の知識に基づいたファジィ推論による配色調和の判定システムを提案した．本システムでは，色相および色調の配色構成をファジィ集合化し，両者の相関に基づいてファジィルールを作成した．提案した配色調和判定を，配色イメージ判定システムと融合し，ユーザが好みの色と配色のイメージを入力することにより，ユーザのイメージとあう調和配色を提示するシステムを構築した．実験により，ユーザのイメージにあう配色が提示されることを確認したが，入力する色によっては，調和判定の際に使用される配色構成タイプに偏りが生じるなどの問題も見られた．

参考文献

[1] 徳丸正孝，山下一美，“ファジー推論を用いた配色のイメージ判定システムの構築”，信学論 D-II, Vol.J83-DII, No.2, pp.680-689, 2000.

[2] 小松由香，亀井且有，“感性工学にもとづくハンカチデザインの評価”，電学論C，Vol.117-C, No.7, pp.934-939, 1997.

[3] 木村一郎，武井　努，黒江康明，“ニューラルネットワークによる色感性の実現”，計測自動制御学会論文誌，Vol.32, No.2, pp.224-230, 1996.

[4] 石原茂和，石原恵子，長町三生，松原行宏，“ニューラルネットワークを用いた感性工学エキスパートシステム-色彩における感性構造の分析への適用”，人間工学，Vol.31, No.6, pp.389-398, 1995.

[5] M.Fukuda, K.Sugita, Y.Shibata, “Perceptional Retrieving Method for Distributed Design Image Database System” Trans. of IPSJ, Vol.39, No.2, pp.158-169, 1998.

[6] Shih-Wen Hsiao, “A Systematic Method for Color Planning in Product Design”, COLOR research and application, Vol.20, No.3, pp.191-205, 1995.

[7] S.Kobayashi, “The Aim and Method of the Color Image Scale” COLOR research and application, Vol.6, No.2, 1981

[8] 小林重順，“カラーイメージスケール”，講談社，1995.

[9] 松田豊，“色彩のデザイン”，朝倉書店，1995.

[問い合わせ先]
〒564-8680　大阪府吹田市山手町 3-3-36
関西大学 工学部 電子工学科
徳丸 正孝
Tel: 06-6368-0883 , Fax: 06-6388-8843
E-mail : toku@ipcku.kansai-u.ac.jp

TD2−1

キュビズムによる空間表現のファジィネスに関する考察

Study on Fuzziness for Expression of Space in Cubism

玉野　和保
Kazuho Tamano
広島工業大学
Hiroshima Inst. of Tech.

Abstract The images of the pictures painted by Picasso and Braque make appreciators produce impressions in multi-value, multiplicity and multi-vocal. This paper has shown an idea that the pictures in Cubism express Fuzziness in displaying space and figures, and the characteristics of multi-value, multiplicity, and multi-vocal make an impression keeping a vague explanation, and give distinct values of truth on appreciators for pictures. The author maintains that the values of truth on impression of picture can be shown by an exchange of matrixes on "arrangement" and "phase". In the relation between these matrixes, the commutative law is not concluded, and an observable matrix is formed. Furthermore, an impression of the picture can be shown as the diagonal of the observable matrix when the canonical expression on the observability is conserved, though these mathematical characteristics have to be confirmed by experiments. These relations are similar to the expression of quantum theory. We can find the state of expression based on these relations through the impression on the picture appears without order when we appreciate the picture.

1　はじめに

ピカソやブラックの絵画にみられるイメージ表現は、空間的に多値・多様・多義である。　本報告はこれらのキュビズムによる空間表現の構造とそのファジネスについて、考察を述べる。

キュビスムは、実在するものを、より現実的に表現するする手法としてブラックとピカソにより発案された絵画法である [1]。セザンヌからも問いかけられていた、２次元面に３次元上の膨らみのある実在物をできるだけ現実的に表現できるか、という解決不能な課題に対する表現法の一つの答であったと言われる。

キュビズムによる表現は「現実の物体は本来３次元的である」という主張に基づいており、その結果、２次元平面構成では不可能な表現をとらざるを得ず、見る人の視覚に錯覚を生じさせ、非現実感を与える。　キュビスムは、人はどのように物体を眺め、それにより空間をどのように捉えているか、ということをより忠実に表現する。　この基本表現思想は、心象や思想など、現実的空間性に基づかない対象を、より具体的に表現しようとする抽象画の表現思想とは、大きく異なる。

キュビズムの絵画表現は、現実の空間性の認識と密接に関係していることから、この絵画を通して人の空間認識を考察することができる。　すなわち、人は現実の物体を見るとき、配置や構成において「正しい」と判断しているが、実際には「注視」「視点移動」また、部分の分解と合成に基づく観察操作において、「多値」「多様」「多義」な空間構成を繰り返しており、認識において非常に「非現実的心象」を構成させている。　このことはピカソやブラックの絵画を鑑賞するとき、その絵画表現が一見、非現実的空間構成でありながら、しばらくそれを眺めていると、不思議にも非現実的な感覚が薄れて、むしろ生き生きとした空間表現を感じることからも、およそ理解できる。

多値・多様・多義な空間表現は、見る人に複数の独立した真理値を与える。　この結果、真理値は曖昧になる。

絵画表現は「配置」と「様相」の表現操作で真理値が与えられる、とする考えを提案する。　配置と様相はそれぞれ表示する部分図形ごとに独立した真理値次元を持つ。

したがって絵画の真理値、すなわちこれにより与えられる印象は、配置と様相のｎ次元行列で表現できる。配置と様相による表現操作は積として表され、一般にこの操作における交換則は成立しない。　このような操作演算関係は量子力学的な扱いに類似している [2, 3]。パターン認識における量子論的な扱いについては、視覚機能に量子論の適用の可能性を論じている文献もある [4]。

本論文では、このような人の空間性の理解を、キュビズム絵画において分析する試みについて、その基本的な考え方を述べる。

2　キュビズム絵画に見られる空間表現の多値、多様、多義性

図１は、ピカソの絵画、「青い襟飾りの女」である [5]。

引用文献の編者の言を借りると、「青い襟飾りの女」の絵画には、顔の明るい部分は陰の部分より大きく見える原理を基に、暗い部分の目を大きく描かれている。



図 1: ピカソの絵画「青い襟飾りの女」



図 2: ピカソの彫像「頭（フェルナンド）」

この絵のモデルは、濃い色の長い髪と美しい黒い瞳を持つ角張った顔つきのドラ・マールだと言われるが、この絵には金髪のショートヘアで丸顔のマリ・テレーズが重ねて描かれていると言われる [5]。　ピカソのこの絵画だけで判断するのは危険かもしれないが、この絵画を見ていると、図２に示すピカソの彫像「頭（フェルナンド）」[6] との類似性を感じる。　この彫像は、ピカソのモデルであった、フェルナンド・オリヴィエを表現している。

引用した編者の解説では、彫像には、彼女の首の筋と、筋肉を誇張させ、瞼の奥の目は鋭く、柔らかく丸みのある顔つきが角張らされて表現されている、と述べられている [6]。　確かに、この彫像には、女性らしい柔らかさと言うより、むしろ深い思考にある男性的な面もちを感じさせられる。　ピカソは、このように彫像においても、絵画と同様、様々な視点から得られる空間の視覚における幾何学性を豊かに表現している。

図１の絵画には、複数の顔が合成された多値表示と、一見して一貫性があるように見えながらも現実にはあり得ない目や口、鼻の配置の多様性、また、顔の明るい部分と陰の部分に一方の顔だけに固定されるような多義性が見られる [7]。

図３は、ピカソと同じくキュービズムを発案したブラックが描いた絵画、「バイオリンのある静物」である [8]。

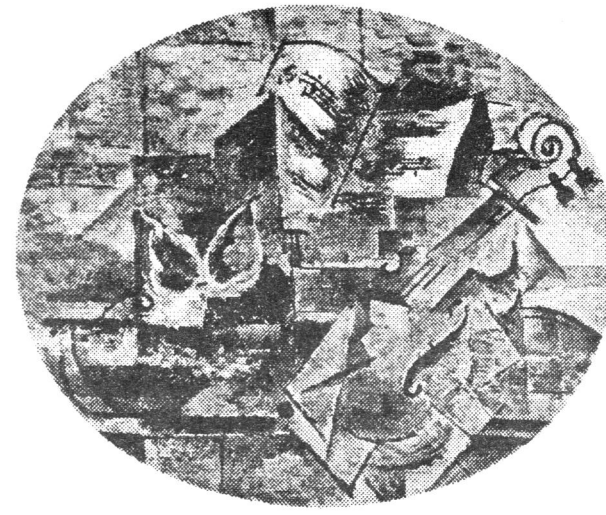


図 3: ブラックの絵画「バイオリンのある静物」

引用文献では、ピカソと、錯覚を使った「歪曲した」技法ではなく、対象物を描写としてとのように表現できるか、そしてそこに自分の内面に持っていたものをどのように表現できるか、と言うことを議論した、と解説している [8]。　確かに、絵を凝視していると、焦げ茶色を基調とした、やや陰鬱な雰囲気の心情を映しながらも、そこに風でめくれているかのような楽譜、膨らみのある

バイオリンの胴と、どうしても目に付いてしまうバイオリンの竜頭と指板、またそれが駒で支えられて傾く弦の様子がリアルに感じられる。　この絵画にも、ピカソと異なった表現法であるが、多値、多様、多義な空間表現がみられる。

多値、多様、多義な空間表現は、先に述べたように、複数の独立した真理値を与えるために、曖昧な印象を与える。　しかし、この曖昧さは、真理値が1と0の間の連続した値とは異なった、たとえば「どれも正しいので、判断に迷う」というような意味での曖昧さと考えられる。

当然ながら、空間表現が明確に見る人の経験と一致が不十分な意味でのファジネスは存在する。　本報告は、このような空間表現における多値、多様、多義な性質をどのように記述できるかということについて、考察したものである。

3　多値・多様・多義な空間表現の数学的扱いへの試み

命題が抽象的で、その解釈にともなう真理値が一意的でないことに基づく多様的曖昧さについて、数学的扱いが畑等によって試みられている [9]。　この論文では、向殿等により提案されたファジィ・インターバル論理が適用されている。　ファジィ・インターバル論理では、真偽と未知・矛盾に基づく二つの曖昧さを同時に表現している [?]。　畑等は、このファジィ・インターバル論理を真偽の曖昧さと状況の多様性に起因する曖昧さについて適用し、それらにもとづく命題の含意演算を定義している。　これによると、真偽度と多様性を区別して扱うことが可能であると述べられている。　それまで、命題の解釈が一様に扱われていたことに対して、真偽度と多様性を明確に区分して扱う数学的手法が提案されたことは、曖昧さの分析に、新視点を与えたものと評価できる。

空間表現は、命題形式とは異なるが、そこにも判断の曖昧さが見られる。　空間の状態表現において、形状識別・認識の程度は、真偽度より「納得」あるいは「受諾」の程度として判断される。　多様性は、「一貫性」の程度として、多義性は、「意外性」として感じられる。これらの程度は上限値と下限値を境として、その中間値で表現できる。　このように考えると、各性質の程度に順序関係が定義できるものと考えられる。　ここにおいてもファジィ・インターバルで定義される状態表現を拡張して適用できそうである。

一方、空間表現の多値、多様、多義の各性質は、図形の絵画中での「配置」と「様相」に基づいて生じていると判断できる。　図形がどのように置かれているかということを認識するとき、それらが総合してどのように性質を表しているかということで空間表現の意味が異なる。

また逆に、絵画の図形部分が生じさせている「様相」に意識が支配されると、部分図形形の幾何学的配置への注視も異なり、それを総合して得られる意味は先のものより異なったものとなる。　このような交換関係において、多値、多様、多義な状態を認識すると考えられる。

部分図形の配置に関する鑑賞者の受け取りの程度をマトリックスPで表すと、このj次元の行要素P_jは、$P_j = [x_{j1} \quad x_{j2} \quad \cdots \quad x_{jn}]$で表わされる。　ここで$j$は部分図形の多義性に基づく次元を、$n$は、並列表示された多値性の個数を示す。　Pの各要素、x_{ji}は図形から受け取る程度を表し、その真理値は、上限値1と下限値0との中間値で表わすとする。　一方、形状の様相に関する受け取りの程度は、マトリックスQで表す。　このj次元の行要素Q_jは、$Q_j = [y_{j1} \quad y_{j2} \quad \cdots \quad y_{jm}]$と表す。$j$は先に示した図形の多義性に基づく次元を、$m$は、図形の多様性に基づく状態の個数を表す。　Qについても、その各要素、y_{ji}は図形から受け取る程度を表し、その真理値は、上限値1と下限値0との中間値で表されるとする。

絵を鑑賞するとき、部分図形の配置に目を留めると様相には気づかないし、また逆に図形の様相に気を引きつけられていると配置には気づかなくなる。　錯覚を観察すると、この性質は理解できる。　配置と様相の間には、このような不確定性が感じられる。

鑑賞者は、絵画に描かれた様々な図形の配置と図形に生じる様相への受け取りの程度を交換しながら印象を形成していくと考えられる。直感的に考えると、鑑賞者が配置に気を引きつけられた後に様相の変化に気づいて得られる印象と、逆に様相に気を引きつけられた後に配置の変化に気づいて得られる印象は異なる。　すなわち、操作として$P \times Q$と$Q \times P$は異なり、$P \times Q - Q \times P \neq 0$と表される。　このような不確定性や、交換則の不成立は量子力学的構造に酷似している [2]。

大胆な仮説であるが、絵画を鑑賞するとき、その「観測マトリックス」をHと置くと、これは、「配置」Pと「様相」Qの関数、$H[P,Q]$と表されると考える。　このHに、PとQによる正準関係が成り立つとするならば、この絵画鑑賞系はHの固有値問題と類推でき、この固有値として絵画の印象を位置づけることも可能である。しかし、絵画鑑賞系に正準関係が成立するか否かについては、今後検討が必要である。　本報告では、絵画、とくにキュビズムの絵画に見られる特徴的な、多値、多様、多義な性質を、マトリックス要素として一括処理しようとすると、そこに量子力学的な性質への類似性が見られるということを主張したものである。

4 おわりに

本報告では、キュビズムによる空間表現の構造とそのファジネスについて、考察を述べた。 そして、絵画表現に見られる「配置」と「様相」の表現操作で印象に関する真理値が与えられる、とする考えを提案した。 この「配置」と「様相」は、図形の多値性、多様性、また多義性について、鑑賞者の受け取りの程度を要素とするマトリックスで表現できるとすると、これらのマトリックス間操作に不確定性と非交換性があると仮定できること、さらに絵画鑑賞における図形が鑑賞者にもたらす状態表現を、「観測マトリックス」として表現できるなら、またそれと「配置」「様相」との間に、正準関係が成り立つとするなら、絵画の印象は、この「観測マトリックス」の固有値として印象の真理値が表現できる。 この考えは、多値、多様、多義な図形が、観測者に量子力学的なディスクリートな印象を与えることに基づいている。
このような表現法の妥当性は、具体的な絵画図形を基に検証が必要である。 さらに、キュビズムだけでなくモンドリアンやカンディンスキー等のキュビズムに影響を受け、それから発展させた抽象絵画についても、検討していく予定である。

参考文献

[1] F. ウイットフォード・木下哲夫訳： 抽象美術入門（第4版）, 美術出版社, 東京,p.89 (1996)

[2] 量子力学–誕生から60年–： サイエンス社, pp.27–29 (1984)

[3] 朝永振一郎： 量子力学I, みすず書房, 東京,pp.262–301 (1966)

[4] 小川英光編著： パターン認識・理解の新たな展開, 電子情報通信学会, 東京,pp.47–51 (1994)

[5] 読売新聞社・美術館連絡協議会： ストックホルム近代美術館展–ピカソからウォーホルまで–, 読売新聞社, 東京, pp.88–89 (1997)

[6] 読売新聞社・美術館連絡協議会： ストックホルム近代美術館展–ピカソからウォーホルまで–, 読売新聞社, 東京, pp.82–83 (1997)

[7] 玉野和保： 絵の印象理解に関する機会論的考察–絵を理解できる光学装置の開発を目指して–, 美術教育シンポジウム–イメージ教育とコンピュータ–, pp.33–43 (1998)

[8] 読売新聞社・美術館連絡協議会： ストックホルム近代美術館展–ピカソからウォーホルまで–, 読売新聞社, 東京, pp.94–95 (1997)

[9] 畑 豊、林 泰宏、大和一晴 ：ファジィ・インターバル論理を用いたあいまいさに関する含意演算の提案, 多値論理技術報告MVL94-13, pp.110–119 (1994)

[10] 高 元伸、向殿政男 :ファジィ論理における真理値の数学的構造について, 多値論理技術報告MVL91-2, pp.10–17 (1991)

問い合わせ先

〒731-5193 広島市佐伯区三宅２丁目1-1
広島工業大学 工学部
電子・光システム工学科
玉野 和保
TEL (082)921-3121 (Ex.317)
FAX (082)923-2679
E-mail tamano@cc.it-hiroshima.ac.jp

TD2−2

ＲＧＢ色空間内で最短距離の色彩系列による人間の色彩感覚

Human color impressions elicited by well-ordered color signal sequences with a minimum distance in the RGB color space

菅野 直敏　那須 利将
Naotoshi Sugano　Toshimasa Nasu
玉川大学 工学部
Faculty of Engineering　Tamagawa University

Abstract. The effects of different color signal sequences with the same several colors in the human color impressions were examined. Whether a several-color cyclic sequence has a minimum distance or not in the RGB color space was applied for subjects in an analysis of color sensations. In this study the degrees of pairs of terms applied to color (or color sequence) such as natural-unnatural, pale-deep, and dark-light were investigated. The word natural as a human color impression is, for example, calm, flowing, relaxed, etc., and the word unnatural is intense, tight, unpleasant, etc. in this case. As the results, the well-ordered color signal sequences with the minimum distance (minimum sequences) showed natural degrees. The random-ordered color signal sequences not having the minimum distance (non-minimum sequences) showed unnatural degrees. And the well-ordered color signal sequences with the maximum distance (maximum sequences) showed also unnatural degrees. In addition, for both non-minimum and minimum sequences, the majority of subjects are impressed with light rather than dark. For pale-deep impressions, they are impressed with deep rather than pale. It seems that the impressions of natural-unnatural, pale-deep, and dark-light are independent.

１．はじめに

人間は色彩に関していろいろな感覚を持ち合わせている．日本色彩研究所では１つの色に対するイメージを調べている[3]．しかし，この色が連続的に変化したとき，どの様な感覚・感情をもち，またそれに影響されるのであろうか．本研究では，色の配列が異なる２種類の７色循環系列（色立体中の距離がもっとも短い系列，ミニマム系列とそうでないノンミニマム系列）の色提示を行い，被験者の感覚として，“自然な-不自然な”，“明るい-暗い”，“濃い-うすい”，および“鮮やか-くすんだ”について調べた．これは我々が色をことばで表現する時，このような修飾語を用いることから考えた[4]．特にここでは「自然」と感じるかあるいは「不自然」と感じるかを分析した[7)-14)]．

２．方法

２．１ 巡回セールスマン問題[1),2)]

数多くの組み合わせの中から最も良い組み合わせを決める問題，いわゆる組み合わせ最適化問題の一つに，巡回セールスマン問題(Traveling Salesman Problem; TSP)がある．巡回セールスマン問題は，その名の通り，セールスマンが担当エリア内の全都市を訪問して再び出発地点に戻ってくるとき，セールスマンの移動距離を最小にするような都市の巡回順序を決める問題のことである．この問題を解くには都市の組み合わせ方を全て挙げ，一つ一つの距離を計算して行けば確実に最適解が求められるが，組み合わせ総数はｎ都市問題で，(n-1)!/2 通り存在する．

この問題に対して Hopfield と Tank(1985)は Hopfield のネットワークを使って解く方法を提案し，普通の計算機上でシミュレートすることによって，かなりよい近似値をかなり高速に得ることができることを示した．本研究では，このアルゴリズムを用いて最適化されたいろいろな色系列を被験者に見せ，その感覚・感情を分析した．

２．２ 実験方法

図１は色の三原色 RGB(Red, Green, Blue)をそれぞれの軸に持ち，0〜1 の範囲で変化する色立体の一辺を 256 階調に分割し，その色立体中からランダムに７個の色を選んだものである．図 1a-c は，ランダム，ミニマム，とマキシマムの巡回経路を示しており，見る角度を変えたものを横に並べてある．表 1b は７色循環ミニマム系列に用いた RGB 値であり，HLS 値は変換したものである．また色の名前はファジィ・カラーネーミングシステム[5),6)]で示された色名である．同様に表 1a，１ｃは７色循環ランダム系列，７色循環マキシマム系列に用いた内容である．このように色をマキシマム（前回，前々回はランダム）に配列したものと，色の急激な変化を抑えるためにそれらを色立体中での７都市巡回セールスマン問題ツアーとしてとらえ，ホップフィールドネットワークを用いて最適化（色立体中での最短距離を求める）した系列をそれぞれ１秒間に 2〜4 色（前々回報告[9)]は 1〜3 色／秒）提示できるようにした．１秒間の色数が同じで，ランダムな系列と色立体中で距離のミニマムな系列の提示を学生の被験者(131 人)に，また色立体中で距離のマキシマムな系列とミニマムな系列の提示を学生の被験者 17 人に見てもらい，以下のような数種類のデータを取った．

３．結果

表２は各色彩系列に対する感覚差の結果を示している．同一色(7 色)を用いて１回目にノンミニマム（ランダム）な系列の色提示，２回目にミニマムな系列の色提示を行った．初期の被験者(31 人)には自由な感じ(感覚･感情)を書いてもらったため，回答がばらつくので「自然」，「不自然」，「不明」，「その他」に分類してみた．これらのことからノンミニマムな

系列を用いると「不自然」と答える被験者が多く，「自然」と答える者はなかった．ミニマムな系列を用いると「自然」と答える被験者が「不自然」と答える被験者を上回った．また，ここで「不明」とは何だかよく分からないなどと答えた場合で，「その他」とは提示された色の様子を表現しているなどであった．そこで，「不明」と「その他」の答えを「自然」と「不自然」のどちらかに（前々回は二者択一で）選んでもらった．

2つの系列に対して自然-不自然のどちらに感じるかを調べた結果，ミニマム系列に対して「自然」と答える者が「不自然」と答える者より多い．また，ノンミニマム系列に対して「自然」と答える者より「不自然」と答えるものが多く，度合は速度に依存しているようだ．このように系列による違いは明らかである．

そこで，RGB 系において，表1のａ）ランダムな系列，ｂ）ミニマムな系列とｃ）マキシマムな系列のＲＧＢ成分を調べた．網がけされた数値は近い値を示す成分である．ここで，それぞれの成分の近さを示すしきい値として，最大値(255)の約 10%とした．この表では隣同士の値が 26.0 に等しいか小さいとき，網がけされている．ミニマム系列に多く７ペア，ノンミニマム系列に少なく，ランダムに２ペア，マキシマムに１ペアある．ミニマム系列のペアの数は，ノンミニマム系列のそれより多い．すなわち，近い成分の組の数は全体の距離に関係していることがわかった．

また，HLS 系に変換し，色相角度ｈを調べるとノンミニマム系列は増減を繰り返すが，ミニマム系列はほぼ大きさの順に並んでいる．これは虹色の順[11]：violet (400-430nm)，indigo (440-460nm)，blue (470nm)，green (505nm)，yellow (575nm)，orange (590-620nm)，red (>630nm)によく似ていて，色彩感覚の「自然」と関係があると考えられる．ここで orange は yellow red，indigo は dull blue，violet は purple blue である． No.1 と No.5 を入れ替えると，色相角度の順は完全に波長の順番となるが，全体の距離はわずかに増加する．これは 3 番目に短いルートに見られる．

これらより次のようなことが分かる．明るく感じることや濃く感じることあるいは鮮やかに感じることは１つの系列の平均値として感じているのかもしれない．特に，提示速度が速い時，かなりの平均操作がなされているように思う．逆に１秒間に１色の時は提示速度がゆっくり過ぎて一枚一枚の色を比べているようである．これは特定の色が印象に残る割合を調べても分かる．ランダム系列は 2 色/秒では 89.6%もあるが，3 色/秒で 66.7%，4 色/秒で 54.2%と減って行く．またミニマム系列は 2 色/秒では 70.8%もあるが，3 色/秒で 66.7%，4 色/秒で 43.7%と同様に減って行く．ここでミニマム系列の特定色印象度はランダム系列の割合より小さいことも分かる．同様のことがマキシマム系列とミニマム系列の間に見られる．

4．まとめ

色彩感覚の分析において数種類の色の提示を行い，その色彩変化の影響を調べた．その結果，同一色（7色）によるノンミニマムな系列とミニマムな系列をに対する感覚は明らかに異なり，提示速度の影響は大きい．また「自然」と「不自然」の違いは，各系列成分の近い値の組数と関係があり、明暗や濃淡とは関係ないことが分かった．

ミニマム系列は色相角度のほぼ大きさの順に並んでいる．また虹色の順がミニマム系列に近いものであるならば，色彩感覚の「自然」と関係があると考えられる．

今後は各色の色相と彩度で与えられるルートエリアを用いた人間の色彩感覚のモデルを構築したいと考えている[14]．

参考文献

1) 中野(1990)：ﾆｭｰﾛｺﾝﾋﾟｭｰﾀの基礎．ｺﾛﾅ社
2) 中野(1994)：C でつくる続脳の情報ｼｽﾃﾑ．啓学出版
3) 日本色彩研究所編(1993)：色彩ﾜﾝﾎﾟｲﾝﾄ 第８巻 色彩ｲﾒｰｼﾞと配色．日本規格協会
4) 日本工業標準調査会編(1985)：物体色の色名．日本規格協会
5) 菅野，鈴木，高橋(1996)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑⅡ．ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会 第 6 回ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ 講演論文集，pp. 32-33
6) 鈴木，高橋，菅野(1997)：ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑⅡ．玉川大学工学部紀要，第 32 号 pp. 97-104
7) 松浦，菅野(1997)：巡回ｾｰﾙｽﾏﾝ問題を利用した色彩感覚の分析．日本ﾌｧｼﾞｨ学会 第 13 回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集，pp. 487-488
8) 菅野，小島(1998)：巡回ｾｰﾙｽﾏﾝ問題を利用した色彩感覚の分析．日本ﾌｧｼﾞｨ学会 東海支部 第 6 回東海ﾌｧｼﾞｨ研究会 講演論文集，pp. 65-68
9) 菅野，小島(1998)：巡回ｾｰﾙｽﾏﾝ問題を利用した色彩感覚の分析Ⅱ．日本ﾌｧｼﾞｨ学会 第 14 回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集，pp. 843-846
10) 菅野，佐藤(1999)：巡回ｾｰﾙｽﾏﾝ問題を利用した色彩感覚の分析Ⅲ．日本ﾌｧｼﾞｨ学会第 15 回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集，pp. 761-765
11) B.Wooten, D.L.Miller(1997): The psychophysics of color. Color categories in thought and language, C.L.Hardin and Luisa Maffi, Ed., Cambridge University Press, New York, pp.59-88
12) 那須，菅野(1999)：巡回ｾｰﾙｽﾏﾝ問題を利用した色彩感覚の分析．日本ﾌｧｼﾞｨ学会 関東支部・北信越支部 第 13 回ﾌｧｼﾞｨ・ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ in 軽井沢 講演論文集，pp. 47-52
13) 菅野，那須(1999)：ＲＧＢ色空間内で最短距離の色彩系列による人間の色彩感覚．日本感性工学会 第１回日本感性工学会大会 講演論文集 pp. 98
14) N.Sugano, T.Nasu(2000): Human color impressions elicited by well-ordered color signal sequence with minimum distance. Proceedings of IEEE-IECON2000 (to be appeared)

問合せ先
〒194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1
玉川大学工学部電子工学科 菅野 直敏
Tel:042-739-8402 Fax:042-739-8858
E-mail:sugano@eng.tamagawa.ac.jp

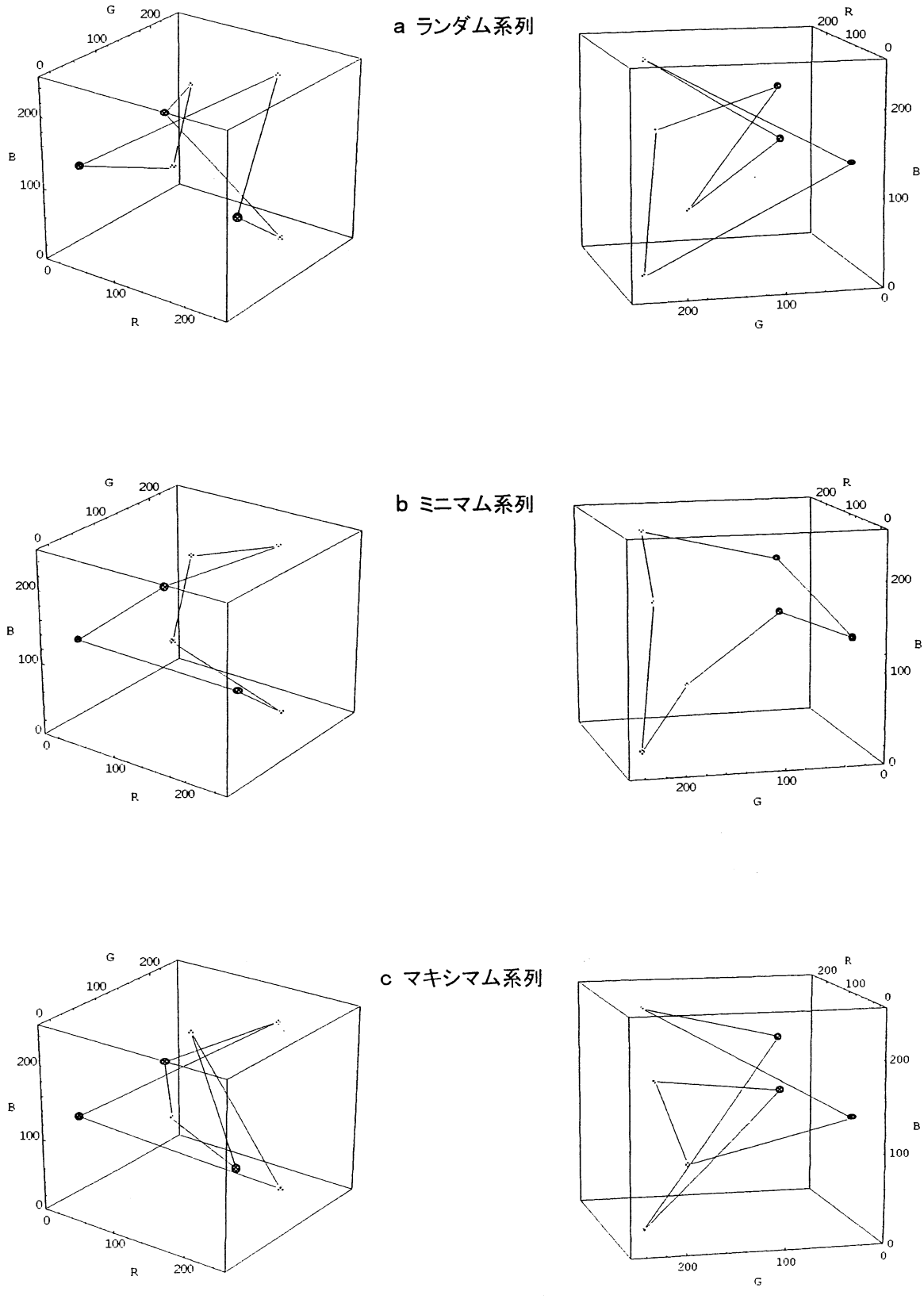


図 1a-c RGB 色立体中におけるランダムな 7 色と 3 つのルート

表 1a ランダム系列

Selected	RGB values			HLS values			Color names	Distance
Order	*r*	*g*	*b*	*h*	*l*	*s*		*d*=1371.2
No.1	117	76	209	258	0.56	0.52	Violet	
No.2	230	143	43	32	0.54	0.73	Light orange	
No.3	243	38	122	335	0.55	0.80	Vivid magenta	
No.4	181	202	235	217	0.82	0.21	Pale greenish blue	
No.5	35	23	133	247	0.31	0.43	Purplish blue	
No.6	0	243	30	127	0.48	0.95	Vivid green	
No.7	46	220	179	166	0.52	0.68	Cyan	

表 1b ミニマム系列

Optimized	RGB values			HLS values			Color names	Distance
Order	*r*	*g*	*b*	*h*	*l*	*s*		*d*=1164.3
No.3	243	38	122	335	0.55	0.80	Vivid magenta	
No.2	230	143	43	32	0.54	0.73	Light orange	
No.6	0	243	30	127	0.48	0.95	Vivid green	
No.7	46	220	179	166	0.52	0.68	Cyan	
No.4	181	202	235	217	0.82	0.21	Pale greenish blue	
No.1	117	76	209	258	0.56	0.52	Violet	
No.5	35	23	133	247	0.31	0.43	Purplish blue	

表 1c マキシマム系列

Optimized	RGB values			HLS values			Color names	Distance
Order	*r*	*g*	*b*	*h*	*l*	*s*		d=1760.1
No.1	117	76	209	258	0.56	0.52	Violet	
No.4	181	202	235	217	0.82	0.21	Pale greenish blue	
No.5	35	23	133	247	0.31	0.43	Purplish blue	
No.2	230	143	43	32	0.54	0.73	Light orange	
No.7	46	220	179	166	0.52	0.68	Cyan	
No.3	243	38	122	335	0.55	0.80	Vivid magenta	
No.6	0	243	30	127	0.48	0.95	Vivid green	

表 2 ランダム系列とミニマム系列による色彩感覚の分類

	Natural-	Unnatural-	Unknown-	Other-impressions
Random	0	20	5	6
Minimum	13	5	3	10

TD2−3

"物質感を伴う色" を使った人間の色感度の計測

Measurement of color sensitivity for surface color with texture

川澄 未来子
Mikiko Kawasumi
愛知淑徳大学
Aichi shukutoku univ.

鈴木 和彦
Kazuhiko Suzuki
(株)豊田中央研究所
Toyota central R&D labs., inc.

山川 みゆき
Miyuki Yamakawa
(株)豊田中央研究所
Toyota central R&D labs., inc.

Abstract Most experimental studies on color discrimination have been performed with uniform colors. Techniques employed in such studies may not generalize to actual surface colors of industrial products. We propose a new technique to measure "color discrimination ellipses" for textured surfaces, such as plastic, leather, and fabric. In our experiments, visual stimuli were produced by mixing two appearances: the surface color of an actual object and the non-object color on a CRT display, by means of a beam splitter (half-silvered mirror). Using a computer-controlled system, the experimenter changed the color appearance while preserving the texture appearance. Every stimulus was perceived as the surface of a colored object. We prepared reference and test stimuli by this technique and obtained color discrimination ellipses by the method of limits. We examined automotive plastic parts with a grained leather pattern. Results were interpreted according to a colorimetric system we developed for color quality control.

1 はじめに

日常生活の中で私たちが物体の色を観察する場合，光沢，きめ，模様，陰影などの「物質感」を伴った状態で捉えており，色だけを切り離して捉える場面は稀である。工業デザイナーや品質管理者たちが製品の色の善し悪しを検討する場合も同様で，物質イメージと色とを切り離さずに扱うことが重要である。

また，一方で，製品の設計・管理の自動化や省力化を目指して，色を計測・評価する技術に対するニーズは非常に高い。ところが，「物質感を伴う色」の計測・評価に関する学術的な研究はこれまでにほとんど存在しなかった。また，色票やディスプレイ上の色のような「物質感抜きの色」を対象とした手法や成果については数多くみられるが[1][2]，実問題への直接的な応用には大きなギャップがあった。そのため，現場では，人間（目視専門家）の目を使って評価や検討を進めているのが実情であった。

本稿では，こうした背景のもとに私たちが開発した自動車部品の色ずれ判定システム，および，その開発プロセスで新たに考案した，人間の色感度の計測手法について報告する。

2 色ずれ判定システム

図1に，自動車の内装樹脂部品の色品質管理を支援する目的で開発した色ずれ判定システムを示す[3][4]。

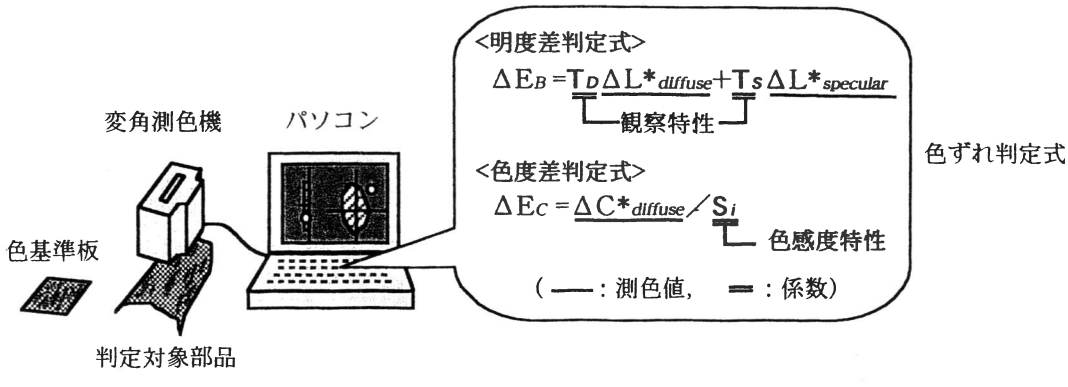


図1： 自動車部品の色ずれ判定システム

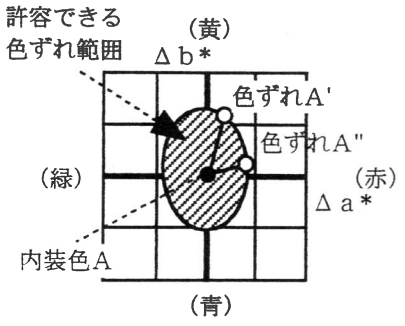
一般に，自動車を注文する顧客がカタログで選択できる内装色は，数種類である。部品工場では，この内装色ごとに色基準板（目標色）を作製し，各部品はこれに対する色ずれの度合を判定され，必要に応じて再び調色作業を行なっている。目視専門家の目による色ずれ判定作業は，精度が高く信頼性が高い一方で，定量表現されにくく経時的な記録を残しにくいという難点がある。本システムでは，目視専門家と同等の感度や判断基準を使って色ずれを自動判定するとともに，その色ずれの強度や方向を定量的かつビジュアルに示すことができる。

図に示すように，システムは変角測色機とパソコンとから構成され，また，パソコンにはオリジナルの色ずれ判定式が実装されている。色ずれ判定式は，変角測色機により獲得された３つの測色値，および，目視専門家の経験的な判断特性を示す３つの係数によって定義されている。また，この３つの係数は，目視専門家を被験者とした心理物理計測の結果をもとに，決定している。

3　部品色に対する人間の色感度特性

色ずれ判定式の３つの係数のうちの１つは，人間の目が持つ色感度特性を表わしている。図２は，色感度特性（色許容特性）を色空間上で示したものである。例えば，ある内装色Ａに対して許容できる色ずれの範囲は，図に示すような楕円形の領域で表わすことができる。すなわちこの例では，赤方向の色ずれには許容巾が狭く，黄方向の色ずれには許容巾が広いという特性を示している。楕円の形や大きさは，内装色の種類（色や表面の質感）に依存する。従って，色ずれ判定式で用いる色感度特性は，内装色ごとに求め，個別に設定する必要がある。

私たちは，この色感度特性を求めるために，目視専門家を被験者として心理物理計測実験を行なってきた。ところが，部品表面にはしぼと呼ばれる革の表皮を模擬した模様があり，この質感が人間の目の色感度を左右する



目で感じる色ずれ：A～A'≡A～A"
（a*－b*：国際照明委員会準拠の色空間）

図２：　色感度特性の例

存在であるため，計測実験の刺激には，「質感抜きの色」（色票やディスプレイ上の色）ではなく実物の部品の色を使う必要があっys。しかし，実験に必要な部品のカラーバリエーションを正確に試作するためには，高度な調色技術に加えて多大な時間と費用を要するため，非常に実験効率が悪かった。そこで今回，部品色の見えを仮想的に生成する方法を考案し，色感度特性を試作レスで計測できるようにした[5][6]。

4　部品色仮想生成のアイディア

図３は，部品色の見えを仮想的に生成するためのアイディアを示したものである。図のように，質感をもつ実物の部品，色を表示したＣＲＴディスプレイ，ハーフミラー（入射光を反射光と透過光とに分割するミラー）を配置する。これにより，ハーフミラーを介して実物の質感の見えとＣＲＴ上の色の見えとが光学的に重ね合わされ，観察者は透過的に着色された新たな部品色の見えを

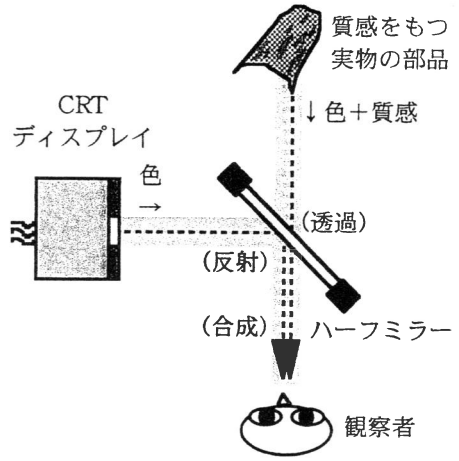


図３：　透過的着色のしくみ

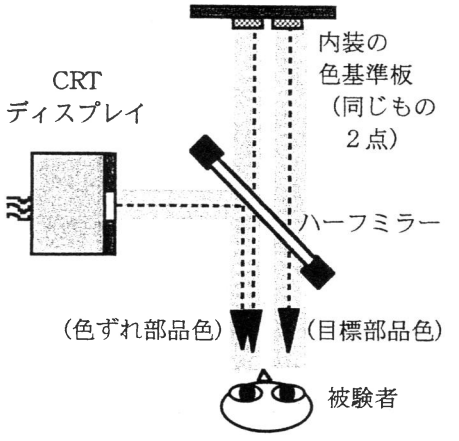


図４：　実験刺激の生成方法

仮想的に観察することができる。すなわち，部品表面のイメージ（物質感や存在感）はリアルなままで，部品に任意の色を着色でき，また，着色の度合はコンピュータを使って自由に制御することができる。

5　色感度特性の計測実験

図４は，色感度特性の計測実験のための実験刺激の生成方法を示したものである。内装の色基準板（同じもの２点）を被験者の正面に設置し，片方はＣＲＴの色を透過的に重ねることにより色ずれ部品色の見えを，また，もう片方はＣＲＴの色を重ねずに目標部品色の見え（色基準板そのままの見え）を表現する仕組みになっている。図５に，実験装置の配置を写真で示す。

また，今回，色感度特性の計測は，色弁別特性を計測[1][2]することによって代用した。求めたい色感度特性は，ごく小さな色差範囲におけるものであるため，色感度楕円を色弁別楕円の相似形であると仮定しても差し支えないと考えた。

次に，実験手続きについて，図６を使って説明する。

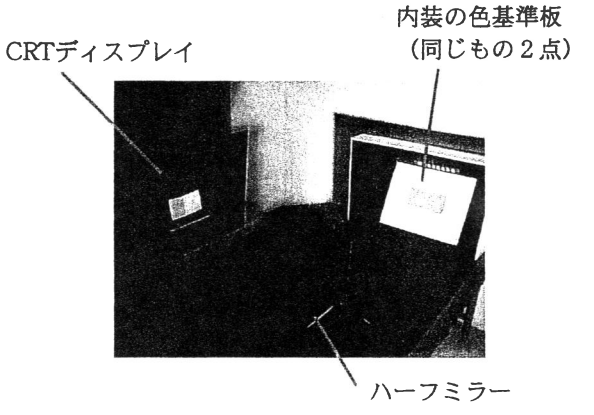


図５：　実験装置の配置

図６（左）は観察者からの実験刺激全体の見えを，また，図６（右）は部品色の見かけ上の測色値の動きを示すものである。被験者は，左右１組の部品色を観察して比較する。まず，左右の色の見えが同じ状態（ＣＲＴの色を両側とも何も重ねない状態）からスタートする。時間経過ともに，片方の部品色の見えだけが，色空間上のある方向（例えば黄方向）へ少しずつ変化していくように，ＣＲＴ表示色を調整する。被験者は，左右の色の見えが異なると自覚できた時点（色弁別閾値[2]）を申告する（極限法／上昇系列[2]）。この閾値の計測を，図６（右）に示す８つの色方向に対して実施し，各閾値を結ぶことにより色弁別楕円（色感度特性）を得ることができる。

なお，今回の計測実験では，ハーフミラーとして透明のアクリル樹脂板を使用した。図７は，実験前に使用検討した７つのハーフミラーの分光透過特性である。透明アクリル樹脂板（図中Ａ）は，透過率が80％以上と高い上，分光特性がフラットなため，実験において透過的に観察したい物体表面の質感が損なわれにくい。また，今回の実験刺激は，色ずれがごく小さな色差範囲であるため，ハーフミラーの反射率は５％程度の低さでも充分であるという理由から，このハーフミラーを選択した。

図８に，計測された色感度特性の一例を示す。表面しぼのある樹脂部品の内装色３種類（ブラウン，グレイ，ブルー）に対する結果を，色空間上で示している。内装色によって，楕円の形やサイズが異なることがわかる。

また，従来のように試作品を実験刺激として計測した場合の結果と比較したところ，特性の傾向は同じであった。従って，多大なコストを投じて部品を試作することなく，同等の結果が得られることを確認できた。

色票などのような「質感抜きの色」に対する色弁別特性の計測事例は古くから知られている[1]。しかし，今回紹介した「物質感を伴う色」に対する直接的な計測は例がないため，今回の手法は，実問題を扱う上で非常に有用性が高いと考えられる。

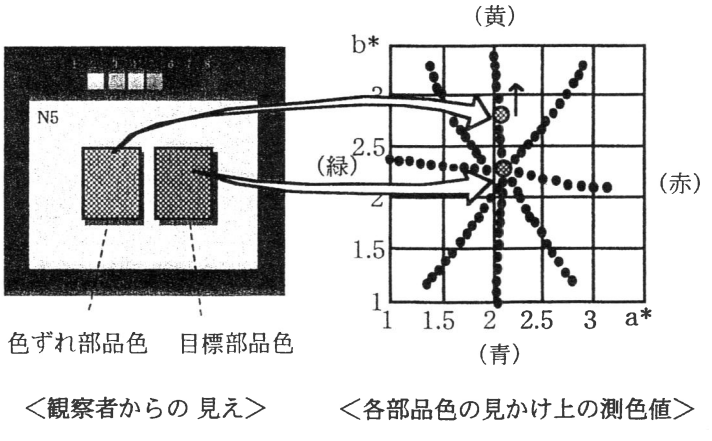


図６：　実験刺激の制御方法

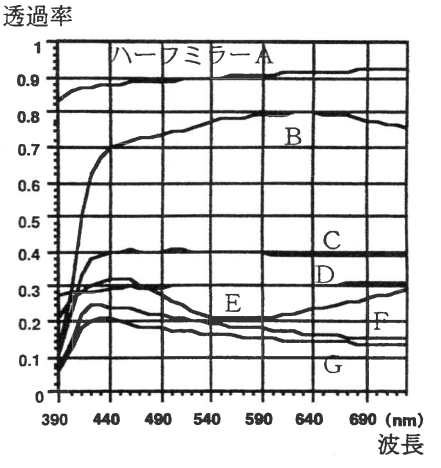


図７：　ハーフミラーの分光透過特性

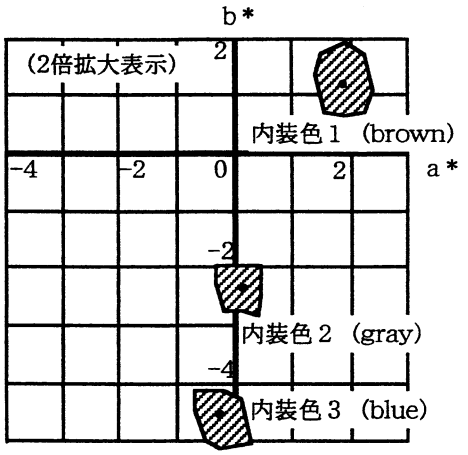


図8： 色許容特性の測定結果

6 まとめ

「物質感を伴う色」を使って人間の目の色感度特性を計測するために，部品に透過的に着色する手法を考案し，計測実験が低コストに実施できるようになった。計測された色感度特性は，内装樹脂部品の色ずれ判定システム内の係数として組み込み，結果的にシステムの開発コストを低減することができた。

透過的着色手法は，こうした実世界の物体に対する人間特性を計測する手段のみならず，例えばカラーデザイン工程などにおいても活用が期待できる。ＣＧを使ったカラーシミュレーションでは，物体表面の質感や存在感の表現に関して，精度上・コスト上の問題が大きい。本手法では，物質イメージの表現に対して高度な技術や手間を要することなく，また実物の試作に対して時間・費用・労力を費やすことなく，低コストに製品のデザインや見映えを検討することができる。今後は，こうしたメリットを活かすような他の使い道についても考えていきたい。

参考文献

[1] D. L. MacAdam, "Visual sensitivities to color differences in daylight", Journal of the Optical Society of America, 32, 247-274, 1942

[2] 日本色彩学会編，"新編色彩科学ハンドブック（第２版）"，東京大学出版会，1998

[3] 田中喜彦，音成信弥，伊東裕之，石原利員，川澄未来子，山川みゆき，"内装樹脂部品の色ずれ評価法の開発"，自動車技術会学術講演会論文集，1997

[4] Mikiko Kawasumi, Toshikazu Ishihara & Miyuki Yamakawa, "Color Difference Measurement for Plastic Parts of Automotive Interiors", IEEE Quality Control by Artificial Vision, 1998

[5] 川澄未来子，鈴木和彦，山川みゆき，"物体表面色に対する人間の色感度特性の測定手法"，第５回画像センシングシンポジウム講演論文集，1999

[6] Mikiko Kawasumi, Kazuhiko Suzuki & Miyuki Yamakawa, "Measurement of colour discrimination ellipses for surface colour with texture", European Conference on Visual Perception, 1999

TD3−1

時間変化を伴う都市景観の評価
−(1) モデル化関数の提案−
Evaluation of Cityscape Subject to Time Variation
−(1) Proposal for Modeling Function−

松下　裕
Yutaka MATSUSHITA

清水建設(株)和泉研究室
Izumi Research Institute, Shimizu Corporation

Abstract We construct a modeling function for multiattribute decision making subject to time variation by extending the multilinear formula with real variables. As a result, the modeling function (Eq. (1)) with no interaction terms is obtainable. Since this function is represented by integrals over time-intervals (i.e. cumulative style), it will help us derive factors' scores in every time step from a cumulative evaluation of a decision maker's.

1. はじめに

都市の景観評価では景観の時間変化が総合評価に大きく影響を与える場合があり，このような評価過程のモデル化には代替案の時間変化を考慮に入れる必要がある。しかも，評価者は，各場面（シーン）の評価値を機械的に足し合わせて総合評価値を求めるというより，ある文脈に基づいて各シーンを捉えながら総合評価値を求めている可能性が高い。これに対するモデル化の方法としては，時間に対する重みと因子の重みを算出して各シーンの評価値から総合評価値を求めるという方法も考えられるが，一般に，時間の重みと因子の重みを分離して算出することは困難である。そこで，本研究では，むしろ逆に累積的な評価値から各シーンの評価値およびその変化を見るという方法を採用し，このことを可能にするモデル化関数の構築を試みる。このとき，特に因子間の相互作用をどのように扱うかに重点をおいて考察を進める。

2. 時間の関数を変数とする汎関数

代替案が時間変化する多属性意思決定手法を構築するとき，因子間の相互作用をどのように扱えば良いであろうか。この疑問に答えるため，モデル化関数の構築を，因子間の相互作用項を（最も一般の形で）含んだ多項式（実変数の多重線型式）を時間の関数を変数とする汎関数に拡張するという方法で行う。

実変数の多重線型式とは，因子数をnとすれば，$\boldsymbol{R}^n$ (=$\boldsymbol{R}\times\cdots\times\boldsymbol{R}$ (n 個の直積)) から$\boldsymbol{R}$への関数Φであり

$$\Phi(h_1,\ldots,h_n) = \sum_{i=1}^{n} h_i g_{\{i\}} + \sum_{k=2}^{n}\sum_{|I|=k} h_{i_1}\cdots h_{i_k} g_I$$

と表される。ここに，$I=\{i_1,\ldots,i_k\}$であり，g_I ($I\subseteq N$) は実定数，h_i ($i=1,\ldots,n$) は実変数（因子スコア）である。右辺の最初の総和は通常の加重和であり，2番目の総和の中の各項は因子間の相互作用を表す。

この関数の特徴は次の通りである。まず，一つは相互作用項より関数$\varphi_I: \boldsymbol{R}^k \to \boldsymbol{R}$を

$$\varphi_I(h_{i_1},\ldots,h_{i_k}) = h_{i_1}\cdots h_{i_k} g_I$$

で定義したとき，これが多重線型写像になることである。すなわち，$\alpha,\beta\in\boldsymbol{R}$のとき

$$\varphi_I(h_{i_1},\ldots,\alpha h_{i_s}+\beta h'_{i_s},\ldots,h_{i_k})$$
$$= \alpha\varphi_I(h_{i_1},\ldots,h_{i_s},\ldots,h_{i_k}) + \beta\varphi_I(h_{i_1},\ldots,h'_{i_s},\ldots,h_{i_k}) \quad \text{(A)}$$

が成り立つ。もう一つの特徴は相互作用項にh_i^2などの同じ変数のべきが無いことである。この性質を汎関数への拡張に都合が良いように変数の従属性の概念と結びつけると，次のような条件としても表現される:

$$h_i \equiv h_j \ (i\neq j) \ \Rightarrow \ \varphi_I \equiv 0 \ \ \forall I \ni i,j. \quad \text{(B)}$$

ここに，$h_i\equiv h_j$は変数h_iと変数h_jに従属関係があることを示す（h_iとh_jが恒等的に等しいと見なしても構わない）。ただし，Φの定義域には本来このような変数は想定されていないから，これはΦが所有する性質ではなく，Φに対して外部から与えた“取り決め事”であることに注意されたい。

さて，上の性質を保ったままで実変数の多重線型式を拡張するのだが，それは次の2段階で行われる：まずベクトル変数の多重線型式に拡張し，次にそれを一般の多変数関数を変数とする汎関数に拡張する。そして，多変数関数を時間の関数に制限することにより，求める汎関数が得られる [1, 命題3の系]。各因子の時

間の関数を $h_j(\varphi(t))$ とするとき，汎関数は

$$\Phi(h_1,\cdots,h_n)=\int_0^1 \sum_{j=1}^n h_j(\varphi(t))\frac{d\varphi_j}{dt}dt \qquad (1)$$

で表される。ここに φ は $\boldsymbol{R}$ のある開区間から $\boldsymbol{R}^n$ の中への滑らかな写像であり，$\boldsymbol{R}^n$ の座標成分によって $\varphi(t)=(\varphi_1(t),...,\varphi_n(t))$ と表される。(1)式より「因子間の相互作用項は不要」ということになる。これはある意味で驚くべき結果かもしれない。そこで，どうしてこのようなことが起こったのかを見ていく。このことは，微分形式の概念を用いると数学的に明瞭になるのだが，ここでは概略を直感的に押さえることにする。

まず，(1)式の汎関数を得るために，次の仮定を用いていたことに注意されたい。

各因子スコアは時間の関数として一意に定まる。(C)

すなわち，因子スコアたちは時間のパラメータ t を介して関数的に従属であったのである。ところが，拡張には性質(B)を保存させていたことを思い出そう。性質(B)は「変数間に従属関係があるとき，相互作用項は零にする」ということだから，拡張後も（同様な性質である）仮定(C)の働きで相互作用項は零になるのである。逆に言えば，「(C)が成立しなければ，相互作用項は不要とは言えなくなる。」実際，本論文（その2）で行うような評価実験では，時間とともに様々な代替案（因子スコア）を与える訳だから，厳密には変数間の従属関係は成立しない。しかし，近似的には仮定(C)の成立は認められると思われる（注意参照）。

3. 統計手法への展開

以下では，都市景観評価において，累積的な評価値から各シーンでの各因子スコアを見れるようにするために，(1)式の汎関数をもう少し分かり易い形に書き換える。時間の分割を

$$0=t_0<t_1<\cdots<t_m=1$$

とし，時間増分 $\Delta t_k=t_k-t_{k-1}$ に対する x_j 座標の増分を $\Delta x_{j,k}$，区間 $[t_{k-1},t_k]$ 内の任意点での h_j の値を $h_{j,k}$ と記述すれば，(1)式の各線積分は級数の形で表される:

$$\int_0^1 h_j(\varphi(t))\frac{dx_j}{dt}dt = \lim_{m\to\infty}\sum_{k=1}^m h_{j,k}\frac{\Delta x_{j,k}}{\Delta t_k}\Delta t_k .$$

さらに，分割を十分小さく取ってこの積分を有限和で近似しよう。いま，m 等分の分割を設定すれば，$\Delta t_k=1/m$ だから，(1)式は次式で近似される。

$$\Phi(h_{1,k},\ldots,h_{n,k})=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^n\sum_{j=1}^n u_{j,k}, \qquad (2)$$

ここに，$u_{j,k}=h_{j,k}g_{j,k}$, $g_{j,k}=\Delta x_{j,k}/\Delta t_k$ である。$g_{j,k}$ を各時間刻みでの因子の重視度と解釈すれば，上式より，総合評価値は時間刻み毎の因子スコアの加重和を時間刻みで平均したものということになる。

(2)式は数量化一類の予測式と見なされる。時間区間 $[t_{k-1},t_k]$ (k ステップ）を固定すれば，(2)式の $u_{j,k}$ は (k ステップでの）j アイテムのあるカテゴリーのウエイトとなる。さらに，k ステップを動かせば，(2)式は“時間発展型”の数量化一類の予測式と考えられる。評価者から各ステップでの代替案の累積評価値を誘導し，その都度，数量化一類の分析を行えば各因子スコアを逐次的に算出できる。具体的な都市景観評価への展開は本論文（その2）で行うが，代替案の数と評価実験の注意を与えると次のようになる。

注意. 都市景観の説明因子（アイテム）として2つの質的特性（eg. 建物外観の色相と明度）を設定し，各因子は3つの独立なカテゴリーを有するものとする。このとき，時間ステップ数を3に設定すると，代替案の数は $(3^2)^3=729$ であり莫大な数になる。しかも，時間ステップ数の分だけ実験は必要であり，実験には時間経過を必要とするので，通常の時間変化を考慮しない実験に比べて被験者に与える負荷はかなり大きくなる。従って，代替案の数を適正規模に削減する必要があり，近似的には時間に対するカテゴリーの値は一意的と考えても良い範囲に落ち着くと予想できる。

4. おわりに

時間変化を伴う多属性評価のモデル化関数として因子間の相互作用項が無いものが構築された。このことは実変数の多重線型式を拡張する際，性質(A), (B), (C)を仮定したことに起因するが，理論的には時間の関数の汎関数を実変数の多重線型式の拡張により求める限り，相互作用項は不要ということになる。この意味は，「因子間の相互作用項があるもの」と仮定して汎関数を構築した結論として「相互作用項は不要」ということを誘導できたことにある。

謝　辞

なお，本研究の一部は，独創的産業技術研究開発促進事業の受託研究の一環として，新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)に協力して実施したものである。

参考文献

[1] 松下裕, 時間変化を伴う多属性意思決定のモデル化関数 - 多重線型式の微分形式の積分で表示される汎関数への拡張 -, 日本ファジィ学会誌, Vol. 12, pp. 253-265 (2000).

[問い合わせ先]
〒100-0011 東京都千代田区内幸町2 - 2 - 2 富国生命ビル
清水建設（株）和泉研究室
松下　裕
Tel: 03-3508-8101, Fax: 03-3508-2196
E-mail: yutaka@ori.shimz.co.jp

TD3−2

時間変化を伴う都市景観の評価
- (2) 分析方法と適用例 -

Evaluation of Cityscape Subject to Time Variation
- (2) Method of Analysis and Applied Example -

宮腰淳一
Jun'ichi MIYAKOSHI
清水建設(株)和泉研究室
Izumi Research Institute, Shimizu Corporation

松下 裕
Yutaka MATSUSHITA
清水建設(株)和泉研究室
Izumi Research Institute, Shimizu Corporation

Abstract In this paper (part 2), we developed a modeling algorithm called " time renewal type quantification theory type I " based on the modeling function proposed in this paper (part 1). We made experiments for several subjects with respect to a cityscape evaluation, and analyzed evaluation structures for subjects by this algorithm. As a result, we represented time variations in category weights by time functions, and we clarified the evaluation structures for subjects.

1. はじめに

都市景観評価では，代替案の時間変化を考慮に入れなければならない場合があり，本論文(その1)では因子スコアが時間の関数となるときのモデル化関数を提案した。これは，説明因子を質的特性とすれば，時間発展型の数量化I類の予測式と見なすことができる。

本論文(その2)では，まず，この時間発展型数量化I類を都市景観評価問題に適用するための解析アルゴリズムを構築する。さらに，街並みを遊歩するイメージの実験刺激を作成して評価実験を行い，本解析アルゴリズムを適用して評価者の意識構造を分析する。

2. 時間発展型数量化I類

属性全体の集合を $N=\{1,...,n\}$ とする。時間の m 等分の分割を

$$0=t_0<t_1<\cdots<t_m=1 \qquad (1)$$

とし，区間 $[t_{k-1}, t_k]$ 内の任意点での属性 j の達成度を $h_{j,k}$ とすると，属性の達成度が時間の関数で表現される場合の入出力系のモデル化関数は次式で表される[1]。

$$\Phi\left(h_{1,k},\cdots,h_{n,k}\right)=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}u_{j,k},\ u_{j,k}=h_{j,k}\cdot g_{j,k} \qquad (2)$$

ここで，$g_{j,k}$ を各時間刻みでの属性の重視度と解釈すれば，総合評価値Φは時間刻み毎の属性の達成度の加重和を時間刻みで平均したものということになる。説明因子が質的特性である場合，(2)式は数量化I類の予測式と見なすことができる（本論文(その1)参照)。

さて，「街並みを遊歩する」という観点から都市景観を評価する場合，評価者は各場面（シーン）を評価するのではなく，各シーンの時間的な連続性を捉えた上で景観を累積的に評価すると考える。このような評価過程を(2)式でモデル化する場合，ある時点での累積的な総合評価値から説明因子のウェイトを求める解析手法が必要となる。

いま，都市景観評価に影響を与える質的特性（アイテム）が n 個あるとする。時間間隔 $[t_{k-1}, t_k]$ を k ステップと呼び，k ステップでの総合評価値を y_k とする。さらに，時間間隔 $[t_0, t_k]$ に対する累積的な総合評価値を Y_k とする。このとき，Y_k と y_k の関係は，

第1ステップ　$Y_1=y_1$
第2ステップ　$Y_2=(y_1+y_2)/2=(Y_1+y_2)/2$
・・・・・
第 k ステップ　$Y_k=((k-1)Y_{k-1}+y_k)/k$
・・・・・

と表される。一定時間の間，代替案を眺めた後の総合評価値は Y_k であるから，その値を評価者から抽出すれば，上の関係式より各ステップでの総合評価値 y_k が得られる。そして，各ステップでの総合評価値とアイテムとの関係を(2)式でモデル化すれば，数量化I類の解析法を利用してステップ毎のカテゴリーウェイトが求められる。すなわち，時間の関数としての因子スコアを算出することができる。このように時間ステップ毎に逐次的に数量化I類を利用したアルゴリズムのことを時間発展型数量

化I一類と呼ぶことにする。図1にそのフローチャートを示す。

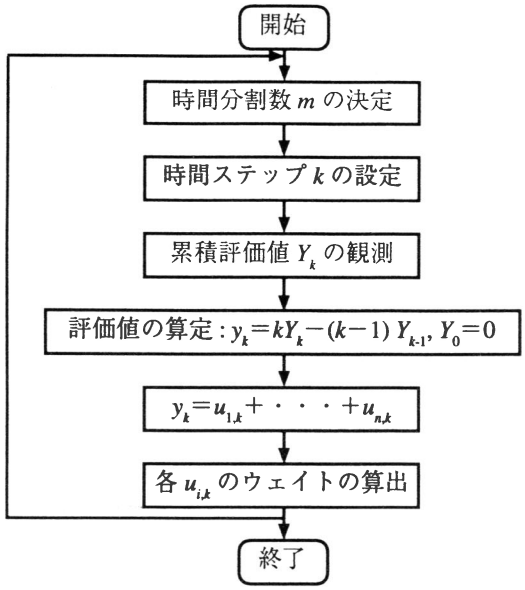


図1. 時間発展型数量化一類のフローチャート

3. 適用例

3.1 都市景観評価実験

静止画による都市景観評価の研究は既に多くのものがあり，文献[2]では，都市景観の総合評価は街並みを構成する建物の壁面の色相と明度の影響を受け，特に色相の影響は最も強いという知見が得られている。本論文では，この知見を参考に，都市景観の目的変数として「総合評価」，説明因子（アイテム）として「色相」を考える。色相のカテゴリーは，表1に示すような3つを設定する。

また，現実に近い街並みを遊歩するイメージを実験室で再現できるように，実験刺激を以下のように作成する。まず，実際の街並み（10点）をデジタルカメラで撮影する。次に，建物の壁面を表1に示したカテゴリーに対応するように画像処理を行う。最後に，簡易型Virtual Reality作成ソフトで連続する街並みを作成する。図2に作成した画像の例を示す。なお，実際の街並みは建物の形態の影響が少ないと考えられるような比較的均質な形

表1. 色相のカテゴリー

カテゴリー	色相	備考
1	暖色系同一	1～3ステップの壁面を青系にする
2	寒色系同一	1～3ステップの壁面を茶系にする
3	ランダム	2の壁面を茶系，1, 3を青系にする

の壁面が連続している地点を選定した。

時間ステップは，撮影した街並みの10点を(1)式の時間刻みと

$t_0 \leftrightarrow$1st point, $t_1 \leftrightarrow$2nd point, ・・・, $t_9 \leftrightarrow$10th point

で対応させ，これから定まる9間隔：$[t_0, t_1]$, $[t_1, t_2]$, ・・・, $[t_8, t_9]$ を3等分し，第1ステップを1～3間隔，第2ステップを4～6間隔，第3ステップを7～9間隔と設定する。なお，実験刺激の色相のランダムとは第2ステップに対応する街区の壁面のみを暖色に，それ以外を寒色に画像処理したものである。

評価実験は，被験者に予め「建物の壁面に注目して評価を行う」ことを要請した上で，各カテゴリーの実験刺激を，1番目は第1ステップ，2番目は第1～2ステップ，3番目は第1～3ステップという時間ステップを連続で提示し，そのたびに目的変数に対する感じ方の度合いを回答させる形式で行った。したがって，1番目から3番目までの評価はそれぞれ，被験者が街並みを遊歩したときの「初期評価」，「中間評価」，「全体評価」に対応するものである。このような形で評価実験を行う意味は「街並みを遊歩するという文脈で評価者が代替案と一定時間接触した上で評価を行う」ことを可能にすることにある。回答シートを図3に示す。被験者は回答シートの対応する部分（縦線のない中間部分も許す）に印をつける。その評価値の数量化は，最悪の言葉に0を，最良の言葉に1を対応させ，[0, 1] に基準化した形で得点を割り当てる。なお，被験者は10人である。

3.2 意識構造分析

都市景観に対する評価実験結果を本解析アルゴリズムで分析した結果を示す。図4に，各カテゴリーのウェイトの値（(2)式の $u_{j,k}$ に相当，ただし，j は本来アイテムに対応するが以下簡単のためカテゴリーに対応させる）の時間的変化を示す。本論文のようにアイテム数が

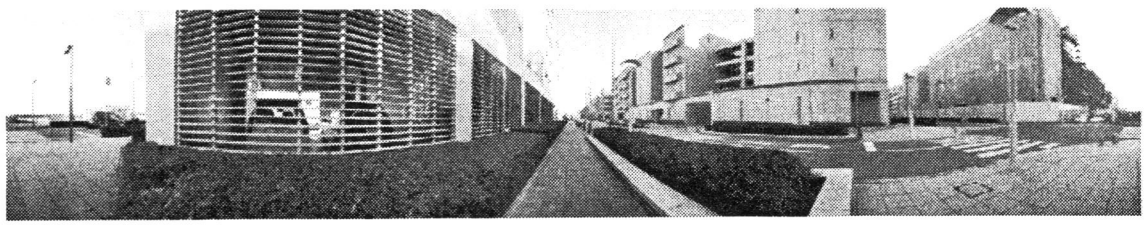


図2. 簡易型Virtual Reality作成ソフトで作成した実験刺激の例

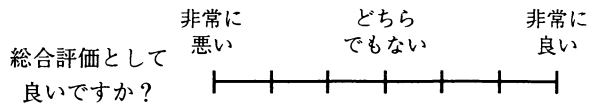


図3. 回答シート

1個の場合，カテゴリーウェイトの値はそのカテゴリーに対する被験者の評価値の平均

$$\bar{y}_{j,k} = \sum_{i=1}^{n} y_{i,j,k} \Big/ n \qquad (3)$$

となることに注意されたい。ここに，nは被験者数であり，下指標はi被験者，jカテゴリー，kステップを意味し，$y_{i,j,k}$は被験者iのjカテゴリー，kステップの評価値である。なお，図中には標準偏差も併せて示す。また，表2に，各時間ステップでの被験者の評価値と予測値との相関係数を示す。これらの表より，以下の考察ができる。

① 総合評価と色相の相関は低く，総合評価は色相以外のアイテム（明度や形態など）の影響を受ける複合的な評価であると考えられる。

② すべてのカテゴリーウェイトにおいて第3ステップの標準偏差は大きくなり，また，第3ステップでの評価値と予測値との相関はかなり低い。すなわち，第3ステップでの総合評価の色相の説明力の低下は，第3ステップでの被験者間の評価値のばらつきと関連すると考えられる。この原因について次の2つが考えられる（③，④）。

③ 多くの被験者にとって，街並みの全体評価は初期評価や中間評価とは異なる意味をもつと考えられる。すなわち，全体評価では，全ての時間ステップでの景観をもう一度想起し，より総合的に判断するのではないかと考えられる。このことが事実ならば，被験者は時間ステップに対して重み付けを行っている可能性がある。

④ 一方，②は誤差項の増幅による結果とも考えられる。実際，全体の評価値から第3ステップの総合評価値の算出は$y_3 = 3Y_3 - 2Y_2$という手続きを踏まえている。

表2. 各時間ステップの評価値と予測値の相関係数

	時間ステップ		
	1	2	3
相関係数	0.43	0.15	0.21

⑤ 寒色系同一，暖色系同一では第3ステップのカテゴリーウェイトが最大になるが，ランダムでは第2ステップで最大となり第3ステップでは減少する。これより，同色系壁面の連続による効果があるものと考えられる。すなわち，同色系の全体評価に関して，同色系壁面の連続が初期評価，中間評価に上積みするような効果を与えていると考えられる。

3.3 アイテム・カテゴリーの妥当性の検討

ここでは，カテゴリー間の影響度合いを調べることによって各時間ステップのカテゴリー設定の妥当性を検討する。すなわち，(3)式の平均値（kステップは固定）を大小順に並べ，その並べられた隣同士の平均値の差の有意差を，以下の帰無仮説に対する検定により調べる。ただし，カテゴリーjの平均はkステップを固定して$\bar{y}_j = \bar{y}_{j,k}$と表す。

＜帰無仮説＞ $\bar{\mu}_\alpha = \bar{\mu}_\beta$

（カテゴリーα，βの母平均の値は等しい）

＜検定＞ $t_0 \geq t(\phi, p)$

（$t(\phi,p)$は自由度ϕ，有意水準pのt分布の値）

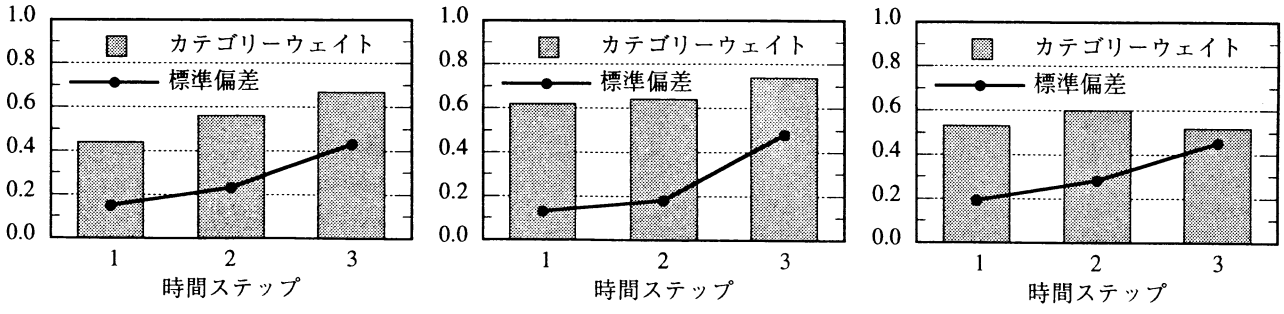
ただし，t_0，ϕは次式で求められる。

$$t_0 = \left|\bar{y}_\alpha - \bar{y}_\beta\right| \Big/ \sqrt{S_\alpha^2/n + S_\beta^2/n} \qquad (4)$$

$$\phi = 1 \Big/ \left(c^2/(n-1) + (1-c)^2/(n-1)\right)$$

$$S_\alpha^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(y_{i,\alpha} - \bar{y}_\alpha\right)^2 \Big/ (n-1)$$

$$S_\beta^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(y_{i,\beta} - \bar{y}_\beta\right)^2 \Big/ (n-1)$$



(a). 寒色系同一　(b). 暖色系同一　(c). ランダム

図4. カテゴリーウェイトと標準偏差の時間変化

表3. 各時間ステップの平均値の差の検定結果

カテゴリー対比	時間ステップ 1	2	3
$\overline{y}_1, \overline{y}_2$	2.77* $>t(18, 0.02)$	0.88* $>t(17, 0.4)$	0.34 $<t(18, 0.7)$
$\overline{y}_1, \overline{y}_3$	1.15 $>t(17, 0.3)$	0.34 $<t(17, 0.7)$	0.77 $<t(18, 0.5)$
$\overline{y}_2, \overline{y}_3$	1.26 $>t(17, 0.3)$	0.39 $<t(17, 0.7)$	1.06* $\fallingdotseq t(18, 0.3)$

注）表の値は(4)式のt_0を示す.
*は平均値の最大と最小の差の検定結果を示す.
$t(\phi,p)$ は自由度ϕ，有意水準pのt分布の値を示す.
帰無仮説に対して，＞は棄却，＜は採択の意識を表す.

$$c = S_\alpha^2 \Big/ \left(S_\alpha^2 + S_\beta^2\right)$$

また，平均値の最大と最小との差での検定も行うことができて，その場合はアイテム設定に対する検定という意味をもつ。これらの検定は，有意水準$p = 0.2$ or $p = 0.3$とあまい設定で行われる。なお，詳細については文献[3]を参照されたい。

表3に，各時間ステップにおける平均値の差の検定結果を示す。表中，アスタリスク(*)は平均値の最大と最小との差の検定の意味であり，それ以外は隣り合う平均値の差の検定である。また，不等号はt_0とt分布の値との関係を適当な有意水準pによって示したものである。例えば，$t(\phi,0.2) < t_0 < t(\phi,0.3)$のとき，$t(\phi,0.2) < t_0$ or $t_0 < t(\phi,0.3)$のいづれかで示す。ただし，これらの表示には意識における差がある。$> t(\phi,0.2)$と書いたときは平均値の差が有意であることを意識した表示（帰無仮説は有意水準20%で棄却）であり，$< t(\phi,0.3)$と書いたときは平均値の差が有意でないことを意識した表示（帰無仮説は有意水準30%で採択）である。表より，次の考察ができる。

⑥ 第1ステップでは，全てのカテゴリー設定が良いといえる。第2ステップでは，寒色系同一と暖色系同一で有意差が見られる。第3ステップでは，暖色系同一とランダムでのみ有意差が見られ，第1，2ステップで有意であった寒色系同一と暖色系同一との有意差は無くなる。

以上より，全ステップを通せばこのようなカテゴリー設定は必要と考えられる。また，第3ステップの有意差の変化は③，④を支持するものと考えられる。

4. おわりに

本論文では，代替案が時間変化する場合の評価過程のモデル化関数を用いて，時間ステップ毎に逐次的に数量化I類を利用する解析アルゴリズム（時間発展型数量化I類）を構築した。さらに，街並みを遊歩するイメージの実験刺激を用いて都市景観評価実験を行い，本論文で提案した解析アルゴリズムを適用した。その結果，評価者の意識構造の時間的変化を表現することができ都市景観評価に対する幾つかの有益な知見が得られた。しかし，同時にモデル化関数およびそれを用いた解析アルゴリズムに対する問題点も明らかとなった。

まず，第3ステップでの評価者のウェイトが大きくばらつく原因が，評価者の意識構造の変化によるのか，単なる誤差項の増幅によるのかが特定できないという問題がある。もし，その原因が評価者の意識構造の変化によるものである場合，時間ステップに対する重視度を考慮すれば本論文でのモデル化関数で表現できる。ただし，この重視度の抽出（観測）は容易ではなく，実験方法などへの工夫が必要となる。

また，同色系の壁面が終始連続することが第3ステップのウェイトを増長していると考えられるが，これは因子スコアを時間の関数で表すことによってのみ表現され得る成果であり，本論文でのモデル化関数に応用上の意味を強く与えるものである。一方，このことを時間ステップ間の相互作用と解釈することもでき，この相互作用を積極的に取り入れて評価者の意識構造を分析するためには新たなモデル化関数の構築が必要であろう。

謝辞

なお，本研究の一部は，独創的産業技術研究開発促進事業の受託研究の一環として，新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）に協力して実施したものである。

参考文献

[1] 松下　裕：時間変化を伴う都市景観の評価 -(1) モデル化関数の提案-，第16回ファジィシステムシンポジウム論文集，2000.

[2] 木多道宏，奥　俊信，舟橋国男，紙野桂人：都市景観における色彩の評価構造に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第502号，pp.147-154, 1997.

[3] 駒澤　勉：数量化理論とデータ処理，朝倉書店，pp.36-39, 1982.

[問い合わせ先]

〒100-0011
東京都千代田区内幸町2-2-2
フコク生命ビル27F
清水建設(株)和泉研究室
宮腰　淳一
Tel: (03)3508-8101
Fax: (03)3508-2196
E-mail: miya@ori.shimz.co.jp

TD4−1

対話による人間が納得できるファジィルールの獲得

Acquisition of Intelligible Fuzzy Rules with Interaction

鬼沢武久
Takehisa ONISAWA
筑波大学機能工学系
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

安斎剛
Tsuyoshi ANZAI
筑波大学理工学研究科
Master's Program in Science and Engineering, University of Tsukuba

Abstract: This paper mentions fuzzy rules acquisition by the interactive genetic algorithms which use an integer coding. Acquired fuzzy rules are expressed in plain linguistic labels. Especially, this paper considers the decision of the number of acquired fuzzy rules. In order to confirm the validity of the presented approach, it is applied to a car control for running through a crank-typed road.

1．はじめに

知識獲得や知識発見の手法でボトムアップ的な知能化手法としてGA(genetic algorithms)やEA (evolutionary algorithms)を用いた手法が提案されている[1,2]。これらの手法を用いて獲得された知識を人間にとってわかりやすい平易な言葉で表現することは知識の伝達にも有効であるが、考慮されることは少ないように思われる[3]。その理由の一つとして、獲得された知識が納得できるかどうかの評価をする必要があるが、このような定性的な評価を明確に定式化することが難しいという点が挙げられる。一方、GA の結果を評価するプロセスに客観的な適応度関数の代わりに人間の評価を組み込んだ対話型 GA が提案されている[4]。

著者らはこの対話型 GA を用いたファジィルール獲得とその表現に関する研究を行ってきたが[5,6]、これらの研究では、獲得されるルールの数をあらかじめ決めておき、その数のファジィルール獲得をねらいとしてきた。本稿では、獲得すべきファジィルールの数についても自動的に決められるよう考慮する。そして本手法を自動車のクランクコース走行制御に応用する。

2. 対話型 GA を用いたファジィルール獲得

2.1 ファジィルールのコーディング

本稿では、ファジィルールを構成するファジィ集合のメンバーシップ関数として台形型メンバーシップ関数を用いる。台形型メンバーシップ関数は**図 1** に示すように 4 つのパラメータ LS, RS, LW, RW で表現される。ただし、LS, RS はそれぞれ、メンバーシップ値が 1.0 をとる始点、終点であり、LW, RW は、メンバーシップ関数の定義域上でメンバーシップ関数の斜辺の長さの半分を表わす変数で、それぞれ左半分、右半分を表わす。本稿では $LS, RS \in [0,100]$、$LW, RW \in [0,50]$ とする。

さて if～then～形式で表現される 1 つのファジィルールを**図 2** に示すように一本の染色体で表現する。つまり、一本の染色体に複数のメンバーシップ関数のパラメータの組をコード化する。そして 1 個以上の染色体（ファジィルール群）を持つものを 1 つの個体とする。

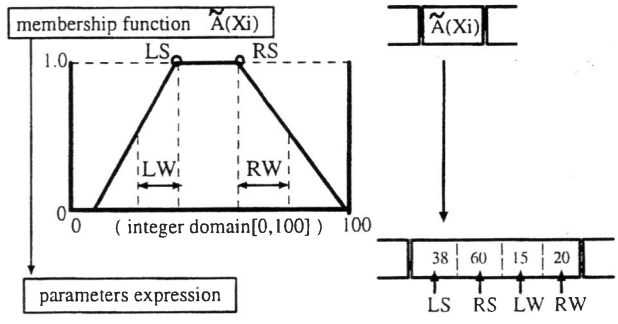


図 1 台形型メンバーシップ関数

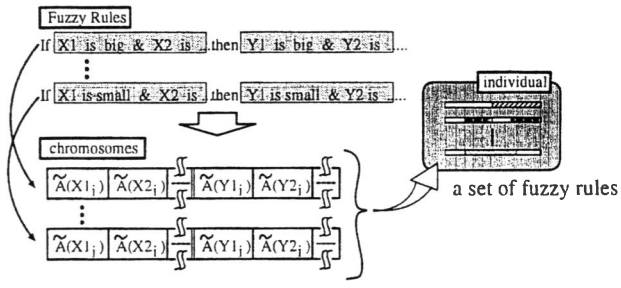
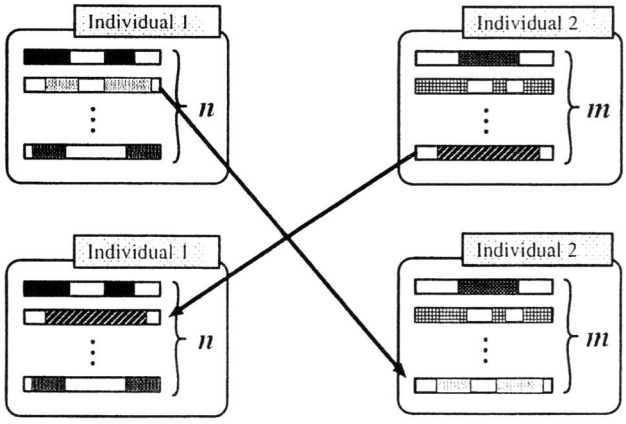


図 2 ファジィルールの個体表現

2.2 異なった数の染色体を持つ個体の遺伝子操作

2.2.1 交叉

交叉を、2 個体間の特徴を受け継ぐことと考え、交叉による子の生成方法は**図 3** に示すように親の染色体を入れ替えることと定義する。こうすることによって、異なる数の染色体を持った親同士の交叉が可能となる。



染色体数(n,m)は変わらない

図3　交叉

2.2.2 突然変異

突然変異を、子の特徴の中に親の特徴にないものが発生することと考え、個体中の染色体に対して**図4**に示すように3種類の突然変異を考える。タイプ1はメンバーシップ関数の情報が全く異なって伝わる場合、タイプ2はメンバーシップ関数が並行移動する場合、タイプ3はメンバーシップ関数が定義域の中心で鏡像をとる形になる場合である。

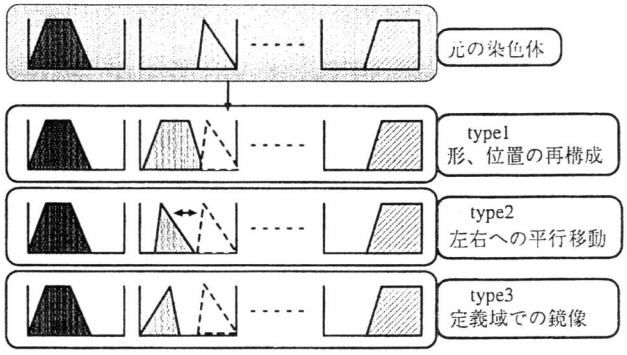


図4　突然変異

2.3 個体の評価方法

個体の評価に関しては2種類の評価指標を考える。1つは、通常のGAにおいて一般的に用いられている適応度関数に基づく定量的な評価、もう1つは、人間が行う定性的な評価で、獲得されたルールの言語的表現のわかりやすさ、納得の度合いに対する評価を含む。

2.3.1 適応度関数

GAを適用する対象によっていろいろな適応度関数が考えられるが、本稿では車のクランクコース走行制御を対象としているため、制御開始地点と壁などにぶつかった地点との距離を以下の式で定義する。

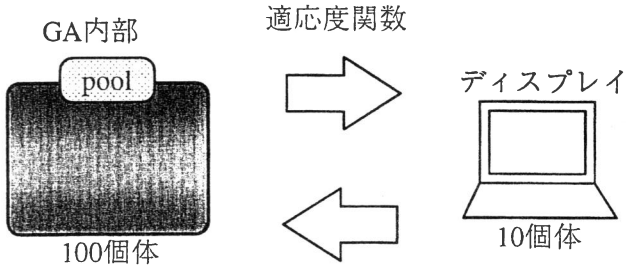
$$dis=\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2} \qquad (1)$$

ただし、(x_1,y_1)は制御開始地点の座標、(x_2,y_2)は車が壁に衝突した地点の座標とし、(1)式の値が大きいほど高い適応度を個体に与える。

2.3.2 定性的評価

対話型GAでは人間による解候補の評価という単純作業を繰り返さなければならないため、人間の疲労が問題になる。そのため評価する個体の数を減らさなければならないが、これは探索結果が初期値に依存してしまうこと、収束が悪くなることにつながる[4]。そこで本稿では以下の手順にしたがってすすめていくことにする。沢山の個体を準備し、すべての個体について前節で述べた適応度関数を用いて適応度を計算する。適応度の高い個体から一部分を選択し、選択されたルールを用いて制御する。制御結果、およびそのルールの理解しやすさ、納得のいく度合いについて人間が定性的評価する。本稿では準備する個体は1つの世代で100個体とし、その中から人間に提示する個体を10個選ぶ。この流れを**図5**に示す。

制御結果とルールの言語表現の納得の度合いについての定性的評価は、「非常に悪い、悪い、どちらとも言えない、良い、非常に良い」の5段階評価で、同世代の10個の個体の中の相対的評価を行う。



評価に応じたGA操作

図5　対話型GAの流れ

2.4 選択

選択はエリート保存戦略とルーレット戦略を併用して用いる。評価された10個の個体のうち最も高い評価を受けた個体をエリートとして次世代にそのまま残す。またその10個体について、(2)式を用いて得られた個数を次世代の親候補の個数とする。

$$\text{次世代の親候補の数}=2\times m \qquad (2)$$

ただしmは前節で述べた5段階評価値で、$m=4$：非常に良い、$m=3$：良い、$m=2$：どちらとも言えない、$m=1$：悪い、$m=0$：非常に悪いとする。こうして選択された次世代の親候補の数が100に満たない場合は、前世代の個体からランダムに選択する。こうして生成された100個体について、そのまま残されるエリート個体を除いた99個体について、交叉、突然変異を適用して次世代の個体を生成する。

3．獲得されたファジィルールの言語ラベル表現

本稿では、ファジィルール獲得手法を車のクランクコース走行制御に適用するため、それに必要な距離や角度などに関するラベルをあらかじめ準備して

おく。獲得されたファジィルールを表わすファジィ集合 A のメンバーシップ関数を $h_A(x)$、あらかじめ準備されたファジィ集合 B_i のメンバーシップ関数を $h_{B_i}(x)(i=1,2,..,15)$ としたとき、ファジィ集合 A と B_i との類似度 $DS1_i$ を（3）式で定義する。

$$DS1_i = \frac{AREA(h_A(x) \wedge h_{B_i}(x))}{AREA(h_A(x) \vee h_{B_i}(x))} \qquad (3)$$

$$AREA(h(x)) = \int_0^1 x_{\max}(\alpha) - x_{\min}(\alpha))\alpha \, d\alpha \qquad (4)$$

ただし、$\wedge$ と $\vee$ はそれぞれ min、max 演算であり、$[x_{\min}(\alpha), x_{\max}(\alpha)]$ はメンバーシップ関数の α カットである。$AREA(h(x))$ はメンバーシップ関数の値で重み付けした $h(x)$ の重み付け面積である。$DS1_i$ が最も大きい値をとる B_i のラベルを生成されたファジィ集合 A の言語ラベルとする。

4．シミュレーション実験

本稿のシミュレーション実験では、車のクランクコース走行制御についての問題を簡略化している。本シミュレーション実験では、個体中の染色体（ファジィルール）の数を１～６としている。また、交叉確率、突然変異確率はすべて一定とし、その確率を交叉は８０％、突然変異はタイプ１が１０％、タイプ２とタイプ３は３０％としている。

4.1 クランク走行制御

車のクランク走行制御のためのファジィ制御器のルール獲得を行う。ここでは５入力２出力のルール獲得を目指す。

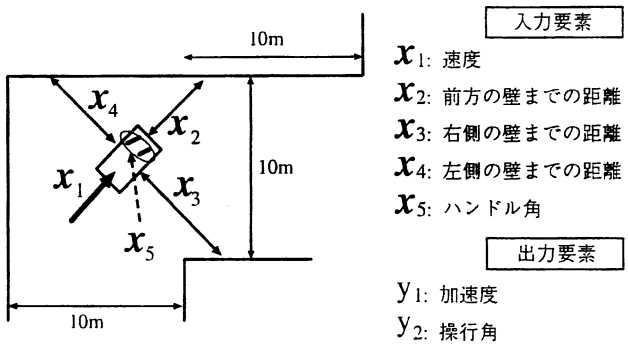


図６　クランク走行制御の環境

入力要素を x_1～x_5 とし、**図６**に示すように x_1 は進行方向に対する車の速度 (m/s)、x_2, x_3, x_4 はそれぞれ前方、右側、左側の壁までの距離 (m)、x_5 をハンドル角 (deg) とする。それぞれが取りうる範囲は、$0 \le x_1, x_2, x_3, x_4 \le 10$、$-30 \le x_5 \le 30$ とする。ただし、入力の定義域の範囲以上の入力があった場合には定義域の上限の値を入力とし、定義域の範囲以下の入力があった場合には定義域の下限の値を入力する。

次に出力要素を y_1, y_2 とする。y_1 は車の加速度 (m/s^2)、y_2 は車の操作角 (deg) でそれぞれの範囲を $-10 \le y_1, y_2 \le 10$ とする。道路の幅は 10m、車の長さ３m、幅を 1.5m とする。

なお本稿では、入力要素に対する入力空間を完全に覆うことに関しては何の制約も設けていない。したがってルールの組み合わせによっては、ルールの前件部の満足度が０になる場合もあり得る。その場合は制御器の出力値は現状維持としている。

4.2 実験結果と考察

4.2.1 シミュレーション例

７世代目でクランクコースを抜けて、かつ人間にとって比較的わかりやすい、納得できるファジィルールが獲得されている。そのときの制御結果を**図７**に、ファジィ集合の形を**図８**に、ルールを車の実際の動作に対応付けて表現したものを**表１**に示す。この実験では最終的に２個のルールが獲得されている。

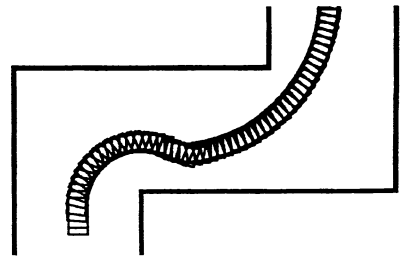


図７　７世代目のエリート個体による制御結果

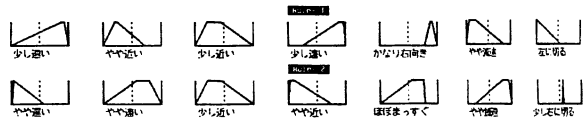


図８　７世代目のエリート個体のファジィルール

表１　獲得されたファジィルールの言語的表現

Rule1	(前件部)	Rule1	(後件部)
速度が 前方の壁が 右側の壁が 左側の壁が ハンドルが	少し速く， やや近く， 少し近く， 少し遠く， かなり右向きなら，	速度を ハンドルを	やや落として， 左に切る
Rule2	**(前件部)**	**Rule2**	**(後件部)**
速度が 前方の壁が 右側の壁が 左側の壁が ハンドルが	やや遅く， やや遠く， 少し近く， やや近く， ほぼまっすぐなら，	速度を ハンドルを	少しあげて， 少し右に切る

表１のルール２では、車がスタートしてハンドルを右に切りながら進んでいくことを示している。このルールでは左右の壁までの距離は右側の方が左側に比べて距離があるのでハンドルを少し右に切っている。一方ルール１は、右折した後、ハンドルを左に切り直してまっすぐに戻している。さらにこのルー

ルは左折するときにも適用されている。ここで獲得された2つのルールは、右折するときに適用されるルールと、ハンドルを右に切れている状態からまっすぐに戻す操作、および左折するときに適用されるルールになっていることがわかる。

5. わかりやすさの評価の有効性

本章では、「わかりやすい」、「納得できる」の評価を入れたことの有効性を確認するために、「わかりやすさ」、「納得できる」評価を考慮しない場合のルールを前章で得られたルールと比較する。

「わかりやすさ」、「納得できる」評価を入れないでルール獲得したときの制御結果を**図9**、獲得されたルールのファジィ集合の形を**図10**、ルールを車の実際の動作に対応付けて表現したものを**表2**に示す。表2を見ると、ルール3は右側の壁が近く、ハンドルが右向きなのにさらにハンドルを右に切ることを表わしており、ルール2は左側の壁が近く、右側の壁が遠く、ハンドルが右向きにもかかわらずハンドルを左に切ることを表わしている。このように図10に示すルールは制御性能はそれなりに良くても言語表現の納得の度合いは低いと言える。前章で獲得されたクランクコース走行制御で獲得されたルールは人間にとって納得できるルールになっていることを考えると、「わかりやすさ」、「納得できる」評価を入れたことの有効性が確認されたと言える。

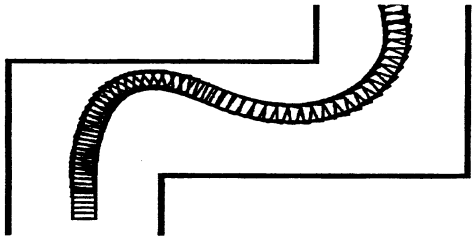


図9　わかりやすさを考慮しない場合の制御結果

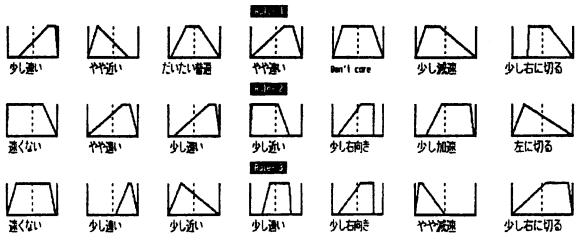


図10　わかりやすさを考慮しない場合のファジィルール

6. おわりに

本稿では、人間にとって理解しやすく納得できるファジィルール獲得のために対話型GAを適用する手法を提案した。従来のGAの評価には適応度関数を用意して定量的な評価を行っているが、本稿では、ルールのわかりやすさ、納得のできるルールといった人間が得意な定性的な評価をGAに組み込んでいる。またルール獲得にあたっては、に含まれる染色体の数を自由にできるようにした。ルール数も自動的に決められるように、個体の中本手法を用いて、車のクランクコース走行制御に応用し、獲得されたルールが納得できていることが確認でき、その有効性が示された。

今後の課題としては、獲得されたルールの言語化は必ずしも洗練されたものではないので、その洗練化が必要である。

表2　獲得されたファジィルールの言語的表現

Rule1	(前件部)	Rule1	(後件部)
速度が 前方の壁が 右側の壁が 左側の壁が	少し速く, やや近く, だいたい普通で, やや遠いなら,	速度を ハンドルを	少し落として, 少し右に切る
Rule2	**(前件部)**	**Rule2**	**(後件部)**
速度が 前方の壁が 右側の壁が 左側の壁が ハンドルが	速くなく, やや遠く, 少し遠く, 少し近く, 少し右向きなら,	速度を ハンドルを	少しあげて, 左に切る
Rule3	**(前件部)**	**Rule3**	**(後件部)**
速度が 前方の壁が 右側の壁が 左側の壁が ハンドルが	速くなく, 少し遠く, 少し近く, 少し遠く, 少し右向きなら,	速度を ハンドルを	やや落として, 少し右に切る

参考文献

[1] 北野：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993

[2] D.B.Fogel: Evolutionary Computation -toward a New Philosophy of Machine Intelligence, New York, IEEE Press, 1995

[3]S.Maebashi and T.Onisawa: Acquirement and Linguistic Expressions of Fuzzy Rules, Proc. of the Third Asian Fuzzy Systems Symposium, pp. 258-263, Masan, Korea 1998

[4]高木、畝見、寺野：対話型進化計算法の研究動向、人工知能学会誌、Vol.13, No.5, pp.692-703, 1998

[5]安斎、鬼沢：人間にとってわかりやすいファジィルールの獲得、第15回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.467-470, 1999

[6] T.Onisawa and T.Anzai: Acquisition of intelligible Fuzzy Rules, Proc. of the 1999 IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics, Vol.6, pp.212-217, Tokyo Japan, 1999

[連絡先]

鬼沢武久

〒305-8573　つくば市天王台1－1－1

筑波大学機能工学系

TEL:0298-53-5060,　FAX:0298-53-5207

E-mail: onisawa@edu.esys.tsukuba.ac.jp

TD4−2

ファジィ同定におけるルール生成規準とルール形式について

Criteria of Rule Generation and Rule Form for Fuzzy Identification

小林 俊一　　網野 栄郎

信州大学　　セイコーエプソン (株)

Abstract: On the modeling of the fuzzy system, the choice of rule generation method is a problem. For this problem, it is effective to identify the system with sampled data to be given previously and many methods had been reported. Then, this article aims to propose a new method by which it is able to identify the nonlinear system with multiple inputs by less rules and determine fuzzy partitions of antecedent part and parameters of the model simultaneously. As a consequence, the number of learning is increased but the number of acquired rules are decreased by approximately from 33% to 50% comparing with the conventional methods. Then , in order to prove the proposed method, the numerical examples are shown.

1. はじめに

近年，非線形システムを表現する方法として，ファジィ推論を用いた方法が注目されている．しかし，システムをモデル化する際に，どのようなルールを用いるかが問題となる．この問題に対して，あらかじめ得られたサンプルデータをもとにモデルを同定するのが有効であるとされており，様々な方法が提案されている [1)2)].

これらの方法のなかでも，サンプルデータに対して直接ルールを生成することによって学習回数を大きく減少させることができる [3)]．しかし，ファジィ規則表に従うようなルールである場合，入力次元が増えればルール数が算術級数的に増大してしまう問題がある．

そこで，本研究では逐次的にルール生成を行い，多入力系に対して少ないルール数で同定可能な方法を提案するものである．

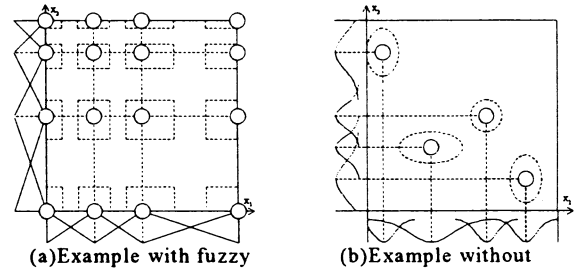
2. 同定理論

2.1 ファジィモデル

ファジィ規則表に従うようなルールの場合 (**Fig.1(a)**)，ルール表現は比較的容易ではあるが，多入力になるとルール数が増大する傾向がある．そこで，本研究では $x_i(i=1,2,\ldots,n)$, y をそれぞれ入力，出力とした場合，**Fig.1(b)**及び**(1)**式に示すようなルールを用いる．

$$R^k : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^k \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^k \text{ and} \ldots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^k, \text{ then y is } w^k \quad (1)$$

$k(k=1,2,\ldots,m)$はルール番号，A_i^kは k 番目のルールに対して i 番目の入力空間に配置されたファジィ集合，w^kは後件部実数値である．このようなルールは規則表として表現はできないが，各メンバシップ関数がルールごとに独立して設定されているため，きめ細かいモデルの表現が可能である．



(a)Example with fuzzy rule table　　(b)Example without fuzzy rule table

Fig.1 Examples of fuzzy rule

以降，本論文ではこのようなルールを独立型ルールと呼ぶことにする．

ファジィ集合を表現するメンバシップ関数は，Fig.1(b)を見ても分かるように，三角型などではファジィルールの非発火が予想されるため，次式に示すガウス型メンバシップ関数を用いた．

$$A_i^k(x_i) = \exp\left\{-\frac{(x_i - a_i^k)^2}{b_i^k}\right\} \quad (2)$$

ここで，a_i^kは中央値，b_i^kは分散を表す．

適合度μ_kは代数積で与え，推論値y^*を求めると**(3)**のようになる．

$$y^* = \sum_{k=1}^{m} \mu_k \bullet w^k \Big/ \sum_{k=1}^{m} \mu_k \quad (3)$$

2.2 パラメータの調整

パラメータの調整には最急降下法を用いる．最急降下法を用いた場合，**(4)**の評価関数 E の最小化問題として定式化できることが知られている．

$$E = \frac{1}{2}(y^r - y^*)^2 \quad (4)$$

ただし，y^rは真値はサンプルデータの出力値である．ゆえに，この(4)式が減少する方向へパラメータ a_i^k, b_i^k, w^kを以下の3式によって更新していく．

$$\begin{cases} a_i^{k\,new} = a_i^{k\,old} - Ka\dfrac{\partial E}{\partial a_i^k} & (5) \\ b_i^{k\,new} = b_i^{k\,old} - Kb\dfrac{\partial E}{\partial b_i^k} & (6) \\ w^{k\,new} = w^{k\,old} - Kw\dfrac{\partial E}{\partial w^k} & (7) \end{cases}$$

Ka, Kb, Kw はそれぞれ a_i, b_i および w に対する学習係数であり，学習がスムースに進むように任意に決定する．

3. ルールの獲得

3.1 ルールの生成方法

ファジィルールは基本的にサンプルデータに対して生成する．そのため，誤差が大きいデータを対象としてルールを生成することが考えられ，事実これまでも文献において最大誤差点のみが考慮されてきた．この場合，誤差のみが考慮されるが，その点における適合度も考慮の対象となるべきである．しかし，今回用いた独立型ルールの場合，サンプルデータによってはルールの低発火が十分考えられ，更には対象とする関数の極値あるいは不連続点に集中してルールが生成される可能性がある．そこで，これらを避けるため次式を定義する．

$$G(p) = \left|y_p^r - y_p^*\right| \Big/ \sum_{k=1}^{m} \mu_{kp} \qquad (8)$$

$y^r{}_p$, $y^*{}_p$, μ_{kp} は p(p=1,...,P)番目のデータに対する出力値，推論値および適合度をそれぞれ表している．この(8)は，誤差が大きいほど，低発火になればなるほど G(p)は大きい値となる．よって，すべてのデータの中から G(p)が最大となるデータを選びルールの生成対象とする．

さて，今上記の方法でサンプルデータ $\{x_1^g,...,x_i^g,...,x_n^g,y^{rg}\}$ が選ばれたとし，その時の推論値，適合度を y^{*g}, $\mu_k{}^g$ とする．新たに生成されるメンバシップ関数の中央値 a_i^{m+1} は，サンプルデータを各入力軸へ投影した値とし，分散 b_i^{m+1} は任意の定数，後件部 w^{m+1} の値は，新たなルールを用いた場合，そのサンプル点での推論値と出力値 y^{rg} とが等しくなるように設定する．これをまとめたのが次の**(9)～(11)**である．

$$\begin{cases} a_i^{m+1} = x_i^g & (9) \\ b_i^{m+1} = \text{const.} & (10) \\ w^{m+1} = y^{rg}\left(\sum_{k=1}^{m}\mu_k{}^g + 1.0\right) - y^{*g}\sum_{k=1}^{m}\mu_k{}^g & (11) \end{cases}$$

提案した同定方法によると，パラメータ調整およびルール生成が次の式で表せる推論誤差 D(t)があらかじめ入力された閾値 T_1 より少なくなるまで繰り返される．

$$D(t) = \frac{1}{P}\sum_{p=1}^{P}\left|y_p^r - y_p^*\right| \qquad (12)$$

更には式(13)で示される推論誤差の変化分 $\Delta D(t)$ が，あらかじめ決定されている閾値 T_2 より少なくなるまでルール生成が繰り返される．

$$\Delta D(t) = \left|D(t) - D(t-1)\right| \qquad (13)$$

閾値 T_2 は推論誤差D(t)を用いて式(14)により決定される．ここで λ は一定であり，10^{-1} から 10^{-3} の値に設定される．

$$T_2 = \lambda D(t) \qquad (14)$$

3.2 ルール獲得の手順

ルールの獲得手順を **Fig.2** に示した．

step 1:初期設定　要求精度 T_1, 収束判定値 λ およびメンバーシップ関数の分散値を入力する．サンプルデータの中から出力値の最大と最小のデータを選びそれぞれの位置にに初期ルールを設定する．

step 2:ルール生成点の選択　$\{x_1^g,...,x_i^g,...,x_n^g,y^{rg}\}$ を選び

step 3:前件部のメンバーシップ関数の生成　式(9)～(10)によりメンバーシップ関数を設定する．

step 4:後件部の生成　式(11)により新規の後件部を設定する．

step 5:推論値の計算　(3), (4)により入力データに対する推論値を求める．

step 6:パラメータの調整　P個のサンプルデータにおいて(5)～(7)式を用いて各パラメータの調整を行う．

step7: 1組の学習の終了判断　データ番号 p が P 個になったか判断をする．

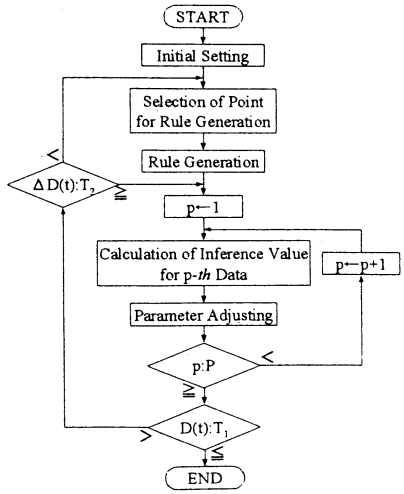


Fig.2 Flow chart

もし p=P ならば step 8 へ，そうでなければ p を 1 増やして step 5 へ戻る．

step 8:推論誤差の計算　式(12)により $D(t)$を求める．

step 9:推論誤差 $D(t)$と要求精度 T_1 を比較する．模試 $D(t)>T_1$ ならば step 10 に，そうでなければ同定作業を終了する．

step 10:新しいルールの生成の決定　推論誤差の差分 $\Delta D(t)$と閾値 T_2 を比較し，もし $\Delta D(t) \leqq T_2$ ならば step 2 に戻り，そうでない場合は p=1 として step 5 に戻る．

4. 数値実験

提案した手法の有効性を明らかにするため，3 種類の非線形関数について数値シミュレーションを行った．それぞれについての関数を Fig. 3 から Fig. 5 に示す．最初の関数は 1 次元関数であり，2 番目は 2 次元の減衰形の波形関数であり最後は 2 次元の不連続関数である．また，それらの式を以下に示す．

Ⅰ．1 次元非線形関数

$$y = 2^{-\frac{2}{3}}(1.27x+0.27)^2(0.73-1.27x)^{\frac{2}{3}} \quad -1 \leq x \leq 1 \qquad (15)$$

Ⅱ．2 次元非線形関数(damped wave function)

$$y = \frac{\cos(2\pi\sqrt{x_1^2+(x_2+0.5)^2})\exp(-x_2-1)}{2}+0.5 \qquad (16)$$

$$-1 \leqq x_1, x_2 \leqq 1$$

Ⅲ．2 次元非線形不連続関数

$$y = \begin{cases} 0.25\sin(\pi x_2)+0.5 & (0 \leqq x_1 \leqq 1) \\ \exp(2x_1 - x_2^2) & (-1 \leqq x_1 < 0) \end{cases} \quad (-1 \leqq x_2 \leqq 1) \qquad (17)$$

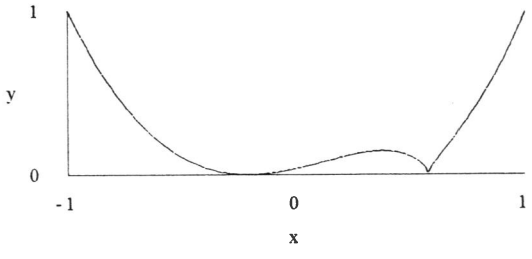


Fig. 3 1 次元非線形関数

4.1 関数Ⅰの同定結果

x∈〔-1，1〕上の区間から 43 点のランダムに選択したデータを基に同定を行った．推論誤差の要求精度は 2.0×10^{-2} とした．生成されたメンバーシップ関数を **Fig.6** に示す．Fig.6 から，提案手法よる場合，x=0.57 の近くに集中していることがわかる．また，従来法による場合には獲得したメンバーシップ関数の数は提案法と同一であるが，変曲点にその集中化は見られない．100 組の同定結果を表 1 に示す．表には 5 個の結果と 100 個の平均値を示した．表より従来法によると学習回数が幅広く分布するが，提案法の場合には平均

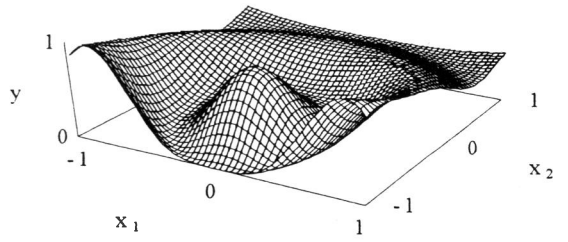


Fig.4 2 次元非線形関数(Damped Wave Function)

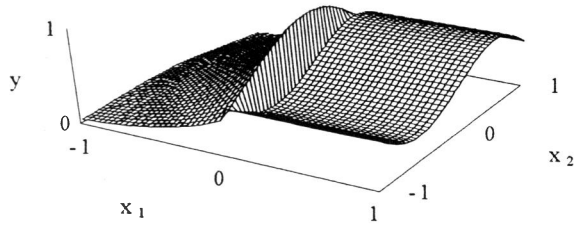
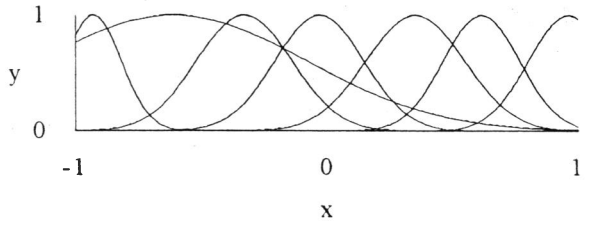
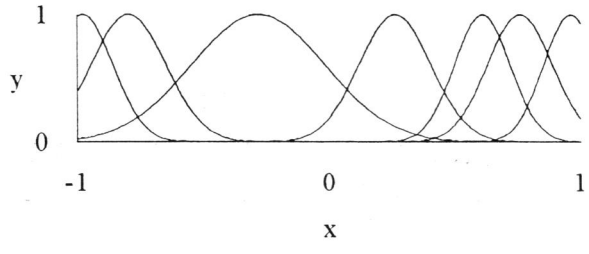


Fig.5 2 次元非線形不連続関数



(a) The Conventional Method



(b) The Proposed Method

Fig.6 獲得したメンバーシップ関数

表 1　同定結果

	Learn. Times		No. of Rules		Mean of Abs. Er.		Max. of Abs. Er.	
	fixed	proposed	fixed	proposed	fixed	proposed	fixed	proposed
①	62	81	7	7	0.0222	0.0290	0.1194	0.1232
②	19	60	7	5	0.0192	0.0217	0.0716	0.0566
③	98	60	7	5	0.0412	0.0287	0.3542	0.1286
④	1148	71	7	7	0.0211	0.0265	0.0948	0.1063
⑤	39	111	7	6	0.0211	0.0172	0.0621	0.0642
mean	1275.84	63.13	7.00	5.68	0.0364	0.0290	0.1971	0.1270

的に 50%位であり，推論精度も高いことがわかる．なお，評価データは等間隔 151 点とした．

4.2 関数Ⅱの同定結果

関数Ⅱについては，区間$-1 \leqq x_1, x_2 \leqq 1$ 内について 100 点をランダムに選び同定を行った．また評価データは 2601 点とし，精度は 0.03 である．同定結果を表 2 に示す．従来法において学習回数は，ルール数が 49 未満であると学習の進展がなかったためルール数をこの様にした．

表 2　同定結果（関数Ⅱ）

	Learn. Times		No. of Rules		Mean of Abs. Er.		Max. of Abs. Er.	
	fixed	proposed	fixed	proposed	fixed	proposed	fixed	proposed
①	69	78	49	12	0.0814	0.0632	0.7614	0.5331
②	136	60	49	13	0.0531	0.0512	0.6562	0.5526
③	56	153	49	18	0.0374	0.0406	0.2293	0.2487
④	48	73	49	14	0.0562	0.0483	0.4275	0.4165
⑤	64	96	49	13	0.0497	0.0455	0.3143	0.3669
mean	216.76	87.49	49.00	14.67	0.0510	0.0479	0.4523	0.4063

表 2 より提案法は従来法と比較しルール数が 1/3 以下でありながら誤差も少ないことが明らかとなった．また，学習回数も平均で 1/2 以下となった．

4.3 同定結果（不連続関数）

この関数は $x_1=0$ において関数が不連続になっている．同定のための条件は関数Ⅱと同一でありその結果を表 3 に示した．表 3 から次のことがわかる．学習回数は従来法の場合，10 数回から 10000 回を超える場合もあり，サンプルデータにより大きく変化する．また，平均値で比較すると提案法は従来法による場合の約 1/5 で終了する．更に獲得したメンバーシップ関数の数も少ない．

表 3　同定結果（関数Ⅲ）

	Learn. Times		No. of Rules		Mean of Abs. Er.		Max. of Abs. Er.	
	fixed	proposed	fixed	proposed	fixed	proposed	fixed	proposed
①	14	103	25	18	0.0416	0.0476	0.4849	0.5108
②	15	102	25	17	0.0472	0.0478	0.5072	0.4217
③	10000	86	25	22	0.0626	0.0503	0.3748	0.3615
④	233	132	25	29	0.0418	0.0382	0.4159	0.4416
⑤	97	103	25	18	0.0467	0.0491	0.5246	0.5723
mean	495.02	95.07	25.00	18.73	0.0404	0.0450	0.4219	0.4273

5. まとめ

逐次的ルール増加法におけるルール生成規準および独立型ルールによるルールの生成法について提案した．また，その方法を用いて，3 種類の関数の同定を試みた．その結果従来法より少ない学習回数で且つ少ないルール数で同定可能となった．

今後は，学習回数を少なくすることや，更に入力次元を増加させた場合の検討あるいは実験用ロボットなどへの応用が考えられる．

参考文献：

1) Shoichi ARAKI, Hiroyoshi NOMURA, Isao HAYASHI : SELF-GENERATION METHOD OF FUZZY INFERENCE RULES, Fuzzy Engineering Toward Human Friendly System IFES'91, pp.1047-1058(1991)

2) 石　岩，水本　政晴，湯場崎　直義，大谷　正幸：最急降下法によるファジィ規則の自動チューニングの一提案，日本ファジィ学会誌 Vol.8, No.4, pp.757-767(1996)

3) 網野　栄郎，小林　俊一：非線形システムのファジィ同定に関する一提案，第 7 回日本ファジィ学会北信越支部ファジィシンポジウム講演論文集，pp.53-56(1998)

[問い合わせ先]
〒386-8567　長野県上田市常田 3-15-1
信州大学 繊維学部 機能機械学科
小林俊一
TEL : 0268-21-5436　FAX : 0268-21-5321(共用)
E-mail : vkoba00@giptc.shinshu-u.ac.jp

TD4−3

統合によるルール削減手法を用いたファジィクラシファイアシステムによるファジィルール自動生成

An Automatic Generation of Fuzzy Rules by Fuzzy Classifier System with a Rule Reduction Technique Using Rule Merging

井上博行† 畑瀬圭太‡ 亀井且有‡
Hiroyuki INOUE† Keita HATASE‡ Katsuari KAMEI‡
†福井大学教育地域科学部 ‡立命館大学理工学部
†Faculty of Education and Regional Studies, Fukui University
‡Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

Abstract: In this paper, we present a generation technique for fuzzy rules using hyper cone membership functions by a fuzzy classifier system. We also present a rule reduction technique by rule merging. In the conventional fuzzy classifier system, lattice type fuzzy rules are constructed in input and output spaces. We use the hyper cone membership functions instead of one-dimensional membership function used in the conventional system and get more efficient fuzzy rules without division of input space by a designer. We applied the presented method to a line pursuit and a inverted pendulum control problems.

1 はじめに

ファジィ推論は，ファジィ制御をはじめ様々な分野に応用されてきた．このファジィ推論には，推論ルールの獲得やメンバーシップ関数のチューニングが困難なことから，自動チューニングや自動生成に関する研究が盛んに行われてきた [1]-[6].

遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた手法も数多く提案されている．これらは，GA に基づく機械学習 (GBML) の枠組みで考えることができる．GBML は，大きく分けてミシガンアプローチとピッツアプローチに分けることができるが，ファジィルール自動生成手法の多くはピッツアプローチに分類できる [3]-[6]．これらは，一つのファジィシステムを一つの個体とするため，遺伝情報が多くなり，大規模なシステムへの適用が難しくなる．それに対して，ミシガンアプローチをファジィシステムに応用したファジィクラシファイアシステム (FCS) が提案されている [7]-[9]．ミシガンアプローチは，ルールを一つの個体とし，一つのファジィシステム内で有効なファジィルールを見つけるので，比較的大きなシステムに対しても適用可能である．しかし，これらはあらかじめ用意した多数のルールの中から，必要なルールを選択する手法であり，前件部構造などをあらかじめ決定しておく必要がある．

本研究では，FCS によりファジィルールの数や位置，形状を自動生成する手法の開発を目標としている．そこで本稿では，超円錐形メンバーシップ関数を用いたファジィルール [6] を自動生成する手法を提案する．これによりメンバーシップ関数の位置，形状を自動的に決定する．さらに，問題対象に適したルール数にするため，ルールを統合し，ルール数を削減する手法を導入する．これらの提案法を，自動車の直線追従走行と倒立振子 [10] のファジィ制御ルールの獲得に応用する．

2 超円錐形メンバーシップ関数を用いたファジィルール

本研究で用いるファジィルール R^i は，(1) 式で表す．

$$R^i : \text{if } \boldsymbol{x} \text{ is } A_i \text{ then } \boldsymbol{y} \text{ is } B_i,\ i = 1, 2, \cdots, n \quad (1)$$

ここで i はルール番号，n はルール数，$\boldsymbol{x}$ と $\boldsymbol{y}$ はそれぞれ入出力ベクトル，A_i と B_i はファジィ集合である．なお，入力と出力の次元数を l と m とする．

ルール R^i の前件部の A_i と後件部の B_i は，それぞれ直接入出力空間上の領域を指しいる．このようなルールを n 個作成し，ファジィ集合 A_i と B_i は以下に示す超円錐形メンバーシップ関数で表す．l 個の入力によって生じる l 次元の入力空間上の超円錐形メンバーシップ関数 μ_{A_i} は，(2)，(3) 式で定義される．

$$\mu_{A_i} : A_i \to [0, 1] \quad (2)$$

$$\mu_{A_i}(\boldsymbol{x}) = \left(1 - \frac{\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{a}_i\|}{\alpha_i}\right) \vee 0 \quad (3)$$

ここで，$\boldsymbol{a}_i$ と α_i はファジィ集合 A_i の中心座標ベクトルと半径である．このメンバーシップ関数 μ_{A_i} は，半径が α_i である超球形ファジィ集合 A_i の中心 $\boldsymbol{a}_i \in \boldsymbol{R}^l$ がグレード 1.0 となり，その中心からの距離に比例してグレードが下がる．例として，$l = 2$ の場合の円錐形メンバーシップ関数を図 1 に示す．ファジィ集合 B_i を表す出力メンバーシップ関数 μ_{B_i} も同様に定義する．

次に入力に $\boldsymbol{x}^*$ が与えられたとき，出力 $\boldsymbol{y}^*$ を算出す

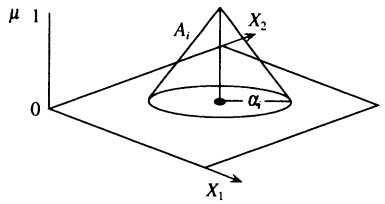


図 1　入力の円錐形メンバーシップ関数 ($l = 2$)

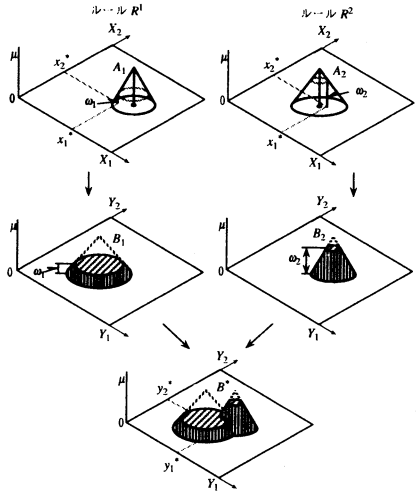


図 2　推論法の例

る．まず，ルール R^i の前件部における適合度 ω_i を求める．メンバーシップ値がそのまま適合度になるので，(3) 式に $\boldsymbol{x}^*$ を代入し，その値を ω_i とする．次に (4) 式のようなメンバーシップ関数 $\mu_{B_i{}^*}(\boldsymbol{y})$ を定義する．

$$\mu_{B_i{}^*}(\boldsymbol{y}) = \omega_i \wedge \mu_{B_i}(\boldsymbol{y}) \tag{4}$$

このメンバーシップ関数 $\mu_{B_i{}^*}(\boldsymbol{y})$ の形状は，$\mu_{B_i}(\boldsymbol{y})$ をグレード ω_i でカットされた形となる．各ルールの推論結果の合成である $\mu_{B^*}(\boldsymbol{y})$ を (5) 式で求める．

$$\mu_{B^*}(\boldsymbol{y}) = \bigvee_{i=1}^{n} \mu_{B_i^*}(\boldsymbol{y}) \tag{5}$$

最後に非ファジィ化を行い，出力値 $\boldsymbol{y}^*$ を求める．

$$\boldsymbol{y}^* = \frac{\int_{D_y} \mu_{B^*}(\boldsymbol{y})\boldsymbol{y}d\boldsymbol{y}}{\int_{D_y} \mu_{B^*}(\boldsymbol{y})d\boldsymbol{y}} \tag{6}$$

$n = 2, l = 2, m = 2$ とした推論の流れを図 2 に示す．

また，入力のメンバーシップ関数の配置により，どのルールに対しても適合度が 0.0 である領域が出現する．本手法ではこのような領域に入力 $\boldsymbol{x}^*$ を得た場合，最も近いルール R^ϕ が発火するものとする．

3　FCS によるファジィルール自動生成

3.1　ファジィクラシファイアシステム

FCS は図 3 に示すように，Fuzzy Rule Base，Fuzzy Inference System，Apportionment of Reward System，Rule Generation Mechanism の 4 ブロックからなる．基

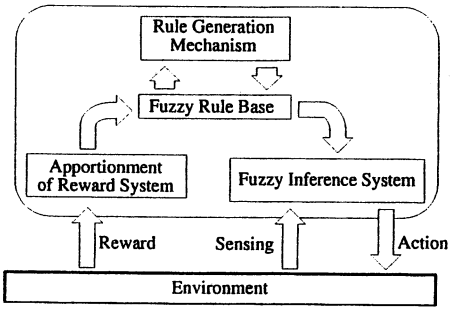


図 3　ファジィクラシファイアシステム

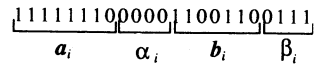


図 4　R^i を構成する染色体

本動作として FCS は，環境からの感覚に対して適合度を持ったルールを Fuzzy Rule Base から取り出し，ファジィ推論を行い行動を決定する．Apportionment of Reward System では，行動による報酬を信頼度として各ルールに，その適合度に応じて割り当てる．Rule Generation Mechanism では，信頼度に基づき GA を用いて新しいルールを生成する．

本手法では，第 2 章で述べた超円錐形メンバーシップ関数用いたファジィルールを用いるものとする．Rule Generation Mechanism においてファジィルール R^i を構成する 4 つの要素，ファジィ集合 A_i の中心座標ベクトル $\boldsymbol{a}_i$ と半径 α_i，ファジィ集合 B_i の中心座標ベクトル $\boldsymbol{b}_i$ と半径 β_i は，図 4 のように遺伝情報としてコーディングされる．

3.2　自動車の直線追従制御への応用

本手法を，図 5 のような自動車の直線追従問題に応用した．これは，η（直線と車両との水平距離）と θ（車両の傾き）より，δ（車両の舵角）を推論するものである．ここでは，ルール数（個体数 N）を 30 とした．GA の演算において選択は信頼度を適応度として適応度比例戦略を，交叉は一点交叉を用い，突然変異は変異率を 0.02 として行った．なお各個体の信頼度 $cf_n (n = 1, 2, ..., N)$ は，(7)〜(9) 式で与える．

$$re_i = \frac{1.0}{\left|\left(1 - \frac{\eta_i}{\eta_0}\right) \times a\theta_i + \frac{\eta_i}{\eta_0} \times b\eta_i\right|} \tag{7}$$

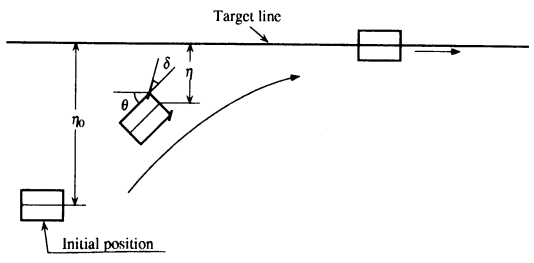


図 5　自動車の直線追従制御

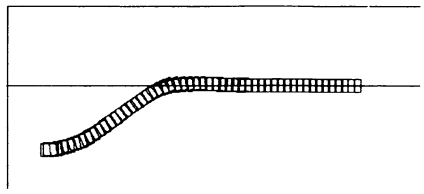


図 6　シミュレーション結果

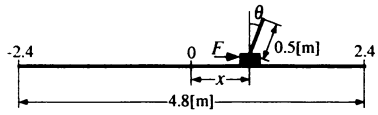


図 7　倒立振子システム

$$g_i = \sum_{n=1}^{N} \mu_{ni} \tag{8}$$

$$cf_n = \sum_{i=1}^{I} \frac{\mu_{ni}}{g_i} \times re_i \tag{9}$$

i はステップ数，I は終了ステップ数，re_i は各ステップでの報酬，μ_{ni} は第 i ステップの各ルールの適合度，g_i は第 i ステップの適合度の合計，a と b は重みである．

得られたファジィルールによるシミュレーション結果を図 6 に示す．図より良好な結果が得られている．

3.3　倒立振子への応用

次に，図 7 のような倒立振子問題に応用した．これは，台車の位置 x と速度 $\dot{x}$，振子の角度 θ と角速度 $\dot{\theta}$ より，加える力 F を推論するものである．なお，このときファジィルールの後件部を実数値とする簡略化ファジィ推論法を用いた [10]．ここでは，ルール数（個体数 N）を 10 とした．GA の演算は基本的に 3.2 と同じだが，突然変異は変異率を 0.03 として行った．なお，報酬 re は初期状態 (x_0, θ_0) を (-1.5, -10), (-1.5, 10), (1.5, -10), (1.5, 10) の 4 試行についておこない，それぞれの評価 re_1〜re_4 を統合し求める．

$$re_{IP} = \frac{I}{\sum_{i=1}^{I} \left(1.0x_i^2 + 100\theta_i^2\right)} \times pe,\ IP = 1,2,3,4 \tag{10}$$

$$re = re_1 + re_2 + re_3 + re_4 \tag{11}$$

(10) 式の I は，サンプリング数，pe は失敗（レールから落ちる，振子の角度が広がる）したときのペナルティである．各個体の信頼度 cf_n は，(12) 式で与える．

$$cf_n = \frac{\sum_{i=1}^{I} \mu_{ni}}{\sum_{n=1}^{N} \sum_{i=1}^{I} \mu_{ni}} \times re \tag{12}$$

得られたファジィルールによるシミュレーション結果を図 8 に示す．図より良好な結果が得られている．

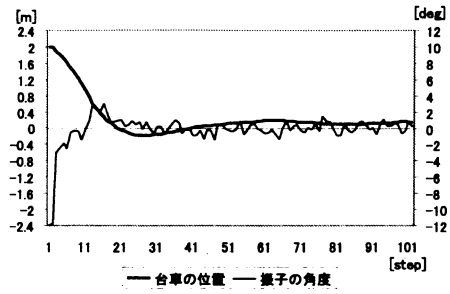


図 8　シミュレーション結果

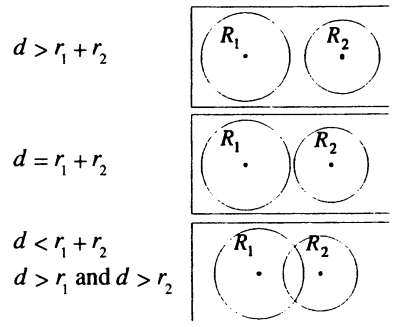


図 9　統合をしない位置関係

4　統合によるルール削減手法の提案

4.1　統合によるルール削減手法

第 3 章の手法では，ルール数を固定しているので，得られたファジィシステムが最適なルール数であるとは限らず，同じようなルールが重複している可能性がある．しかし，不必要なルールを削除するために不用意に個体数を減らすと，GA の操作に影響が出る．そこで本研究では，ある一定世代毎に類似したルールを統合することによってルール数を一時的に削減させる手法を導入する．以下にその手順を示す．

[Step1] 初期世代から $G-1$ 世代までは，与えたルール数でファジィ推論を行う．各世代とも推論結果による信頼度により，次世代を生成する．

[Step2] G 世代目において次のような操作を行う．

[Step2-1] 類似するルールを統合する．

[Step2-2] ルール数が削減された状態で推論を行い報酬を得る．これらのルールに対して信頼度を与える．

[Step2-3] この信頼度を適応度とし，削除前のルール数になるまで次世代の個体を遺伝演算により作成する．

[Step3] $G-1$ 世代後までは Step1 と同様の操作を行う．また，G 世代たてば Step2 に戻る．

これによって，ルール数が少ないシステムが生成されると考えられる．次に，統合するルールの条件を示す．

1) 吸収または統合しようとするルール対の後件部メンバーシップ関数が相反する操作を行う場合は統合しない．

2) 前件部メンバーシップ関数が離れている，または一部しか重なっていない場合は統合しない (図 9 参照)．

3) 一方の前件部メンバーシップ関数がもう一方のメン

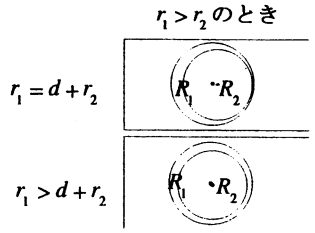


図 10　吸収する位置関係

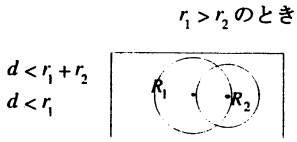


図 11　統合を行う位置関係

バーシップ関数の中にある場合は吸収する (図 10 参照). 4) それぞれの中心間の距離より一方の半径が長く，大部分が重なっている場合は統合する (図 11 参照)．なお，図中の d は 2 つのルールの中心座標の距離，r_1, r_2 はそれぞれのルールの半径である．

統合する 2 つのルールの中心座標を $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ としたとき，統合されたルールの半径 r と中心座標 (X, Y) は，(13)〜(15) 式で求める．

$$r = \frac{\frac{r_1}{2} + \frac{r_2}{2} + d}{2} \tag{13}$$

$$X = \frac{\frac{r_1(x_1 - x_2)}{2d} + \frac{r_2(x_2 - x_1)}{2d} + x_1 + x_2}{2} \tag{14}$$

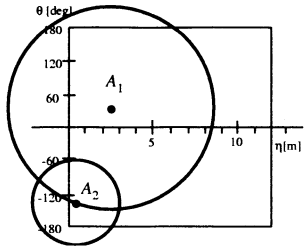
$$Y = \frac{\frac{r_1(y_1 - y_2)}{2d} + \frac{r_2(y_2 - y_1)}{2d} + y_1 + y_2}{2} \tag{15}$$

4.2　自動車の直線追従制御への応用

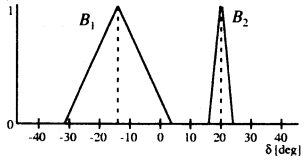
本手法を，3.2 で用いた自動車の直線追従のファジィルール獲得に応用した．このときルール数（個体数）N を 30 とし，20 世代ごとに統合を行った．このとき得られたファジィルールを図 12 に示す．統合によりルール数が 2 に減っているのが分かる．次にこのファジィルールを用いたシミュレーション結果を図 13 に示す．ルール数が少ないにかかわらず，良好な結果が得られている．

5　おわりに

本稿では，FCS により超円錐形メンバーシップ関数を用いたファジィシステムを自動生成する手法を提案し，自動車の直線追従走行と倒立振子のファジィ制御ルールの獲得に応用した．それぞれの制御目的にあったファジィシステムを得ることができた．また，ルール数も自動的に決定するために，FCS にルール統合を組合すことを試みた．自動車の直線追従走行に応用したところ，ルール数の少ないファジィシステムが得られた．今後の課題として，多入力の複雑な問題に適用することが望まれる．



(a) 入力のメンバーシップ関数



(b) 出力のメンバーシップ関数

図 12　生成されたファジィルール

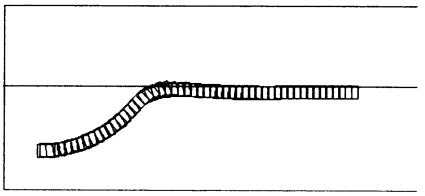


図 13　シミュレーション結果

参考文献

[1] 林，野村，若見：「ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルールの獲得」，日本ファジィ学会誌，vol.2, no.4, pp.585–597, 1990.

[2] 亀井：「ファジィクラスタリングの制御への応用」，日本ファジィ学会誌，vol.8, no.3, pp448–455, 1996.

[3] M. A. Lee and H. Takagi, "Integrating Design Stage of Fuzzy Systems Using Genetic Algorithms," in *Proc. of the FUZZ-IEEE'93*, pp.612-617, 1993.

[4] 野村，若見：「遺伝アルゴリズムによるファジー推論ルールの決定法」，電子情報通信学会論文誌 A，vol.J77-A, no.9, pp.1241–1249, 1994.

[5] 石渕，村田，田中：「遺伝的アルゴリズムによるファジィ識別システムの構築」，日本ファジィ学会誌，vol.7, no.5, pp.1022–1040, 1995.

[6] 井上，亀井，井上：「遺伝的アルゴリズムと超円錐形メンバーシップ関数によるファジィルール自動生成手法の提案」，日本ファジィ学会誌，vol.8, no.6, pp.1104–1115, 1996.

[7] M. Valenzuela-Rendon, "The Fuzzy Classifier System: A Classifier System for Continuously Varying Variables," in *Proc. of the ICGA'91*, pp.346–353, 1991.

[8] 古橋，中岡，森川，内川：「多段ファジィクラシファイアシステムによる制御知識獲得」，日本ファジィ学会誌，vol.6, no.3, pp.603–609, 1994.

[9] 中島，村田，石渕：「クラシファイアシステムによる言語的識別ルールの獲得」，日本経営工学会論文誌，vol.47, no.3, pp.199–206, 1996.

[10] 井上，亀井：「遺伝的アルゴリズムによるファジィルールの獲得と倒立振子への応用」，第 15 回ファジィ システム シンポジウム講演論文集，pp.57–60, 1999.

問い合わせ先

〒 910-8507 福井市文京 3-9-1
福井大学教育地域科学部
井上博行
TEL: 0776-27-8714 FAX: 0776-27-8911
Email: inoue@edu00.f-edu.fukui-u.ac.jp

TD5−1

ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張

Extension of Learning by Switching Rule Generation and Reasoning Methods

馬野 元秀　松本 裕二　宇野 裕之　瀬田 和久
UMANO Motohide　MATSUMOTO Yuji　UNO Yushi　SETA Kazuhisa

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences,
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract When we solve a problem, we firstly have no knowledge and gradually acquire some piece of knowledge by observing new data, and at last arrive at complete knowledge for solving the problem. We have a simple form of specific knowledge in the first stage but a complex form of general one in the final stage. To implement such kind of learning mechanism, we must combine several kinds of learning methods for several stages. we proposed a method for reconstructing rules and switching methods in each knowledge representation in addition to switching rule generation methods for several knowledge representation. In this paper, we re-implemented the system and added a new rule generation and reasoning method for decision trees.

1 はじめに

人間の知識を計算機で獲得するためにさまざまな研究が盛んに行われている [1][2]. しかし, これらの手法はすべてのデータを用いて一度に知識を生成しており, 人間が実際に行っていると思われる知識獲得の方法とは大きく異なっている.

人間の場合, 知識を最初から持っているわけではない. 知識を持っていない状況から, 与えられたデータを用いて少しずつ知識を作り上げていき, 一般的な知識を持つようになると考えられる. はじめはデータと同じような形式の簡単な知識表現を用いるが, 学習が進むに従い次第に複雑な知識表現を用いるようになる. そこで, 学習データが逐次的に増加していく状況において推論法の切り替えやルールの再構成や知識表現の切り替えを行う学習方法を提案した [3][4].

今回はシステムを再構築して知識表現の追加が簡単に行えるようにし, 新たに決定木を使用するルールの生成法と推論法を追加した.

2 学習方法の枠組み

本手法はデータが逐次的に与えられていくような状況において推論を行う. 推論のための知識は与えられたデータを基にして作成する. このとき, ルールの生成法と推論法を複数用意しておき, 与えられた状況に応じて適切なルールの生成法や推論法に切り替えていきながら推論を行う. それらを切り替える契機は, 推論結果の不正解が連続したときとした.

本手法ではルールに基づく推論を扱う. ルールにもさまざまな形式のものが存在し, それぞれの形式に応じたルールの生成法と推論法がある. 推論法と生成法は密接に関係しており, ルールの生成法にいくつかの推論法が付随していると考えられる. ここでは, ひとつの生成法とそれに付随する推論法からなるものを知識表現と呼ぶことにする.

知識表現は常にひとつだけを用いる. つまり, ある知識表現のルール生成法によってルールを生成し, 生成されたルールを知識表現の中のひとつの推論法が用いることで推論結果を求める. そして, 推論結果が連続して不正解であるときに, すべての知識表現のなかから適切なものを選択してその知識表現に切り替える.

なお, 与えられたデータはシステムが一括して保存する. これらはルールの再構成や知識表現の変更のときにのみ使われる. ルールの再構成や知識表現の変更を行った後はシステムに保存されているデータは一定の割合で古いものから破棄される.

3 知識表現

ここでは，本手法で用いる学習データと同じ形式の表現，ファジィルールによる表現，決定木による表現という3つの知識表現について説明する．

3.1 学習データと同じ形式のルール

(1) 生成法

- データ点をルールとする方法 (G_1)

この方法は今までに経験した学習データをそのままルールであるとみなす．この方法ではルール数はデータ数に比例するのでデータ数が多くなるにつれて，より多くのメモリを必要とする．

- クラスタリングを行い，その重心をルールとする方法 (G_2)

各クラスごとに全属性を用いてクラスタリング [5] を行い，その重心となる点をルールとする．

(2) 推論法

- 最も類似しているルールによる方法 (R_1)

推論するデータ x が与えられたときに，そのデータと j 番目のルール r_j との非類似度 d_j を次の式で計算する．

$$d_j = \sqrt{\sum_{i}^{m}(x_i - r_{ji})^2} \tag{1}$$

ただし，x_i はデータ x の属性 A_i の値，r_{ji} はルール y_j の属性 A_i の値である．そして，d_j が最小となるルールが属しているクラスを推論結果とする．

- 非類似度による重みを考慮する方法 (R_2)

推論するデータが与えられたときに，そのデータと各ルールの点との非類似度を式 (1) で計算する．これを正規化してクラスに属する度合いを求める．そして，クラスごとの度合いの合計を求め，それが一番大きいクラスを推論結果とする．

3.2 ファジィルールによる表現

(1) 生成法

- 各属性ごとに一定数のファジィ集合を作成する方法 (G_3)

各属性ごとに一定数のファジィ集合をつくり，そのファジィ集合からファジィルールをつくる．

例えば，3個のファジィ集合をつくる場合は，属性 A_i に対し，データの最小値 α_i，平均値 β_i，最大値 γ_i を求め，次のような三角型ファジィ集合「大きい」「中くらい」「小さい」を各属性ごとにつくる．

$$\mu_{\text{大きい}_i}(x) = \begin{cases} 0 & x < \beta_i \\ \frac{x-\beta_i}{\gamma_i-\beta_i} & \beta_i \le x \le \gamma_i \\ 1 & \gamma < x \end{cases}$$

$$\mu_{\text{中くらい}_i}(x) = \begin{cases} \frac{x-\alpha_i}{\beta_i-\alpha_i} & \alpha_i \le x \le \beta_i \\ \frac{x-\gamma_i}{\beta_i-\gamma_i} & \beta_i < x \le \gamma_i \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{2}$$

$$\mu_{\text{小さい}_i}(x) = \begin{cases} 1 & x < \alpha_i \\ \frac{x-\beta_i}{\alpha_i-\beta_i} & \alpha_i \le x \le \beta_i \\ 0 & \beta_i < x \end{cases}$$

次に，このファジィ集合をすべて組み合わせてルールの条件部をつくる．結論部はクラス名を変数と考え，その値 (実数値) はそのファジィルールのすべての属性の度合いが0.5以上であるデータに対するそのクラスに属するデータの比とする．ただし，結論部の値がすべて0のルールはつくらない．

この方法は，人間が見て分かりやすいルールを生成するが，属性値の分布がファジィ集合と一致しない可能性がある．

- クラスタリングを行い，それをファジィルールにする方法 (G_4)

この方法は生成法 G_2 と同様にしてクラスごとに全属性を用いてクラスタリングを行ない，作成されたクラスタごとにファジィルールをつくる．条件部のファジィ集合はクラスタの各属性ごとに作成する．このファジィ集合は，各属性の重心を中心とし各属性の最大値，最小値の点で度合いが0.5となるような三角型ファジィ集合とする．

(2) 推論法

- ファジィ推論 (min-max-重心法) による方法 (R_3)

ファジィルールによる推論を min-max-重心法によって行う．

- ファジィ推論 (×-+-重心法) による方法 (R_4)

ファジィルールによる推論を ×-+-重心法によって行う．

3.3 決定木による表現

(1) 生成法

- ID3 を用いて決定木を作成する方法 (G_5)

ID3[6] を用いて決定木を作成し，それに基づいてルールを作成する．連続値をとる属性に対しては，クラスタリングを行って3つのクラスタを作成し，隣り合うクラスタの重心の平均値を分割点とし，3つの離散値とみなすようにする．

(2) 推論法

- 決定木を用いて推論を行う方法 (R_5)
  決定木を用いて推論を行う [6].

4 生成法と推論法の切り替え

一般に，同じルールで推論を続けていると正解率が減少してしまう．正解率が減少したときに，正解率を上げるために何らかの手段を取らなければならない．これには推論方法の変更，ルールの再構成，知識表現の変更の3つが考えられる．

具体的には，次のようにする．

m_1 回連続不正解　推論方法の変更
m_2 回連続不正解　ルールの再構成
m_3 回連続不正解　知識表現の変更

一般的には，$m_1 \leq m_2 \leq m_3$ となる．この3つの方法を具体的に説明する．

(1) 推論方法の変更

現在の知識表現の推論法のなかで，妥当だと思われる推論法に切り替える．すなわち，現在の知識表現が持つすべての推論法について，システムに保存されているデータの集合に対して推論を行い，一番正解率の高い推論法に切り替える．

(2) ルールの再構成

現在の知識表現が持つルールの生成法を用いて，システムに保存されているデータ集合からルールを作り直す．

ルールの再構成が効果があったかどうかを評価する基準として，次の評価関数を用いる．

$$H(c_a, r_a) = c_a + \frac{\alpha}{r_a} \tag{3}$$

ここで，

c_a ：学習方法 a の正解率
r_a ：学習方法 a のルール数
α ：パラメータ

システムに保存されているデータの集合に対して推論を行い，評価関数の値を再構成前と再構成後とで比較する．再構成後の値の方が大きい場合には，ルールの再構成に意味があったとみなして，新しいルールで処理を続ける．再構成後の値のほうが小さい場合には，ルールの再構成に意味がなかったとみなして，知識表現の変更を行う．

(3) 知識表現の変更

すべての知識表現から妥当と思われる知識表現に切り替える．すべての知識表現について，デフォルトの推論法を用いてシステム本体が持つデータの集合に対して推論を行い，式 (3) の値が最大となる知識表現を選択する．値が同じ場合は先に登録した知識表現 (一般的には簡単な知識表現) を選択する．

5 数値実験

本手法に対して，R. A. Fisher のアヤメの分類データ [7] を用いて数値実験を行った．数値実験に用いた知識表現を表 1 に示す．

データを無作為にひとつずつ取り出して，前節で述べた方法で推論を行い，正解率とルール数を計算した．実行結果は逐次的に与えるデータの順序によって異なるが，いくつかの例を図 1 ～ 3 に示す．このとき，$m_1 = 2, m_2 = 3, m_3 = 5, \alpha = 1$ とし，クラスタリングは最短距離法を用い，しきい値は 0.2 とした．

図 1 ～ 3 において，正解率は初回からの通算の正解率であり，ルール数はその時点の知識表現のルール数である．縦の点線はその時点で知識表現が変化したことを示している．図 1 ～ 3 のいずれの場合にも正解率が急激に下がった場合には知識表現が変更されていることがわかる．

知識表現	生成法，推論法
K_1	G_1, R_1, R_2
K_2	G_2, R_1, R_2
K_3	G_3, R_1, R_2
K_4	G_4, R_3, R_4
K_5	G_5, R_5

表 1: 用いた知識表現

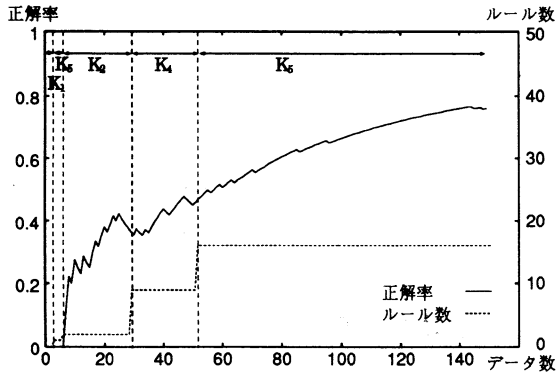


図 1: 本手法による学習の一例

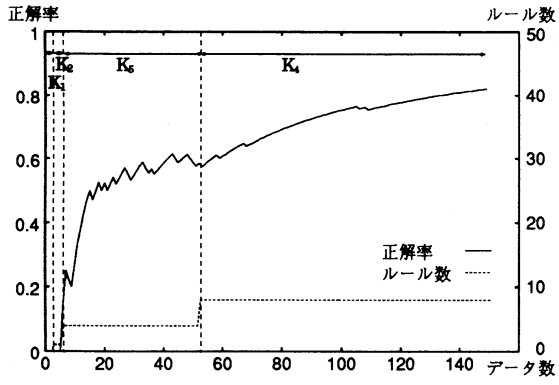


図 2: 本手法による学習の一例

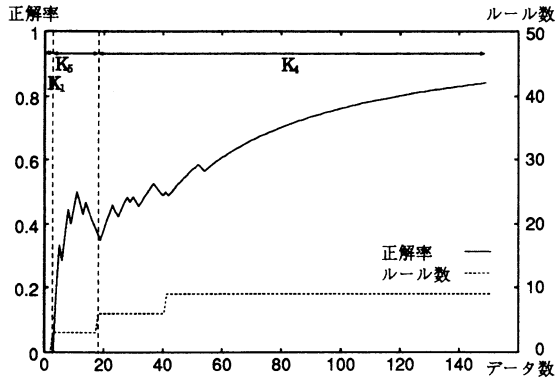


図 3: 本手法による学習の一例

また，推論法の変更はほとんど行われなかった．これは，どちらの知識表現の場合にも推論法には大きな違いがないため，変更が行われなかったものと考えられる．

また，ID3 による決定木を作成する方法は，データが少ない状況では高い正解率を得ることができなかった．今回は枝刈りを行っていないので，ルール数が比較的多くなってしまうことも原因であると思われる．

6 おわりに

本研究では，ルール生成法と推論法をいくつか用意し，データを逐次的に与えながらルールを生成させていき，正解率やルール数の変化を基に推論法の変更やルールの再構成やルールの生成法の変更などを行いながら学習を行う手法について述べた．

しかし，ルールを生成するときに過去のすべてのデータを利用できるという状況は不自然である．そこで，記憶するデータ数を制限してルールを生成する方法，例えば，現在のルールと推論が不正解であったデータから新たなルールを生成する方法を考える必要がある．

参考文献

[1] 林 勲 編: 特集 ファジィ・ニューラルネットワーク, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.2, pp.176–260, 1993.

[2] 前田 陽一郎 編: 特集 進化的アルゴリズムとファジィ理論, 日本ファジィ学会誌, Vol.10, No.4, pp.582–646, 1998.

[3] 馬野 元秀, 北辻 佳憲, 鳩野 逸生, 田村 坦之: ルールの生成法を変化させる学習, 日本ファジィ学会 第13回ファジィシステムシンポジウム, pp.569–572, 1997.

[4] 馬野 元秀, 松本 裕二, 宇野 裕之, 佐藤 浩: ルールの生成法を変化させる学習について, 日本ファジィ学会第14回ファジィシステムシンポジウム, pp.503–506, 1999.

[5] Michael R. Anderberg: Cluster Analysis for Applications, *Academic Press, Inc.*, 1973. [邦訳] 西田 英郎 監訳, 佐藤 嗣二 他訳: クラスター分析とその応用, 内田老鶴圃, 442p., 1988.

[6] J. R. Quinlan: Induction of Decision Trees, *Machine Learning*, Vol.1, pp.81–106, 1986.

[7] R. A. Fisher: The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems, *Annals of Eugenics*, Vol.7, No.2, pp.170–188, 1936.

[問い合わせ先]
〒599–8531 堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 0722–54–9675
FAX: 0722–54–9930
Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

TD5−2

遺伝的プログラミングと相関ルールの組み合せによるルール獲得手法

Rule Acquirement Technique using Genetic Programming Combined with Association Rule

○ 新美 礼彦, 田崎 栄一郎
○ Ayahiko Niimi and Eiichiro Tazaki

桐蔭横浜大学 工学部 制御システム工学科
Department of Control and Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract: We propose rule generation technique from the database combining genetic programming and association rule algorithm. The technique takes rules generated by the association rule algorithm as an initial individual of genetic programming. The learning speed of genetic programming is improved by association rule algorithm. To verify the effectiveness of the proposed technique, we applied the rule generation system from the medical database.

1 はじめに

分類学習によるルール生成システムの構築において、さまざまな手法が提案されている。一般に遺伝的プログラミングを用いた学習システムは、学習速度が遅く、システム設計者は問題と手法の両方の知識を要求される。しかし、構造も同時に扱うので、環境に適応したより高次な知識が獲得可能な学習システムの構築が可能である。大量のデータからのルール作成手法として、Apriori アルゴリズムがある。これは、相関ルール構築のアルゴリズムであり、支持度と確信度という２つの指標を用いて探索を行う。それぞれの指標に閾値を設け、探索空間を縮小したり、相関ルール候補を増やすなどの操作を行うことが可能である。しかしながら、有効な閾値の設定には経験を必要とする。また、連続値属性を含んだルールを記述しにくいという問題点もある。

このようにそれぞれの手法には利点と欠点がある。そこで本論文では、それぞれの手法を組み合わせてルール構築を行う学習手法を提案する。組み合わせ学習を行うことにより、大量のデータに対して、柔軟なルールを探索可能なシステムの構築が期待される。

提案した学習法の有効性を検証するために、Apriori アルゴリズムによる相関ルール構築法と自動関数定義を組み込んだ遺伝的プログラミングによる学習において、それらを組み合わせた学習を取り上げた。これを医療データからのルール生成システムへ適用し、従来の単独での学習方法による結果と比較・検討し、ここに報告する。

2 相関ルール構築のアルゴリズム

相関ルール分析では、一般的に各事例がデータ記述の最小単位としてのトランザクション形式のデータを対象とする。事例に含まれるアイテム組に見られる共起パターンが相関ルールとして抽出される。相関ルールは、事例データにおけるアイテム集合組の共起パターンとして表現される。[1, 2]

$$B \Rightarrow H$$

ここで B は相関ルールの条件部、H は相関ルールの結論部である。

2.1 Apriori アルゴリズム

大量のデータから相関ルールを探索的に抽出するには、従来手法では多くの計算時間が必要であった。Apriori アルゴリズムは、探索の効率を図ることにより大量データからでも現実的な時間で相関ルールを抽出することが可能である。Apriori アルゴリズムでは、相関ルールの探索中に、支持度 (support value) と確信度 (confidence value) という２つの指標を用いて相関ルールの候補を評価する。相関ルールの支持度と確信度は以下のように定義される。

$$sup(R : B \Rightarrow H) = \frac{n(B \cup H)}{N}$$

ここで $n(B \cup H)$ は B と H の全アイテムを含む事例数、N は全データ数である。

$$conf(R : B \Rightarrow H) = \frac{n(B \cup H)}{n(B)}$$

ここで $n(B \cup H)$ は B と H の全アイテムを含む事例数、 $n(B)$ は B の全アイテムを含む事例数である。

Apriori アルゴリズムでは、支持度と確信度について最小支持度 (minimun support value) と最小確信度 (minimun confidence value) という閾値を設定し、各最小値を充たさない相関ルール候補をその相関性が低いものとして逐次的に評価対象から除外し、探索空間を縮小することにより、従来の相関ルール分析手法よりも計算時間について大幅に効率化している。

各最小値を操作することにより、対象とする相関ルール候補を増やしたり、探索範囲を縮小することができる。しかしながら、検索範囲を縮小すると意外なルールを抽出することができなくなる可能性がある。また、相関ルール候補が多すぎるとルールを分析する専門家の負担が増加し、有用なルールが埋もれてしまう可能性もある。

3 遺伝的プログラミング

遺伝的プログラミング (Genetic Programming:GP) は、生物進化論の考えに基づいた学習法であり、そのアルゴリズムの流れは遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) と同様である。その特徴は染色体表現が GA と異なり、関数ノードと終端ノードを用い構造表現ができるように拡張してあることである。今回は、決定木を表現するためにツリー構造を用いた。

3.1 自動関数定義

通常、GP では木の大きさを評価しないため、木の成長を的確に制御する方法がない。このため、探索に伴って、木が長く複雑になることや逆に単純すぎる木に収束してしまうことがある。そこで関数をプログラム自身で定義して効率的に利用する方法が研究されている。そのうちの一つが自動関数定義 (Automatically Defined Function:ADF) であり、これは通常の GP に関数定義用の遺伝子表現を付加することによって行われる。[3] ADF を組み込むことにより、得られるプログラムがコンパクトにでき、また処理すべき個体も少なくできる。 ADF は 1 個体内に複数持たせることができる。

3.2 適応度関数

さらに木の大きさを評価することにより、木の成長を制御する。木の大きさの評価に関しては、最小記述長 (Minimum Description Length:MDL) に基づくもの [4] などが提案されている。ここでは、個体の適応度に、的中率と木を構成するノード数を用い定義した。

$$f_{fitness(n)} = \alpha f_{hits(n)} + (1-\alpha) f_{nodes(n)}$$

ここで $0 \leq \alpha \leq 1$ は重みである。

これにより、GP において過学習を避けながら、精度を上げる学習を行うことが期待され、生成される決定木も比較的コンパクトにすることができる。なお、的中率とノード数のどちらに重みを置くかにより、最良個体の推論精度とルールサイズが影響をうける。

3.3 GP からのルールの生成

GP の最良個体からルールを生成する。GP の個体が決定木を表現している場合、決定木からルールを作成する方法が利用できる。しかし、GP より得られたルールは無効な条件や無意味な条件を多く含んでいることがある。これを取り除くことにより、精度を落すことなく、ルールを一般化できる。

GP:

```
(IFLTE Syu4 134
    (IFLTE Syu5 139
        (IFLTE Syu2 138
            (IFLTE Syu3 138 N P) P) P) P)
```

Rules:

Rule 1: (Syu4 ≤ 134) ^(Syu5 ≤ 139) ^(Syu2 ≤ 138) ^(Syu3 ≤ 138) → N

Rule 2: (Syu4 ≤ 134) ^(Syu5 ≤ 139) ^(Syu2 ≤ 138) ^(Syu3 > 138) → P

Rule 3: (Syu4 ≤ 134) ^(Syu5 ≤ 139) ^(Syu2 > 138) → P

Rule 4: (Syu4 ≤ 134) ^(Syu5 > 139) → P

Rule 5: (Syu4 > 134) → P

図 1: GP からのルール生成例

4 提案する組み合わせによる学習

Apriori アルゴリズムと GP の利点と欠点を補うため、本論文ではそれぞれの手法を組み合わせてルール構築を行う学習手法を提案する。組み合わせ学習を行うことにより、大量のデータに対して、柔軟なルールを探索可能なシステムの構築が期待される。

組み合わせによる学習手法の構築にあたっては、2つのアルゴリズムをオブジェクトと捉え、オブジェクト指向に基づく学習法を利用した。[5, 6] まず、Apriori アルゴリズムを用いて相関ルールを生成する。生成された相関ルールを決定木に変換し、GP の初期集団に取り込み、学習を行う。これにより、GP の初期集団内に有効と思われるスキーマを含ませることが可能となり、GP の学習速度と分類精度の改善が期待される。同時に、相関ルールで困難な連続値に対する学習を GP 学習で行うことが可能となる。

相関ルールから決定木への変換は以下の手順で行う。まず、相関ルールの条件部を決定木の分割属性としてとらえることにより、決定木の経路を構築する。次に、この経路の終端ノードに相関ルールの結論部をおく。最後に、相関ルールで定義されていない終端ノードに関しては、終端ノード候補の中からランダムに決定する。

5 医療データベースからのルール生成システムへの適用

我々が提案した学習法の有効性を検証するために、本論文では高血圧発症の実験データを用いてルール生成システムの構築を行った。このデータは、性別、年齢、肥満度など 15 項目からなる入力データと発症に関する出力の組み合わせで構成されており、全部で 1024 件ある。訓練データとして、発症・未発症それぞれ 100 件ずつランダムに抽出したものを用いた。

5.1 相関ルール

まず、データベースから Apriori アルゴリズムにより相関ルールを抽出した。使用したデータベースには連続値属性が含まれているため、データの平均からこれらの属性を 2 値属性に変換してから、Apriori アルゴリズムを使用した。最小支持度と最小確信度とルール数の関係を探るため、パターンを変えて実験を行った。(結果は表 1 参照)

表 1: 閾値とルール数の関係

最小支持度	最小確信度	ルール数
25	75	396
30	75	125
25	90	187
30	90	33

以下の実験では、最小支持度 = 30 、最小確信度 = 90 を用いて実験を行った。

表 2: GP のパラメータ

集団数	500
複製確率	0.1
交叉確率	0.8
突然変異確率	0.1
選択方式	トーナメント方式, エリート戦略
関数ノード	IFLTH, IFEQ, *, /, +, −, ADF0, ADF1
終端ノード	SEX,AGE などデータベースの属性値 (15 個), P, N, R
訓練データ数	P:100, N:100
テストデータ数	1024
終了世代数	20000

IFLTH,IFEQ: より少ない (≤), 等しい (=)
ADF0, ADF1: ADF により拡張した関数定義遺伝子
R: ランダムに生成される定数
P, N: 発症 (P), 未発症 (N)

5.2 決定木構築

データベースに対して、決定木構築を行った。決定木構築には、ADF-GP のみによる学習と相関ルールを初期個体として取り込んだ ADF-GP による学習を使用した。GP のパラメータに関しては、どちらの学習においても表 2 を用いた。(結果は表 3)

ADF-GP のみの場合、世代を経てもなかなか推論精度が上がらなかったのに対し、相関ルールを初期個体として取り込んだ場合は比較的はやく高い精度に達した。初期個体として取り込まれた相関ルールは最良個体に継承されたことが確認され、学習効率の改善に影響を与えたといえる。

5.3 ルールの生成

構築された決定木をもとに、ルールを作成した。決定木からルールを作成する段階で、無効な条件や無意味な条件を取り除いた。このとき、生成ルール数に対する有効ルール数の割合は、 37.5% (ADF-

表 3: 各手法による生成決定木の比較

	訓練 (%)	全体 (%)	サイズ	深さ	獲得世代数
ADF-GP のみ	89.5	66.3	41	6	18553
Apriori + ADF-GP	89.5	74.9	49	4	671

GP のみ) と 50.0% (Apriori+ADF-GP) であった。(表 4 はそれぞれの手法により生成されたルールの中で、支持度の高い上位 3 つをあらわしたもの)

ADF-GP のみを使用したものでは、ルールの解釈が困難な多くの無効なルールが生成された。提案した手法では、ADF-GP のみの学習に比べて、支持度を下げて精度の向上を行うという学習が見られた。これにより、有効ルールの割合の向上と精度の改善が行われている。このとき、初期個体として取り込まれた相関ルールを元にして学習が行われていることを確認した。

表 4: 各手法による生成ルールの比較

手法	サイズ	支持度 (%)	誤分類率 (%)
ADF-GP のみ	4	41.4	48.4
	2	36.0	24.1
	4	22.6	8.2
Apriori+ADF-GP	2	17.7	39.2
	4	15.5	13.2
	4	13.8	19.2

6 おわりに

本研究では、遺伝的プログラミングと相関ルールアルゴリズムの組み合わせにより、データベースからのルール獲得を行う手法を提案した。また、提案した手法の有効性を検証するために、医療データからのルール生成システムを構築し、その評価を行った。

その結果、学習効率の改善が認められた。このことより、提案した手法はルール生成システムの学習効率の改善に有効な方法であるといえる。

今後は、相関ルールから、より精度の高い決定木への変換アルゴリズムの検討、多値分類問題への拡張を検討する予定である。

参考文献

[1] 喜連川 優, データマイニングにおける相関ルール抽出技法, 人工知能学会誌 Vol.12 No.4,pp.513–520,1997

[2] 寺邊 正大, 片井 修, 椹木 哲夫, 鷲尾 隆, 元田 浩, 相関ルールにもとづく属性生成手法, 人工知能学会誌 Vol.15 No.1,pp.187–197,2000

[3] J. R. Koza, K. E. Kinner(ed.), et.al, Scalable Learning in Genetic Programming Using Automatic Function Definition, Advances in Genetic Programming, pp.99–117, 1994

[4] 伊庭斉志, 遺伝的プログラミング, 東京電機大学出版局, 1996

[5] 新美 礼彦, 田崎 栄一郎, オブジェクト指向を用いた決定木と ADF GP の組み合わせによる学習, 第 42 回知識ベースシステム研究会, 人工知能学会, pp.19–24, 1999

[6] 新美 礼彦, 田崎 栄一郎, C4.5 と遺伝的プログラミングを用いたオブジェクト指向の組み合わせ学習, 第 15 回 ファジィシステムシンポジウム論文集, pp.511–514, 1999

[問い合わせ先]

〒 225–8502
神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614
桐蔭横浜大学 工学部 制御システム工学科
田崎　栄一郎
TEL:045–974–5070　FAX:045–978–1311
E-mail:tazaki@intlab.toin.ac.jp

TE1−1

ラフ集合論による医学的推論過程のモデル化

– Modelling Medical Diagnostic Procedure based on Rough Set Model–

津本周作
Shuaku Tsumoto
島根医科大学医学部医学科医療情報学
Department of Medical Informatics, Shimane Medical University, School of Medicine

Abstract

This paper discusses the characteristics of medical reasoning and shows the representation of these diagnostic models by the use of rough set theory. The key ideas are both a variable precision rough set model, which corresponds to an ordinal positive reasoning, and an upper approximation of a target concept, which corresponds to a focusing procedure.

1. Introduction

Medical reasoning always includes uncertainty[1], which is caused by the limitations of medical knowledge, available data and our recognition, compared with the complexities of human body. Thus, medical databases also have a certain degree of uncertainty: rules extracted from databases are also incomplete, which suggests that rule induction method should deal with uncertain rules. This paper presents how medical diagnostic rules are modeled by the concepts of rough sets[3] in a more theoretical way. The key ideas are both a variable precision rough set model, which corresponds to an ordinal positive reasoning, and an upper approximation of a target concept, which corresponds to a focusing mechanism in medical reasoning. Acquired models show that the characteristics of medical reasoning reflect the concepts on approximation of rough sets, which explains why rough sets work well in medical domains.

2. Probabilistic Rules

In this section, a probabilistic rule, which is a basis for describing diagnostic rules, is defined by the use of the following three notations of rough set theory[3]. In the following, these notations are illustrated by a small database shown in Table 1.

First, a combination of attribute-value pairs, is denoted by a formula R. For example, $[age = 50 - 59]\&[loc = occular]$ will be one formula, denoted by $R = [age = 50 - 59]\&[loc = occular]$. Secondly, a set of samples which satisfies R is denoted by $[x]_R$, corresponding to a star in AQ terminology. For example, when $\{2, 3, 4, 5\}$ is a set of samples which satisfies $[age = 40 - 49]$, $[x]_{[age=40-49]}$ is equal to $\{2, 3, 4, 5\}$. [1] Finally, U, which stands for "Universe", denotes all training samples.

2.1 Accuracy and Coverage

Definition of Accuracy and Coverage

According to the notations above, classification accuracy and coverage (true positive rate) is defined as:

$$\alpha_R(D) = \frac{|[x]_R \cap D|}{|[x]_R|}, \text{ and } \kappa_R(D) = \frac{|[x]_R \cap D|}{|D|},$$

where $|A|$ denotes the cardinality of a set A, $\alpha_R(D)$ denotes a classification accuracy of R as to classification of D, and $\kappa_R(D)$ denotes a coverage, or a true positive rate of R to D, respectively. In the above example, when R and D are set to $[nau = 1]$ and $[class = migraine]$, $\alpha_R(D) = 2/3 = 0.67$ and $\kappa_R(D) = 2/2 = 1.0$.

It is notable that $\alpha_R(D)$ measures the degree of the sufficiency of a proposition, $R \rightarrow D$, and that $\kappa_R(D)$ measures the degree of its necessity. For example, if $\alpha_R(D)$ is equal to 1.0, then $R \rightarrow D$ is true. On the

[1] In this notation, "n" denotes the nth sample in a dataset (Table 1).

表 1: An Example of Database

	age	loc	nat	prod	nau	M1	class
1	50-59	occ	per	0	0	1	m.c.h.
2	40-49	who	per	0	0	1	m.c.h.
3	40-49	lat	thr	1	1	0	migra
4	40-49	who	thr	1	1	0	migra
5	40-49	who	rad	0	0	1	m.c.h.
6	50-59	who	per	0	1	1	psycho

DEFINITIONS: loc: location, nat: nature, prod: prodrome, nau: nausea, M1: tenderness of M1, who: whole, occ: occular, lat: lateral, per: persistent, thr: throbbing, rad: radiating, m.c.h.: muscle contraction headache, migra: migraine, psycho: psychological pain, 1: Yes, 0: No.

other hand, if $\kappa_R(D)$ is equal to 1.0, then $D \rightarrow R$ is true. Thus, if both measures are 1.0, then $R \leftrightarrow D$.

2.2 Probabilistic Rules

By the use of accuracy and coverage, a probabilistic rule is defined as follows:

Definition 1 ((Probabilistic Rules)) *Let R be a formula (conjunction of attribute-value pairs), D denote a set whose elements belong to a class d, or positive examples in all training samples (the universe), U. Finally, let $|D|$ denote the cardinality of D. A probabilistic rule of D is defined as a tripule, $< R \stackrel{\alpha,\kappa}{\rightarrow} d, \alpha_R(D), \kappa_R(D) >$, where $R \stackrel{\alpha,\kappa}{\rightarrow} d$ satisfies $\alpha_R(D) > 0$.*[2]

In the following sections, all the diagnostic rules are represented as special types of the probabilistic rule above.

3. Simplest Diagnostic Rules

3.1 Representation of Rules

The simplest probabilistic model is that which only uses classification rules which have high accuracy and high coverage. Such rules can be defined as:

$$R \stackrel{\alpha,\kappa}{\rightarrow} d \quad \text{s.t.} \quad R = \vee_i R_i = \vee_i \wedge_j [a_j = v_k], \quad \alpha_{R_i}(D) \geq \delta_\alpha \text{ and } \kappa_{R_i}(D) \geq \delta_\kappa,$$

[2] It is notable that this rule is a kind of probabilistic proposition with two statistical measures, which is one kind of an extension of Ziarko's variable precision model(VPRS) [5].

```
procedure Induction of Classification Rules;
  var
    i : integer;    M, L_i : List;
  begin
    L_1 := L_er; L_er: List of Elementary Relations */
    i := 1;    M := {};
    for i := 1 to n do
    /* n: Total number of attributes */
      begin
        while ( L_i ≠ {} ) do
          begin
            Sort L_i with respect to the value of coverage;
            Select one pair R = ∧[a_i = v_j] from L_i,
            which have the largest value on coverage;
            L_i := L_i - {R};
            if (κ_R(D) ≥ δ_κ)
              then do
                    if (α_R(D) ≥ δ_α)
                      then do S_ir := S_ir + {R};
                  /* Include R as Classification Rule */
                    M := M + {R};
          end
        L_i+1 := (A list of the whole combination of
        the conjunction formulae in M);
      end
  end {Induction of Classification Rules };
```

図 1: An Algorithm for Classification Rules

where δ_α and δ_κ denote given thresholds for accuracy and coverage, respectively. For the above example shown in Table 1, probabilistic rules for m.c.h. are given as follows (both δ_α and δ_κ are set to 0.75):

$$\begin{aligned} [prod = 0] &\rightarrow m.c.h. \quad \alpha = 3/4 = 0.75, \kappa = 1.0, \\ [nau = 0] &\rightarrow m.c.h. \quad \alpha = 3/3 = 1.0, \kappa = 1.0, \\ [M1 = 1] &\rightarrow m.c.h. \quad \alpha = 3/4 = 0.75, \kappa = 1.0, \end{aligned}$$

3.2 An Rule Induction Algorithm

An rule induction algorithm is defined as a heuristic search algorithm, which is discussed precisely in [4]. It is notable that rule induction of other type rules is derived by simple modification of this algorithm.

4. Focusing Mechanism

One of the characteristics in medical reasoning is a focusing mechanism, which is used to select the final diagnosis from many candidates[4]. For example, in differential diagnosis of headache, more than 60 diseases will be checked by present history, physical examinations and laboratory examinations. In diagnostic procedures, a candidate is excluded if a symptom necessary to diagnose is not observed.

This style of reasoning consists of the following two kinds of reasoning processes: exclusive reasoning and inclusive reasoning. First, exclusive reasoning excludes a disease from candidates when a patient does not have a symptom which is necessary to diagnose that disease. Secondly, inclusive reasoning suspects

a disease in the output of the exclusive process when a patient has symptoms specific to a disease. These two steps are modeled as usage of two kinds of rules, negative rules (exclusive rules) and positive rules, the former of which corresponds to exclusive reasoning and the latter of which corresponds to inclusive reasoning. In the next two subsections, these two rules are represented as special kinds of probabilistic rules.

4.1 Positive Rules

A positive rule can be defined as a rule supported by only positive examples, which means that the classification accuracy of a rule is equal to 1.0. Thus, a positive rule is represented as:

$$R \rightarrow d \quad s.t. \qquad R = \wedge_j [a_j = v_k], \quad \alpha_R(D) = 1.0$$

In the above example, one positive rule of "m.c.h." is:

$$[nau = 0] \rightarrow m.c.h. \quad \alpha = 3/3 = 1.0.$$

This positive rule is often called deterministic rules. However, in this paper, we use a term, positive (deterministic) rules, because deterministic rules which are supported only by negative examples, called negative rules, is introduced as in the next subsection.

4.2 Negative Rules

Before defining a negative rule, let us first introduce an exclusive rule, the contrapositive of a negative rule[4]. An exclusive rule can be defined as a rule including all the positive examples, which means that the coverage of a rule is equal to 1.0.[3] Thus, an exclusive rule is represented as:

$$R \rightarrow d \quad s.t. \quad a \quad R = \wedge_j [a_j = v_k], \quad \kappa_R(D) = 1.0.$$

In the above example, exclusive rule of "m.c.h." is:

$$[prod = 0] \wedge [nau = 0] \wedge [M1 = 1] \rightarrow m.c.h. \quad \kappa = 1.0,$$

It is notable that exclusive rule corresponds to an upper approximation of a target concept. For example, the set which supports the exclusive rule above is an upper approximation of m.c.h.

[3] Exclusive rules represent the necessity condition of a decision.

From the viewpoint of propositional logic, an exclusive rule uniquely corresponds to

$$d \rightarrow \wedge_j [a_j = v_k],$$

because the condition of an exclusive rule correspond to the necessity condition of conclusion d. Thus, it is easy to see that a negative rule is defined as the contrapositive of an exclusive rule:

$$\vee_j \neg [a_j = v_k] \rightarrow \neg d,$$

which means that if a case does not satisfy any attribute value pairs in the condition of a negative rules, then we can exclude a decision d from candidates. For example, the negative rule of m.c.h. is:

$$\neg [prod = 0] \vee \neg [nau = 0] \vee \neg [M1 = 1] \rightarrow \neg m.c.h.$$

In summary, a negative rule is defined as:

$$\vee_j [a_j = v_k] \rightarrow \neg d$$
$$s.t. \quad \forall [a_j = v_k] \ \kappa_{[a_j = v_k]}(D) = 1.0,$$

where D denotes a set of samples which belongs to a class d.

4.3 Rule Induction Algorithm

An algorithm for induction of positive and negative rules is derived by simple modification of the algorithm in Figure 1: if the thresholds of accuracy and coverage is set to 0.0 and 1.0, respectively, the algorithm for negative rules will be obtained. On the other hand, if the thresholds of accuracy and coverage are set to 1.0 and 0.0, respectively, the algorithm for negative rules will be obtained.

It is notable that positive and negative rules can be extended to probabilistic versions, which is discussed precisely in [4].

5. Criteria Tables

5.1 Representation of Rules

Another characteristic reasoning in medicine is m−of−n concepts, or a criteria table, which is discussed in [2]. The criteria table for a disease d is described by n attributes, which are enough to make its diagnosis. If at least m attributes are observed in a patient, d should be suspected.

Langley discusses that this m−of−n description can be rewritten as a simple linear combination of attribute-value pairs. Thus, he implements an induction of this description as an induction of threshold concepts.

However, a m−of−n rule in medicine is not equivalent to a linear combination rule, which is a special kind of statistical discriminant functions. Rather, this type of rule is based on relations between sets as follows.

1. If total n attributes are observed, a disease d is suspected with the highest accuracy. (The coverage is equal to 1.0).

2. If m attributes are satisfied, a disease d should be suspected with high accuracy. (The coverage is equal to 1.0).

3. If less than m attributes are satisfied, the probability of d is low. However, the coverage is equal to 1.0. Thus, m−of−n concept is described as combination of exclusive rules (below, we call them *unit rules*) with the constraint that their accuracies are high:

$$\begin{aligned} R \rightarrow d \quad s.t. \quad & R = \wedge_{j=1}^{i}[a_j = v_k](m \leq i \leq n) \\ & \alpha_R(D) \geq \delta_\alpha \\ & \forall [a_j = v_k], \kappa_{[a_j=v_k]}(D) = 1.0, \\ & (\alpha_{[a_j=v_k]}(D) \geq \delta_2), \end{aligned}$$

which also satisfies that: if R is represented as $\wedge_{j=1}^{i}(i < m)$, then $\alpha_R(D) < \delta_\alpha$ holds.

For the above example in Table 1, exclusive rule of m.c.h. is:

$$[prod = 0] \wedge [nau = 0] \wedge [M1 = 1] \rightarrow m.c.h. \quad \kappa = 1.0, \alpha = 1.0$$

This attains the highest accuracy. If the threshold for accuracy is set to 0.75, then

$$\begin{aligned} & [prod = 0] \rightarrow m.c.h. \quad \kappa = 1.0, \alpha = 0.75, \\ & [nau = 0] \rightarrow m.c.h. \quad \kappa = 1.0, \alpha = 0.75, \quad and \\ & [M1 = 1] \rightarrow m.c.h. \quad \kappa = 1.0, \alpha = 1.0. \end{aligned}$$

So, diagnostic rules for m.c.h. can be viewed as 1−of−3 concept. In this way, combination of accuracy and coverage is also important to represent m−of−n type rules.

5.2 Rule Induction Algorithm

An algorithm for induction of unit rules is derived by simple modification of the algorithm in Figure 1: if the thresholds of accuracy and coverage are set to δ and 1.0, respectively, then the algorithm for induction of each unit rule will be obtained. In this model, we should only add integration of unit rules after rule induction to obtain the total algorithm, which is not shown for the limitation of the space.

6. Conclusion

In this paper, rough set framework is introduced to model medical diagnostic rules. Acquired models show that the characteristics of medical reasoning reflect the concepts on approximation of rough sets, which explains why rough sets work well in medical domains. These results have not been validated by experiment results yet, which will be reported in the near future.

参考文献

[1] Buchnan, B. G. and Shortliffe, E. H.(eds.) *Rule-Based Expert Systems*, Addison-Wesley, 1984.

[2] Langley, P. *Elements of Machine Learning*, Morgan Kaufmann, CA, 1996.

[3] Pawlak, Z. *Rough Sets*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.

[4] Tsumoto, S. Automated Induction of Medical Expert System Rules from Clinical Databases based on Rough Set Theory *Information Sciences* 112, 67-84, 1998.

[5] Ziarko, W. Variable Precision Rough Set Model. *Journal of Computer and System Sciences*, **46**, 39-59, 1993

[問い合わせ先]

津本周作
島根医科大学医学部医学科医療情報学講座
〒 693-8501 島根県出雲市塩冶町 89-1
Tel: 0853-20-2172, Fax: 0853-20-2170
E-mail: tsumoto@computer.org

TE1−2

細菌検査データベースからのデータマイニング

− Data Mining in Laboratory Data −

横山茂樹
S. Yokoyama
高電工業 (株)
Kouden Industry, Inc.

津本周作
S. Tsumoto
島根医科大学
Shimane Medical University

松岡 喜美子, 福並正剛
K. Matsuoka, M. Fukunami
大阪府立病院
Osaka Pref. Gen. Hospital

Abstract

The search for patterns of emerging infection and antimicrobial resistance is one of the most difficult problems in clinical environment. In order to solve this problem and support the clinicians, we developed a new decision support system based on data mining techniques. The introduced system applied to a large database on bacterial culture and laboratory tests. Experimental results show that induced rules include a several pieces of knowledge, which are useful and interesting for clinicians.

1. はじめに

病院情報システムの発展とともに計測データの電子化、データベース化が著しく進み、癌プロトコルデータベースをはじめ、膨大なデータの集積が可能となってきた。このような電子化の進展によって集積された膨大なデータは人の処理能力をはるかに越え、計算機による有効な使用方法確立の必要性が指摘されている。さらに、電子カルテによる検査以外の診療情報がすべて電子保存されてくれば、データの蓄積量はますます増加すると思われる。

このような現在蓄積されつつある膨大なデータベースから癌や痴呆をはじめとする難病の予防に関する知識、あるいはより一般的に診療に役立つ知識を抽出する方法の開発は蓄積されたデータの再利用の観点から極めて重要であり、従来の統計学的手法のみならず、Data Mining及びKnowledge Discovery in Databases (KDD) におけるルール生成法が期待されている [1]。

本論文では、大規模な病院で収集されたデータベースにルール生成法を適用した研究について報告する。本論文では、1995年から1998年まで集積した細菌検査データを利用し、血液から嫌気性菌が検出された症例を対象に，相関ルールの生成法を用いて調査、解析した。

2. 対象となるデータベース

使用したデータベースは大阪府立病院の細菌検査に関する医療データ (20407件) であり、1995年から1998年間に受け付けた細菌培養検査の結果、検体に関する情報及び関係する血液、尿検査データを約60の属性によって記述している。

2.1 属性の説明

データの記述に使用されている属性は表2の通りである。本データベースの特徴の一つはリストとして記述された項目が存在することであり、通常、リストを表に埋めこむ際は記述の最大限を推定して、その上限値のコラムを用意しておくという方法が取られている。

2.2 データベースの特徴

データベースは実際に蓄積され、前処理を施していない生のデータで、その特徴は以下の通りである。

1. 属性の一部はリストとして保存されている。
2. 欠損値のある項目がほとんどである。
3. 検出菌、疾患名等の項目の値が極めて多く、領域知識による値の変換が必要である。
4. 同時に採取した材料に関するデータが含まれている。
5. 一部、時系列データも含まれている。

一番めの項目に関しては、現行の表形式データベースへの保存が前提になっているためである。この項目のためデータがsparceであるような場合もありうるが、本データベースはその効果を取り除いても、データがsparceになっている。四番め、五番めの項目に関して

表 1: 細菌検査データベースの属性 (診断)

項目	属性
個人情報	受付日, 性別, 生年月日
診療科情報	病棟, 採取月日時, 病名 (3)
オーダー	材料, 目的菌 (2)
症状等	発熱, カテーテル (5), 気切, 挿管, ドレナージ (5)
検査	白血球, 尿 WBC, 尿硝酸塩, 尿蛋白, 尿潜血, 尿定量
治療歴	投薬, ステロイド, 抗癌剤, 放射線, 消炎剤
培養結果	総菌数, 検出菌,biocode,VITEK カード,β-lactamase
抗生物質感受性	PCG, 合 PCs,Aug,PCs-緑,CEPs-1,CEPs-2,CEPs-3,CEPs-4, CEPs-緑,
抗生物質感受性	AGs,MLs,TCs,LCMs,Cs,CBPs,VCM,RFP/FOM

注. (数字) は項目数を示している。

は、一部、同じ被験者から取った空間的ないし時間的に異なる検体も一括して登録されており、個々のデータの独立性は必ずしも保持されていない。

これらはKDD の研究で指摘されていたことであり、前処理、data cleaning がデータマイニングの非常に大きな部分を占める。

2.3 解析の Target

データベース中に含まれる検出菌、病名の項目数は極めて多く、このままでは汎化した知識は抽出しにくい。このため、これらの項目はグループ化して、よりルールを生成しやすい形へとデータベースを変換した。

以上の処理を踏まえて、以下の Target に絞って、データを解析した: 原因菌の欄は大きく分ければ、検出菌 (+) と (-) にわかれる。この解析では、嫌気性菌に注目し、嫌気性検出の有無によってそれぞれの場合、どの属性と関係があるか探索した。

3. ルール生成

3.1 解析・評価の基本的手法: 分割表

本論文で使用される手法は統一的に分割表の中で表される変量によって記述することが可能である。ただし、前向き、後ろ向き研究はこれらの変量に関する測定の順序が異なり、この順序は分割表上に明示的には記述できない。

ここで用いる分割表は表 2 のような 2 × 2 の分割表である。

表 2: Contigency Table

		D(Target)		計
		+	−	
R(formula)	+	a	b	a+b
	−	c	d	c+d
計		a+c	b+d	T

3.2 Accuracy と Coverage

この表から、ルール生成で用いられる条件付き確率の代表である accuracy(confidential ratio) 及び coverage (support ration) は次のように定義できる

$$\alpha_R(D) = \frac{card\ ([R] \bigcap D)}{card\ [R]} = \frac{a}{a+b} = P(d|R), \quad (1)$$

$$\kappa_R(D) = \frac{card\ ([R] \bigcap D)}{card\ D} = \frac{a}{a+c} = P(R|d) \quad (2)$$

ここで、$[R]$ はある属性=値の対からなる連言 R を満たす集合、D は目標となるクラス d に属する集合を表現している。これら二つの指標はスクリーニングの理論では、それぞれ positive predictive value 及び sensitivity(=true positive rate) に相当する。

3.3 ルール生成

相関ルールを含め、ルール生成においては accuracy 及び coverage あるいはそれらの関数を指標として用いてルールを生成する。したがって、一般に、

$$R \overset{\alpha,\kappa}{\rightarrow} d \quad s.t. \quad f_1(\alpha_R(D), \kappa_R(D)) > \delta_{f_1}, \cdots, \\ f_n(\alpha_R(D), \kappa_R(D)) > \delta_{f_n}.$$

の形で表される。上式で、R は属性=値の対の連言、$\delta_{f_1}, \cdots, \delta_{f_n}$ は二つの確率的測度のいき値を表し、問題領域に依存して設定されるパラメータである。

この中で、最も単純なものが、accuracy と coverage そのものを基準として使用したもので、

$$R \overset{\alpha,\kappa}{\Rightarrow} d \ s.t. \ \alpha_R(D) > \delta_\alpha, \ and \ \kappa_R(D) > \delta_\kappa.$$

の形で表され、この形式のルールは図 1 のようなアルゴリズムで生成することができる。Accuracy と Coverage が有用であるのは、以下の小節のように、その二つが trade-off の関係にあり、ルールの生成の制御が簡単だからである。

3.4 Trade-Off 関係

正確度 Accuracy と被覆度 Coverage の二つの指標の trade-off は Bayes の公式から容易に示すことができる。

$$\begin{aligned} \alpha_R(D)P(R) &= P(D|R)P(R) &= P(R,D) \\ &= P(D)P(R|D) &= \kappa_R(D)P(D) \end{aligned}$$

ここで、Accuracy $\alpha_R(D)$ を増加させるために、式 R の記述長を長くすれば、$P(R)$,$P(R,D)$ は減少、$P(D)$ は一定であるから、$\kappa_R(D)$ は減少する。Coverage が式 R の記述長によって単調に減少することは容易に示すことができるから、これは記述に対するコストであるとみなせば、Accuracy と Coverage の trade-off 関係は MDL 原理 [3] と同等であると考えることができる。

3.5 ルール生成と分割表

Accuracy と Coverage を使用したルール生成の方法の場合、分割表との対応を考えることができる。Accuracy と Coverage の定義から、ルールが R と D との intersection (表 2 では a) を R の立場からみるか、D の立場からみるかを示している。したがって、ルール生成は各 R と D に対して、分割表を生成し、その中で accuracy と coverage を算出、閾値以上の条件をみたす R をルールの条件部として採用する。

ここで、R に関して、ベイズ流の解析も含めて、統計的解析では各変量の独立性が問題となるが、ルール生成の場合、集合の intersection を算出する段階で、この独立性のチェックが組み込まれていると考えることができる。

4. 解析結果

4.1 相関ルール

1995 年から 1998 年にかけて 4 年間の両端，1995 年と 1998 年に対して相関ルールの抽出を試み、以下のようなルールが生成された。

第一に、1995 年のデータより発見された If-Then ルール:

1. If-腫瘍患者が，外科で治療を受けていた（75 症例）ならば，Then-血液から嫌気性菌が検出される（22 症例）．このルールの確率 (accuracy) は，29.3%（=22 症例/75 症例）．
2. If - 血液以外の材料で，腫瘍患者が，外科で治療を受けていた（619 症例）ならば，Then-嫌気性菌が検出される（91 症例）．このルールの確率は，14.7% (=91 症例/619 症例）．

次に、1998 年のデータより発見された If-Then ルール:

1. If-患者が腫瘍かつ投薬がカルバペネム系薬剤である（9 症例）ならば，Then-嫌気性菌が血液から検出されない（9 症例）．このルールの確率は，100%（=9 症例/9 症例）．
2. If-患者が腫瘍でかつ投薬がカルバペネム系薬剤である（92 症例）ならば，Then-嫌気性菌が血液以外の材料から検出されない（89 症例）．このルールの確率は，96.7%（=89 症例/92 症例）である．

相関ルール解析により得られた If-Then ルールから，1995 年と 1998 年の If-Then ルールは異なっていた．すなわち，1995 年では外科・腫瘍患者ならば嫌気性菌が検出されるというルールが得られたのに対し，1998 年では同一ルールは発見されず，逆に抗菌剤の使用により嫌気性菌が検出されないというルールが得られた．したがって，少なくとも，カルバペネム系薬剤を含む何らかの抗菌剤の投与により嫌気性菌が検出されないこと（嫌気性菌の検出減少）に関与していることが，データマイニング解析により示唆された．

4.2 仮説の検証

以上の仮説、外科・腫瘍患者における血中嫌気性菌検出なしに対するカルバペネム系薬剤使用有無の有意性に関して，$\chi 2$ 乗検定を行った．1995 年と 1998 年の 2 x 2 クロス表に対する $\chi 2$ 乗検定では，有意レベル（$\alpha = 0.05$）< p 値=0.3336 であり，外科・腫瘍患者で嫌気性菌検出なしに対するカルバペネム系薬剤使

```
procedure Induction of Probabilistic Rules;
  var
    i : integer;    M, L_i : List;
  begin
    L_1 := L_er; /* L_er: List of Elementary Relations */
    i := 1;    M := {};
    for i := 1 to n do       /* n: Total number of attributes */
      begin
        while ( L_i ≠ {} ) do
          begin
            Calculate Accuracy and Coverage;
            Sort L_i w.r.t. the value of coverage;
            Select one pair R = ∧[a_i = v_j] from L_i, which have the largest value on coverage;
            L_i := L_i - {R};
            if (κ_R(D) ≥ δ_κ)
              then do
                if (α_R(D) ≥ δ_α)    then  do S_ir := S_ir + {R}; /* Include R as Classification Rule */
                else M := M + {R};
          end
        L_{i+1} := (A list of the whole combination of the conjunction formulae in M);
      end
  end {Induction of Probabilistic Rules };
```

図 1: An Algorithm for Probabilistic Rules

用有無に統計学的に差があるとはいえなかった.

5. おわりに

本論文では、診療データベースからの知識発見についての成果およびそれに関する専門家の評価方法についての考察を含め、報告した。今後、電子カルテの進展とともに、蓄積されたデータから有効な知識を抽出、診療を支援するシステムを構築、実装することは、電子カルテの構築を促進する動機づけになる筆者は考えている。また、データマイニングの研究そのものも発展途上であることを考えれば、これらの分野が結合することで両分野の研究がさらに進展することが期待される。

参考文献

[1] Fayyad, U.M., et al.(eds.): *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, AAAI Press, 1996.

[2] Quinlan, J.R. *C4.5 - Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann, CA, 1993.

[3] Rissanen J: *Stochastic Complexity in Statistical Inquiry*. World Scientific, Singapore, 1989.

[問い合わせ先]

津本周作
島根医科大学医学部医学科医療情報学講座
〒 693-8501 島根県出雲市塩冶町 89-1
Tel: 0853-20-2172, Fax: 0853-20-2170
E-mail: tsumoto@computer.org

TE1−3

GDT-RSによる共通データからの知識発見
Rule Discovery in Medical Databases by GDT-RS

鍾 寧
Ning Zhong
前橋工科大学
Maebashi Institute of Technology

董 菊珍
Juzhen Dong
前橋工科大学
Maebashi Institute of Technology

大須賀 節雄
Setsuo Ohsuga
早稲田大学
Waseda University

Abstract We have developed an approach that combines the *Generalization Distribution Table (GDT)* with the rough set methodology (GDT-RS for short). In this paper, we describe the applications of our approach for mining *if-then* rules from the medical databases - the *meningitis database* and the *bacterial examination database*.

1 はじめに

実世界のデータから *if-then* ルールを発見できるため、ノイズや未知データの対応、背景知識の利用、および大規模データベースの処理などの問題を解決しなければならない。

本論文では、確率的ラフ帰納学習システムGDT-RS、つまり、「一般化分布表」(GDT) とラフ集合理論 (RS) の組み合わせにより、新たなに構築された「ハイブリッドシステム」を紹介し、そして、GDT-RS を用いて、ノイズデータ、未観測な情報に対する処理の有効性、学習のためのバイアス調整に対する柔軟性、背景知識の利用の可能性などについて、例を通してGDT-RSが優れていることを示す。

2 GDT-RSの概要

GDT-RSはノイズデータや、不完全性なデータからルール発見することを目的として提案された。GDT-RSは一般化分布表 (GDT) とラフ集合 (RS) のハイブリッドである。GDTでは、データの不完全性・曖昧性と発見されたルールの強さを評価する確率基準を用い、ルール選択の基準が作られている。ラフ集合理論は、ルールの抽出や、強いルールの中からすべての実例をカバーする最小ルール集合を絞り出すために用いられる。GDT-RSはノイズや未知 (未観察) データがあるデータから *if-then* ルールを発見できる。GDT-RS で発見されたルールの強さには、ノイズや未知 (未観察) データの影響が明記的に示されている。また、GDT-RSは、学習のためのバイアス調整に対する柔軟性を持ち、背景知識の利用ができる。GDT-RS の実現アルゴリズムなどの詳細は、文献 [1] を参照されたい。

一般化分布表 (GDT)

GDT-RS の中心は変形した遷移マトリクス、いわゆる一般化分布表 (*Generalization Distribution Table (GDT)*) である。GDT は三つの要素からなる：「可能な実例」、「可能な一般化」及び可能な実例と可能な一般化の間の「確率関係」。j番目の可能な実例 PI_j と i 番目の可能な一般化 PG_i の間の関係の強さを表す「確率関係」G_{ij}は、式 1による定義され、又 $\sum_j G_{ij} = 1$。

$$G_{ij} = \begin{cases} p(PI_j|PG_i) & \text{背景知識を利用せず} \\ p_{bk}(PI_j|PG_i) & \text{背景知識を利用する} \end{cases} \quad (1)$$

$p(PI_j|PG_i)$ は一様分布で、$p_{bk}(PI_j|PG_i)$ はそうではない。

$$p(PI_j|PG_i) = \begin{cases} \dfrac{\prod_{k\in\{l|\ PG_i[l]\neq *\}} n_k}{E} & \text{if } PI_j \in PG_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p_{bk}(PI_j|PG_i) = p(PI_j|PG_i) \times AF(PI_j|PG_i)$$

ここで、$E = \prod_{k=1}^{m} n_k$、n_kは属性 kに含む異なった値の数である。$PG_i[l]$ は一般化 PG_iの l番目の属性の値を表しており、$PG_i[l] = *$ は PG_i に l番目の属性が含まれていないということを意味している。AFは調節因子 (*adjusting factors*)[3] で、背景知識の影響で事前分布の変化の幅を示している。

ルールの強さ

GDT-RS ではルール"$X \rightarrow Y$"の強さ $S(X \rightarrow Y)$ は以下のように定義されている：

$$S(X \rightarrow Y) = s(X) \times (1 - r(X \rightarrow Y)), \quad (2)$$

ここで、$s(X)$ は一般化 X(すなわち、ルールの条件部) の強さを表す。$X = PG_i$とすると、一般化 PG_iの強さ $s(PG_i) = \sum_j G_{ij}$。$s(PG_i)$ の初期値は 0 で、実データにより、動的に変更していく。PG_iに満足する全て可能な実例がデータベースに収集されると、PG_iの強さが最大値の 1 になる。一方、$r(X \rightarrow Y)$ はルール"$X \rightarrow Y$"のノイズ率を表している。つまり、一般化 Xに満足する実例の中で、クラス Yに属していない実例の数の比率である。GDT-RS では、ユーザの許すノイズ率を閾値と

して指定できる。ルールのノイズ率が閾値より高いものは自動的に削除される。

3 髄膜脳炎データベースからの知識発見

ここからは、二つの実世界のデータを用いてGDT-RSの特徴を示す。まず、髄膜炎の例で、背景知識を利用する場合と利用しない場合の結果を比較し、背景知識の利用により、良い結果が得られることを示す。

"白血球数(WBC)が高ければ、炎症性蛋白(CRP)も高い"などの医師の経験が背景知識として提供されている。そのような背景知識を用いる場合と、用いない場合の結果を比較した結果、一部のルールが異なっていることが分かった。

まず、背景知識が用いられない場合に強さが低いという理由で削除されたルールが選択されている。例えば、$rule_1$は、背景知識の利用により選出された。

$rule_1$:

$$ONSET(acute) \wedge ESR(\leq 5) \wedge CSF_CELL(> 10) \wedge CULTURE(-) \rightarrow VIRUS(E),$$
$$S = 30 * (384/E) * 4$$

その理由は、"*CSF_CELL(low)*、*Cell_Poly(high)*は同時に発生しない"と"*CSF_CELL(low)*、*Cell_Mono(high)*は同時に発生しない"という背景知識の影響により、$rule_1$の強さが4倍上がったということである。

また、背景知識の利用により、一部のルールが他のルールに置き換えられた。その理由も、背景知識の利用によりルールの強さが変更されたということである。

実験の結果に対して、専門家の医師に評価を頂いた。医師の意見によると、背景知識の利用で発見されたルールのほうがより合理的である。

4 細菌培養検出データベースからの知識発見

二番目の例で、細菌培養検査という大きなデータベースを用いて、データの前処理から、ルール生成するまでのプロセスを説明し、大規模性/複雑問題への対応性があるということを示す。

細菌培養検査データには、実例の数が20,000個、属性の数が49個がある。また、幾つかの属性が複数個の子属性からなる。例えば、病名属性には三つの病名を含んでいる。子属性も計算すると、属性の数が60にのぼる。

このデータベースは実世界のデータの集まりで、ルール発見のための前処理を行っていない。欠損データが存在するし、ルール発見に必要ではない属性が含まれている。また、今回の医療データに対し、正確率が100%のルールがあっても、ルールを満足する実例数が少ないという特徴がある。そのため、以下の手順でルール発見を行う:

1. 欠損に"?"を代入し、属性値の一つとして扱う。但し、異なった実例中の"?"は同じ値として扱わない。
2. 属性の数を減らす
   明らかにクラス属性に無関係な属性、例えば、検出菌に無関係の治療手段、材料、病棟、などを削除し、それでも属性の数が多いので、自動属性選択方法[2]により重要ではない属性を削除する。
3. 連続値属性を離散化する
4. 高い正確率の範囲でルール発見を行う
5. カバーする実例数が少ない(例えば、3以下)ルールにカバーされた実例に対して、低正確率でもう一度ルール発見を行う。

C4.5との比較

同じデータに対して、C4.5も実行して、ルール発見を行なった。一部の結果がGDT-RSと同じであるが、一部のルール、例えば、医師の意見によると、意味のあるルール:"病名1(肺炎) → 検出菌(-)"がGDT-RSで発見されたが、C4.5では発見されなかった。

勿論、C4.5で発見され、GDT-RSで発見されなかったルールもある。例えば:"*βlactamese*(1+) → 検出菌(+)"。その原因はGDT-RSでは、より低い閾値(ノイズ率40%)でルール発見を行ったためである。そのため、GDT-RSはC4.5よりもっと一般的なルールが発見された。C4.5では、*βlactamese(1+)*を含むもっと特殊なルールが発見された。

5 おわりに

ノイズデータや未観測な情報に対する処理の有効性、学習のためのバイアス調整に対する柔軟性、背景知識の利用の可能性などを考慮して、一般化分布表(GDT)とラフ集合(RS)のハイブリッドによるGDT-RSを提案した。二つの医療データに応用し、その有効性を確認した。

References

[1] Zhong, N., Dong, J.Z., and Ohsuga, S. "Data Mining: A Probabilistic Rough Set Approach", *Rough Sets in Knowledge Discovery*, Vol.2, In Studies in Fuzziness and Soft Computing series, Vol.19, Physica-Verlag (1998) 127-146.

[2] Dong, J.Z., Zhong, N., and Ohsuga, S. "Using Rough Sets with Heuristics to Feature Selection", *New Directions in Rough Sets, Data Mining, Granular-Soft Computing*, Lecture Notes in AI 1711, Springer-Verlag (1999) 178-187.

[3] Dong, J.Z., Zhong, N., and Ohsuga, S. "Rule Discovery by Probabilistic Rough Induction", *Journal of Japanese Society for Artificial Intelligence*, Vol.15, No.2 (2000) 276-286.

[問い合わせ先]

〒371-0816
前橋市上佐鳥町460-1
前橋工科大学 情報工学科
鍾 寧
Tel&Fax: 027-265-7366
E-mail: zhong@maebashi-it.ac.jp

TE2−1

ラフ集合専用プロセッサの設計
A Design for Rough Processor

金杉 昭徳
Akinori Kanasugi

埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科
Department of Electronics, Saitama University

Abstract This paper proposes a novel design for Rough Sets processor. The system architecture, the structure of execution units, basic algorithm are shown.

1 まえがき

データマイニング等の分野で，ラフ集合理論が注目されている [1]. 従来，この理論の演算は，ソフトウェアにより実行されていた．しかしながら，大規模システムでは実行時間が増大し，迅速な応答を得ることは困難である．そこで，ラフ集合理論の演算に特化した専用のプロセッサ，即ちラフ・プロセッサの実現が望まれている．そこで，本論文では，ラフ・プロセッサのアーキテクチャ，新しい演算アルゴリズムについて提案する．

2 ラフ・プロセッサの概要

提案するラフ・プロセッサは，図1に示すように，決定表からルール（論理式）を抽出するものである．ブロック・ダイアグラムを図2に示す．プロセッサ内部で特徴的なユニットは，

(a) Discernibility Matrix Maker
(b) Core Selector
(c) Covering Unit
(d) Reconstruction Unit

である．これらの概要は次節で述べる．



図 1: ラフ・プロセッサの概念

本プロセッサで扱う識別行列の1列分のサイズは，バイナリ化したアトリビュートが2032，行数は100万（2の20乗）とする．また，出力する論理関数の項数は20以下とする．内部データ形式を図3に示す．256バイトで識別行列の1要素を表現する．先頭ビットはカバリング・フラグ，5〜15ビット目に，1要素データ（254バイト）に含まれる“1”の総和が格納される．

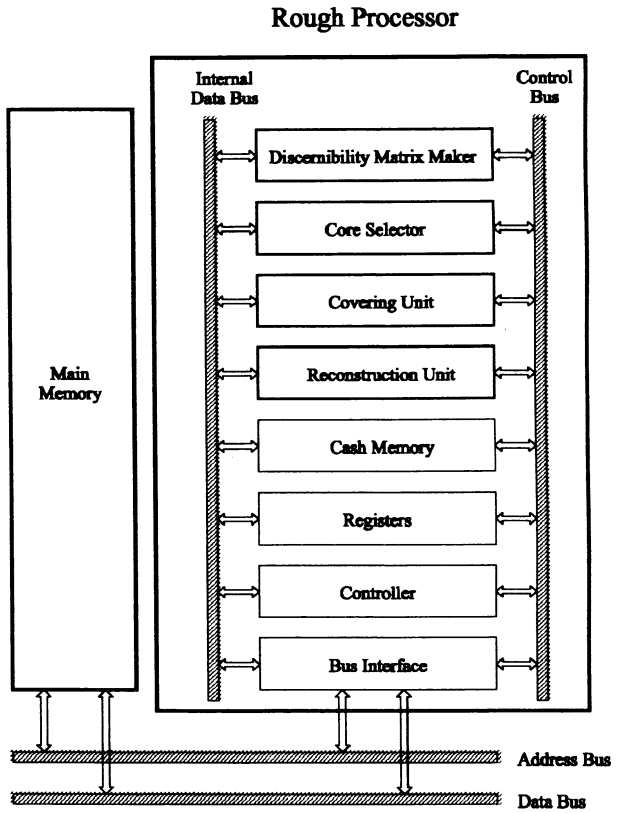


図 2: ブロックダイアグラム

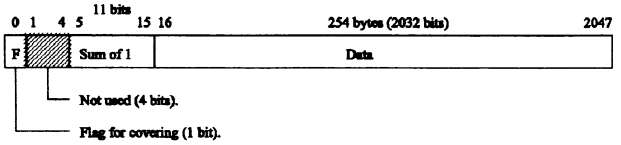


図 3: 内部データ形式

3 内部ユニット

本節では，各ユニットの概要について述べる．

3.1 Discernibility Matrix Maker

本ユニットが行う処理は問題に依存し，かつ複雑である．従って現状では，バイナリ化した識別行列を実質的な入力とする．

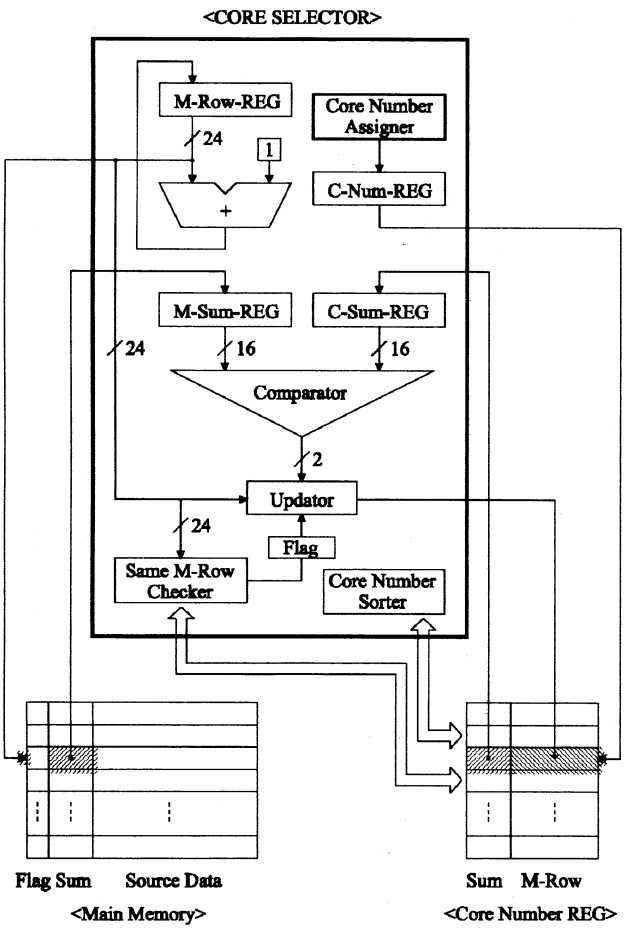


図 4: コア・セレクタ

3.2 Core Selector

主記憶のデータの中から，“1” の総和が少ないものを選び，そのアドレスを専用のレジスタ（Core Number REG）に格納するものである．これをコア・データと呼ぶことにする．

3.3 Covering Unit

コア・データを用いて，入力データを簡略化する．すなわち含意演算により入力データを間引く．2 つのデータ A, B の全ビットにおいて，

$$a_i \subset b_i \tag{1}$$

が成り立つとき，B を消去する．結果は各入力データの先頭ビットのフラグに格納する．残しておくデータには “1”，消去する場合は “0” とする．

処理は，256 ビット長単位で行い，1 データ（2032 ビット長）について 8 回繰り返す．途中で含意条件が満たされなかった場合は，残りの判定処理をスキップすることにより，処理を高速化する．

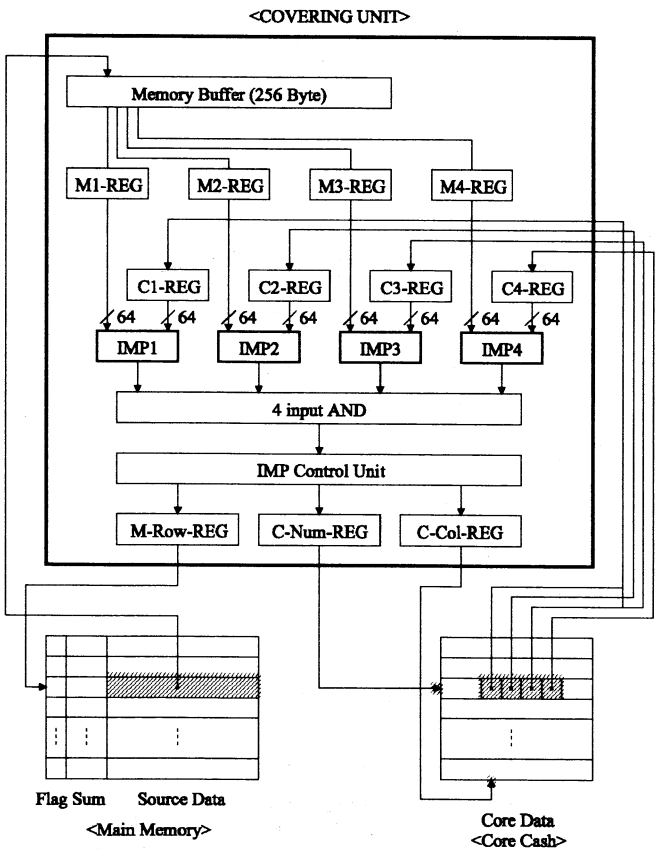


図 5: カバリング・ユニット

3.4 Reconstruction Unit

本ユニットは，第1に，コア・データによってカバリングされずに残ったデータを対象にして，最も頻繁に現れるアトリビュートを求める．第2に，そのアトリビュートを元に，入力データを再構築する．

そのためにまず，各ビットごとに“1”の出現頻度をカウントする．しかしながら，目的は正確な出現回数ではない．そこで高速化と回路規模の縮小を目的とした工夫を行う．すなわち，

(a) カウンタビット長の短縮
(b) カウント対象データの間引き

(a) は，本来20ビット長のカウンタを必要とするところを，8ビット程度の短いビット長のカウンタで代用するものである．このためオーバーフローが生じる度に，全てのカウンタを1ビット右にシフトする．シミュレーションにより，実用上問題ないことを確認した．これにより，回路規模の縮小と同時に高速化が図れる．

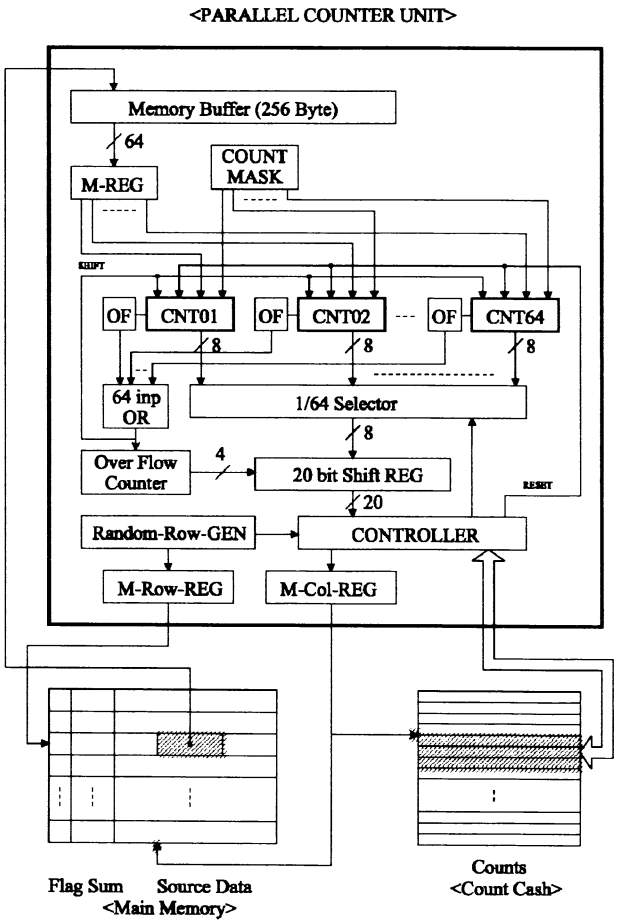


図 6: カウンタユニット

(b) は，全てのデータを対象とするのではなく，20%程度のデータをランダムに選んでカウントするものである．これにより，5倍の高速化が達成される．

内部処理は64ビット（アトリビュート）毎に行う．カウント中に生じたオーバーフロー回数は，Over Flow Counterに記憶しておき，各アトリビュートの出現回数をCount Cashに書き込む際に，このカウンタ値だけ，左にシフトする．

3.5 ユニットの割り当て

本プロセッサでは，Reconstruction Unitを複数用意して，並列動作させることを考えている．そこで，各ユニットに適切にタスクを割り当てる必要がある．目的とする論理式の項数を20と設定しているので，まず図7に示すように，32項の論理式（未完成）を求める．各項は，$x_i \wedge x_{ij} \wedge x_{ijk}$ (i, j = 1〜4, k = 1,2) で与えられる．これを出発点として，ユニットを割当て論理式を求める．ユニットは図8に示すように，横方向に割り当てる．これにより単純なアルゴリズムで，なるべく浅い論理項を見つけるようにする．図7において，“×”は終端している論理項，“·”は終端していない論理項である．

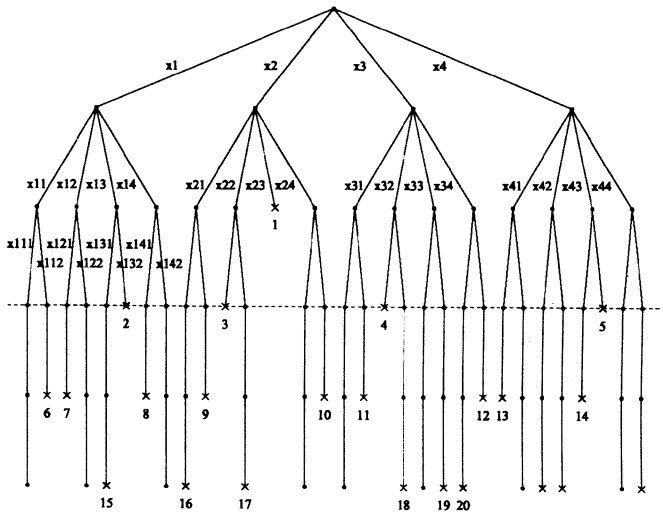


図 7: 論理項

4 むすび

ラフ集合理論に基づき，決定表から，ルールを抽出するための専用プロセッサ，すなわち，ラフ・プロセッサの設計概要を示した．今後は詳細部分の設計を進め，

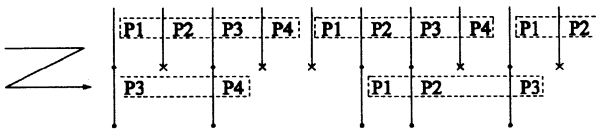


図 8: ユニットの割り当て

実装していく予定である.

謝辞

本研究を進めるにあたり，御指導・御討論頂いたワルシャワ大学 Skowron 教授に感謝致します.

参考文献

[1] S. K. Pal and A. Skowron : "Rough Fuzzy Hybridization – A New Trend in Decision - Making", Springer Verlag (1999).

[2] M. Muraszkiewicz and H. Rybinski : "Towards a Parallel Rough Sets Computer", in "Rough Sets, Fuzzy Sets and Knowledge Discovery" W. P. Ziarko (Ed.), Springer Verlag, pp. 434 – 443 (1994).

[問い合わせ先]
〒 338 - 8570
浦和市下大久保 255
埼玉大学工学部電気電子システム工学科
金杉 昭徳
Tel: 048-858-3473
Fax: 048-858-3473
E-mail: kanasugi@super.ees.saitama-u.ac.jp

TE2−2

ラフ集合論に基づく類似データ発見法を用いた名義データのクラスタリング法

A Clustering Method for Nominal Data by Similar-Object-Discovering Based on Rough Sets

奥崎 智裕　植西 健二　畑 豊
Tomohiro Okuzaki　Kenji Uenishi　Yutaka Hata

姫路工業大学 工学部 情報工学科
Department of Computer Engineering, Himeji Institute of Technology

Abstract This paper presents a new approach to hard clustering, based on the concepts of rough sets. Our method is designed for classifying the nominal data with a concept of *reduct*, which is generally used for identifying each object. The method can classify a database coarsely with ignoring some attributes that are important to describe decision rules, and are discovered by extracting reducts. The experimental result showed that our method could produce a good result.

1. まえがき

データベースの解析には全データをいくつかのまとまりに類別するクラスタリングが有効である．従来法ではK-means 法[1], Fuzzy C-Means 法[2]が有用として知られているが，これらの方法では解を求める際にデータ間に重心が必要となり，データ間で距離や演算が定義されていない名義データの扱いは困難である．本文では名義データの処理が可能であるラフ集合論[4]-[7]を用いたクラスタリング法を提案する．本方法ではラフ集合論の概念である reduct を考慮することで全データを類別する．reduct から求まる決定規則はデータを個別に区別するために用いられるが、その記述に対し使用頻度が高い属性を除いた識別不能関係は情報の不足により細かな類別が不可能である．本方法ではこれらの属性を除くことでデータの大まかな類別を行い，クラスタリング結果を得る．除く属性により複数の結果が得られるため，それぞれの解の正当性を評価することで最適なクラスタリング結果を選択する．

2. クラスタリング法

まず与えられたデータの value reduct を求める．reduct は各データを個別に区別するために必要な属性値によって記述される．全データを $U=\{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n\}$，$U$ に対する全属性を $\boldsymbol{A}$ とする．このとき $\boldsymbol{A}$ の value reduct を以下のように定義する．

$$\text{value reduct} = \left\{ \boldsymbol{B}(x) \middle| [x]_{IND(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B})} \neq [x]_{\boldsymbol{A}},\ \boldsymbol{B} \subset \boldsymbol{A} \right\}.$$

ただし，属性 $\boldsymbol{B}$ に対するデータ x の値を $\boldsymbol{B}(x)$，同値関係 $\boldsymbol{A}$ における x を含むカテゴリを $[x]_{\boldsymbol{A}}$ と表す．

得られた value reduct から与えられたデータをそれぞれ単独に区別する決定規則が求められる．決定規則の記述に対して，ある属性の重要である度合いを value reduct の各属性値の出現数，決定規則の総数を用いて次のように定義する．

属性の重要度=（出現数）/（決定規則数）.

表 1 に示す各データの value reduct，決定規則に用いる属性の重要度は表 2 のようになり，属性"Color"の重要度は，value reduct の出現数 3，決定規則数 16 より，3/16 となる．重要度の高い属性ほどデータの細かな類別に必要となる属性であり，この属性を考慮せずに得られた類別結果は粗いものとなる．本方法では重要度の高い属性を除いたデータに対し，残りの属性を用いて全データを大まかに類別した結果をクラスタリング結果の候補とする．表 2

表 1 toys data

データ番号 \ 属性	Color	Size	Feel	Cuddliness	Material
1	Blue	Big	Hard	Indefinite	Plastic
2	Red	Big	Moderate	Indefinite	Wood
3	Blue	Small	Soft	Smooth	Plastic
4	Blue	Small	Soft	Smooth	Plush
5	Red	Small	Moderate	Indefinite	Plastic
6	Blue	Big	Moderate	Indefinite	Plush

表 2 表 1 データの reduct と各属性の重要度

データ番号 \ 属性	Color	Size	Feel	Cuddliness	Material
1	×	×	Hard	×	×
	×	Big	×	×	Plastic
2	Red	Big	×	×	×
	×	×	×	×	Wood
3	×	×	Soft	×	Plastic
	×	×	×	Smooth	Plastic
4	×	Small	×	×	Plush
	×	×	Soft	×	Plush
	×	×	×	Smooth	Plush
5	Red	Small	×	×	×
	Red	×	×	×	Plastic
	×	Small	Moderate	×	×
	×	Small	×	Indefinite	×
	×	×	Moderate	×	Plastic
6	×	Big	×	×	Plush
	×	×	Moderate	×	Plush
重要度	3/16	7/16	6/16	3/16	11/16

に示すデータの属性のうち最も重要度が高い属性"Material"を除いたデータの類別結果 G_1 は以下に示すようになる.

$G_1=U/\{a, b, c, d\}=\{\{1\}, \{2\}, \{3, 4\}, \{5\}, \{6\}\}$.

同様に, 重要度の高い順に属性を重ねて除いていくと各時点での類別結果は次のようになる.

$G_2=U/\{a, c, d\}=\{\{1\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}, \{6\}\}$,

$G_3=U/\{a, d\}=\{\{1,6\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}\}$,

$G_4=U/\{a\}=\{\{1, 3, 4, 6\}, \{2, 5\}\}$,

$G_5=U/\{d\}=\{\{1, 2, 5, 6\}, \{3, 4\}\}$.

3. 解の正当性

本方法では, 除く属性によって複数の解が得られるため, それぞれの正当性を評価することで最適な解を選択する. 解の正当性 $V(G)$を, クラスタ数 $class$, 同一クラスタに属するデータ x_i, x_j間のハミング距離 $d_H(x_i, x_j)$, クラスタ lの大きさ $rad(l)$, クラスタ lに属するデータ数 N_l, 除いた属性の数 t を用いて次のように定義する.

$$V(G)=\frac{t}{class\times\sum rad},$$

$$rad(l)=\begin{cases}\dfrac{\sum\sum d_H(x_i, x_j)}{{}_{N_l}C_2}, & \text{if } N_l>2\\ 0, & \text{if } N_l=1\end{cases}.$$

この正当性が最も高い解を最適なクラスタリング結果とする. 表 2 から得られた解の $V(G)$の値はそれぞれ, $V(G_1)$=0.2, $V(G_2)$=0.16, $V(G_3)$=0.2, $V(G_4)$=0.41, $V(G_5)$=0.57 であり, 最適な解は G_5 となる.

4. 実験結果

本方法を表 3 に示すデータ数 9, 属性数 5 のデータに対して適用した結果, 表 3 の列"Class"に示す結果が得られた. 結果に対する $V(G)$の値は 0.16 となる. 表 3 より本方法で類似データを同一クラスタに類別した正確なクラスタリング結果を得ることができる. また本結果は大まかな類別を行う属性のみにより決定されているため, 各クラスの単純な決定規則を記述することが可能である. 表 3 のクラスタリング結果におけるクラス割り当ての決定規則は以下に示すよう単純な規則となる.

表3 患者データベースのクラスタリング結果

データ＼属性	Temperature	Dry-cough	Headache	Muscle pain	Influenza	Class
1	normal	absent	absent	absent	absent	Class1
2	high	absent	absent	absent	absent	
3	normal	absent	present	present	absent	Class2
4	subfeb.	absent	present	present	present	
5	subfeb.	present	absent	absent	absent	Class3
6	subfeb	present	absent	absent	present	
7	high	present	absent	absent	absent	
8	high	present	absent	absent	present	
9	high	present	present	present	present	Class4

If (Dry cough=absent) and
((Headache=absent) or (Muscle Pain=absent)) Then Class 1
If (Dry cough=absent) and
((Headache=present) or (Muscle Pain=present)) Then Class 2
If (Dry cough=present) and
((Headache=absent) or (Muscle Pain=absent)) Then Class 3
If (Dry cough=present) and
((Headache=present) or (Muscle Pain=present)) Then Class 4

5. むすび

本文ではラフ集合論に基づく類似データ発見法を用いた名義データのクラスタリング法を提案した. 本方法では, データの value reduct から求められる決定規則の記述に対して, 重要である属性を順に除くことで全データを大まかに類別した. 次に得られた類別結果の正当性を評価し最適な解を選択した. 実験としてデータ数 9, 属性数 6 の名義データに本方法を適用した結果, 類似データを同一クラスタに類別した正確なクラスタリング結果を得た. また得られた結果から単純な決定規則が求められることを示した. 今後の課題として, 属性値単位で値を除く類似データ発見法への拡張が挙げられる.

参考文献

[1] S. Selim, and M. Ismail, "K-means-type Algorithm," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. 6, No. 1, pp. 81-87, 1984.

[2] J. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithm*, Plenum Press, New York, 1981.

[3] Z. Pawlak, *Rough Sets, Theoretical Aspect of Reasoning about Data*, Kluwer Acid. Publ., Dordrecht, 1991.

[4] S. Tsumoto, Y. Yao, and M. Hadjimichael, *Bulletin of International Rough Set Society*, Vol. 3, No. 3, Aug., 1999.

[5] A. Ohrn, S. Vinterbo, P. Szymansski, and J. Komorowski, "Modelling Cardiac Patient Set Residuals Using Rough Sets," the AMIA Annual Fall Symposium Nashville, TN, USA, Oct., pp.25-29, 1997.

[6] S. Tsumoto, and H. Tanaka, "Induction of Disease Description based on Rough Sets," 1st Online Workshop on Soft Computing, Aug., pp. 19-30, 1996.

[問い合わせ先]
〒671-2201
兵庫県姫路市書写 2167
姫路工業大学工学部情報工学科
奥崎智裕
Tel(Fax):0792-67-4986
E-Mail:okuzaki@comp.eng.himeji-tech.ac.jp

TE2−3

必然性測度の新しいクラスとファジィラフ集合
A New Class of Necessity Measures and Fuzzy Rough Sets

乾口 雅弘　　谷野 哲三
Masahiro INUIGUCHI and Tetsuzo TANINO

大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract: In this paper, we propose a new class of necessity measures which satisfy (R1) $N_A(B) > 0$ if and only if $\exists\varepsilon > 0$; $[A]_{1-\varepsilon} \subseteq (B)_\varepsilon$, (R2) there exists $h^* \in (0,1)$ such that $N_A(B) \geq h^*$ if and only if $A \subseteq B$ and (R3) $N_A(B) = 1$ if and only if $(A)_0 \subseteq [B]_1$. It is shown that such a necessity measure is designed easily by level cut conditioning approach. A simple example of such a necessity measure is given. The necessity measure is applied to fuzzy rough set based on certainty qualifications. It is demonstrated that we obtain a better upper and lower approximations of a fuzzy set by the proposed necessity measure than by necessity measures defined by S-, R- and reciprocal R-implications.

1. はじめに

必然性測度の値 $N_A(B)$ が h 以上である必要十分条件を与えることにより，必然性測度，すなわち，それを定義する含意関数が求められることが示されている [1][2]. 本研究では，この方法により，$N_A(B) > 0$ であることと $\exists\varepsilon > 0$; $[A]_{1-\varepsilon} \subseteq (B)_\varepsilon$ が等価となり，$N_A(B) \geq 0.5$ であることと $A \subseteq B$ が等価となり，$N_A(B) = 1$ であることと $(A)_0 \subseteq [B]_1$ が等価となるような新しい必然性測度のクラスを定義する．ただし，$[A]_h$ は h-レベル集合，$(A)_h$ は強 h-レベル集合である．一方，確実性限定によるファジィラフ集合が従来のファジィラフ集合より良い近似を与えることが知られている [3]. 確実性限定によるファジィラフ集合の中でも，本研究で提案するクラスに属する必然性測度を用いることにより，任意のファジィ集合のより良い上下近似が得られることを示す.

2. レベルカット条件付けによる必然性測度

ファジィ情報 $x \in A$ が与えられたもとでの $x \in B$ の必然性測度 $N_A(B)$ は次式で定義される.

$$N_A(B) = \inf_x I(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{1}$$

ここで，$I : [0,1]^2 \to [0,1]$ は含意関数で，(I1) $I(0,0) = I(0,1) = I(1,1) = 1$，(I2) $I(1,0) = 0$ を満たす．通常，(I3) $a \geq c, b \leq d$ に対して，$I(a,b) \leq I(c,d)$ となる単調性を仮定することが多い.

必然性測度を定める含意関数は無数に存在し，これらの中からいずれを採用するかは難しいところであるが，必然性測度を利用したい状況に応じて定められるべきである．通常，取り扱い易さやメンバシップ関数の基数性を必要としないことから，Dienes 含意，$I^{\mathrm{D}}(a,b) = \max(1-a, b)$ が用いられることが多い．しかし，問題に応じて必然性測度を定める含意関数 I を決めた方が，より良好なあるいは合理的な結果が得られる.

このような観点から，含意関数の定め方が問題となるが，直接定めることは困難である．そこで，著者ら [1][2] は，必然性測度が集合の包含関係に対応することから，$N_A(B) \geq h$ の必要十分条件を h に依存した包含関係として与えることにより，含意関数 I を定める方法を提案している．すなわち，

$$N_A(B) \geq h \Leftrightarrow \mathrm{Very}_h(A) \subseteq \mathrm{Roughly}_h(B) \tag{2}$$

が成立すると仮定し，修正子 Very_h, $\mathrm{Roughly}_h$ を $h \in [0,1]$ に依存した関数 $g^{\mathrm{V}}(\cdot,h)$, $g^{\mathrm{R}}(\cdot,h) : [0,1] \to [0,1]$ により定めることにより，I を決定する方法である．ただし，ファジィ集合の包含関係 $A \subseteq B$ は，$\forall x$; $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ と定められる．ここで，修正されたファジィ集合 $\mathrm{Very}_h(A)$, $\mathrm{Roughly}_h(B)$ は次のメンバシップ関数で定義される.

$$\mu_{\mathrm{Very}_h(A)}(x) = g^{\mathrm{V}}(\mu_A(x), h) \tag{3}$$

$$\mu_{\mathrm{Roughly}_h(B)}(x) = g^{\mathrm{R}}(\mu_B(x), h) \tag{4}$$

式 (2) の意味や存在するための条件から，g^{V}, g^{R} に関する次の性質を考える.

(G1) $g^{\mathrm{V}}(a,\cdot)$ および $g^{\mathrm{R}}(a,\cdot)$ は，それぞれ，任意の $a \in [0,1]$ に対して，下におよび上に半連続な関数である.

(G2) 任意の $h > 0$ について，$g^{\mathrm{V}}(1,h) = g^{\mathrm{R}}(1,h) = 1$ かつ $g^{\mathrm{V}}(0,h) = g^{\mathrm{R}}(0,h) = 0$ となる.

(G3) 任意の $a \in [0,1]$ に対して，$g^{\mathrm{V}}(a,0) = 0$ かつ $g^{\mathrm{R}}(a,0) = 1$ となる.

(G4) 任意の $a \in [0,1]$ に対して，$h_1 \geq h_2$ ならば $g^{\mathrm{V}}(a,h_1) \geq g^{\mathrm{V}}(a,h_2)$ かつ $g^{\mathrm{R}}(a,h_1) \leq g^{\mathrm{R}}(a,h_2)$ となる.

(G5) 任意の $h \geq 1$ に対して，$a \geq b$ ならば $g^{\mathrm{V}}(a,h) \geq g^{\mathrm{V}}(b,h)$ かつ $g^{\mathrm{R}}(a,h) \geq g^{\mathrm{R}}(b,h)$ となる.

(G6) 任意の $a \in (0,1)$ に対して，$g^{\mathrm{V}}(a,1) > 0$ かつ $g^{\mathrm{R}}(a,1) < 1$ となる.

以上の性質が満たされるとき，式 (2) を満たす必然性測度が存在し，次の含意関数で定められることが知られている [2].

$$I^{\mathrm{L}}(a,b) = \sup_{0\le h\le 1}\{h \mid g^{\mathrm{V}}(a,h) \le g^{\mathrm{R}}(b,h)\} \quad (5)$$

I^{L} が満たす性質については，文献 [2] を参照されたい．また，文献 [2] では，逆に，必然性測度が与えられたときに，式 (2) を満たす g^{V}，g^{R} を求める問題も議論されている．

3. 確実性限定によるファジィラフ集合

ラフ集合 [4] は，情報に内在する識別不能性に起因するあいまいさを数学的に扱う理論で，情報システムの簡略化，データマイニングやエキスパートシステムなどで有用な手法として注目されてきている．また，ラフ集合の一般化として，ファジィラフ集合 [5] が提案されている．このファジィラフ集合は，ラフ集合の定義に用いていた同値関係を類似関係に拡張したもので，下近似，上近似のメンバシップ関数が，それぞれ，必然性測度，可能性測度で定義される．これに対し，著者ら [3] は，確実性限定を用いてファジィラフ集合を定義し直すことにより，より良い上下近似が得られることを示すとともに，任意のファジィ分割が与えられた場合にも適用可能なことを示している．

確実性限定とは，ファジィ集合 B と $x \in B$ である必然性測度の最低値 q が与えられたとき，$N_A(B) \ge q$ を満たす A を推定することをいう．通常，$N_A(B) \ge q$ を満たす A は無数に存在するので，その最大解が議論される．含意関数 I が上半連続であり，(I3) を満足する場合には，この最大解 $\hat{A}$ は次式で与えられる．

$$\mu_{\hat{A}}(x) = \sigma[I](q, \mu_B(x)) \quad (6)$$

ただし，σ は含意関数から含意関数を生成する汎関数で，

$$\sigma[I](a,b) = \sup_{0\le h\le 1}\{h \mid I(h,b) \ge a\} \quad (7)$$

と定義される．

また，逆確実性限定を考える．すなわち，q と A が与えられたもとで，$N_A(B) \ge q$ を満たす B を議論する．このような B も無数に存在するが，最小解が存在する場合が多い．含意関数 I が上半連続であり，(I3) を満足する場合には，この最小解 $\check{A}$ は次式で与えられる．

$$\mu_{\check{B}}(x) = \xi[I](\mu_A(x), q) \quad (8)$$

ただし，ξ は含意関数から連言関数を生成する汎関数で，

$$\xi[I](a,b) = \inf_{0\le h\le 1}\{h \mid I(a,h) \ge b\} \quad (9)$$

と定められる．

ファジィラフ集合における上下近似を確実性限定，逆確実性限定により 2 通りに定義できる [3] が，より簡単に表現できるものを用いることにする．すなわち，対称的なファジィ関係 R が与えられたとき，ファジィ集合 A のラフファジィ集合とは，次のように定義される対 $(R_\Box(A), R^\Diamond(A))$ のことをいう．

$$\mu_{R_\Box(A)}(x) = \sup_y \xi[I](\mu_{[y]_R}(x), N_{[y]_R}(A)) \quad (10)$$

$$\mu_{R^\Diamond(A)}(x) = \inf_y n(\xi[I](\mu_{[y]_R}(x), N_{[y]_R}(A^{\mathrm{c}}))) \quad (11)$$

ただし，$n : [0,1] \to [0,1]$ は $n(0) = 1$, $n(n(a)) = a$ となる厳密減少関数で，強否定と呼ばれる．$\mu_{A^{\mathrm{c}}}(x) = n(\mu_A(x))$ と定められ，$[y]_R$ はファジィ同値類で，次式で定められる．

$$\mu_{[y]_R}(x) = \mu_R(x,y) \quad (12)$$

$R_\Box(A) \subseteq A \subseteq R^\Diamond(A)$ が常に成立する [3].

対称なファジィ関係の代わりに，分割を一般化した 2 条件

(P1) $\inf_x \max_{i=1,2,\ldots,n} \mu_{F_i}(x) > 0$

(P2) $\sup_x \min(\mu_{F_i}(x), \mu_{F_j}(x)) < 1$,
for $i,j \in \{i = 1,2,\ldots,n\}$, $i \ne j$

を満たすファジィ集合族 $\Phi = \{F_1, F_2, \ldots, F_n\}$ が与えられた場合にもファジィラフ集合が定義できる [3]. すなわち，Φ のもとでの A の下近似 $\Phi_\Box(A)$，上近似 $\Phi^\Diamond(A)$ は，

$$\mu_{\Phi_\Box(A)}(x) = \max_{i=1,2,\ldots,n} \xi[I](\mu_{F_i}(x), N_{F_i}(A)) \quad (13)$$

$$\mu_{\Phi^\Diamond(A)}(x) = \min_{i=1,2,\ldots,n} n(\xi[I](\mu_{F_i}(x), N_{F_i}(A^{\mathrm{c}}))) \quad (14)$$

と定められる．

4. 新しい必然性測度のクラス

必然性測度を定める含意関数として，従来，Dienes 含意，Gödel 含意，対偶 Gödel 含意，Goguen 含意，対偶 Goguen 含意，Łukasiewitz 含意などが有名である．さらに，これらの一般形となる，T-ノルムや否定演算 n により定められる S-含意，R-含意 [6]，対偶 R-含意がよく用いられる．通常，これらの含意関数は，T-ノルムを min 演算または連続なアルキメデス的な T-ノルムとしたものである．min 演算から生成される含意は，Dienes 含意，Gödel 含意，対偶 Gödel 含意，あるいは，これらの否定演算を変えたものである．連続なアルキメデス的な T-ノルムで定められる場合の g^{V}，g^{R} が表 1 のようになることが知られている [2]．表 1 の関数 $f : [0,1] \to [0,+\infty)$ は T-ノルムの加法的生成関数である．

これらのいずれの場合も，3 条件，

(R1) $N_A(B) > 0$ であることと $\exists\varepsilon > 0$; $[A]_{1-\varepsilon} \subseteq (B)_\varepsilon$ が等価となる．

(R2) $h^* \in (0,1)$ が存在して，$N_A(B) \ge h^*$ であることと $A \subseteq B$ が等価となる．

(R3) $N_A(B) = 1$ であることと $(A)_0 \subseteq [B]_1$ が等価

表 1: 連続でアルキメデス的な T-ノルムによる S-含意，R-含意，対偶 R-含意に対する g^{V} と g^{R} の組合せ

I	$f(0)$	$g^{\mathrm{V}}(a,h)$ $(h>0)$	$g^{\mathrm{R}}(a,h)$ $(h>0)$
S-含意	—	$\max(0,1-f(a)/f(n(h)))$	$\min(1,f(n(a))/f(n(h)))$
R-含意	$<+\infty$	$\max(0,1-f(a)/(f(0)-f(h)))$	$\min(1,(f(0)-f(a))/(f(0)-f(h)))$
	$=+\infty$	a	$f^{-1}(\max(0,f(a)-f(h)))$
対偶 R-含意	$<+\infty$	$(f(n(a))-f(h))/(f(0)-f(h))$	$\min(1,f(n(a))/(f(0)-f(h)))$
	$=+\infty$	$n(f^{-1}(\max(0,f(n(a))-f(h)))$	a

となる．

を同時に満たさない．実際，(R2) と等価な条件，$g^{\mathrm{V}}(\cdot,h)=g^{\mathrm{R}}(\cdot,h)$ が成立する $h\in(0,1)$ が存在するか否かを調べると，R-含意，対偶 R-含意では，$h=1$ となり，$h\in(0,1)$ は存在せず，S-含意では，この方程式を満たす h すら存在しない．

そこで，$h^*=0.5$ で上の 3 条件を満たす必然性測度を考える．これを実現するには，

(i) 任意の $a\in(0,1)$ について，$\lim_{h\to+0}g^{\mathrm{V}}(a,h)=0$ かつ $\lim_{h\to+0}g^{\mathrm{R}}(a,h)=1$ が成立する．

(ii) $h=0.5$ のとき，かつ，そのときに限り，$g^{\mathrm{V}}(\cdot,h)=g^{\mathrm{R}}(\cdot,h)$ が成立する．

(iii) 任意の $a\in(0,1)$ について，$g^{\mathrm{V}}(a,1)=1$ かつ $g^{\mathrm{R}}(b,1)<1,\forall b\in[0,1)$，または，$g^{\mathrm{R}}(a,1)=0$ かつ $g^{\mathrm{V}}(b,1)>0,\forall b\in(0,1]$ が成立する．

および (G1)〜(G6) を同時に満たす関数 g^{V}, g^{R} を準備すればよい．このような関数のペアは無数に存在する．

例 1. たとえば，次の線形の g^{V}，g^{R} を考えれば上の (i)〜(iii) および (G1)〜(G6) を満足する．

$$g^{\mathrm{V}}(x,h)=\begin{cases}0, & h=0,\ x\in[0,1)\ \text{のとき}\\ 1, & h=0,\ x=1\ \text{のとき}\\ \max\left(0,\dfrac{x+2h-1}{2h}\right), & h\in(0,0.5)\ \text{のとき}\\ \min\left(1,\dfrac{x}{2-2h}\right), & h\in[0.5,1)\ \text{のとき}\\ 0, & h=1,\ x=0\ \text{のとき}\\ 1, & h=1,\ x\in(0,1]\ \text{のとき}\end{cases}\tag{15}$$

$$g^{\mathrm{R}}(x,h)=\begin{cases}0, & h=0,\ x=0\ \text{のとき}\\ 1, & h=0,\ x\in(0,1]\ \text{のとき}\\ \min\left(1,\dfrac{x}{2h}\right), & h\in(0,0.5)\ \text{のとき}\\ \max\left(0,\dfrac{x+1-2h}{2-2h}\right), & h\in[0.5,1)\ \text{のとき}\\ 0, & h=1,\ x\in[0,1)\ \text{のとき}\\ 1, & h=1,\ x=1\ \text{のとき}\end{cases}\tag{16}$$

このとき，式 (5) より，必然性測度を定める含意関数 I^{L} は次のように得られる．

$$I^{\mathrm{L}}(a,b)=\begin{cases}1, & a=0\ \text{または}\ b=1\ \text{のとき}\\ \dfrac{1-a+b}{2}, & \text{その他}\end{cases}\tag{17}$$

これ以外にも，(i)〜(iii) および (G1)〜(G6) を満たす関数 g^{V}, g^{R} は無数に存在する．

5. 提案した必然性測度のクラスとファジィラフ集合

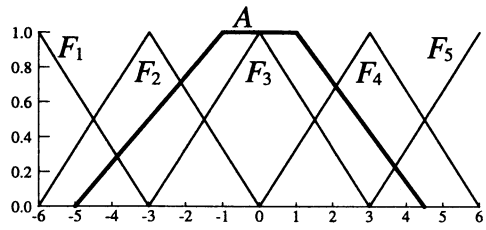
ファジィラフ集合に用いる必然性測度について考察しよう．そのために，逆確実性限定の最小解 (式 (8)) について考察する．必然性測度が，S-含意 $I^{\mathrm{S}}(a,b)=n(t(a,n(b)))$，R-含意 $I^{\mathrm{R}}(a,b)=\sup\{h\in[0,1]\mid t(a,h)\le b\}$，対偶 R-含意 $I^{\mathrm{r\text{-}R}}(a,b)=\sup\{h\in[0,1]\mid t(n(b),h)\le n(a)\}$ で定められる場合を考えよう．ただし，t は T-ノルム，n は強否定である．式 (8) の $\check{B}$ が空集合でないためには，$q>0$ でなければならない．そこで，$N_A(B)>0$ となるための条件を考察しよう．

まず，

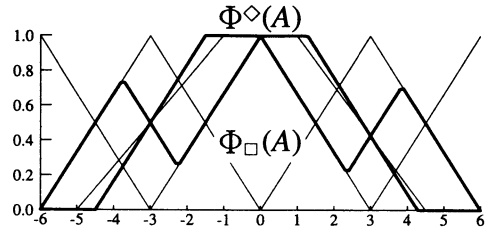
$$\forall\varepsilon_1>0,\ \forall\varepsilon_2>0;\ t(\varepsilon_1,\varepsilon_2)>0\tag{18}$$

が成立するときを考える．たとえば，t が min 演算，算術積のとき，これが成立する．S-含意では，$N_A(B)>0$ となるための必要十分条件は，$\exists\varepsilon>0$; $[A]_{1-\varepsilon}\subseteq(B)_\varepsilon$ となる．R-含意では，$\exists\varepsilon>0$, $\forall\varepsilon'\in(0,\varepsilon]$; $(A)_{\varepsilon'}\subseteq(B)_{\varepsilon'}$ となり，対偶 R-含意では，$\exists\varepsilon>0$, $\forall\varepsilon'\in(0,\varepsilon]$; $[A]_{1-\varepsilon'}\subseteq[B]_{1-\varepsilon'}$ となる．このことより，式 (18) が成立する T-ノルムによる R-含意，対偶 R-含意を用いて定義される必然性測度が正の値をとる条件がかなり厳しいことがわかる．R-含意，対偶 R-含意を用いる際，式 (18) が成立しない T-ノルム，たとえば，限界積で定めることが望ましい．

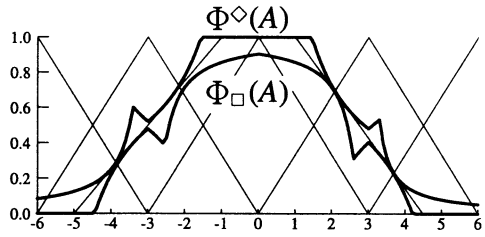
一方，$N_A(B)=1$ となるための必要十分条件は，S-含意では，式 (18) が成立するとき，$(A)_0\subseteq[B]_1$ となる．したがって，式 (18) が成立するとき，S-含意を用いると，$0<N_A(B)<1$ となる A,B の組合せは多様である．R-含意および対偶 R-含意では，連続な T-ノルムで定められるとき，$N_A(B)=1$ となるための必要十分条件は，$A\subseteq B$ となる．したがって，R-含意および対偶 R-含意を用いた必然性測度では，$A\subseteq B$ であるとき，A が B 内でどのように小さいかを識別できないことになる．



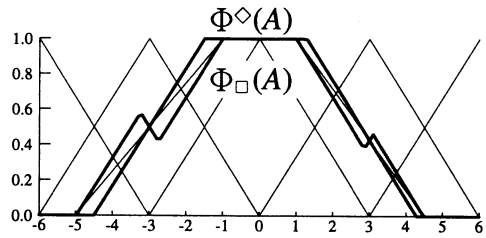
(a) F_i, $i = 1, 2, \ldots, 5$ と A



(b) Łukasiewitz 含意の場合



(c) Reichenbach 含意の場合



(d) 式 (17) の含意関数の場合

図 1: 三つの含意演算による必然性測度を用いた A の上下近似の比較

以上の議論より，S-含意，R-含意，対偶 R-含意の中では，式 (18) を満たす T-ノルムにより定められる S-含意が良さそうであるが，次の欠点をもつ．すなわち，$\xi[I^S](a,b)$ を考えると，式 (18) より，$b = 1$ かつ $a > 0$ のとき，かつ，そのときに限り，$\xi[I^S](a,b) = 1$ となる．このことより，ファジィラフ集合への適用を考えると，式 (13) より，$N_{F_i}(A) = 1$ なる F_i が存在するときに限り，下近似 $\Phi_\square(A)$ が正規になる．また，式 (14) より，$N_{F_i}(A^c) = 1$ なる F_i が存在するときに限り，上近似 $\Phi^\diamond(A)$ のメンバシップ関数の最小値が 0 となる．$N_{F_i}(A) = 1$ の必要十分条件は $(F_i)_0 \subseteq [A]_1$ と厳しいので，多くの場合，下近似は正規なファジィ集合とならない．

前節で提案した必然性測度が (R1), (R3) を満たすことに注意すると，$0 < N_A(B) < 1$ となる A, B の組合せは多様であることがわかる．また，(R2) より，$N_{F_i}(A) \geq 0.5$ なる F_i が存在すれば，下近似 $\Phi_\square(A)$ が正規になり，$N_{F_i}(A^c) \geq 0.5$ なる F_i が存在すれば，上近似 $\Phi^\diamond(A)$ のメンバシップ関数の最小値が 0 となる．したがって，式 (18) を満たす T-ノルムで定められる含意をもつ必然性測度より，本研究で提案した必然性測度の方が，A のよい近似を与えうる．

例 2. F_i, $i = 1, 2, \ldots, 5$ および A が図 1(a) のように与えられたとき，$N_{F_i}(A)$, $N_{F_i}(A^c)$ を記憶しておき，必要なときに A を復元することを考える．

含意関数 I として，Łukasiewitz 含意 ($I(a,b) = \min(1 - a + b, 1)$)，Reichenbach 含意 ($I(a,b) = 1 - a + ab$)，式 (17) を用いた上下近似の様子を図 1 に示す．Łukasiewitz 含意は式 (18) を満たさない T-ノルム (限界積) により定義される R-含意かつ対偶 R-含意であり，S-含意でもある．Reichenbach 含意は式 (18) を満たす T-ノルム (算術積) により定義される S-含意である．図 1 より，提案した含意関数の一つである式 (17) の場合が最も良好な近似を与えていることがわかる．

参考文献

[1] M. Inuiguchi and Y. Kume: Necessity Measures Defined by Level Set Inclusions - Nine Kinds of Necessity Measures and Their Properties -, *International Journal of General Systems*, Vol.22, pp.245–275 (1994).

[2] M. Inuiguchi and T. Tanino: Level Cut Conditioning Approach to the Necessity Measure Specification, N. Zhong, A. Skowron and S. Ohsuga (Eds.): *New Directions in Rough Sets, Data Mining, and Granular-Soft Computing: Proceedings of 7th International Workshop, RSFDGrC'99*, Springer, Berlin, pp.193–202 (1999).

[3] M. Inuiguchi and T. Tanino: Fuzzy Rough Sets Based on Certainty Qualifications, *Proceedings of AFSS 2000* (2000).

[4] Z. Pawlak: *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, Kluwer Academic Publishers (1991).

[5] D. Dubois and H. Prade: Rough Fuzzy Sets and Fuzzy Rough Sets, *International Journal of General Systems*, Vol.17, pp.191–209 (1990).

[6] D. Dubois and H. Prade: Fuzzy Sets in Approximate Reasoning, Part I: Inference with Possibility Distributions, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.40, pp.143–202 (1991).

［連絡先］ 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
電子情報エネルギー工学専攻
乾 口 雅 弘
Tel. 06-6879-7787 Fax. 06-6879-7939
E-mail: inuiguti@eie.eng.osaka-u.ac.jp

TE3−1

複数の情報源があるデータの取り扱いについて
Handling Data with Multiple Information Sources

中田 典規　千葉経済大学短期大学部　Chiba-Keizai College
Germano Resconi　カトリック大学　Universita Cattolica
村井 哲也　北海道大学工学部　Hokkaido University

Abstract Data with multiple information sources are dealt with in an extended relational model under a modal logic approach. An information source corresponds to a possible world and relationship between information sources is expressed by an accessibility relation. An attribute value in database relations is a triplet that consists of a set of possible worlds, an accessibility relation and a set of valuation functions.

キーワード: 複数情報源、拡張関係データモデル、様相論理

1 序論

データベースの研究の大部分は、一つの実体に対して正確で確実な一つの情報が得られることを前提としてなされてきた。しかし、限定された期間に実体を全て完全に認識することが可能であるとは限らない [1]。この指摘に対して、正確で確実な情報が得られない場合を想定した研究がファジィ集合論や可能性理論及び確率論を用いてなされ、基本的な枠組みが提案されているが [2, 3]、複数の情報源が存在する場合の考察はあまりされていない。本論は、このことを様相論理を用いて扱い、その場合のデータベースの枠組みを示すことが目的である。

2 複数の情報源の取り扱い

2.1 様相論理

様相論理は古典的命題論理を拡張したものである。関心の対象となる式の意味は与えられた文脈での真理値である。様相論理のモデル M は3成分 $\langle \mathcal{W}, \mathcal{R}, \mathcal{V} \rangle$ から成る。ここで、$\mathcal{W}$、$\mathcal{R}$、$\mathcal{V}$ はそれぞれ可能世界の集合、$\mathcal{W}$ 上の2項関係（到達可能関係）、真理値評価関数の集合である。$\mathcal{W}$ における各可能世界について、真か偽のいずれか一つが各原子命題に指定される。関心の対象となるのは、$\langle w_i, w_j \rangle \in \mathcal{R}$ の全ての $w_j \in \mathcal{W}$ について $\nu_j(p) = \mathrm{t}$ である時のみ $\nu_i(\Box p) = \mathrm{t}$ と $\langle w_i, w_j \rangle \in \mathcal{R}$ のある $w_j \in \mathcal{W}$ について $\nu_j(p) = \mathrm{t}$ である時のみ $\nu_i(\Diamond p) = \mathrm{t}$ という場合である。ここで、$\Box$ は「必然である」ことを表し、$\Diamond$ は「可能である」ことを表す。従って、$\nu_i(\Box p) = \mathrm{t}$ と $\nu_i(\Diamond p) = \mathrm{t}$ は、可能世界 w_i で式（命題）p が真であることが必然であることと可能であることを意味する。さらに、$\langle w_i, w_j \rangle \in \mathcal{R}$ である時、可能世界 w_j は可能世界 w_i から到達可能であると言う。到達可能関係 $\mathcal{R}$ を $n \times n$ 行列 $\mathcal{R} = [r_{ij}]$ で表し、

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & if\ \langle w_i, w_j \rangle \in \mathcal{R}, \\ 0 & otherwise. \end{cases}$$

また、各式 p に対しては各可能世界について、

$$T(\nu_i(p)) = \begin{cases} 1 & if\ \nu_i(p) = \mathrm{t}, \\ 0 & otherwise. \end{cases}$$

2.2 情報源と可能世界

ある実体に複数の情報源があることは、その実体を記述する可能世界が複数あることを意味する。可能世界はある命題が真であることによって特徴づけられる。このことをモデル化するために、以下の形の命題を用いる。
e_A: "ある与えられたデータ値 ε は集合 A に分類される。"
ここで、$\varepsilon \in \mathcal{X}$、$A \in \mathcal{P}(\mathcal{X})$、$\mathcal{X}$ は定義域、$\mathcal{P}(\mathcal{X})$ は $\mathcal{X}$ のべき集合である。この命題の内部構造によって、原子命題として、命題 $e_{\{x\}}(x \in \mathcal{X})$ を考えればよい。この時、命題 e_A は以下の式で定義される。

$$\forall A \neq \emptyset \ \ e_A = \bigvee_{x \in A} e_{\{x\}} \ \text{ and } \ e_\emptyset = \bigwedge_{x \in \mathcal{X}} \neg e_{\{x\}}.$$

ここで、各可能世界 $w_i \in \mathcal{W}$ について、唯一の $x \in \mathcal{X}$ で $\nu_i(e_{\{x\}}) = \mathrm{t}$ であると仮定されている。つまり、評価関数の集合 $\mathcal{V}$ は、$\mathcal{W}_A$ に属している各世界において、要素 $x \in A$ についてのみ命題 $e_{\{x\}}$ が真であるというように指定される。例えば、可能世界 w_1 と w_2 において、ある実体に対して値がそれぞれ u と v であることが得られている時、評価関数 $\mathcal{V}$ は2つの真理値評価関数 ν_1 と ν_2 の集合で、それぞれ原子命題が真、つまり、$\nu_1(e_{\{u\}}) = \mathrm{t}$ と $\nu_2(e_{\{v\}}) = \mathrm{t}$ である。

情報源どうしの関連は、可能世界どうしの到達可能関係によって表わされる。例えば、2つの情報源があることを対応する可能世界の集合 $\mathcal{W}(= \{w_1, w_2\})$ で置き換えるとしよう。この二つの情報源が独立している時、つまりお互いに許容していない時、到達可能関係 $\mathcal{R}$ は、

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

二つの情報源がお互いに認めあっている時、二つの可能世界が互いに到達可能で、到達可能関係 $\mathcal{R}$ は、

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

つまり、お互いに到達可能である場合に、到達可能関係は同値関係となる。
情報源1は情報源2を認めているが、情報源2は情報源1を認めていない時、つまり w_1 から w_2 へは到達可能であるが、w_2 から w_1 へは到達可能ではない時、到達可能関係 $\mathcal{R}$ は、

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

尚、同値関係を構成する全ての世界について、同じ命題が真である時、同値関係は恒等関係となる。これは、各世界は孤立していることと同一であることを意味する。

例 1
5つの情報源があるとし、その情報源から得られた値はそれぞれ a,b,c,c,d としよう。情報源2と3、及び4と5はそれぞれお互いに認めあっているものとする。この時、可能世界の集合 $\mathcal{W}(=\{w_1, w_2, \ldots, w_5\})$ は、3つの同値関係 $\{w_1\}$, $\{w_2, w_3\}$, $\{w_4, w_5\}$ を持っている。到達可能関係 $\mathcal{R}$ は

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & 1 & & 0 \\ & 1 & 1 & & \\ & & & 1 & 1 \\ 0 & & & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

真理値評価関数の集合 $\mathcal{V}$ は5つの真理値評価関数の集まりで、$\nu_1(e_{\{a\}}) = \mathrm{t}$, $\nu_2(e_{\{b\}}) = \mathrm{t}$, $\nu_3(e_{\{c\}}) = \mathrm{t}$, $\nu_4(e_{\{c\}}) = \mathrm{t}$, $\nu_5(e_{\{d\}}) = \mathrm{t}$ となる。

3 拡張関係データモデル

定義 拡張関係スキーマ R は従来の属性 $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \ldots, A_n\}$ とメンバシップ属性 μ から成る。すなわち、$R = \mathcal{A} \cup \{\mu\} = \{A_1, A_2, \ldots, A_n, \mu\}$.

定義 あるタプル t の属性 A_i の値 $t[A_i]$ は $\langle \mathcal{W}, \mathcal{R}, \mathcal{V} \rangle_{t[A_i]}$ $(= \langle \mathcal{W}_{t[A_i]}, \mathcal{R}_{t[A_i]}, \mathcal{V}_{t[A_i]} \rangle)$ によって表される。ここで、$\mathcal{W}_{t[A_i]}, \mathcal{R}_{t[A_i]}, \mathcal{V}_{t[A_i]}$ は、それぞれ、$t[A_i]$ に関する可能世界の集合、到達可能関係、真理値評価関数の集合である。

属性値の並び $\langle t[A_1]t[A_2]\cdots t[A_n] \rangle$ であるタプル値 $t[\mathcal{A}]$ もまた同様に $\langle \mathcal{W}, \mathcal{R}, \mathcal{V} \rangle_{t[\mathcal{A}]}$ $(= \langle \mathcal{W}_{t[\mathcal{A}]}, \mathcal{R}_{t[\mathcal{A}]}, \mathcal{V}_{t[\mathcal{A}]} \rangle$ で表現される。

この拡張に加えて、タプル値の関係への所属を表す属性を導入する。

定義 各タプル値 $t[\mathcal{A}]$ は関係 r における所属度 $t[\mu]$ $(= (t[\mu_\Box], t[\mu_\Diamond]))$ を持っている。ここで、$t[\mu_\Box]$ と $t[\mu_\Diamond]$ は、タプル値 $t[\mathcal{A}]$ が r に属することが必然である度合いと可能性である度合いである。
$r = \{\langle t[\mathcal{A}], (t[\mu_\Box], t[\mu_\Diamond]) \rangle \mid t[\mu_\Diamond] > 0\}$.

この定義で述べられているように、関係は要素としてタプル値を持つ拡張された集合である。関係もまた $\langle \mathcal{W}, \mathcal{R}, \mathcal{V} \rangle$ で表すことができる。

定義 タプル値が関係に属する度合いは、関係に課せられる一貫性制約やデータ処理時に関係に課せられる制約とタプル値との整合性の度合いである。

属性のレベルでは、制約は属性が取りうる値の集合を規定するが、タプルのレベルでは、タプル値として許される値の集合を規定する。情報源が複数ある時、可能世界の数は複数となる。ある可能世界でとる値は制約で規定された集合に属するが、別の可能世界についもそうであるとは限らない。故に、所属度の値は0あるいは1とは限らない。さらに、ある可能世界は到達可能関係を通じて別の可能世界と関連している。このために、所属度が必然性と可能性の組で得られる。

$t[\mathcal{A}]$ が $\langle \mathcal{W}_{t[\mathcal{A}]}, \mathcal{R}_{t[\mathcal{A}]}, \mathcal{V}_{t[\mathcal{A}]} \rangle$ で表され、$|\mathcal{W}_{t[\mathcal{A}]}| = n$ とする。タプル値 $t[\mathcal{A}]$ と制約 C との整合性の度合いは、

$$\begin{aligned} Nec(C|t[\mathcal{A}]) &= T(\Box(C|t[\mathcal{A}]))/n, \\ Pos(C|t[\mathcal{A}]) &= T(\Diamond(C|t[\mathcal{A}]))/n. \end{aligned}$$

ここで、$T(\Box(C|t[\mathcal{A}]))$ と $T(\Diamond(C|t[\mathcal{A}]))$ は、タプル値 $t[\mathcal{A}]$ が制約 C と整合することが必然である可能世界の数と可能である可能世界の数である。

$$\begin{aligned} T(\Box(C|t[\mathcal{A}])) &= \sum_i T(\nu_i(\Box(C|t[\mathcal{A}]))), \\ T(\Diamond(C|t[\mathcal{A}])) &= \sum_i T(\nu_i(\Diamond(C|t[\mathcal{A}]))). \end{aligned}$$

ここで、$T(\nu_i(\Box(C|t[\mathcal{A}])))$ と $T(\nu_i(\Diamond(C|t[\mathcal{A}])))$ は可能世界 w_i におけるタプル値 $t[\mathcal{A}]$ が制約 C と整合することが必然である度合いと可能である度合いである。各可能世界 $w_i \in \mathcal{W}_{t[\mathcal{A}]}$ について、

$$\nu_i(\Box(C|t[\mathcal{A}])) = \mathrm{t} \equiv$$
$$\forall w_j \in \mathcal{W}_{t[\mathcal{A}]}\ \langle w_i, w_j \rangle \in \mathcal{R}_{t[\mathcal{A}]} \Rightarrow \nu_j(C|t[\mathcal{A}]) = \mathrm{t}.$$

この式は、各可能世界 $w_i \in \mathcal{W}_{t[\mathcal{A}]}$ について、可能世界 w_i から到達可能な全ての可能世界 w_j において $\nu_j(C|t[\mathcal{A}]) = \mathrm{t}$ のときのみ $\nu_i(\Box(C|t[\mathcal{A}])) = \mathrm{t}$ であることを意味する。同様に、

$$\nu_i(\Diamond(C|t[\mathcal{A}])) = \mathrm{t} \equiv$$
$$\exists w_j \in \mathcal{W}_{t[\mathcal{A}]}\ \langle w_i, w_j \rangle \in \mathcal{R}_{t[\mathcal{A}]} \wedge \nu_j(C|t[\mathcal{A}]) = \mathrm{t}.$$

この式は、各可能世界 $w_i \in \mathcal{W}_{t[\mathcal{A}]}$ について、可能世界 w_i から到達可能な少なくとも一つの可能世界 w_j において $\nu_j(C|t[\mathcal{A}]) = \mathrm{t}$ のときのみ $\nu_i(\Diamond(C|t[\mathcal{A}])) = \mathrm{t}$ であることを意味する。故に、$Nec(C|t[\mathcal{A}])$ と $Pos(C|t[\mathcal{A}])$ は制約 C と整合することが必然である可能世界の割合と可能である可能世界の割合である。

例 2
ある関係の属性値 A に関して、$\langle \mathcal{W}, \mathcal{R}, \mathcal{V} \rangle$ が例1で示したように得られているとする。今、「$A = \{b, c\}$」という制約 C がこの関係に課されているとしよう。この時、タプル値 $t[\mathcal{A}]$ に対して、この制約を満たすことが必然である度合い $Nec(C|t[\mathcal{A}]) = 2/5$ と可能である度合い $Pos(C|t[\mathcal{A}]) = 4/5$ が上述の式を用いて得られる。

4 結語

複数の情報源があるデータを様相論理によって扱い、データモデルの枠組みを示した。情報源は可能世界に対応し、属性値は、可能世界の集合、可能世界間の到達可能関係、真理値評価関数の集合の3組みによって表わされる。また、属性値と関係に課せられる制約との整合性の度合は必然性の度合と可能性の度合を用いて計算される。

参考文献

[1] Parsons, S. [1996] Current Approaches to Handling Imperfect Information in Data and Knowledge Bases, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, **83**, 353-372.

[2] Prade, H. and Testemale, C. [1984] Generalizing Database Relational Algebra for the Treatment of Incomplete or Uncertain Information and Vague Queries, Information Science, **34**, 115-143.

[3] Zimányi, E. [1997] Query Evaluation in Probabilistic Relational Databases, Theoretical Computer Science, **171**, 179-219.

問い合わせ先：
263-0021 千葉市稲毛区轟町4丁目3-30
千葉経済大学短期大学部　経営情報学科　中田　典規
TEL 043-255-3451 FAX 043-252-6050
E-mail: nakata@chiba-kc.ac.jp

TE4−1

ファジィモデルによる上水道系の配水量予測
Fuzzy Modeling and Prediction of Water Supply at Water Works System

○石井 省爾　　島川 学　　村上 周太
Shouji ISHII　　Manabu SHIMAKAWA　　Shuta MURAKAMI
九州工業大学工学部
Faculty of Engineering, Kyusyu Institute of Technology

Abstract: This paper deals with fuzzy modeling of water supply at water works in Kitakyusyu City. The water works system needs the stable and safe operation. Especially, water demand prediction is important information for adjusting the quantity of water intaken from upper streams. In this paper, we construct fuzzy models for prediction of water supply at the water works system and show its effectiveness.

1. はじめに

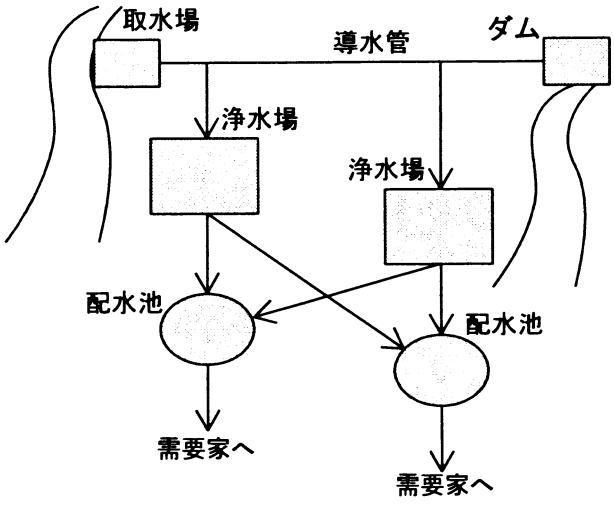


図 1：上水道システム

一般に、上水道システムは、図1に示すように水源として複数個のダムや取水場、河川とこれらを結ぶ導水管路、水処理設備として浄水場群、配水設備としてポンプ場群と配水池群と、需要家へ連なる管網群からなる。ダム、河川より取水された水は、浄水設備を経て需要家へ供給される。ダム、河川や浄水場からの取水量は、水源側の貯水量と水質や需要家側からの需要要求に応じて決定される。このように、需要要求に応じて決められた水を、どの水源から取水し、どの浄水場施設や配水池を経て需要家へ供給すればよいかということを考慮しなければならないので、取水可能量推定、需要予測、浄水場設備の最適処理によるシステム的運用が必要とされる。

本論文では、需要予測を行うために、北九州市の本城上水道系についてファジィモデリングを行う。図2に対象となる上水道系の概略図を示す。図2中の①～⑥が需要家への配水である。同上水道系における需要予測を行うために各配水池からの需要家への配水量を予測するファジィモデルを作成し、検討を行う。

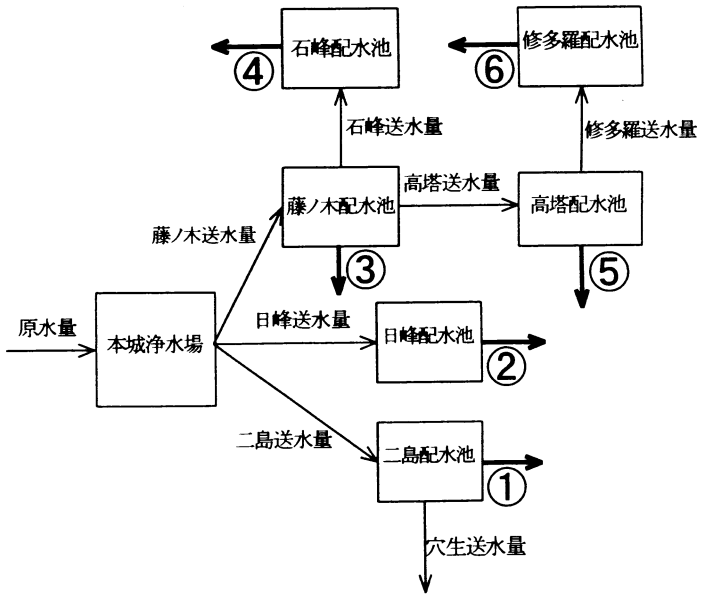


図 2：北九州市本城上水道系

2. ファジィモデルの構成

2. 1 前件部変数の選択

モデリングを行う際に重要なことの一つとして前件部変数の選択がある。現実のシステムは多くの状態変数、制御変数で構成されている。その中から、システムの説明のために重要度の高いと思われる変数を選択する必要がある。本論文で使用するデータは、毎日の曜日、気温、雨量、湿度、天候、配水量が3年分ある。このデータの中から配水量と相関の強い3～4個の変数に絞り、その中から前件部3変数を組み合わせて2通りのモデルを作成する。

そこで、需要家への配水量との相関の強かった前日の配水量、気温、天候の変化、平日・休日の変化の組み合わせでモデルを作成する。ここでいう天候の変化とは、晴に0、曇に1、雨に2という実数値を割り当て、当日の天候の値から前日の天候の値を引いた値である。例えば、前日が晴(0)で当日が曇(1)なら天候の変化は＋1となる。同様に、平日・休日の変化とは、休日に1、平日に0という実数値を割り当て、当日の値から前日の値を引いたものである。例えば、前日が休日(1)で当日が平日(0)なら平日・休日の変化は－1となる。

2. 2 ファジィモデルのルール構成

3個の前件部変数は図3に示すような三角型メンバーシップ関数の3分割とするので、ファジィモデルのルール数は27個となる。ファジィモデルの構成を式(1)に示す。

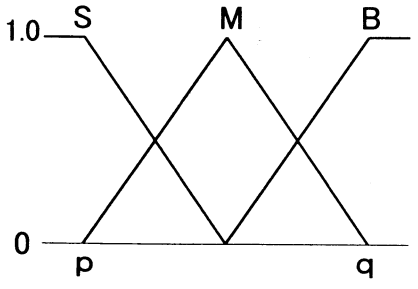


図 3：前件部メンバーシップ関数

$$Rule\,i: if\ x_1\ is\ A_{i1}\ and\ x_2\ is\ A_{i2}\ and\ x_3\ then\ A_{i3}\ then\ y\ is\ B_i \quad (i=1,\cdots,27) \quad (1)$$

ここで、x_1, x_2, x_3 は前件部変数、y は後件部変数、$A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}\ (i=1,\cdots,27)$ はファジィ集合、$B_i\ (i=1,\cdots,27)$ は実数値である。

3. モデリングの手法

本論文におけるファジィモデリングの簡単なフローチャートを図4に示す。

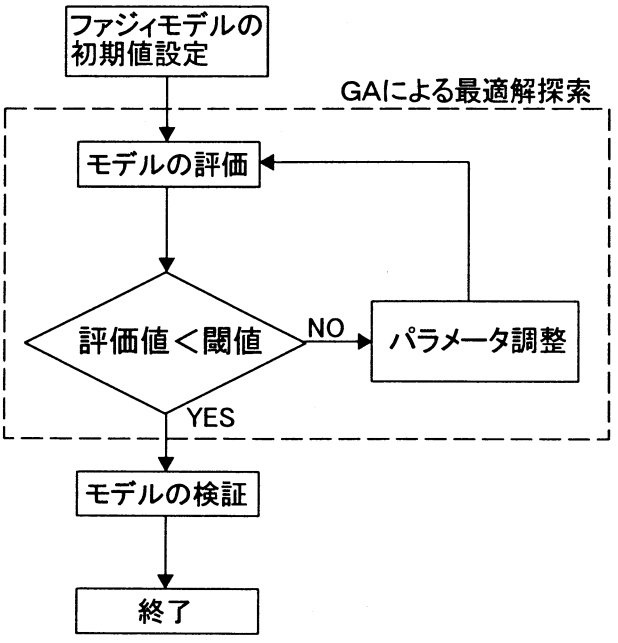


図 4：ファジィモデリングのフローチャート

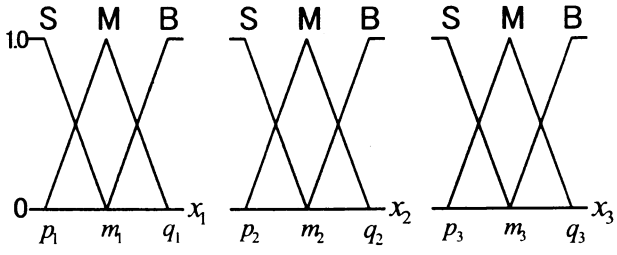
モデルの構築は、前件部を三角型メンバーシップ関数の3分割とし、後件部メンバーシップ関数がシングルトンのファジィモデルを構築する。以下にモデル構築の流れを示す。また、3年分の上水道系のデータがあるので、2年分のデータでモデルを構築し、1年分のデータで検証を行う。また、パラメータは前件部メンバーシップ値の中心値(図5(a)におけるm_i)と、後件部メンバーシップ関数の実数値の値(図5(b)におけるB_i)の計30個である。この30個の値をGAによりパラメータ調整を行う。

a. ファジィモデルの初期値設定

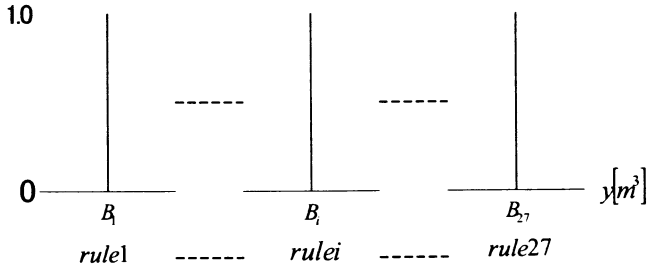
始めに、ファジィモデルの初期値設定を行う。まず、前件部3変数の選択を行い、そのメンバーシップ関数は図5(a)に示すように正規分割とする。後件部のメンバーシップ関数は図5(b)に示すようにシングルトンで、その初期値はモデル構築データの平均値とする。

b. モデルの評価

ファジィ推論によりモデルの構築用データの推論値を計算する。本論文では簡略推論法を用いる。この推論法では、入力が実数値、出力も実数値である。次に、実測値を推論値との誤差率の平均を評価値として計算する。この評価値の計算を式(2)に示す。



(a) 前件部3変数（ファジィ数）



(b) 後件部（シングルトン）

図 5：メンバーシップ関数

$$評価値 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|実測値 - 推論値|}{実測値} \qquad (2)$$

i：日　N：データ数

c. GAによるパラメータ調整

前・後件部変数のパラメータをGAによりパラメータ調整を行い、評価値がある閾値より小さくなるまで、またはGAによる計算が1000回に達するまでモデルの評価を繰り返し行う。

d. 検証

GAによるパラメータ調整で決められた値をもとに、構築したモデルに検証用データを入力してそのモデルの検証を行う。

4. 推論結果

前件部変数の組み合わせが、前日の配水量、気温、天候の変化の場合をモデル1と名付ける。同様に、前件部変数の組み合わせが、前日の配水量、気温、平日・休日の変化の場合をモデル2と名付ける。ここで、それぞれのモデルに使用した変数を表1にまとめる。

表 1：モデルに使用する変数

変数	モデル1	モデル2
x_1	前日の配水量	前日の配水量
x_2	気温	気温
x_3	天候の変化	平日・休日の変化

以下に、日峰配水池（図2中の②）のある1ヶ月におけるモデル1による構築用データ、検証用データとモデル出力との比較をそれぞれ図6、図7に示す。同様に、モデル2による構築用データ、検証用データとモデル出力との比較をそれぞれ図8、図9に示す。

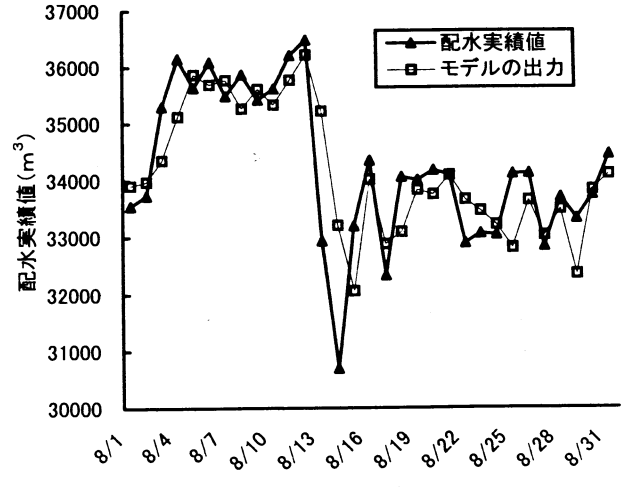


図 6：構築用データとモデル出力との比較（モデル1）

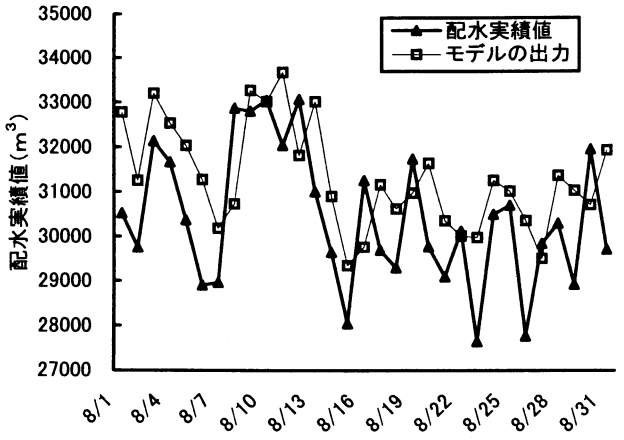


図 7：検証用データとモデル出力との比較（モデル１）

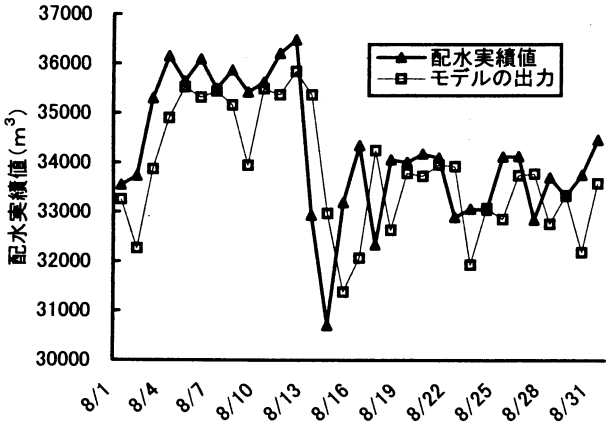


図 8：構築用データとモデル出力との比較（モデル２）

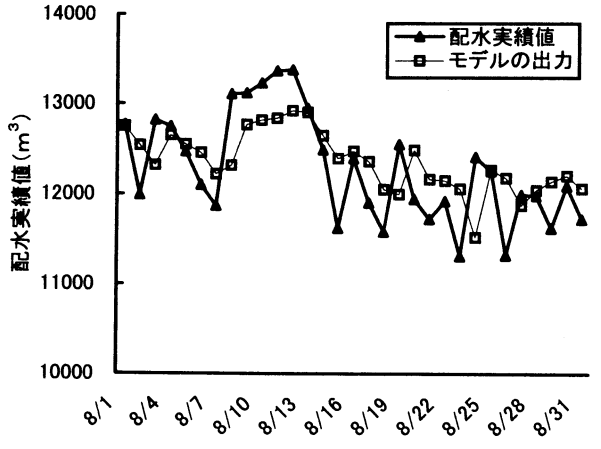


図 9：検証用データとモデル出力との比較（モデル２）

次に、各配水池におけるモデルの評価値を表2にまとめる。ここで用いる評価値とは、実際値と推論値の誤差平均(式(2))である。

表 2：各配水池におけるモデルの評価値[%]

	モデル1	モデル2
二島配水池	2.961	3.510
日峰配水池	3.067	3.517
藤ノ木配水池	6.203	3.641
石峰配水池	4.918	4.412
高塔配水池	4.583	3.691
修多羅配水池	4.583	4.935

表2からは、モデル1、モデル2のどちらが精度のよいモデルかということは判断しがたい。なぜなら、モデル1の評価値がよいものと、モデル2の評価値がよいものの両方が存在するからである。

5. おわりに

本論文で作成したモデルは、図7、図9から見て分かるようにある程度の精度しか得られなかった。なぜなら、過去に行われた最小2乗法[1]やカルマンフィルター[2]による推定値の誤差と比較して誤差が大きくなっているからである。

今後の課題としては、前件部変数およびメンバーシップ関数の分割数の増加、後件部変数をシングルトン以外の型で構成する、またモデル構造の再検討によって、モデルの精度を上げることである。

参考文献

[1] 村上 周太、前田 幹夫：上水道システムにおける1日配水量推定、九州工業大学研究報告(工学)、第30号、pp 65-70(1975)

[2] 村上 周太、朴 鐘浩、那 慶昱、黒須 顕二：北九州市の上水道系の水需要予測、九州工業大学研究報告(工学)、第47号、pp. 49-59(1983)

TE4−2

ファジィモデリングにおける主成分分析によるルール削減と時系列データへの適用

Reduction of Fuzzy Rules Based on the Principal Component Analysis in Fuzzy Modeling and its Appliction to Time series Data.

本多中二 Nakaji HONDA 電気通信大学 Univ. of Electro-Communications

植田俊克 Toshikatsu UEDA 新菱冷熱工業株式会社 Shinryou Corporation

○品田 誠一 Seiichi SHINADA 電気通信大学 Univ. of Electro-Communications

Abstract Many methods were proposed as the important research fields on Fuzzy modeling. We had propoded the method including membership function based data as the modeling of nonlinear systems. Howevwer, it has problem that the rules increase in number combinably. So, we show the method decreasing the number of rules with the Principal Component Analysis, and verify the advantage. On the one hand, we consider the case of appliction to time series Data.

1 はじめに

ファジィモデリング(以下FMと記す)はシステムをファジィ推論形式で記述する手法であり，これまで多くの方法が提案されてきた．我々も複雑で非線形なシステムのモデリング手法として，入出力データからif-thenルールを生成する方法を提案している([1], [5])．

ところで，このFMでは後件部をシングルトンで表現していて，実データからシングルトンを決定できない場合がある．そこで，本稿ではルール後件部の近傍値から線形式を設定し，この線形式による推定値をシングルトンの値として代用する方式を提案する．

また，この方法は組合わせ的にルール数が増加するという問題点がある．そこで，本稿では主成分分析を用いてルール数を削減する方法を示し，その有効性を検証する．さらに，時系列データを適用した場合について考察する．

2 ファジィモデリング(FM)について

FMにおいて，$x_1, x_2, ..., x_n$を前件部変数，yを後件部変数，$A_1^i, A_2^1, ..., A_n^i$をファジィ集合，また，B^iをシングルトン(非ファジィ数)とする．入出力関係Rはif-then形式で以下のように記述できる．

$$R^i : \text{if } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and...} x_n \text{ is } A_n^i \text{ then } y \text{ is } B^i \quad (1)$$

ただし，iはi番目のルールであることを示している．

2.1 FMの手順

ここでは，FMの手順について述べる．

1. 入出力データをM組みとN組みに分ける．前者を同定用データ，後者を評価用データとする．前件部変数に関するファジィ入力変数$x_p(q = 1, ..., n)$の初期メンバーシップ関数を図1のように与える．

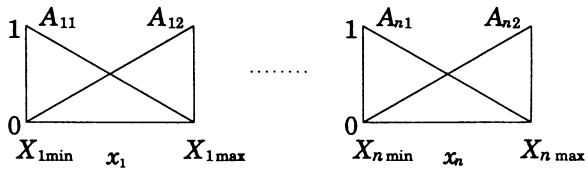


図 1: 初期メンバーシップ関数

2. 同定用データより入出力ファジィ関係Rが得られる．

3. ファジィ関係 Rの出力推定誤差を求め，推定誤差の許容量εに対して，

$$\max_h |y_h - \hat{y}_h| > \varepsilon \qquad (2)$$

が成り立つかを調べる．ただし，h はデータの番号，y_hは評価用データの出力値，$\hat{y}_h$ は出力推定値である．

4. 式 (2) が成り立つような h が存在した場合，図2のように h 番目の入力データをメンバーシップ関数の新たな分割点とする．以後 1〜4 の操作を式 (2) が成立しなくなるまで繰り返す ([1], [5]).

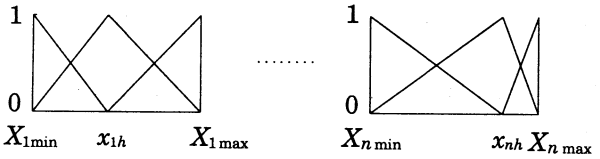


図 2: 分割されたメンバーシップ関数

3 後件部の推定

FM でメンバーシップ関数の分割が行われたとき，我々の今までの方法ではルール後件部のシングルトンの値は実データがない場合，最も近傍の実データを代りに用いていた．ここではそれに代わって，ルール後件部の近傍の実データより求めた線形式を用いてシングルトンの値を推定する方法を示す．これによってモデルの精度を向上させることができる．

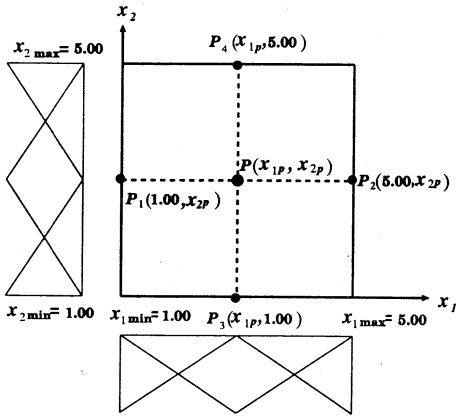


図 3: ルール後件部のシングルトン推定値を求める方法

入力が 2 変数の場合，図3のように分割点 Pが与えられたとき，そこから 4 つの座標 P_1,$\cdots$,P_4が得られる．この 4 つの座標における出力推定値を求める手順を以下に示す．

- 求める点 $P_i(i = 1 \cdots 4)$ の座標 (x_1, x_2) と実データ $(\acute{x}_1, \acute{x}_2)$ の距離を求める．
- 最も距離が小さい実データを 3 つ取り出して線形式 $y = \alpha + \beta x_1 + \gamma x_2$に代入して係数 α, β, γ を求め，それぞれルールの後件部のシングルトンの値とする．
- 得られた線形式を用いて $P_i(i = 1 \cdots 4)$ の出力推定値を求める．

一般に入力変数が n の場合も同様の操作を行なう．すなわちこの場合，$P_i(i = 1 \cdots n)$ の数は$2 \times n$となり，それぞれ P_iの推定値を求める線形式は P_iの $n+1$ 個の近傍値より定める．

4 非線形関数の FM による同定

次の (3) 式に示す 2 入力 1 出力の非線形関数を用いて，先に述べた後件部を推定する方法による FM の表現能力を調べる．

$$y = (1 + x_1^{-2} + x_2^{-1.5})^2 \qquad \text{ただし } x_1, x_2 \in [1,5] \quad (3)$$

この関数からランダムに得た 100 個の同定用入出力データと，同じくランダムに得た 100 個の評価用入出力データを用いて，FM により関数を同定した．

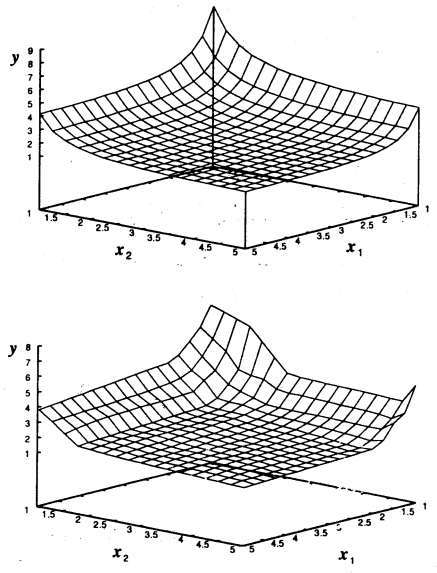


図 4: 関数のグラフ (上) と FM による再現グラフ (下)

図4により，本FMによって関数(3)がよく再現されていることがわかる．また，従来のFMと比較して，モデル精度において本FMが優れていた．

5 主成分分析を用いたルールの削減

主成分分析は，相関のある多くの変数を，少数個の合成変量(主成分)で表す方法である．これは，多くの変量をまとめ，現象を要約する有効な方法である([3])．

ここでは，もとのデータをそのままモデリングした場合と，主成分分析を行い変数を削減してモデリングをした場合を比較する．また回帰分析の結果も示し，FMと比較する．

そこで，入力変数として53の各種産業における総従業者数(x_1)，工業製造品年間出荷額(x_2)，小売業総商店数(x_3)，飲食店数(x_4)，出力変数として商店年間販売額(y)([4])を用いてモデリングを行う．なお，データは平均が0，分散が1になるように標準化して用いている．

また，変数削減前と変数削減後のそれぞれのデータ53個より得られた重回帰分析による回帰式y_1，g_1をそれぞれ(4)，(5)に示す．

$$y_1 = -0.0011 + 2.127x_1 - 0.183x_2 + 0.249x_3 - 1.459x_4 \quad (4)$$

$$g_1 = -0.0002 + 0.3846z_1 - 0.0504z_2 \quad (5)$$

表1より，主成分分析により変数削減されたデータについてモデリングを行なっても，モデルの精度が十分維持されていることがわかる．これより，主成分分析によるルール削減は，FMにおいて有効な手段であるといえる．また，回帰分析との比較においても，非線形性が強いデータに対してFMが有効であることがわかる．

表 1: 産業関連データに関するモデルの結果

	ルール数	平均誤差	標準偏差	相関係数
変数削減前のFM	500	0.0353	0.0517	0.9981
回帰分析	-	0.1608	0.1844	0.9693
変数削減後のFM	36	0.0598	0.1141	0.9919
回帰分析	-	0.4347	0.6261	0.6444

なお，変数削減前のメンバーシップ関数と変数削減後のメンバーシップ関数を図5および図6にそれぞれ示す．これらの図からルール数が大幅に削減されることがわかる．

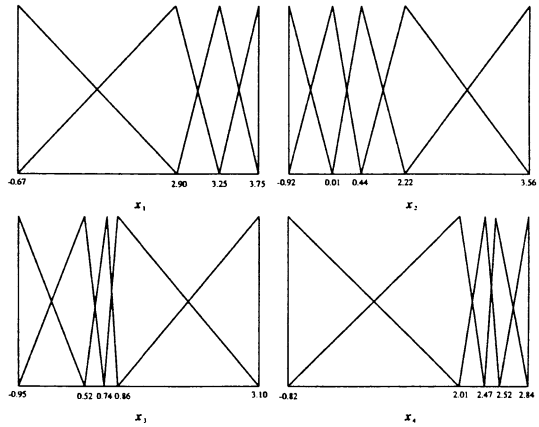


図 5: 変数削減前のメンバーシップ関数

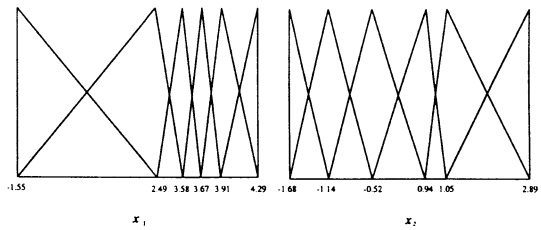


図 6: 変数削減後のメンバーシップ関数

6 時系列データのモデリング

次に時系列データについてFMによりモデリングを行なう．ここでは自己回帰の形式で出力変数をy_n，入力変数をy_{n-1},y_{n-2},y_{n-3},y_{n-4}とする．そして，2入力，3入力，4入力のときのFMによるモデルを求め，自己回帰モデルと比較する．

データは西暦800年から2000年までの日本の人口動態([5])であり，それを等間隔に49個に標本化して用いる．FMおよび自己回帰モデルの結果を表2に示す．なお，FMの終了条件として最大誤差の許容値を7.00とした．

表2より，FMでは入力変数の減少とともにルール数が大幅に減少するが，一方モデルの精度はそれ程劣化しないことがわかる．これは自己回帰モデルでも同様で，このデータの場合2変数でも十分な精度を有する．またFMと自己回帰モデルの比較では相対的にFMが精度がよいことがわかる．しかし，本データは非線形性が弱く，自己回帰モデルでも十分表現可能である．

表 2: 2 変数～4 変数での FM と自己回帰モデルの比較

	ルール数	平均誤差	標準偏差	相関係数
4 変数の FM	4096	1.7796	1.5254	0.9983
回帰分析	-	1.9847	3.6467	0.9915
3 変数の FM	125	2.2502	1.5448	0.9984
回帰分析	-	2.1335	3.8681	0.9904
2 変数の FM	64	2.1124	1.6930	0.9982
回帰分析	-	2.2875	4.4640	0.9876

なお，4 変数の FM の結果を図 7に，自己回帰モデルの結果を図 8にそれぞれ示す.

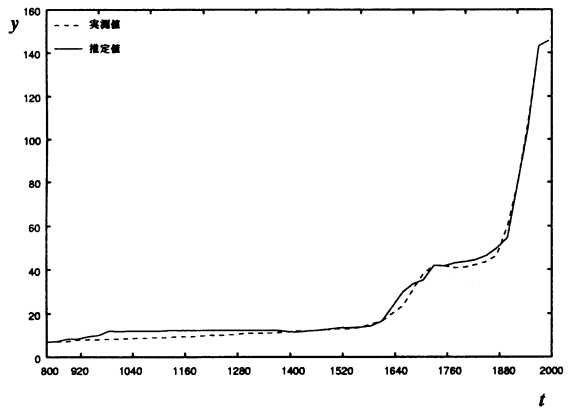


図 7: 時系列データと FM の推論値の比較

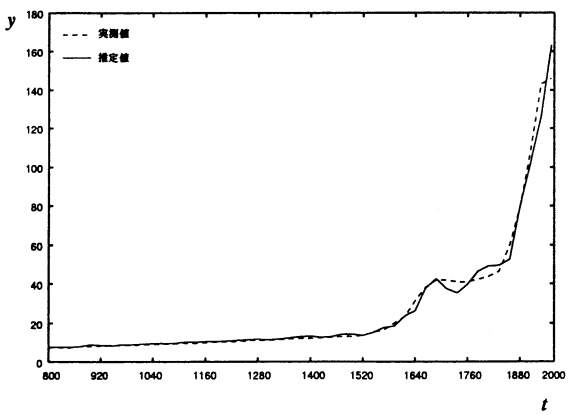


図 8: 時系列データと回帰式の推論値の比較

7 結論および今後の課題

本稿では，ルール後件部に線形式による推定値を用いる方法を提案し，実際のデータでその有効性を検証した．その結果，今までの我々が提案した FM よりもすぐれた精度でモデルが構築できた．また，主成分分析を用いた変数の削減において，ルール数を十分削減できることが確認された．さらに時系列データに本方法を適用し，精度の高いモデリングができることも確認された.

今後の課題として，さらに多くのシステムに本 FM を適用してその特性を詳細に把握すること，線形推定値を求める際の計算誤差を少くすることなどが挙げられる.

参考文献

[1] 福味弘崇，本多中二，植田俊克．大空間空調における温度特性の高木・菅野モデルを用いたモデリング，第 9 回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集，pp.46-49，(1999).

[2] 本多 中二，大里 有生 'ファジィ工学入門'，海文堂，(1989).

[3] 河口至：『多変量解析入門』，森北出版株式会社 (1973)

[4] 朝日新聞社：『'98 民力』，朝日新聞社編 (1998)

[5] 土田孝弘，植田俊克，柴野俊弘，鈴木正美，萩野剛二郎，本多中二，'可動ノズルを用いた大空間空調に関するファジィモデリングの研究'，第 13 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.453-456，(1997).

[問い合わせ先]
〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 電気通信学部 システム工学科
本多 中二
Tel : 0424-43-5277
Fax : 0424-43-8020
E-mail : honda@fs.se.uec.ac.jp

TE4−3

ファジィGMDHによる大空間空調温度特性のモデリング

A Modeling for the Temperature Characteristics of Heating and Air-Conditionings in Larger Scale Indoor Space by Fuzzy GMDH.

本多中二 Nakaji HONDA 電気通信大学 Univ. of Electro-Communications

植田俊克 Toshikatsu UEDA 新菱冷熱工業株式会社 Shinryou Corporation

○品田 誠一 Seiichi SHINADA 電気通信大学 Univ. of Electro-Communications

Abstract GMDH(Group Methed of Data Handling) is often used for a modeling methodology of complicated nonlinear systems. GMDH usually utilizes a quadratic regression equation as the partial representation of the systems. We propose to introduce a fuzzy modeling to the partial representation for obtaining a higher ability of expressing system's nonlinear characteristics. We apply this method to the temperature characteristics of heating and air-conditionings in larger scale indoor space, and verify its advantages.

1 はじめに

複雑なシステムの制御を行う際，システムのモデリングが重要となる．非線形で複雑なシステムのモデリング手法として，GMDH(Group Methed of Data Handling) ([2], [4]) が提案されており，有効な手法として利用されている．GMDH では通常，部分表現式として2次回帰式が用いられ，それらを階層的に組合わせる．

一方，システムの入出力関係をファジィ推論形式で表し，データに合わせてルールを学習的に生成するファジィモデリングの手法(以下，FM とする) を我々は提案している．この手法はルール数は増加するが，かなり複雑な非線形特性を表現できる ([1], [5]).

そこで本稿では，非線形特性の表現能力を高めるためにGMDH の部分表現式である2次回帰式に代えて，FM を用いた手法を提案する．これをここではファジィGMDH と呼ぶことにする．そしてこのファジィGMDH を多変数で非線形性の強い大空間空調の温度特性のモデリングに用い，その有効性を検証する．

2 モデリング手法

2.1 ファジィモデリング (FM)

本FM では，if–then 形式の複数のファジィルールを用いて，システムの構造を表す．FM で用いる入出力ファジィ関係 Rは

$$R_i : \text{if } x_1 \text{ is } A_{1i} \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } A_{ni} \text{ then } y \text{ is } B_i \quad (1)$$

の形式の複数のルールで構成される．ここでiはi番目のルールを示す．$x_1, \cdots, x_n$を前件部変数，yを後件部変数と呼ぶ．$A_{1i}, \cdots, A_{ni}, B_i$はファジィ集合を表しており，ファジィ変数と呼ぶ．本 FM では，$A_{1i}, \cdots, A_{ni}$を三角型ファジィ変数とし，B_iをシングルトン (非ファジィ値) とする．

この方法では，当初設定したルールに取得されているデータを代入し，最も誤差の大きい箇所を頂点としたメンバーシップ関数を設定してルールを新たに生成していく．この操作を繰り返して全体で誤差を少なくし，十分誤差が少なくなればモデリングを終了する．

2.2 GMDH

GMDH では推定モデルを得るために，式 (2) の2入力変数の部分表現式を構成する．

$$z_k = c_0 + c_1 x_p + c_2 x_q + c_3 x_p^2 + c_4 x_q^2 + c_5 x_p x_q \quad (2)$$

実データを用いた回帰分析により部分表現式の係数 $(c_0, c_1, \cdots, c_5)$ を求め，中間変数 z_kを求める．中間変数による入出力データを構成し，次の階層

でやはり式(2)を用いて同様の操作を行なう．この一連の操作を終了判定式が満足されるまで繰り返す．この操作の終了後，得られた部分表現式を階層的に組合せて，最終的な推定モデルを得る．

2.3 ファジィGMDH

提案する手法では2.1のFMにおいて，(1)の入力変数x_iを2変数として，(2)式に代えて部分表現式とする．

本手法のアルゴリズムを以下に示す．

1. **STEP 1.**
   N個の入出力データ$(x_{1i}, x_{2i}, \cdots, y_i)$，$i = 1, 2, \cdots, N$を同定用データ$(N_t)$と評価用データ$(N_c)$に分割する．

2. **STEP 2.**
   同定用データに対して，n個の入力変数の中から，2つの入力変数x_p，x_qを選択し，FMにより入出力ファジィ関係を得る．このとき，出力推定値$\hat{y}$と出力値yができるだけ一致するようにメンバーシップ関数を分割する．

3. **STEP 3.**
   評価用データに対して，STEP 2で得られた入出力ファジィ関係を用いて，出力推定値z_k，$k = 1, 2, \cdots, n(n-1)/2$を求める．

4. **STEP 4.**
   STEP 3で得られたz_kに対して，2乗誤差値E_kを求める．

$$E_k = \sum_{j=1}^{N_c} (y_j - z_{kj})^2, \quad j = 1, 2, \cdots, N_c \quad (3)$$

5. **STEP 5.**
   STEP 2からSTEP 4までをすべての入力変数の対に対して行ない，その中で最小のE_kを$\min E_k$とする．この$\min E_k$が前層での最小2乗誤差値であるE_*との間に次の不等式を満足する場合は，これ以上誤差が減少しないと見なしてアルゴリズムを終了する．

$$\min E_k \geq E_* \quad (4)$$

6. **STEP 6.**
   上式を満足しない場合，E_kの小さいものからm組選び，その組における推定値z_{mi}を求める．$x_{1i} = z_{1i}, x_{2i} = z_{2i}, \cdots, x_{ni} = z_{ni}, (i = 1, 2, \cdots, N)$として新たな入出力データを構成し，STEP 1にもどる．

7. **STEP 7.**
   アルゴリズム終了後，得られた入出力関係を階層的に組合せて，最終的な推定モデルを得る．

これまで説明した本アルゴリズムの流れを図1のフローチャートで示す．また，ファジィGMDHの概念図を図2に示す．

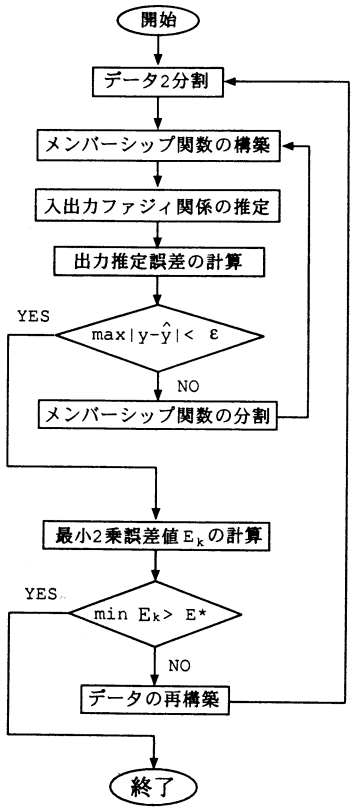


図1: ファジィGMDHのフローチャート

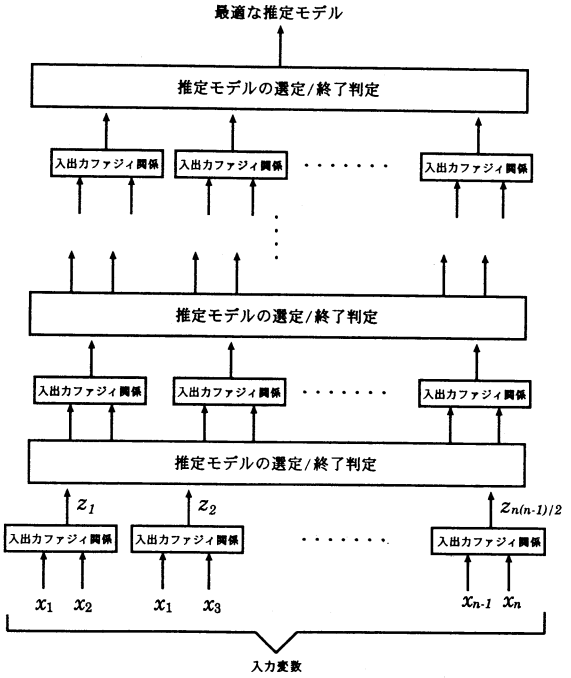


図2: ファジィGMDHの概念図

3 モデリングの結果

大空間において，吹出し口温度，吹出し口風速，ノズル傾斜角を変数として実験を行ない，以下の60地点での温度を測定をしてデータを得た．

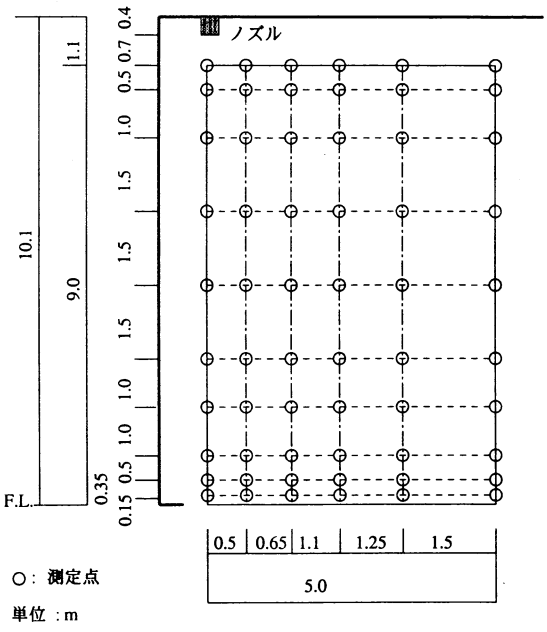


図 3: 測定点の配置

- 入力変数

x_1（吹出し口温度）:5通り ··· 10,15,20,25,30[℃]

x_2（吹出し口風速）: 4通り
··· 2.5,5.0,7.5,10.0[m/s]

x_3（ノズル傾斜角）: 3通り ··· 0,8,15[°]

x_4（距離）: 6通り ··· 0 ～ 5[m]

x_5（高さ）: 10通り ··· 0.15 ～ 9[m]

- 出力変数

y：温度[℃]

上記の5入力変数を組合せた3240個の測定データを用い，本手法でモデリングを行なった．表1に2次回帰式モデル，GMDHモデル，FMおよび本モデルによる結果を示す．モデリングでは，GMDHは第12層目，FMは同定回数8回，本手法は第3層目まで行なわれた．

表 1: モデルの精度比較

手法	最大誤差	誤差平均	標準偏差	相関係数
回帰式	8.143	0.606	0.714	0.690
GMDH	8.566	0.519	0.662	0.760
FM	4.357	0.292	0.379	0.934
本手法	7.044	0.389	0.502	0.881

温度30.0℃，風速5.0m/s，傾斜角15.0°で固定した場合の，空間の温度分布を表した等温線図を図4に示す．

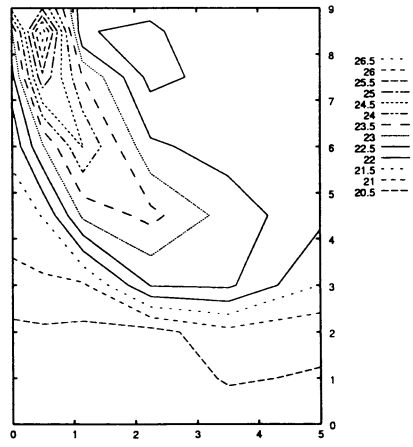


図 4: 測定データ

次に，この測定データをもとに，図5にGMDHによる結果を，図6にFMと本手法による結果を示す．

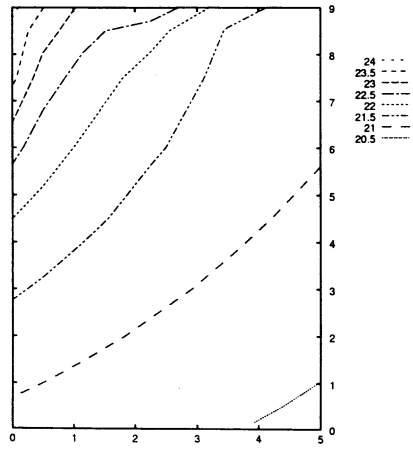


図 5: GMDHによる等温線図

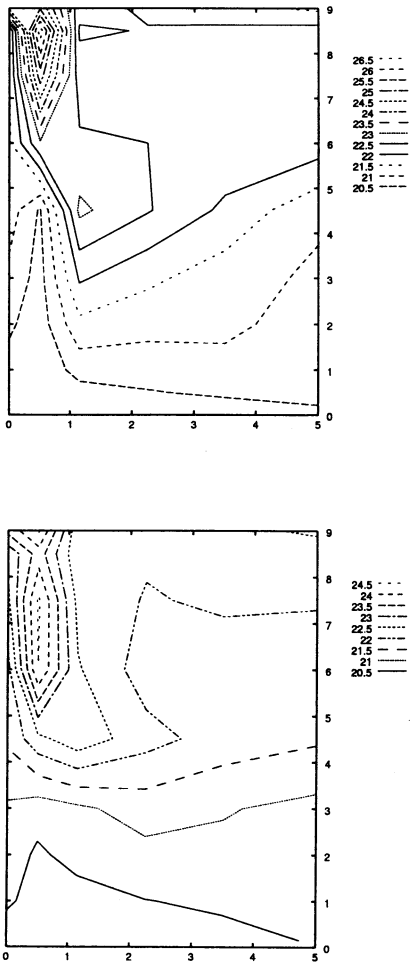


図 6: FM による等温線図 (上)，本手法による等温線図 (下)

4 考察

表 1より，本手法は 2 次回帰式，GMDH と比較して良好な結果が得られた．また，GMDH はここでは多くの階層を必要としたのに対し，本手法は GMDH の部分表現式に非線形性の表現能力が高い FM を用いているため，少ない階層でモデリングが終了した．しかし，本手法は FM と比較すると精度が劣っている．本手法では 2 層目以降は前層での推定値を用いていて，メンバーシップ関数の分割点でのルール後件部に用いる実データがない場合が起こる．その場合，後件部は分割点に最も近い実データで代替しており，その結果，モデルの精度が下がったと考えられる．しかし，最終的にかなり良い結果が得られたのは第 2 層目以降で有効な部分表現だけを残す GMDH の特性が生かされたからと考えられる．

5 結論と今後の課題

本手法は GMDH の多層構造による自己組織性と，FM の非線形の表現能力を兼ね備えた有効な手法であることが明らかとなった．

今後の課題として，より多くの変数を持つシステムについてモデリングを行ない，FM や GMDH との比較を通じてさらに本手法の特性を調べる必要がある．

参考文献

[1] 本多中二，大里有生，‘ファジィ工学入門’，海文堂，(1989).

[2] A. G. IVAKHNENKO, ‘Polynomial Theory of Complex Systems’, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL. SMC–1, No.4,(1971).

[3] 福味弘崇，本多中二，植田俊克．大空間空調における温度特性の高木・菅野モデルを用いたモデリング，第 9 回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集，pp.46-49, (1999).

[4] 林勲，‘GMDH’，日本ファジィ学会誌，Vol.7, No.2, pp.270-274, (1995).

[5] T. Takagi, M. Sugeno, ‘Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control’, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL.SMC-24, NO.5, (1985).

[6] 土田孝弘，植田俊克，柴野俊弘，鈴木正美，萩野剛二郎，本多中二，‘可動ノズルを用いた大空間空調に関するファジィモデリングの研究’，第 13 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.453-456, (1997).

[問い合わせ先]
〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 電気通信学部 システム工学科
本多 中二
Tel : 0424-43-5277
Fax : 0424-43-8020
E-mail : honda@fs.se.uec.ac.jp

TE5−1

非定常時系列のファジィモデリングに関する一提案と予測問題への適用
A Proposal on Fuzzy Modeling of Non-Stationary Time Series and Its Application to Predicition Problem

竹内一郎　　○古橋 武
Ichiro TAKEUCHI　Takeshi FURUHASHI
名古屋大学
Nagoya University

Abstract : Most of time series data in real world are non-stationary. A basic method to approximate non-stationary time series is Locally Stationary Representation (LSR), which concatenates some stationary sub-periods. In this paper, we propose a class of extended LSR, where stationary sub-periods are fuzzily concatenated. Time series prediction with the proposed model is also considered. To realize the prediction, we have to identify the dynamic characteristics and design its state estimator. As a preliminary stage of the prediction, we formulate the state space of the proposed model and analyze it.

1 はじめに

現実の時系列には非定常なものが多い。非定常時系列を近似する基本的な方法の一つは、時間区間を適当な小区間に分割し、各小区間では定常と仮定するものである。このような区分的に定常性を満たす表現は、局所定常表現 [1] と呼ばれる。局所定常表現によるモデル化は、各小区間への分割と各小区間の定常なサブモデル同定によって特徴づけられる。各小区間への分割をメンバシップ関数によって表現すれば、局所定常表現は時間区間をクリスプに分割したものとみなすことができる。本稿では、局所定常表現を特徴づけるクリスプ分割をファジィ分割へ拡張した非定常時系列のモデルを提案する。

拡張された局所定常表現に従う時系列は、各時間ステップにおけるメンバシップのグレードの組によって完全に特徴づけられるため、時系列を発生させるシステムはメンバシップのグレードの組を状態変数とする動的システムとみなすことができる。この動的システムの動特性を同定し、状態推定器を作成することができれば、時間パラメータを陽に含まない時不変なシステムとしてこれをモデル化できるため、定常時系列と同様に、その予測を行うことができる。

本発表では、拡張された局所定常表現の一つのクラスを提案し、その動特性に関する考察を行う。なお、以下では、時間区間 $T=\{1,2,\cdots,t_e\}$ における離散時間1変量時系列 $y(1),y(2),\cdots,y(t_e)$ を考察の対象とする。

2 非定常時系列のファジィモデル

ランダムな変動を含む時系列を解析する際には、これを確率過程の実現値とみなすことが有効である。確率過程の統計量が時間に関して一定なものを定常過程、そうでないものを非定常過程と呼ぶ。実用上、ほとんどの定常過程は自己回帰 (AR) モデル:

$$y(t)=\sum_{i=1}^{n}a_i y(t-i)+a_{n+1}+w(t) \tag{1}$$

によって十分に近似される。ここで $a_i, i=1,\cdots,n+1$ は AR 係数と呼ばれるパラメータ、$w(t)$ は平均 0、分散 σ^2 の正規白色雑音を表す。

非定常時系列のファジィモデリングは、時間区間を定常な小区間へファジィ分割することにより実現される。モデルは、時間区間のファジィ分割を特徴づけるメンバシップ関数と各小区間の定常時系列を近似する AR モデルによって構成される。ここで、時間区間 T を p 個の小区間にファジィ分割するものとする。$k=1,2,\cdots,p$ 番目の小区間のメンバーシップ関数を $\mu_k(t)$ と表し、その小区間の AR モデルを

$$y_k(t)=\sum_{i=1}^{n}a_{ki}y(t-i)+a_{k,n+1}+w_k(t) \tag{2}$$

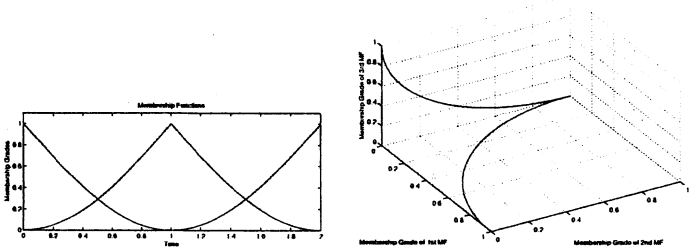
と表す。このとき、$t\in T$ におけるモデルは、

$$y(t)=\sum_{k=1}^{p}\mu_k(t)y_k(t) \tag{3}$$

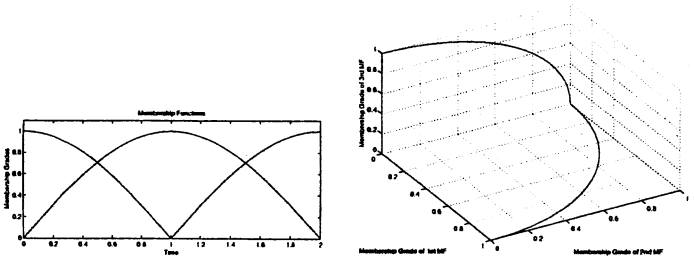
と表される。

(3) 式で表されるモデルは、$t\in T$ における性質が $\boldsymbol{\mu}(t)=\{\ \mu_1(t),\mu_2(t),\cdots,\mu_p(t)\ \}$ によって完全に特徴づけられるため、時系列発生源はこれを状態変数とする動的システムとみなすことができる。メンバーシップのグレードが推移する様子は、空間 $[0,1]^p$ 内の運動によって表すことができる。例えば、図1の各図の左側の図の3つのメンバーシップ関数は、それぞれ、右側の図の $[0,1]^3$ 内の軌跡をたどる運動に対応している。

局所定常表現は (3) 式のモデルの $\boldsymbol{\mu}(t)$ に制約が加えられたものとなっており、その状態空間は p 次元超立方体 $[0,1]^p$ の頂点のみから構成された'小さな'ものとなっている。(3) 式のモデルのうち最大の状態空間を



(a) 例 1



(b) 例 2

図 1: メンバーシップグレード $\{\mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t)\}$ の推移と $[0,1]^3$ 上の運動との対応関係の例 (制約なしの場合)

持つモデル (混合定常表現)[2] は、$\boldsymbol{\mu}(t)$ が制約なしに p 次元超立方体 $[0,1]^p$ 中を動くものである。局所定常表現は、状態が離散的に変化するため、知識との整合性がよく記述が簡潔であるが、近似可能なシステムのクラスは狭い。混合定常表現は、連続で'大きな'状態空間を持つため、近似可能なクラスは広いが、知識との整合性が悪い。

3 ファジィ定常表現

本稿では、前節で紹介した局所定常表現と混合定常表現の'折衷案'として、一つのクラスを提案し、これをファジィ定常表現と呼ぶ。

ファジィ定常表現においては、知識との整合性を保つため、メンバーシップ関数の重なり方や形状などの性質を考慮して設計を行う。メンバーシップ関数に次のような四つの制約を与えることで、それらの性質を表現する。

- すべてのメンバーシップ関数は凸である。すなわち $\mu_k, k = 1, 2, \cdots, p$ は $\forall t_1, t_2 \in T, \forall \lambda \in [0,1]$ に対して

$$\mu_k(\lambda t_1 + (1-\lambda)t_2) \geq \mu_k(t_1) \wedge \mu_k(t_2) \qquad (4)$$

を満たす。

- すべてのメンバーシップ関数は'ほぼ'正規である。すなわち $\mu_k, k = 1, 2, \cdots, p$ は

$$\max_{t \in T} \mu_k(t) \simeq 1 \qquad (5)$$

を満たす。

- すべての時間区間において、正のグレードを持つメンバーシップ関数は 1 つもしくは 2 つである。すなわち $\{\mu_k, k = 1, 2, \cdots, p\}$ は $\forall t \in T$ に対して

$$\#(M) = \{1, 2\},$$
$$M = \{k \in \{1, 2, \cdots, p\} | \mu_k(t) > 0\} \qquad (6)$$

を満たす。ここで $\#(M)$ は集合 M の基数 (要素数) を表す。

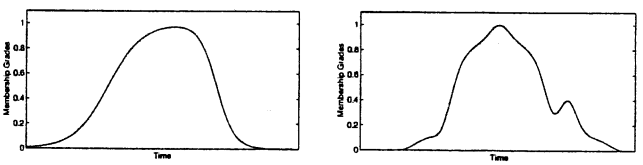
- すべての時間区間において、各メンバーシップ関数のグレードの和が 1 である。すなわち $\{\mu_k, k = 1, 2, \cdots, p\}$ は

$$\sum_{k=1}^{p} \mu_k(t) = 1, \forall t \in T \qquad (7)$$

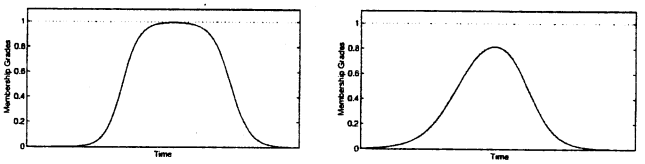
を満たす。

図 2の各図は、左側がそれぞれの性質を満たすものを例示し、右側は満たさないものを例示している。

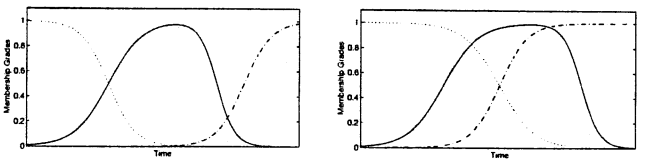
上から下へそれぞれ 4 つの性質を満たすものと満たさないものを例示している。



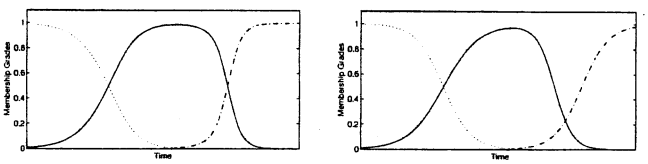
(a) 凸性の制約



(b) 正規性の制約

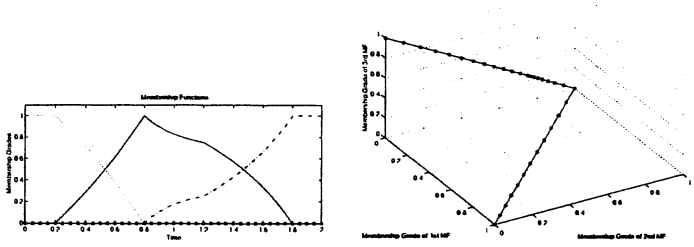


(c) 重なり方の制約

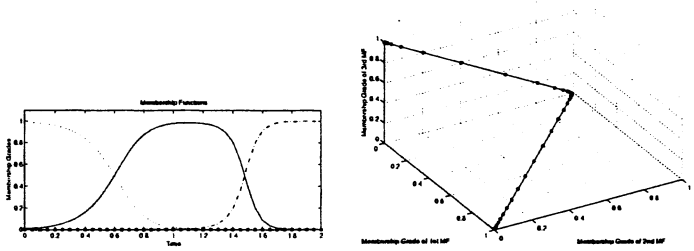


(c) メンバシップのグレードの和の制約

図 2: ファジィ定常表現を特徴づけるメンバーシップ関数の制約 (左列 : 制約をみたす場合, 右列 : 制約制約をみたさない場合)



(a) 例 1



(b) 例 2

図 3: メンバーシップグレード $\{\mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t)\}$ の推移と $[0,1]^3$ 上の運動との対応関係の例 (制約ありの場合)

上記の 4 つの制約 (4) ~ (7) 式を満たすようなファジィ分割に対応する $[0,1]^p$ 内の軌跡は、超立方体 $[0,1]^p$ の頂点 $(1,0,\cdots,0)$, $(0,1,\cdots,0)$, $\cdots$, $(0,0,\cdots,1)$ を順に結ぶ連結線分上を 1 方向に動く。例えば、図 3 の左側の図の 3 つのメンバーシップ関数は、それぞれ、右側の図の $[0,1]^3$ 内の軌跡をたどる運動に対応している。また、左側の図の横軸上に均等に配置された $*$ 印は、右側の図の軌道上の $*$ 印に対応している。このように、制約 (4) ~ (7) 式を満たすファジィ分割に対応する $[0,1]^3$ 内の運動は、いずれも同じ軌道を描くが、'速さ' がそれぞれ異なっている。制約 (4) ~ (7) 式を満たすファジィ分割は、この連結線分上の点列の濃度分布によって特徴づけられる。

連結線分を構成する $p-1$ 個の線分を長さが 1 になるように縮め、それらをならべた 1 次元の区間 $S = [0, p-1]$ を考えて、S 上の点列の濃度分布について考える。各時間ステップ $t \in \{1,2,\cdots,t_e\}$ の各メンバーシップグレード $\mu_k(t)$, $k = 1,2,\cdots,p$ は、S 上の点列 $s(1), s(2), \cdots, s(t_e)$ の t 番目の点 $s(t) \in S$ によって

$$\mu_k(t) = \max[\min\{s(t) - (k-2), -s(t) + k\}, 0] \quad (8)$$

と対応づけられる。メンバーシップ関数が制約 (4) ~ (7) 式を満たすとき、区間 S 上の $s(t)$ は制約

$$\begin{aligned} &s(1) = 0,\ s(t_e) = p-1, \\ &s(t) \le s(t+1),\ t = 1,2,\cdots,t_e - 1 \end{aligned} \quad (9)$$

を受ける。

4 ファジィ定常表現の推定

本節では、非定常時系列をファジィ定常表現にて近似するための方法を述べる。ファジィ定常表現は、時間区間のファジィ分割と各区間の AR モデルによって特徴づけられる。前者は (9) 式の制約を満たす $\boldsymbol{s} = \{s(t)\}, t = 1,\cdots,t_e$ によって定まり、後者は AR 係数 $\boldsymbol{a} = \{a_{k,i}\}, k = 1,\cdots,p, i = 1,\cdots,n+1$ によって定まる。モデルは撹乱項が正規白色雑音であるので、最尤推定値と最小二乗推定値は一致する。以下では、「ファジィ分割の推定」、すなわち、パラメータ $\boldsymbol{s}$ の推定と「サブモデルの推定」、すなわち、パラメータ $\boldsymbol{a}$ の推定を交互に繰り返すアルゴリズムを採用する。

4.1 ファジィ分割の推定

ファジィ分割の推定問題は、制約付きの最適化問題である。前節で述べたように、(4) ~ (7) 式による制約を受ける p 個のメンバーシップ関数は、区間 $S = [0, p-1]$ 上の濃度分布によって特徴づけられる。ここでは、離散時間系を対象としているので、この濃度分布は t_e 個の点列の分布によって表される。区間 S 上の t_e 個の点の分布を推定する問題は、2 次元空間 $\{1,2,\cdots,t_e\} \times [0, p-1]$ 上の経路最適化問題と捉えることができる。制約 (4) ~ (7) 式を受けるメンバーシップ関数、すなわち S 上の t_e 個の点列は、$\{1,2,\cdots,t_e\} \times [0, p-1]$ において、点 $(1,0)$ と点 $(t_e, p-1)$ を結ぶ単調な連続曲線として表される。すなわち、本項のファジィ分割推定問題の解は、このような曲線のうち評価関数を最小にするものをみつけることである。

このような問題には、評価関数が微分不可能な場合、動的計画法の利用が有効である。動的計画法とは、一つの多次元最適化問題を多くの 1 次元最適化問題に変換するアルゴリズムである。ファジィ分割推定問題は、点列 $s(1), s(2), \cdots, s(t_e)$ のうち制約された 2 点 $s(1), s(t_e)$ を除いた $t_e - 2$ 点を最適に配置する $t_e - 2$ 次元最適化問題となり、これが $O(t_e - 2)$ 個[1)] の 1 次元最適化問題に変換される。

紙面の都合上アルゴリズムの説明は省略する。詳しくは [3] を参照されたい。

4.2 サブモデル推定問題

サブモデル推定問題は、線形システムのパラメータ推定問題となり、最小二乗法にて容易に解くことができるため、本稿での説明は省略する。詳しくは [3] を参照されたい。

5 数値実験

[1)] オーダー t_e 個、すなわち、t_e 個の定数倍個を表す。

本節では、非定常時系列をファジィ定常表現にて近似する数値実験について述べる。本数値実験では、対象システムを次数が2の時変係数自己回帰モデル

$$y(t) = b_1(t)y(t-1) + b_2(t)y(t-2) + b_3(t) + w(t) \quad (10)$$

とした。時間パラメータ $t = 1, 2, \cdots, t_e$ に対して、自己回帰係数 $b_1(t), b_2(t)$、ならびに定数 $b_3(t)$ は、

$$b_1(t) = 0.5\cos(2\pi t/t_e) - 0.5 \quad (11)$$

$$b_2(t) = -0.5\cos(2\pi t/t_e) - 0.5 \quad (12)$$

$$b_3(t) = \sin(2\pi t/t_e) \quad (13)$$

と変化するものとした。また、正規白色雑音 $w(t)$ の分散を0.1とした。対象システムの発生した長さ $t_e = 400$ の実現時系列の2通りの例を図4に示す。

ファジィ定常表現の推定において、メンバーシップ関数の初期配置は、図6(a)に示すものとした。誤差の減少比が0.9999以上となるまで学習を続けたところ、その回数は42回であった。図5は、学習過程における評価関数の推移を表している。ただし、初期に設定されたメンバーシップ関数(図6(a))とそこに最小二乗法を適用して推定したサブモデルのパラメータによるモデルの平均二乗誤差を1とし、それ以降のものは、その相対値となっている。また、図5の曲線上で○印は、メンバーシップ遷移過程を動的計画法にて推定したことによる改善値を、＊印は、サブモデルのパラメータを最小二乗法にて推定したことによる改善値を表している。

推定されたメンバーシップ関数は、図6(b)に示すようになった。図7は、推定されたモデル(10)式と同じ正規白色雑音 w_t を加えて発生させた長さ400の実現時系列の2通りの例である。

推定の計算時間(CPU Time)は、SUNのURTRA SPARCにて2940.34[s]であった。

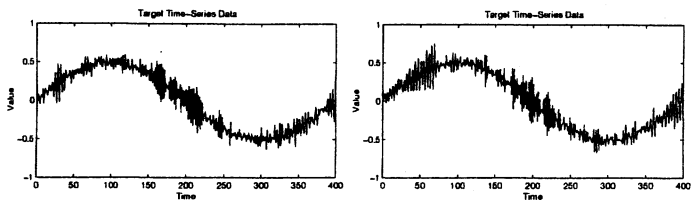


図4: 対象システムから生じた時系列の例

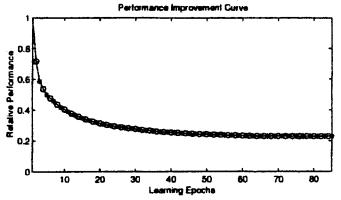
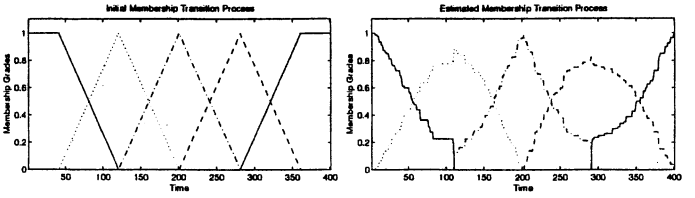


図5: 学習曲線



(a) 初期配置　　(b) 推定後の配置

図6: 推定によるメンバーシップ関数の変化

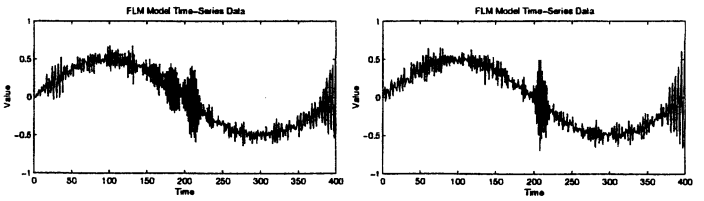


図7: 推定されたファジィ定常表現から生じた時系列の例

6 まとめ

本稿では、非定常時系列のファジィモデリングについて考察し、ファジィ定常表現を提案した。今後は動特性の同定、状態推定のアルゴリズムを開発し、非定常時系列予測システムを作成することを目指す。

参考文献

[1] 北川. 時系列解析プログラミング. 岩波書店, 1993.

[2] I. Takeuchi and T. Furuhashi. A study on fuzzy modeling for dynamic characteristics. In *Proc. of IEEE Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 3, pp. 34–39, 1999.

[3] 竹内, 古橋. ファジィ定常表現の推定. Technical Report TF000424, 名古屋大学電子情報学科生体電子講座, http://www.bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp/member/takeuchi/TR/, 2000.

[問い合わせ先]
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻古橋研究室
竹内 一郎
TEL (052)789-2793 FAX (052)789-3166
e-mail takeuchi@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

TE5−2

ファジィモデルの簡潔さに関する一考察

A Study on Conciseness of Fuzzy Models

鈴木 俊博　　古橋 武
Toshihiro Suzuki　Takeshi Furuhashi
名古屋大学
Nagoya University

Abstract Fuzzy modeling is a method to describe input-output relationships of nonlinear systems using if-then type rules. In the process of fuzzy modeling, we evaluate fuzzy models with various criteria such as accuracy, generality, conciseness, etc. Among these criteria, conciseness is essential for comprehensible fuzzy models. Though much work has been done on this criterion, there have been no conciseness criteria that can evaluate the shape and allocation of membership functions on the universe of discourse. In this paper, we propose a new criterion using fuzzy entropy for evaluation of conciseness of fuzzy models. A fuzzy relative entropy is introduced in this paper. The new quantitative measure can evaluate the shape and allocation of membership functions.

1 はじめに

ファジィモデリング [1] は、非線形な入出力関係をファジィルールを用いて記述する手法である。入出力関係を if-then 形式のファジィルールにより表すことで、システムを言語的に捉えやすくする。

ファジィモデルは、精度・汎化性・簡潔さ・耐ノイズ性などの種々の評価指標により評価がなされる。ファジィモデルの特長が、人が記号表現された if-then ルールを理解しやすいというところにあることから、簡潔さの指標は特に重要である。これまで、ファジィモデルの簡潔さは、ファジィルールの数やメンバーシップ関数の数もしくは、AIC (Akaike's Information Criterion) [2] の自由度の項により評価がなされてきた。しかし、これらの評価指標はメンバーシップ関数の形状・配置位置などを評価するものではなく、ファジィモデルの簡潔さの評価指標としては十分ではない。

本稿では、ファジィモデルの簡潔さを定義し、その指標として、メンバーシップ関数の配置位置の評価のためのファジィ相対エントロピーを提案する。本指標は、メンバーシップ関数の形状・配置位置を定量的に評価できるファジィモデルの簡潔さの適切な指標である。数値実験により、本指標の妥当性を示す。

2 ファジィモデルの簡潔さ

本稿では、簡単のため簡略化ファジィ推論を用いた 1 入力 1 出力のファジィモデルについて考察する。1 入力 1 出力のとき、入力 x に対するファジィモデルの出力 y は、

$$y = \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{m}}} \mu_i(x) \cdot c_i \qquad (1)$$

により求めることができる。ただし、$\mu_i(x)$ および c_i $(i = 1, \cdots, N_{\mathrm{m}})$ は、それぞれ x 軸上に配置されたメンバーシップ関数、c_i は後件部定数であり、N_{m} はメンバーシップ関数の数である。

まず、ファジィモデルが簡潔であるとはどういうことかを明確にしておく必要がある。以下に、本稿におけるファジィモデルの簡潔さを定義する。

定義 1 (ファジィモデルの簡潔さ)
簡潔なファジィモデルとは、各変数の台集合上に配置されるメンバーシップ関数の数が少なく、かつメンバーシップ関数の配置が均等間隔に近く、かつメンバーシップ関数の形状がクリスプ集合に近いファジィモデルをいう。

□

定義 1 のようにファジィモデルの簡潔さを定義するのは、次の理由による。図 1 は入力 x 軸上に配置されたメンバーシップ 関数の例を示す。各メンバーシップ

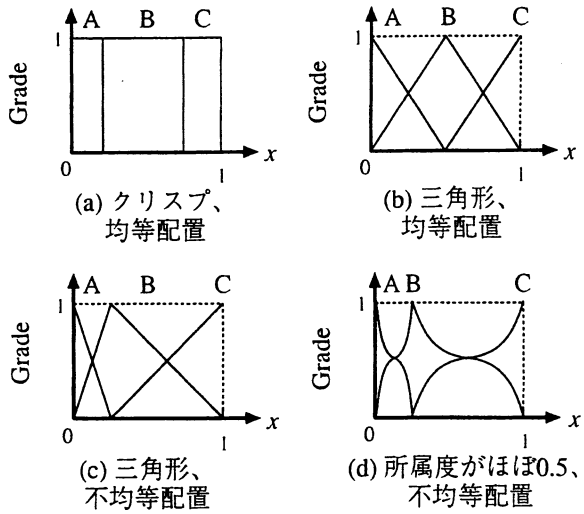


図 1: メンバーシップ関数の例

関数のラベルから、モデルの入出力関係を捉えようとするとき、(a) のモデルが最も容易であり、以下 (b)、(c) の順で捉え難くなり、(d) が最も捉え難い。定義 1

は、この記号と連続量との対応関係の捉え易さを、モデルの簡潔さとして定義している。

3 ファジィエントロピー

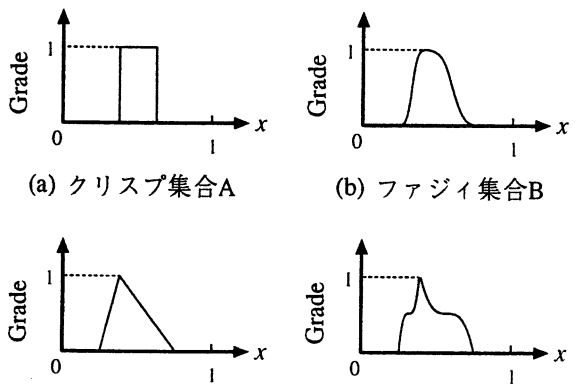
3.1 De Luca, Terminiのファジィエントロピー

前節で定義したファジィモデルの簡潔さの定量的な指標について考察する。ファジィ集合Aのファジィエントロピーは、De Luka, Termini [3]により、

$$d(A) = \int_{x_1}^{x_2} \{-\mu_A(x)\ln\mu_A(x) - (1-\mu_A(x))\ln(1-\mu_A(x))\}\,dx \quad (2)$$

と定義された。ただし、xは入力変数軸上の点、$\mu_A(x)$はファジィ集合Aを表すメンバーシップ関数である。$\forall x\ \mu_A(x) = 0.5$のときファジィ集合$A$のファジィエントロピーは最大となる。

また、図2の各種形状のメンバーシップ関数では、ファジィエントロピーは、$d(A) = 0 < d(B) < d(C) < d(D)$



(a) クリスプ集合A　(b) ファジィ集合B

(c) 三角型ファジィ集合C　(d) ファジィ集合D

図 2: メンバーシップ関数の形状によるファジィエントロピーの違い

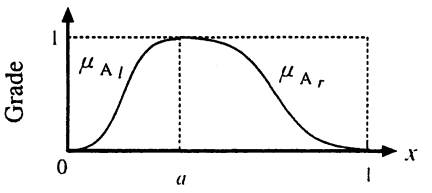
となる。このファジィエントロピーはメンバーシップ関数の形状の評価指標である。

図3(a)に示すファジィ集合のファジィエントロピーについてさらに考察する。ファジィ集合Aの頂点から左側のメンバーシップ関数をμ_{A_l}、右側のメンバーシップ関数をμ_{A_r}とする。これらの片側のメンバーシップ関数のファジィエントロピーを求める。図3(b)において、

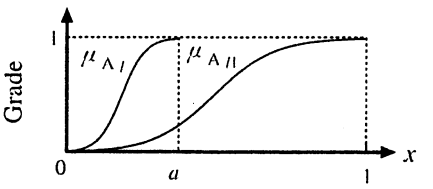
$$\mu_{A_l}(at) = \mu_{A_{l1}}(t)\ (0 \le t \le 1) \quad (3)$$

であるとする。このとき、

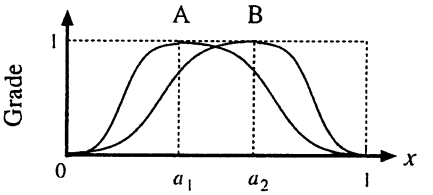
$$d(A_l) = \int_0^a \{-\mu_{A_l}(x)\ln\mu_{A_l}(x) - (1-\mu_{A_l}(x))\ln(1-\mu_{A_l}(x))\}\,dx$$



(a) ファジィ集合A



(b) 片側のメンバーシップ関数



(c) 頂点を中心として左右のメンバーシップ関数が相似なファジィ集合A, B

図 3: ファジィ集合

$$= \int_0^1 \{-\mu_{A_l}(at)\ln\mu_{A_l}(at) - (1-\mu_{A_l}(at))\ln(1-\mu_{A_l}(at))\}\cdot a\,dt \quad (4)$$

式(3)より、

$$d(A_l) = a\cdot\int_0^1 \{-\mu_{A_{l1}}(t)\ln\mu_{A_{l1}}(t) - (1-\mu_{A_{l1}}(t))\ln(1-\mu_{A_{l1}}(t))\}\,dt = a\cdot d(A_{l1}) \quad (5)$$

となる。右側のメンバーシップ関数のファジィエントロピーについても同様の結果が得られる。

図3(c)において、ファジィ集合A, Bが頂点を中心として左右のメンバーシップ関数が相似であるとき、すなわち、

$$\mu_{A_l}(x) = \mu_{A_r}\left(1 - \frac{1-a}{a}x\right) \quad (6)$$

であるとき、証明は省略するが

$$d(A) = d(B) \quad (7)$$

である。

このことは、式(2)のファジィエントロピーはメンバーシップ関数の形状の評価の指標とはなり得るが、配置位置の評価指標としては十分ではないことを意味する。

3.2 ファジィ相対エントロピー

メンバーシップ関数の配置の定量的な尺度として、ファジィ相対エントロピーを本稿で定義する。まず、一つのメンバーシップ関数に対するファジィ相対エントロピーを、以下のように定義する。

定義 2 (ファジィ相対エントロピー)
頂点の座標が a、台の両端の座標が x_1, x_2 であるメンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ (図 4) に対し、ファジィ相対エントロピー $r(\mu_A)$ を以下のように定義する。

$$r(\mu_A) = \int_{x_1}^{x_2} \mu_C(x) \ln \frac{\mu_C(x)}{\mu_A(x)} dx + \int_{x_1}^{x_2} (1-\mu_C(x)) \ln \frac{1-\mu_C(x)}{1-\mu_A(x)} dx \quad (8)$$

ただし、$\mu_C(x)$ は $\mu_A(x)$ と台が同じで、頂点の座標が台の中央にあり、頂点を通る縦軸を中心として左右対称なメンバーシップ関数である。また、$\mu_C(x)$ と $\mu_A(x)$ は x 軸方向に頂点の左右で異なる比率で伸縮させることで一致させることができるものとする。

□

このファジィ相対エントロピーは左右対称なメンバーシップ関数からのずれを評価できる。メンバーシップ

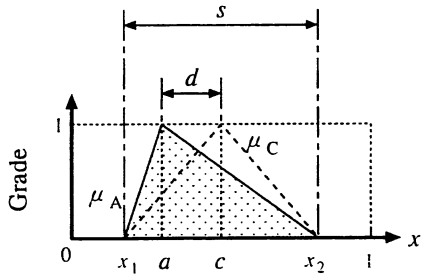


図 4: 頂点の座標が異なるメンバーシップ関数

関数が頂点を中心として左右相似であり、式 (6) を満たすとき、ファジィエントロピーとファジィ相対エントロピーの和は、

$$\begin{aligned} & d(A) + r(A) \\ = & \int_{x_1}^{x_2} \{-\mu_A(x) \ln \mu_A(x) \\ & -(1-\mu_A(x)) \ln(1-\mu_A(x))\} dx \\ & + \int_{x_1}^{x_2} \left\{ \mu_C(x) \ln \frac{\mu_C(x)}{\mu_A(x)} \right. \\ & \left. +(1-\mu_C(x)) \ln \frac{1-\mu_C(x)}{1-\mu_A(x)} \right\} dx \end{aligned} \quad (9)$$

式 (7) の関係から、

$$\begin{aligned} & d(A) + r(A) \\ = & \int_{x_1}^{x_2} \{-\mu_C(x) \ln \mu_A(x) \\ & -(1-\mu_C(x)) \ln(1-\mu_A(x))\} dx \end{aligned} \quad (10)$$

となる。これは、メンバーシップ関数の形状および左右対称形状からのずれを定量化したものである。この情報量は、ファジィルール表が与えられたとき、この記号表からもとのモデルの入出力関係をどの程度の精度で捉えられるかに関する理論限界を提供する。詳細は別の機会に報告する。

次に、x 軸上に配置された $N_{\rm m}$ 個のメンバーシップ関数の偏りを評価するために、平均ファジィ相対エンロトピーを定義する。N_m 個のメンバーシップ関数が、

$$\forall x \sum_{i=1}^{N_{\rm m}} \mu_i(x) = 1 \quad (11)$$

を満たし、2 つのメンバーシップ関数が常に重なっていて、また、各メンバーシップ関数が頂点を中心として左右が互いに相似であるとする (図 5)。このとき、平

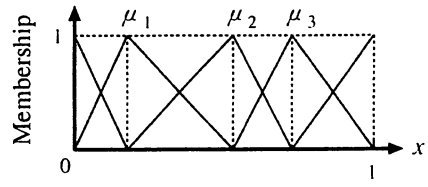


図 5: 式 (11) を満たすメンバーシップ関数の配置例

均ファジィ相対エントロピー $r_{\rm avr}$ を、

$$r_{\rm avr} = \frac{1}{N_{\rm m}-2} \sum_{i=2}^{N_{\rm m}-1} r(\mu_i) \quad (12)$$

とする。ただし、$\mu_1(x)$ と $\mu_{N_{\rm m}}(x)$ は、それぞれ、$x = 0, 1$ を頂点とするメンバーシップ関数である。

次節では、本節で定義した平均ファジィ相対エントロピーが、メンバーシップ関数の不均等配置の尺度として有効であることを示す。

4 モデルの精度と簡潔さとの関係

いま、図 6 の入力 1 出力の関数のファジィモデルについて考える。式 (11) の制約を与えたとき、2 つのメ

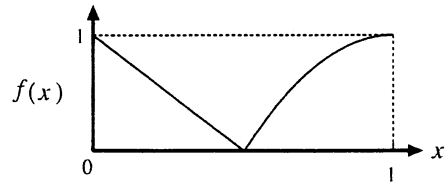
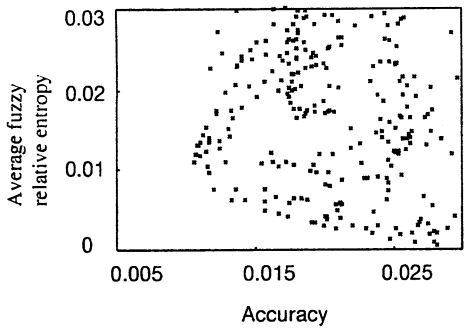


図 6: モデル対象の関数

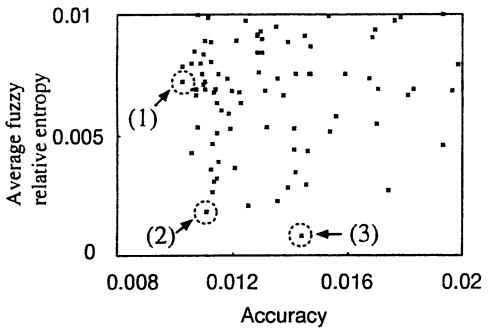
ンバーシップ関数が常に重なるとし、メンバーシップ関数の形状を三角形に限定するとき、後件部がシングルトンであるファジィモデルは、台集合上のメンバー

シップ関数の数を決め、$0 < c_i < 1$であるメンバーシップ関数の頂点 $\{c_i | \ i = 2, \cdots, N_{\mathrm{m}} - 1\}$ を定めることにより決定される。

このとき、頂点の組合せをさまざまに変えて、ファジィモデルの平均ファジィ相対エントロピーと出力の平均2乗誤差の関係をプロットしたものを図7に示す。縦軸・横軸は、それぞれ、平均ファジィ相対エントロ



(a) メンバーシップ関数の数 $N_{\mathrm{m}} = 4$



(b) メンバーシップ関数の数 $N_{\mathrm{m}} = 6$

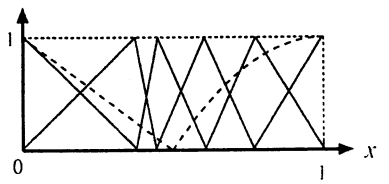
図 7: 平均ファジィ相対エントロピーと平均2乗誤差との関係

ピー・出力の平均2乗誤差である。図7から、平均ファジィ相対エントロピーと出力の平均2乗誤差との間には、トレードオフの関係があることが分かる。

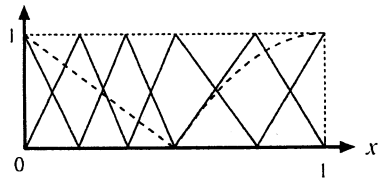
また、図7(b)の点(1)(2)(3)のファジィモデルのメンバーシップ関数の配置を、図8の(1)(2)(3)にそれぞれ示す。平均ファジィ相対エントロピーが小さいほど、メンバーシップ関数の配置が均等間隔に近いことが分かる。

5 おわりに

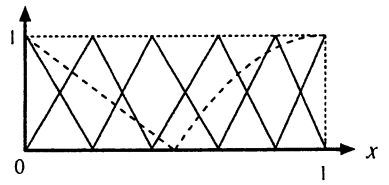
本稿では、ファジィモデルの簡潔さを、入力変数軸上のメンバーシップ関数の形状と配置で定めることにより、簡潔さを定量的に測ることを試みた。特に、メンバーシップ関数の配置について、平均ファジィ相対エントロピーの尺度で測ることができることを示した。また、平均ファジィ相対エントロピーが、精度とトレー



(1) Precision: 0.0103, Simplicity: 0.00721



(2) Precision: 0.0111, Simplicity: 0.00177



(3) Precision: 0.0144, Simplicity: 0.000789

図 8: メンバーシップ関数の配置の異なるモデル

ドオフの関係にあることを示し、ファジィモデリングがこのパレートフロント上の解の探索として定式化できることが確かめられた。

謝辞

本研究を始めるにあたり、沖電気工業（株）の安田真氏とは、有益な議論をする機会を得た。ここに感謝する。

参考文献

[1] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control", *IEEE Transactions on Systems and Cybernetics* , Vol. SMC-15, pp. 116–132, 1985.

[2] H. Akaike, "Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle", *2nd International Symposium on Information Theory*, pp. 267-281, 1973.

[3] A. De Luca and S. Termini, "A Definition of a Nonprobabilistic Entropy in the Setting of Fuzzy Sets Theory", *Information and Control*, Vol.20, pp. 301-312, 1972.

[4] 廣田ほか,「ファジィシステム, 3.5 ファジィエントロピー」, 計測自動制御学会, 1990.

TE5−3

H^∞ ノルムベースドファジィモデリングとロバスト制御

H^∞ Norm-Based Fuzzy Modeling and Robust Control

田中　一男　　堀　強
Kazuo Tanaka　Tsuyoshi Hori
電気通信大学 知能機械工学科
Dept. of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The Univ. of Electro-Communications

This paper presents an iterative LMI approach to H^∞ norm-based fuzzy modeling and controller design for nonlinear systems with unknown parameters. H^∞ norm-based fuzzy modeling conditions achieve robust parameter identification for the data contaminated by noise.

1　はじめに

近年、非線形制御の一つの試みとしてファジィモデルに基づく非線形制御のアプローチ [1][2] が行われている。これを実現するためには、非線形制御対象のファジィモデルが必要である。従来のアプローチでは既知の非線形システムを Sector Nonlinearity の考え方に基づいてファジィIf-Then 形式に置き換えていた。一方、非線形システムが未知の場合は、その動特性を表現するファジィモデルの構造とパラメータを同定する必要がある。入出力データに基づくファジィモデリングについてはいくつかの方法が提案されているが、ファジィモデリングからファジィ制御器の設計までを統合的に考慮したアルゴリズムは提案されていなかった。文献 [4][5][6] では、非線形モデルの構造は既知であるがそのパラメータが未知の場合を想定し、ファジィモデルのパラメータ同定、同定誤差のモデルの不確かさへの変換、これに基づくロバストなファジィ制御系の設計を統合的に行う手法を提案した。特に、ファジィモデルのパラメータ同定、同定誤差のモデルの不確かさのへの変換、これに基づくロバスト安定条件全てが LMI で記述されており、モデルのパラメータ同定から、この同定誤差を考慮した制御系設計までがシステマティックで効果的に行われている。機械系の場合、非線形モデルの構造は既知であるがそのパラメータが未知である場合も多い。例えば、ラグランジュ法やニュートン・オイラー法などによりその非線形運動方程式は得られるが、モーメント、質量、ばね定数、粘性摩擦係数などのシステム固有のパラメータが未知あるいは、以前は既知であったが経年変化した場合などがそれにあたる。本論文では、文献 [4]-[6] で提案したファジィモデルのパラメータ同定において H^∞ ノルムの概念を取り入れたノイズに強いファジィモデリング手法を提案する。

2　ファジィモデルと統合化設計手法

r 個の規則からなる次のようなファジィモデルを考える。

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

$$then\quad x(t+1)=A_ix(t)+B_iu(t) \tag{1}$$

$$i=1,2,\cdots,r$$

(1) 式は r 個の規則の中で i 番目の規則を示したものである。ここで、M_p^i はファジィ集合である。$z_1(t)$〜$z_p(t)$ は前件部変数であり、状態変数に依存してもよく他の外部変数でもよい。推論結果は次のように記述できる。

$$x(t+1)=\sum_{i=1}^{r}h_i(z(t))\{A_ix(t)+B_iu(t)\} \tag{2}$$

ここで、$z(t)=[z_1(t)\ z_2(t)\ \cdots\ z_p(t)]^T$ であり、

$$h_i(z(t))=\frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^{r}w_i(z(t))},\quad w_i(z(t))=\prod_{j=1}^{p}M_j^i(z_j(t))$$

である。また、文献 [4]-[6] で提案している統合化設計手法のアルゴリズムの概要を図 1 に示す。

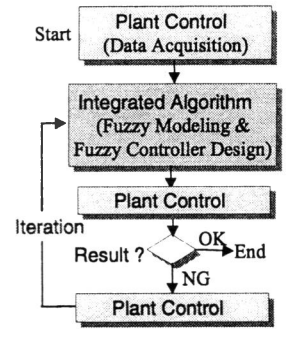


図 1: 統合化設計の流れ

3　H^∞ ノルムに基づく同定条件

下記のようなノイズを含んだ高木・菅野のファジィモデルを考える。

$$x(t+1)=\sum_{i=1}^{r}h_i(z(t))\{A_ix(t)+B_iu(t)+D_iv(t)\}, \tag{3}$$

$$A_i=A_i^*+\sum_{k=1}^{\gamma_i^A}p_{ik}A_{ik},\quad B_i=B_i^*+\sum_{m=1}^{\gamma_i^B}q_{im}B_{im}, \tag{4}$$

ここで、$v(t)$ は未知のノイズをあらわす変数であり、

$$v^T(t)v(t)<d^2I$$

ただし、d は既知とする。一方、コントローラとして

$$u=-\sum_{i=1}^{r}h_i(z(t))F_ix(t)+r(t) \tag{5}$$

を考える。パラメータ同定時にはコントローラのパラメータ F_i は既知である [4]-[6]。$r(t)$ は同定用の信号であり、この同定用の信号 $r(t)(t=1,\cdots,T)$ を入れた時の (3) と (5) からなる制御系の $x(t)$ の値を $x_d(t)$ とする。$x_d(t)$,$r(t)$,$z(t)$, $A_i^*, A_{ik}, B_i^*, B_{im}$, D_i, F_i は既知であり、p_{ik}, q_{im} が同定すべきパラメータである [4]-[6]。p_{ik}, q_{im} より A_i, B_i の行列が (4) から求まる。

Theorem 1

$$\sup_{\|v(t)\|\neq 0} \frac{\|e(t)\|_2}{\|v(t)\|_2} < \gamma$$

の条件を満たすための H^∞ ノルムに基づくモデリングは以下の LMI 条件を解くことによって実現される。

$$\underset{p_{ij},q_{ij},s}{minimize}\,\gamma$$

subject to

$$2\sum_{i=1}^{r} D_i^T \sum_{i=1}^{r} D_i - \gamma^2 < s \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} R & K^T(1) & \cdots & K^T(T) \\ K(1) & \frac{1}{2}I & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ K(T) & 0 & \cdots & \frac{1}{2}I \end{bmatrix} > 0 \tag{7}$$

ここで、

$$R = -sd^2 - 2\sum_{t=1}^{T-1}\{x_d^T(t+1)x_d(t+1)\} + \epsilon^1 + \sum_{t=1}^{T}\left\{\sum_{i=1}^{r}\sum_{k=1}^{\gamma_i^{A_i}} p_{ik}\kappa_{ik}^1(t) + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{m=1}^{\gamma_i^{B_i}} q_{im}\lambda_{ijm}^1(t)\right\}$$

$$K(t) = \hat{\epsilon}(t) + \sum_{i=1}^{r}\sum_{k=1}^{\gamma_i^{A_i}} p_{ik}\kappa_{ik}^2(t) + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{m=1}^{\gamma_i^{B_i}} q_{im}\hat{\lambda}_{ijm}(t)$$

$$\begin{aligned}\epsilon^1 = & -2\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(z(t))h_j(z(t)) \\ & \times\left\{x_d^T(t+1)A_i^*x_d(t) + (A_i^*x_d(t))^T x_d(t+1)\right. \\ & -x_d^T(t+1)B_i^*F_jx_d(t) - (B_i^*F_jx_d(t))^T x_d(t+1) \\ & \left.+x_d^T(t+1))B_i^*r(t) + (B_i^*r(t))^T x_d(t+1))\right\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\kappa_{ik}^1(t) = & -2\sum_{i=1}^{r} h_i(z(t))\{x_d^T(t+1)A_{ik}x_d(t) \\ & +(A_{ik}x_d(t))^T x_d(t+1)\},\end{aligned}$$

$$\kappa_{ik}^2(t) = h_i(z(t))A_{ik}x_d(t),$$

$$\begin{aligned}\lambda_{ijm}^1(t) = & -2\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(z(t))h_j(z(t))\{-x_d^T(t+1)B_{im} \\ & \times F_jx_d(t) - (B_{im}F_jx_d(t))^T x_d(t+1) \\ & + x_d^T(t+1))B_{im}r(t) + (B_{im}r(t))^T x_d(t+1))\}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{\epsilon}(t) = & \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(z(t))h_j(z(t)) \\ & \times\{A_i^*x_d(t) - B_i^*F_jx_d(t) + B_i^*r(t)\},\end{aligned}$$

$$\hat{\lambda}_{ijm}(t) = -h_i(z(t))h_j(z(t))B_{im}F_jx_d(t)B_{ik}r(t).$$

である。上式の LMI において、p_{ik}, q_{im} と s が LMI 変数である。

(証明) 略

4 混合モデリング条件

誤差の最小化による同定条件 [4] と H^∞ ノルムに基づく定理 1 の条件を同時に解く混合モデリング条件を以下のように考えることができる。ここで、$\beta_1, \beta_2 > 0$ で混合モデリング条件のどちらにどれだけのウェートを割り当てるかを決定するパラメータである。

$$\underset{p_{ij},q_{ij},s}{minimize}\ \beta_1\alpha + \beta_2\gamma$$

subject to (6) , (7) and

$$\begin{bmatrix} \alpha & N^T(1) & \cdots & N^T(T-1) \\ N(1) & I & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ N(T-1) & 0 & \cdots & I \end{bmatrix} > 0,$$

ここで

$$N(t) = \mu(t) + \sum_{i=1}^{r}\sum_{k=1}^{\gamma_i^{A_i}} p_{ik}\eta_{ik}(t) + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{m=1}^{\gamma_i^{B_i}} q_{im}\zeta_{ijm}(t)$$

$$\begin{aligned}\mu(t) = & h_i(z(t))h_j(z(t))\{x_d(t+1) \\ & -A_i^*x_d(t) + B_i^*F_jx(t) - B_i^*r(t)\}\end{aligned}$$

$$\eta_{ik}(t) = h_i(z(t))A_{ik}x_d(t)$$

$$\zeta_{ijm}(t) = h_i(z(t))h_j(z(t))\{B_{im}F_jx_d(t) - B_{im}r(t)\}$$

である。

5 まとめ

本論文では、H^∞ ノルムベースドファジィモデリング手法を提案した。これに基づくロバスト制御については文献 [4]-[6] に示されている。

参考文献

[1] 田中; アドバンストファジィ制御, 共立出版 (1994)

[2] K. Tanaka and H. O. Wang, "Fuzzy Control Systems and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach", John Wiley & Sons (2000).

[3] 中西、井上; ニューラルネットワークによるロバストな制御系の構築, 第 42 回システム制御情報学会講演会,pp.93-94(1998)

[4] 堀、田中; ファジィモデルと制御器のロバスト統合化設計法, 第１５回ファジィシステムシンポジウム,pp.73-76(1999)

[5] K. Tanaka , T.Hori, K. Yamafuji and H. O. Wang, An Integrated Algorithm of Fuzzy Modeling and Controller Design for non Linear Systems, 1999 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol.2, pp.887-892 (1999).

[6] 田中、堀 ; ファジィモデリングと制御器設計の反復型アルゴリズムの提案, 計測自動制御学会論文集 (掲載確定)

[問い合わせ先]

〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

電気通信大学 知能機械工学科 田中 一男

TEL/FAX: 0424(43)5425, e-mail: ktanaka@mce.uec.ac.jp

TF1−1

ミンコフスキー差を用いた区間ロバスト回帰
Interval Robust Regression Using Mikowski's Difference

乾口 雅弘　藤田 晴喜　谷野 哲三
Masahiro INUIGUCHI　Haruki FUJITA and Tetsuzo TANINO

大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract: In this paper, we propose two approaches to interval regression analyses in the presence of outliers and noise. Both approaches are based on the interval regression models based on Minkowski difference which are previously proposed by the authors. It is shown the estimation problems based on the proposed approaches are reduced to convex quadratic programming problems. The effectiveness of the approaches are demonstrated by a few simple examples.

1. はじめに

田中ら [1] により提案されている区間回帰は従来の最小二乗法と全く異なった考え方に基づいている．ところが，著者ら [2] は，従来の最小二乗法を拡張することによっても田中らの区間回帰と同様な回帰手法が得られることを示している．さらに，この考え方により，Diamond [3] による距離最小化に基づくファジィ回帰と同様な手法も得られることを示している．著者らの方法の特徴は，区間線形モデル，区間誤差および区間観測値の関係を示す方程式を考えており，これから導かれる区間誤差の二乗和あるいは絶対和を最小にするところにある．この際，区間誤差は区間方程式を解くことにより，Mikowski 差 [4] を用いて求められる．

田中ら [1] と異なり，区間誤差を用いているという観点に立てば，従来提案されているロバスト回帰 [5] の考え方を適用することが考えられる．そこで，本研究では，Minkowski 差に基づく区間回帰モデルにロバスト回帰の考え方を導入する．

2. 三つの区間回帰モデルと回帰問題の定式化

通常の回帰モデルでは，観測データ $(\boldsymbol{x}_i, y_i)$, $i = 1,2,\ldots,n$ が与えられたとき，$\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i + e_i = y_i$ が成立すると仮定される．e_i は誤差である．このモデルを区間観測データ $(\boldsymbol{x}_i, Y_i = [y_i^{\mathrm{L}}, y_i^{\mathrm{R}}])$, $i = 1,2,\ldots,n$ が与えられた場合への拡張として，次の三つのモデルを考える．

(a) MD (Minkowski Difference) モデル:

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} + E_i = Y_i \tag{1}$$

ただし，$\boldsymbol{A}$ は区間ベクトルで，各成分 A_i は中心 a_j^{C}，幅 a_j^{W} で定められる．$E_i = [e_i^{\mathrm{L}}, e_i^{\mathrm{R}}]$ は区間誤差で，

$$e_i^{\mathrm{L}} = y_i^{\mathrm{L}} - \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2}\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\mathrm{T}}|\boldsymbol{x}_i|$$

$$e_i^{\mathrm{R}} = y_i^{\mathrm{R}} - \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2}\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\mathrm{T}}|\boldsymbol{x}_i|$$

と定められる．$\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}}, \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}}$ は第 j 成分を a_j^{C}, a_j^{W} とするベクトルで，$|\boldsymbol{x}_i|$ は各成分を $\boldsymbol{x}_i$ の成分 x_{ij} の絶対値 $|x_{ij}|$ とするベクトルである．区間演算の性質より，このモデルでは，暗に，$\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}}|\boldsymbol{x}_i| \leq y_i^{\mathrm{R}} - y_i^{\mathrm{L}}, i = 1,2,\ldots,n$ を仮定している．したがって，観測データが広めの区間で観測されると仮定できる場合に有効である．

(b) C-MD (Converse Minkowski Difference) モデル:

$$Y_i - E_i = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i \tag{2}$$

この場合，区間誤差 $E_i = [e_i^{\mathrm{L}}, e_i^{\mathrm{R}}]$ は，

$$e_i^{\mathrm{L}} = y_i^{\mathrm{R}} - \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2}\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\mathrm{T}}|\boldsymbol{x}_i|$$

$$e_i^{\mathrm{R}} = y_i^{\mathrm{L}} - \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2}\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\mathrm{T}}|\boldsymbol{x}_i|$$

と与えられる．MD モデルとは逆に，このモデルでは，暗に，$\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}}|\boldsymbol{x}_i| \geq y_i^{\mathrm{R}} - y_i^{\mathrm{L}}, i = 1,2,\ldots,n$ を仮定している．したがって，観測データが狭めの区間で観測されると仮定できる場合に有効である．

(c) S-MD (Symmetric Minkowski Difference) モデル:

$$Y_i - E_i^{\mathrm{LS}} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i + E_i^{\mathrm{RS}} \tag{3}$$

ただし，E_i^{LS}, E_i^{RS} のいずれかは常に $0 = [0,0]$ で，区間誤差 $E_i = E_i^{\mathrm{LS}} + E_i^{\mathrm{RS}} = [e_i^{\mathrm{L}}, e_i^{\mathrm{R}}]$ は，

$$e_i^{\mathrm{L}} = \min\Big(y_i^{\mathrm{L}} - \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2}\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\mathrm{T}}|\boldsymbol{x}_i|,\ y_i^{\mathrm{R}} - \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2}\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\mathrm{T}}|\boldsymbol{x}_i|\Big)$$

$$e_i^{\mathrm{R}} = \max\Big(y_i^{\mathrm{L}} - \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2}\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\mathrm{T}}|\boldsymbol{x}_i|,\ y_i^{\mathrm{R}} - \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2}\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\mathrm{T}}|\boldsymbol{x}_i|\Big)$$

と定められる．このモデルでは，MD モデルや C-MD モデルのように幅に関する制限がないので，観測データが広め，あるいは，狭めの区間で観測されるという仮定なしに適用できる．

上のモデルそれぞれに対し，最小二乗法，あるいは，絶対誤差和最小化法の拡張である

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} {E_i}^2 \tag{4}$$

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} |E_i| \tag{5}$$

を適用して，区間パラメータ $\boldsymbol{A}$ を求める問題を考える．式 (4)，(5) が区間関数の最小化となるので，$|E_i| = [|e|_i^{\mathrm{L}}, |e|_i^{\mathrm{R}}]$ とし，MD モデルと C-MD モデルに対して，回帰問題を

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} {|e|_i^{\mathrm{L}}}^2 + \epsilon \sum_{i=1}^{n} {|e|_i^{\mathrm{R}}}^2 \tag{6}$$

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} |e|_i^{\mathrm{L}} + \epsilon \sum_{i=1}^{n} |e|_i^{\mathrm{R}} \tag{7}$$

と定式化することにより，それぞれ，田中ら [1] の C-Nes 問題と Nes 問題と類似した回帰手法が得られることが示されている [2]．ただし，ϵ は十分小さい非アルキメデス的な正数である．一方，S-MD モデルに対しては，回帰問題を

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} {|e|_i^{\mathrm{R}}}^2 \tag{8}$$

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} |e|_i^{\mathrm{R}} \tag{9}$$

と定式化することにより，Diamond [3] と類似した手法が得られることが明らかになっている [2]．

3. M-推定法による区間ロバスト回帰

田中ら [1] の区間回帰分析では，推定区間がすべての区間出力データを含む，あるいは，区間出力データに含まれるという条件を課しているため，異常データが存在する場合には，良好な結果を得ることができない．式 (6)，(7) に基づく MD モデル，C-MD モデルの推定法も，絶対区間誤差の下限値の和の最小化を第一段階で行うので，同様な欠点をもつ．絶対誤差和最小化法は，異常データの存在に対してロバストな性質をもつ [6] ので，MD モデル，C-MD モデルの場合も式 (9) のように，絶対区間誤差の上限値の和の最小化のみに変更すれば，異常データに強い回帰となるが，n 個のデータの絶対区間誤差の中央値を最小にすることになり，n が偶数の場合は唯一に決定できないという欠点がある．

本研究では，ロバスト回帰の考え方を導入し，これらの問題点の改善を試みる．ロバスト回帰手法 [5] では，最小二乗法や絶対誤差和最小化法の代わりに，

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} f(e_i : c_i) \tag{10}$$

により，パラメータが推定される．ただし，$f(\cdot : c)$ は $f(0 : c) = 0$ となる凸関数であり，

$$f(z : c) = \begin{cases} \dfrac{1}{2}z^2 & |z| < c \text{ のとき}, \\ c|z| - \dfrac{1}{2}c^2 & \text{その他} \end{cases} \tag{11}$$

と定められることが多い．式 (11) を用いる場合の推定法は，M-推定法と呼ばれる．

M-推定法に基づけば，区間回帰の場合にも

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} f(E_i : c_i) \tag{12}$$

を考えればよいことになる．この問題も区間関数の最小化であるので，問題の解釈が必要になる．式 (6)，(7) のように，絶対区間誤差の下限値を第一段階の目的関数として用いると，異常データの影響を受けた結果が得られてしまう．そこで，S-MD モデルと同様に，MD モデル，C-MD モデルでも絶対区間誤差の上限値の最小化，

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} f(|e|_i^{\mathrm{R}} : c_i) \tag{13}$$

を行う．この問題を差異変数 $g_i^- \geq 0, g_i^+ \geq 0$ $(g_i^- \cdot g_i^+ = 0)$ を用いて変形すると，MD モデルの場合は，次の凸 2 次計画問題 (MD-M) になる．

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} \left\{ {g_i^-}^2 + 2c_i(g_i^+ - g_i^-) \right\} \\
&\text{subject to} \\
&{\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}}}^{\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - (c_i + g_i^+ - g_i^-) \leq y_i^{\mathrm{L}}, \ i \in N \\
&{\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}}}^{\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + (c_i + g_i^+ - g_i^-) \geq y_i^{\mathrm{L}}, \ i \in N \\
&{\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}}}^{\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - (c_i + g_i^+ - g_i^-) \leq y_i^{\mathrm{R}}, \ i \in N \\
&{\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}}}^{\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + (c_i + g_i^+ - g_i^-) \geq y_i^{\mathrm{R}}, \ i \in N \\
&{\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}}}^{\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| \leq y_i^{\mathrm{R}} - y_i^{\mathrm{L}}, \ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}}, \boldsymbol{g}^+, \boldsymbol{g}^- \geq \boldsymbol{0}
\end{aligned} \tag{14}$$

ただし，$N = \{1, 2, \ldots, n\}$ である．目的関数の性質から，相補条件 $g_i^- \cdot g_i^+ = 0$ が除かれている．C-MD モデルの場合は，下から 2 番目の制約条件の不等号の向きを逆にした問題 (C-MD-M) を考えればよい．また，S-MD モデルの場合は，下から 2 番目の制約条件を取り除いた問題 (S-MD-M) を考えればよい．

4. 緩和による区間ロバスト回帰

M-推定法に基づく方法は，異常データの混入の恐れがある場合に有効な手法であったが，ここでは，区間出力データの位置が外乱の影響により，上下にずれる場合に有効な手法を提供する．S-MD モデルは，区間データの位置のずれ，広がりのずれが存在しても，推

定区間の幅に関する制約条件がないため，ある程度，外乱を除去しうる．一方，MD モデルや C-MD モデルでは，推定区間の幅が区間出力データの幅以下，あるいは，幅以上という制約条件が存在するので，区間出力データの幅が外乱の影響を大きく受ける場合には，これらのモデルを適用することは適切でない．

また，式 (6), (7) に基づく MD モデル，C-MD モデルの推定は，推定区間が区間出力データに含まれる，あるいは，区間出力データを含むように区間回帰関数を求めようとするので，区間出力データの位置の影響も強く受ける．したがって，区間出力データの位置のみが外乱の影響を大きく受ける場合は，式 (6), (7) に基づく MD モデル，C-MD モデルを修正する必要がある．

式 (6), (7) の代わりに，第 1 項を緩和した問題，

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} g(|e|_i^{\mathrm{L}} : c_i)^2 + \epsilon \sum_{i=1}^{n} |e|_i^{\mathrm{R}\,2} \tag{15}$$

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{n} g(|e|_i^{\mathrm{L}} : c_i) + \epsilon \sum_{i=1}^{n} |e|_i^{\mathrm{R}} \tag{16}$$

を考える．ただし，ϵ は十分に小さい (非アルキメデスな) 正数であり，g は次式で定義される．

$$g(z : c) = \min_{s \le c} \max(0, |z| - s) \tag{17}$$

明らかに，$g(\cdot : c)$ は凸関数である．式 (15), (16) の第 1 項は，$|e|_i^{\mathrm{L}} \le c_i$ の範囲で 0 となるので，式 (15), (16) は式 (6), (7) の緩和となっていることがわかる．

問題 (15), (16) を変形すると，MD モデルの場合，次の凸 2 次計画問題 (Q-MD-R)，線形計画問題 (L-MD-R) に帰着できる．

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^{n} {g_i^+}^2 + \epsilon \sum_{i=1}^{n} {d_i}^2 \\
&\text{subject to} \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + (c_i + g_i^+ - g_i^-) \ge y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - (c_i + g_i^+ - g_i^-) \le y_i^{\mathrm{R}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - d_i \le y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + d_i \ge y_i^{\mathrm{R}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| \le y_i^{\mathrm{R}} - y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}},\ \boldsymbol{g}^+,\ \boldsymbol{g}^-,\ \boldsymbol{d} \ge \boldsymbol{0}
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^{n} g_i^+ + \epsilon \sum_{i=1}^{n} d_i \\
&\text{subject to} \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + (c_i + g_i^+ - g_i^-) \ge y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - (c_i + g_i^+ - g_i^-) \le y_i^{\mathrm{R}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - d_i \le y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + d_i \ge y_i^{\mathrm{R}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| \le y_i^{\mathrm{R}} - y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\boldsymbol{a}^{\mathrm{W}},\ \boldsymbol{g}^+,\ \boldsymbol{g}^-,\ \boldsymbol{d} \ge \boldsymbol{0}
\end{aligned} \tag{19}$$

C-MD モデルの場合は，次の凸 2 次計画問題 (Q-C-MD-R)，線形計画問題 (L-C-MD-R) に帰着できる．

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^{n} {d_i}^2 \\
&\text{subject to} \quad \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - c_i \le y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + c_i \ge y_i^{\mathrm{R}},\ i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + d_i \ge y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - d_i \le y_i^{\mathrm{R}}, i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| \ge y_i^{\mathrm{R}} - y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}},\ \boldsymbol{d} \ge \boldsymbol{0}
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^{n} d_i \\
&\text{subject to} \quad \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - c_i \le y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + c_i \ge y_i^{\mathrm{R}},\ i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i - \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| + d_i \ge y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{C}\,\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| - d_i \le y_i^{\mathrm{R}},\ i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}\,\mathrm{T}} |\boldsymbol{x}_i| \ge y_i^{\mathrm{R}} - y_i^{\mathrm{L}},\ i \in N \\
&\qquad \boldsymbol{a}^{\mathrm{W}},\ \boldsymbol{d} \ge \boldsymbol{0}
\end{aligned} \tag{21}$$

5. 数値例

5.1. M 推定法による区間ロバスト回帰の例

表 1 の区間データに対して，

$$Y = A_1 x^2 + A_2 x + A_3 \tag{22}$$

と仮定し，MD モデルを用いて式 (6), (7), (13) により，区間回帰を行った結果を図 1 に示す．ただし，$c_i = y_i^{\mathrm{R}} - y_i^{\mathrm{L}}, i \in N$ と設定している．

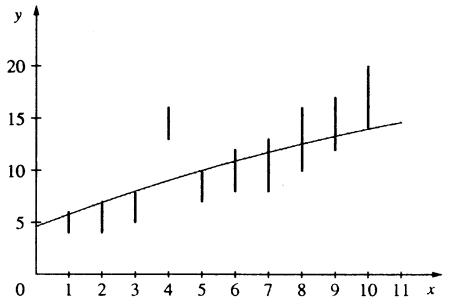
図 1 に示すように，M-推定法を用いることにより，異常データの影響の少ない区間回帰関数が得られていることがわかる．

表 1: 数値例 1

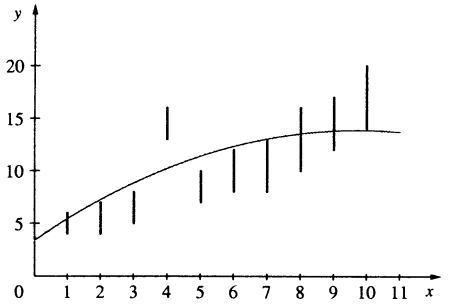
x_i	1	2	3	4	5
Y_i	[4,6]	[4,7]	[5,8]	[13,16]	[7,10]
x_i	6	7	8	9	10
Y_i	[8,12]	[8,13]	[10,16]	[12,17]	[14,20]

5.2. 緩和による区間ロバスト回帰の例

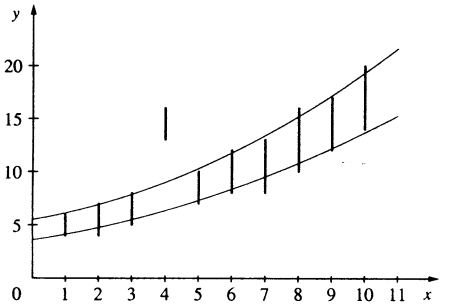
表 2 に示す区間データに対して，式 (22) を仮定し，C-MD モデルを用いて式 (6), (7), (15), (16) により，区間回帰を行った結果を図 2 に示す．ただし，$c_i = y_i^{\mathrm{R}} - y_i^{\mathrm{L}}$,



(a) 式 (6) の結果



(b) 式 (7) の結果



(c) 式 (13) の結果

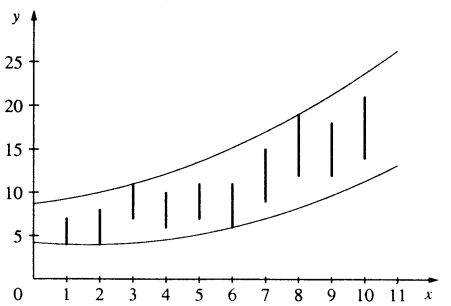
図 1: M-推定法による区間ロバスト回帰

表 2: 数値例 1

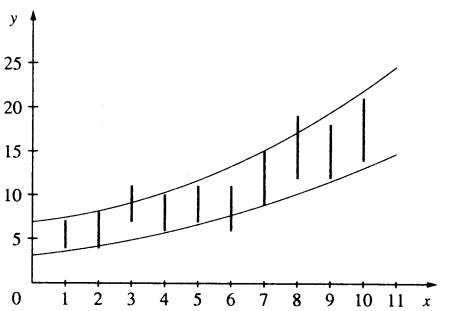
x_i	1	2	3	4	5
Y_i	[4,7]	[4,8]	[7,11]	[6,10]	[7,11]
x_i	6	7	8	9	10
Y_i	[6,11]	[9,15]	[12,19]	[12,18]	[14,21]

$i \in N$ と設定している

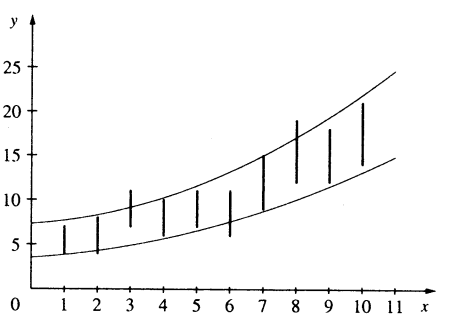
図 2 に示すように，式 (15), (16) により，外乱の影響の少ない区間回帰関数が得られていることがわかる．



(a) 式 (6), (7) の結果



(b) 式 (15) の結果



(c) 式 (16) の結果

図 2: 緩和による区間ロバスト回帰

参考文献

[1] 田中，林，長坂：可能性測度による区間回帰分析，行動計量学，Vol.16, No.1, pp.1–7 (1988).

[2] 乾口，藤田，谷野：Minkowski 差に基づく区間線形回帰，第 10 回ソフトサイエンス・ワークショップ講演論文集，pp.60–63 (2000).

[3] P. Diamond: Fuzzy Least Squares, *Information Sciences*, Vol.46, pp.141–157 (1988).

[4] J.-P. Aubin and H. Franskowa: *Set-Valued Analysis*, Birkhäuser, Boston (1990).

[5] P. J. Huber: Robust Statistics, *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol.43, pp.1041–1067 (1972).

[6] W. F. Shape: Mean-Absolute-Deviation Characteristic Lines for Securities and Portfolios *Management Science*, Vol.18, No.2, B1–B13 (1971).

［連絡先］ 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科
電子情報エネルギー工学専攻
乾 口 雅 弘
Tel. 06-6879-7787 Fax. 06-6879-7939
E-mail: inuiguti@eie.eng.osaka-u.ac.jp

TF1−2

ファジィ回帰モデルを用いたデータ分析に関する基礎的研究

A basic study on the data analysis using the fuzzy regression model

田島 博之
Hiroyuki TAJIMA
創価大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Soka University

Abstract: In this study, the author introduces the problem to identify the model and the case study for insisting on the usability of my model and software. The author aims to develop the software, which identify the fuzzy regression model that he has proposed before. The software can identify four types of fuzzy regression model using data sets of the type of real number. By defining the performance function, the best fit of the data and the model can be seen on the software. And by loading the function of the graphical representation, the user can apprehend the quality of data visually.

1．はじめに

著者はこれまでに幾つかのタイプのファジィ回帰モデル同定法を提案してきた。現在、これらのモデル同定をコンピュータ上で容易に行うためのソフトウェアの開発を行っている。本研究の前半では、現段階で採用している幾つかのタイプのモデル同定法を紹介する。後半では応用事例を紹介する。本研究の目的は、具体的な事例研究を示すことでモデルの有用性を確認することであり、著者の提案するファジィ回帰分析ツールを作成することで汎用化の道を開き、更なる発展を目指すことである。

2．モデルの定義

本研究ではモデルを同定する際に用いるデータを独立変数、従属変数が共に実数として与えられる m 個のデータセットを扱う。

$$(x_i, y_i) \quad ,i=1,2,...,m$$

ファジィ回帰モデルを表現するために以下の図１に示す非対称型ファジィ数を用いメンバーシップ関数を定義する。

$$f(x)=\begin{cases} \max\left(\dfrac{x-c+l}{l},0\right) & ,\text{if } c\geqq x \\ \max\left(-\dfrac{x-c-r}{r},0\right) & ,\text{if } c<x \end{cases}$$

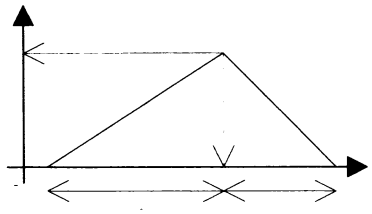


図１ メンバーシップ関数

以上のファジィ数を $\tilde{Y}=(c,l,r)$ と表現する。与えられた任意のデータ (x_i, y_i) に対してモデルの表現するデータが上で定義されたファジィ数を $(x_i, \tilde{Y}_i)$ とするとき、$y_i \in \tilde{Y}_i$ となるようにモデルは同定される。本研究で表現するファジィ回帰モデルは、３つのタイプの関数で表現される。

$$\tilde{Y}(x)=(c(x), l(x), r(x))$$

ここで、$c(x)$ は中心関数、$l(x)$ は中心から下辺までの幅を顕わす関数、$r(x)$ 中心から上辺までの幅を顕わす関数であり、本研究ではそれぞれ１次関数となる。

$$c(x)=c_0+c_1x, l(x)=l_0+l_1x, r(x)=r_0+r_1x$$

これらを用いてモデルの下、上辺関数を以下に定義する。

$$y_*(x)=c(x)+l(x), y^*(x)=c(x)+r(x)$$

3．モデルの同定法

開発しているソフトでは４つのタイプの同定法が使える。定式化のための基本概念として L1-measure および L2-measure を用いているが、詳しい紹介は文献[1]～[5]に紹介している。本稿では L2-measure を導入した２タイプの同定問題を紹介する。

3．1 Ｌ２－１型同定法

First Level

最小化目的関数：

$$\min \sum_{i=1}^{m}\left[\left(y^*(x_i)-y_i\right)^2+\left(y_*(x_i)-y_i\right)^2\right]$$

制約条件式： $y_*(x_i) \leqq y_i \leqq y^*, i=1,2,\cdots,m$

同定関数： $y^*(x), y_*(x)$

同定された上下辺の関数を $\hat{y}^*(x), \hat{y}_*(x)$ とする。

Second Level

最小化目的関数： $\min \sum_{i=1}^{m}(y_i-c(x_i))^2$

制約条件式： $\hat{y}_*(x_i) \leqq c(x_i) \leqq \hat{y}^*(x_i), i=1,2,\cdots,m$

同定関数： $c(x)$

3．2 Ｌ２－１型同定法

First Level

最小化目的関数：

$$\min \sum_{i=1}^{m}\left[\left(y^*(x_i)-y_i\right)^2+\left(y_*(x_i)-y_i\right)^2\right]$$

制約条件式： $y_*(x_i) \leqq y_i \leqq y^*(x_i), i=1,2,\cdots,m$

同定関数： $y^*(x), y_*(x)$

同定された上下辺の関数を $\hat{y}^*(x), \hat{y}_*(x)$ とする。

Second Level

最大化目的関数を以下に定義する。

$$\alpha(x_i,y_i)=\begin{cases}\dfrac{y_i-\hat{y}_*(x_i)}{c(x_i)-\hat{y}_*(x_i)} & for\ c(x_i)\geqq y_i\\ \dfrac{y_i-\hat{y}^*(x_i)}{c(x_i)-\hat{y}^*(x_i)} & for\ c(x_i)<y_i\end{cases}$$

最大化目的関数：$\max\sum_{i=1}^{m}\alpha(x_i,y_i)$

制約条件式：$\hat{y}_*(x_i)\leqq c(x_i)\leqq\hat{y}^*(x_i),i=1,2,\cdots,m$

同定関数　：$c(x_i)$

4．評価関数

決定されたモデルの中心関数を$\hat{c}(x)$、その上下辺の関数を$\hat{y}^*(x),\hat{y}_*(x)$とする。

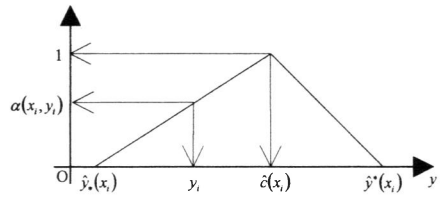


図２ 評価関数の基準

この時、データ点(x_i,y_i)に重なるファジィ数のメンバーシップ関数と従属変数値y_iの関係を示す式を$\alpha(x_i,y_i)$として次式に表す。

$$\alpha(x_i,y_i)=\begin{cases}\dfrac{y_i-\hat{y}_*(x_i)}{\hat{c}(x_i)-\hat{y}_*(x_i)} & for\ \hat{c}(x_i)\geqq y_i\\ \dfrac{y_i-\hat{y}^*(x_i)}{\hat{c}(x_i)-\hat{y}^*(x_i)} & for\ \hat{c}(x_i)<y_i\end{cases}$$

この値の総和が大きくなるほどモデルの表現する中心関数が、モデルを同定する際に用いたデータセットに強く反映されているといえる。そこで、評価関数にはこの関数値$\alpha(x_i,y_i)$の平均値を用いることにする。

$$ave.\alpha(X,Y)=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\alpha(x_i,y_i)$$

この関数値$ave.\alpha(X,Y)$が１に近いほど、そのモデルの中心関数がデータセットの持つ性質を、良く表現しているといえる。

5．事例研究

以下のデータは、ある試験における学生の学習時間とその得点を表している。

表 1: 学習時間と試験結果

Data No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
学習時間	30	30	40	50	50	60	70	70	70	80	90	90	90	100	100	110	110	120	120	140
得点	4	6	6	5	9	8	6	9	11	7	6	8	10	9	12	9	11	11	13	12

学習時間が実数であるのに対して、試験の得点は試験を受ける学生の実力を表現する値として見ることができる。すなわち、よりファジィな要因を含む実数値である。そこで、学習時間を独立変数x、得点を従属変数yとしてこれらのデータをファジィ回帰モデルによって分析する。従来型、L2-1 型、L2-2 型のモデル同定の結果を次の表 2 および図３に示す。

表 2: 計算結果

	中心関数		上辺関数		下辺関数		評価関数値
	傾き	切片	傾き	切片	傾き	切片	$ave.\alpha(X,Y)$
L2－1型	6.33E-02	3.48	4.00E-02	8.20	3.33E-02	3.00	0.497
L2－2型	5.59E-02	4.32	4.00E-02	8.20	3.33E-02	3.00	0.502

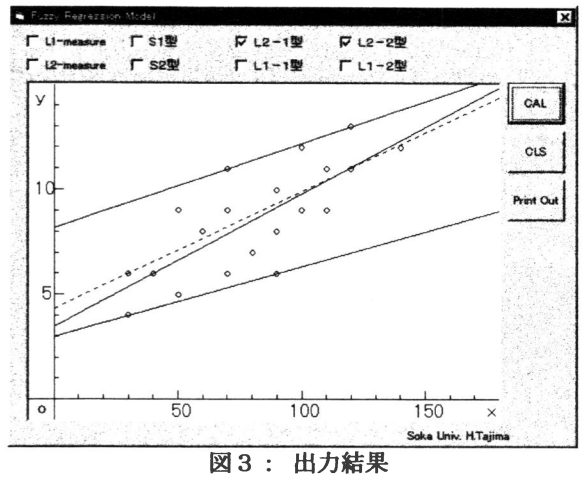


図３： 出力結果

最新版の開発ソフトでは、上図のように計算結果をグラフとして出力することができる。点線で描かれた中心関数が L2-1 型、実線が L2-2 型である。$ave.\alpha(X,Y)$の値は、L2-1 型が 0.497、L2-2 型が 0.502 と次第に増加していることが分かる。同定するモデルから推定するファジィ数に重点をおく場合は、最小二乗法的な概念を用いて中心関数を求める L2-1 型よりも独自の概念[5]を導入した L2-2 型の方がよくデータを表現するといえよう。

6．まとめ

本研究で著者は独自に提案するファジィ回帰モデルを同定するためのソフトウェアを開発した。現在は４タイプの単回帰モデルを同定することができるが、今後は重回帰モデルへの拡張や、他のタイプの同定法も行えるようにしたい。また、モデルを同定する際に用いるデータは、実数型のみとしたが、今後は従属変数がファジィとして与えられた場合についての同定法もシステムに導入し,ファジィ回帰分析総合アプリケーションとして開発してゆく予定である。

参考文献

[1] 田島博之 “LR ファジィ数をもちいたファジィ回帰モデルの提案とその評価” 日本ファジィ学会第１４回ファジィシステムシンポジウム.1998 年６月.岐阜.第１４回ファジィシステムシンポジウム予稿集.pp.117-118,1998

[2] Hiroyuki TAJIMA “A Proposal of fuzzy regression model” Vietnam-Japan Bilateral Symposium of Fuzzy Systems and Applications. 1998 年 10 月 Halong Bay(Vietnam). Proceedings. pp383-389,1998

[3] ― “実数データを用いたファジィ回帰モデル同定法の研究” 京都大学数理解析研究所研究集会「数理モデルにおける決定理論」.1998 年 11 月.京都.数理解析研究所講究録 1079.pp.190-195,1998

[4] ― “中心関数を重視したファジィ回帰モデル同定法” 日本ファジィ学会誌. Vol.10, No6 :pp1135-1143, 1998.

[5] ― “A Study on the data analysis using the fuzzy regression model” First Western Pacific/Third Australia-Japan Workshop on Stochastic Models.1999 年 9 月 Christchurch(New Zealand). Proceedings. pp512-519,1999

[問い合わせ先]
〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236
創価大学大学院工学研究科古川長太研究室所属
田島博之　E-mail htajima@t.soka.ac.jp

TF2−1

凸包に基づくファジィ回帰分析[1]

Fuzzy Regression Analysis based on Convex Hull

和多田 淳三[1)]　櫛木 雄介[2)]　豊浦 由浩[1)]

Junzo Watada, Yusuke Kushiki, Yoshihiro Toyoura

[1)]大阪工業大学　[2)]松下電器産業

Osaka Institute of Technology,　Matsusita Electric Industrial Co.

Abstract − In such real problems as economy, management, medicine and engineering, it is general in a regression analysis to deal with the huge number of data. It is necessary and essential in a fuzzy regression analysis to solve a large-scale of linear programming. So, it is required to spend huge time in computation of a linear programming. In order to solve the fuzzy regression analysis efficiently, we should remove samples which are not influential to the result. In this paper we propose the effective method to decrease drastically the number of samples in terms of convex hull method.

Stress is placed on that (1) only vertex points obtained by the convex hull are constraints in a linear programming, that(2) the convex hull approach works efficiently in real-time data gathering, and that (3) the number of vertexes obtained by the convex hull will not increase so much.

1 はじめに

ファジィ回帰分析を解くためには，データ数に比例して増加する拘束条件のもとで線形計画問題を解く必要がある．一方，ファジィ回帰分析に用いる現実のデータは多量であり，必然的に大規模な線形計画問題となる．これには多大の計算量を要する．このため，ファジィ回帰分析を効率的に解くために，線形計画問題の拘束条件を削減する必要があった．

本論文ではこの問題を解決するために，計算幾何学における凸包問題を導入した拘束条件数の効率的削減の手法を提案する．

2 ファジィ回帰分析

ファジィ回帰モデルは，係数がファジィ数である線形モデルであり，次のように表される．

$$Y = A_0 + A_1 x_1 + \cdots + A_K x_K \qquad (1)$$

ただし，x_j はサンプルの入力値を表し，K は説明変量の数，A_j はファジィ数，Y は推定ファジィ数となる．簡単のため，ファジィ数を対称三角型ファジィ数として $A_j=(a_j, c_j)$とする．

n サンプルの入力値と出力値の対 $(y_i, \mathbf{x}_i)$，$i=1,\cdots,n$ が与えられたとき，モデルを(1)式とし，ファジィ係数 A_j を $A_j=(a_j, c_j)$で表す．(1)式のファジィ数 Y_i は，

$$Y_i = \left(\alpha \mathbf{x}_i, \mathbf{c}\left|\mathbf{x}_i\right|\right) \qquad (2)$$

これまでに述べたファジィ回帰分析における線形計画問題の拘束条件数は，全データの内包条件が上部と下部から $2n$ 個，幅 c の非負条件数として d 個，計 $2n+d$ 個で表される．ただし，このとき分析対象となるサンプルデータは，d 次元ユークリッド空間における n 個のデータ点と考え，$d=K+1$ とする．

3 凸包問題

拘束条件は，計算幾何学の考えを導入すると，d 次元ユークリッド空間 E^d 内の領域を示す式といえる．超多面体を，幾何学の分野では凸包（convex hull）と呼び，凸包の頂点を求める問題を凸包問題と呼んでいる．すなわち，凸包の頂点を用いれば，ファジィ回帰分析に要する拘束条件を削減できる．

3．1 幾何学

ファジィ回帰分析において扱うデータは，幾何学的に多次元の点集合に置きかえることができる．回帰分析に用いるデータは，多くの場合，多次元である．したがって，本稿では多次元空間を対象とした用語で表現する．

以下に，幾何学的な規則や定義を示す．

3.1.1 アフィン包・凸包

E^d 内において n 個の有限点集合 $P=\{p_i \mid p \in E^d, i=1\cdots n\}$ が与えられたとする．（これ以降に示す有限点集合 P はすべて，この定義に準じる）

1）アフィン集合・アフィン結合

$$\pi = \sum_{i=0}^{k} \lambda_i p_i \ ; \sum_{i=0}^{k} \lambda_i = 1 \qquad (3)$$

これを満たす点の集合をアフィン集合（affine set）と呼ぶ．また，π は P のアフィン結合（affine combination）である．

2）E^d 内の部分集合 L に対して，L のアフィン包(affine hull) aff(L)は L を含む最小のアフィン集合である．

3）凸集合・凸結合：

$$\pi = \sum_{i=0}^{k} \lambda_i p_i \ ; \sum_{i=0}^{k} \lambda_i = 1 ; \lambda_I \geq 0 \qquad (4)$$

これを満たす点の集合を凸集合（convex set）と呼ぶ．

[1]本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(C-2)(Grant No.11680459)の助成を受けた．

また，πはPの凸結合（convex combination）である．

4）凸包：　E^d内の部分集合Lに対して，Lの凸包（convex hull）conv(L)はLを含む最小の凸集合である．

以上が，aff()，conv()式の形状の定義である．また，本稿では，「凸包の頂点」を点集合として，「凸包」を領域として書き分ける．

3.1.2 基本規則

凸包とは，ある点集合を包含する最小の領域である．この凸包を超凸多面体と考えたとき，この超多面体の面（多角形では辺）をファセットと呼ぶ．

1）ファセット（facet）：(d−1)次元の面（(d−1）面）で，d個の点で構成される．

2）部分ファセット（subfacet）：　(d−2)次元の面（(d−2）面）で，d−1個の点で構成される．

3）辺（edge）：　次元の数dに関わりなく，1次元の面（1面），2個の点で構成される．

4）点もしくは頂点（vertex）：　次元の数dに関わりなく，0次元の面（0面），1個の点を示す．

［命題1］点集合の部分集合を包含する凸包は束(lates）を構成している．1は全体集合を包含する凸包0は空の凸包である．

［命題2］凸包1に含まれる点と凸包2に含まれる点から構成される凸包は凸包1と凸包2に含まれる点を包含する．

［命題3］凸包1と凸包2を含む最小の凸包は凸包1の端点と凸包2の端点で構成される凸包である．

［命題4］凸包1と凸包2を含む最小の凸包は凸包1の端点の集合と凸包2の端点の集合の差集合で表される点から構成される凸包である．

［命題5］凸包（凸0）から端点（p1）を除いた凸包（凸1）は，p1とその隣接する端点で構成される凸包（凸x）に含まれる点と凸0からp1を除いた端点で凸1が構成される．（すなわち，凸包0からp1を除くことで新たに加わる点は凸xに含まれる点から選ばれる．）

［命題6］凸包1(凸1）から凸包k（凸k）の端点から構成された凸包（凸0）から凸0の端点p1を除いて得られる凸包は，p1が端点として含まれるもとの凸包i（凸i）に含まれるとすると，凸iから端点p1を除いて得られる凸包i'（凸i'）をもちいて凸1・・・凸i'・・・凸kから得られる凸包と同じである．

3.2 内点の省略

一般的に，包装法を含む凸包問題の解法は全点探索を基本としている．ゆえに，少なくとも凸包でありえない点集合を，計算量の少ない方法で省略すると，大幅な計算の効率化が期待できる．

凸包の頂点ではない点集合の大半は，このような$2d$個の点で構築される領域内に収まる．実際の処理においては，これらの点集合を省く処理を行うことが望ましい．

4 凸包に基づくファジィ回帰分析

(1)　拘束条件の削減

凸包の頂点を用いることにより，ファジィ回帰分析における線形計画問題の拘束条件を減少させることが可能である．

しかし，包装法の計算時間が減じた分を上回っていては意味がない．そこで，場合によっては包装法を用いない解法を行う必要性があるが，線形計画問題の解法の計算量と比較して，有効な適用範囲を導くことは2つの理由から非常に困難である．

まず，入力に対する計算量（ここでは主に計算時間）が必ずしも等価ではない点．これは線形計画問題の解法に多い特徴である．特にシンプレックス法は，解が求められない場合も考慮しなくてはならない．次に出力が予測困難である点．これは包装法など，凸包問題にかかる問題である．データ入力に対して，凸包の頂点の出力は一定ではない．

以上のことから，ある一定のデータ量に対しては，本稿で提案した手法を用いないほうが望ましい事もありうる．

(2)　再計算の簡便性

既存データに新規データが加えられる状況において，既存の凸包データを用いることで再計算が容易である．

分析の用法として，新規入力されたデータを既存のものに加えて分析する場合がある．凸包は点集合が存在する領域を，その部分集合で明示しているといえる．包装法によって凸包の頂点のデータが保持されている場合，新規入力されたデータが点集合の内部にあるか，外部にあるかを判断し，その判断でファジィ回帰分析を行うか是非を判断することができる．

また，再計算を要する場合においても，包装法のプロセスを経ずにm+1個の拘束条件での再計算が可能となる．包装法で再計算するにも，近傍の部分ファセットで再処理することで，容易に凸包を再計算できる．この利点は特に，リアルタイムな計算を要する場合に有効である．

新規データと凸包の関係を判定する手順は，近傍ファセットを求める手順と，距離を測る手順は同時に行うことが可能である．

参考文献

[1] F.P.Preparata, M.I.Shamos 著 浅野孝夫，浅野哲夫 訳：計算幾何学入門，総研出版，pp108-112, pp148-154 (1992)

[2] David Avis,今井浩，永井信介：計算幾何学・離散幾何学，朝倉書店，pp12-15 (1994)

［問い合わせ先］　和多田　淳三

大阪工業大学　工学部　経営工学科

〒535-8585　大阪市旭区大宮5－16－1

TEL 06-6954-4327　FAX 06-6952-6197

E-mail：watada@dim.oit.ac.jp

TF2−2

凸包に基づくファジィスイッチング回帰分析[1]

Switching Regression Analysis based on Convex Hull

○豊浦 由浩　　和多田 淳三

○Yoshihiro Toyoura　Junzo Watada

大阪工業大学

Osaka Institute of Technology

Abstract- Sometimes data should be analyzed by a regression model, even though the data are obtained out of several differed systems. In this case we should separate the data into groups, each of which comes from one system and analyze each of partitions of the data in the proper way.

J. C. Bezdeck has proposed a switching regression model based on both cluster analysis and regression analysis. In this paper, we propose Fuzzy Switching Regression Model based on a fuzzy regression model.

1 はじめに

与えられたデータが複数のシステムから生成したものである場合には，単一の回帰分析で処理すると潜在的なシステムの構造を表現したことにならない．しかしながら一般的にはその下に有るシステムが単数か複数かは先見的には与えられていない．このため，自動的に必要なモデル数を同定して，複数のデータ群に分割し，複数の回帰直線を引くことができれば非常に有効である．このための手法としてBezdeckはファジィクラスタリングの手法を適用したスイッチング回帰分析(Switching Regression Model : SRM)を提案してる．このBezdekのモデルは，混入した複数のシステムをクラスタリングおよび回帰分析を同時に行うFuzzy c-Regression Model(FCRM)である．また，中森らはBezdeckの方法を拡張している．

本論文では，与えられたデータを効率的に分離するために凸包の概念を導入する．GAによって分離されたデータ群の内で最も効率的な凸包を探索し，そのデータ分割に基づいてファジィ回帰式を探索する方法を提案する．

2 SRM

2.1 FCRM

SRMにはBezdekや中森によるモデルがあるが，ここではBezdekのモデルについて説明する．

いま，m組のデータセットSが得られたとする．

$$S=\{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \cdots, (\mathbf{x}_m, y_m)\}$$
$$\mathbf{x}'_j=[x_{j1}, x_{j2}, \cdots, x_{jn}](j = 1, 2, \cdots, m)$$

データセットSがc個のグループに別れて分布している場合，データセットSを1つのシステムから得られたデータとして分析すると正しい分析結果を得ることができない．この場合，c個のシステムについて分析する必要がある．

また，偏回帰係数β_iを用いてクラスターiに対する重回帰モデルf_iを

$$f_i(\mathbf{x};\beta_i) = x_1\beta_{i1} + x_2\beta_2 + \cdots + x_n\beta_{in} \qquad (1)$$

とする．

重回帰モデルf_iとデータD_iの誤差をE_{ij}とするとFCRMの目的関数Zは，パラメータ$r(r > 1)$を用いると

$$Z = \sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{m} u_{ij}^r E_{ij} \qquad (2)$$

となる．FCRMでは目的関数(2)が最小になるようにデータセットSをファジィクラスター分析(c-means法)によってクラスタリングしている．

3 凸包アルゴリズム

d次元ユークリッド空間E^dにおける$(d-1)$次元の面をファセット，$(d-2)$次元の面を部分ファセットとする．

初期ファセットをFとし，Fの部分ファセットの1つをeとする．このeとF内にない有限点集合$P = \{p_1, \cdots, p_N\}$の各点でそれぞれ半平面を作ったとき，Fを含む半平面との角度が最大となる点が次のファセット(求めたいファセット)に含まれる点と考えることができる．

そのFを含む半平面と，eと求めるべきp'を含む半平面との角度を求めるためにそれぞれの角度θから$cot\theta$の大小を比較する．ベクトル$\mathbf{n}$をFに直交する

[1]本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(C-2)(Grant No.11680459)の助成を受けた．

単位ベクトルとし，ベクトル$\mathbf{a}$をeとベクトル$\mathbf{n}$に直交する単位ベクトルとする．

p_1と任意の点p_kで成すベクトルを$\mathbf{v}$とするとき，$\mathbf{v}\cdot\mathbf{a}^T/\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}^T$が最大となる$p_k$が求めるべき点ということになる．

(1) ρの計算

$cot\theta$は

$$cot\theta = -\frac{|\overline{up_1}|}{|\overline{uv}|} = \frac{\mathbf{v}_k\cdot\mathbf{a}^T}{\mathbf{v}_k\cdot\mathbf{n}^T} = \rho_h \tag{3}$$

で与えられる．ここから，$\rho_h = \max\rho_k$となるものを選ぶ．

(2) 初期ファセットの計算

$r = 1$(初期化)：x_1座標で最小の点p_1'を決定する．点p_1'は初期ファセットを構成する1点である．

初期化の段階で求められる支持超平面π_1は，ベクトル$\mathbf{n}_1 = (1,0,\cdots,0)$($x_1$座標方向)に直交して，$p_1'$を通るように定められる．

r=2：$\mathbf{n}_1$に対して直交し，座標方向$x_3,x_4,\cdots,x_d$にも直交する．ベクトル$\mathbf{a}_2$を求める．こうして求まった$\mathbf{a}_2$と$\mathbf{n}_1$に対して包装法を用いる．

r：$\mathbf{n}_{r-1}$に対して直交し，座標方向$x_{r+1},\cdots,x_d$にも直交し，さらにベクトル$\overrightarrow{p_1'p_2'},\cdots,\overrightarrow{p_1'p_{r-1}}$にも直交するベクトル$\mathbf{a}_r$を求める．こうして求まった$\mathbf{a}_r$と$\mathbf{n}_{r-1}$に対して包装法を用いる．

また，$\mathbf{n}_r$については，

$$\mathbf{n}_r = \frac{-\mathbf{a}_r + \rho\mathbf{n}_{r-1}}{|-\mathbf{a}_r + \rho\mathbf{n}_{r-1}|} \tag{4}$$

によって求めることができる．

4 凸包に基づくFSRM

BezdekによるSRMでは，ファジィクラスター分析によりクラスタリングを行っているFCRMである．

統計による回帰モデルでは，最小自乗法によってモデルを求めていることからクラスター分析による結果を用いることが可能である．しかし，ファジィ回帰モデルでは観測システムのもつ可能性を表現しようとするため，混在したデータ分布を把握しそれぞれの可能性に分割しなければならない．また，ファジィクラスター分析により分割されたデータをそのまま適用するとモデルが大きく歪んだ形状になる．

ファジィ回帰モデルをSRMに適用するには，1つのクラスタと1つのデータ分布を対応付ける必要がある．また，そのような分布の中から幅が最小となるようにデータを分割しなければならない．

本研究においては，各データ分布に分割するために凸包を適用する．凸包はデータの分布状態を把握し，用いるデータ数減らしすることが目的である．すなわち，本研究ではデータ分布を評価する指標として分割されたデータの長軸とそれに直交する短軸の比を用いる．

遺伝的アルゴリズムにおいて，各個体は各データ分布への帰属を示すようコーディングし，その評価値は各分布の長軸と短軸の比により計算される．

個体jの評価関数J_jは，第iデータ分布に関する長軸$l_i^{(j)}$，その長軸に直交する短軸$s_i^{(j)}$を用いると

$$J_j = \sum_{i=1}^{c}\frac{s_i^{(j)}}{l_i^{(j)}} \tag{5}$$

と表現できる．

上に示す評価関数(5)を用い，遺伝的アルゴリズムによりデータを各データ分布に分割する．分割されたデータにそれぞれファジィ回帰モデルを当てはめる．

5 おわりに

本研究では，効率的に最適なクラスター分割を探索するために遺伝的アルゴリズムを適用し，複数のシステムから出力されたデータをそれぞれのシステムのデータに分離できることを示した．

また，それぞれの可能性にファジィ回帰モデルを適用することでFuzzy Switching Regression Modelを構築できることを示した．

参考文献

[1] David Avis，今井浩，永井信介，“計算幾何学・離散幾何学”，朝倉書店，1994

[2] F.P.Preparata and M.I.Shamos，“計算幾何学入門”，総研出版，1994

[3] R.J.Hathway and J.C.Bezdek，“Switching Regression Models and Fuzzy Clustering”，IEEE Transactions on Fuzzy Syztems，Vol.1，No.3，pp.195–204，1993

[4] 豊浦由浩，藪内賢之，和多田淳三，“ファジィスイッチ回帰の遺伝的モデル”，バイオメディカル・ファジィ・システム学会第11回年次大会講演論文集，pp.91–94，1998

[問い合わせ先]

和多田　淳三

大阪工業大学　工学部　経営工学科

〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1

TEL 06-6954-4327　FAX 06-6952-6197

E-mail:watada@dim.oit.ac.jp

TF2−3

ショケ積分エージェント・ネット同定による生活様態理解

Home life state understanding by identification of Choque integral agent network

中村 和男
Kazuo NAKAMURA
長岡技術科学大学 経営情報系
Department of Management Information Science, Nagaoka University of Technology

Abstract : The author has proposed a flexible information fusion mechanism in quasi-hierarchical network structure to extract macroscopic meaning or aggregated state information from observed multi-channel data. The proposed mechanism is called Choquet integral agent network (*CHIAN*) which has the feature that the aggregation operation covers either weighted sum or complex logical operation and the network works like a neural network (NN) while each agent could stand for a meaningful state. For applying the method to practical problems the author has also proposed a conceptual method to estimate the fuzzy measures by learning process. To enhance the applicability of the identification method this paper proposes a revised algorithm by using an extended concept of a back propagation method in NN. Then the method is employed for estimating macroscopic states of home life behavior through observed data by multi-modal sensing system set in a living space.

1. はじめに

居住空間における実生活様態を日常的に計測・理解するため多元センシングと柔軟な情報融合機構を組み合わせたシステム技法を提案[1] [2]してきた。そこでは、多元センシングにより取得した光、音、人体などに関する多様な情報からマクロな生活行動や生活環境状態を推測してゆけるような柔軟な情報融合機構として、多チャンネル情報をショケ積分により統合するユニットをネットワーク化するショケ積分エージェントネット (*CHIAN*) を導入した。図1はその概念図である。この機構を実システムとして具体化するためにはその形成法を確立する必要があり、情報融合に関する先験的知識の埋め込み法とセンシング情報と生活行動の見本過程を教師データとして学習的に同定して行く方法[3]を検討してきた。

本報告では現実に居住空間に設置された多元センシングシステムによる多元データから生活様態を推定する言語的な推論則のネットワークを検討し、それを埋め込むことを前提とした *CHIAN* による情報融合機構の同定アルゴリズムをより実用的なものに高める提案を行う。

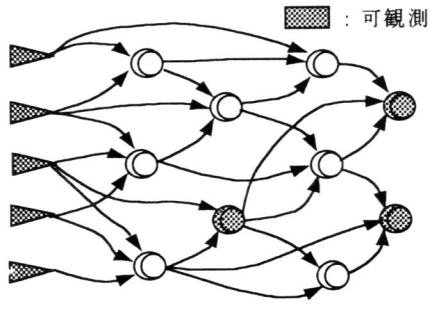


図1 ショケ積分エージェントネット(*CHIAN*)

2. ショケ積分エージェントネットと知識形成概念

各エージェントはセンシング情報の質的カテゴリへの該当度あるいは他のエージェントの出力値を複数個入力値として取り込み、有意味な生活様態要因としての該当度を出力するものとし、観測不可能なものがあってもよいとする（図1）。

(1) 1つのエージェントによるショケ積分

あるエージェントの多元入力チャンネルの全体集合 $S=\{s_1, s_2, \ldots, s_m\}$ 上のファジィ測度を $\mu: 2^S \rightarrow [0,1]$ とする。S 上の実数値関数 r: $S \rightarrow [0,\infty)$ を被積分関数（多元入力値）としたファジィ測度 μ によるショケ積分は、

$$y = (c)\int r(s)d\mu$$

$$= \sum_{p=1}^{m} (r(s_{(p)}) - r(s_{(p-1)}))\mu(A_{(p)}) \qquad \text{(1-a)}$$

$$= \sum_{p=1}^{m} r(s_{(p)})(\mu(A_{(p)}) - \mu(A_{(p+1)})) \qquad \text{(1-b)}$$

ただし、$r(s_{(1)}) \leqq r(s_{(2)}) \leqq \ldots \leqq r(s_{(m)})$、$A_{(p)}=\{s_{(p)}, s_{(p+1)}, \ldots, s_{(m)}\}$。

(2) ショケ積分エージェントネット (*CHIAN*)

*CHIAN*による階層的情報融合は図2のように数理表現できる。基本的には多変数間の統合的情報変換であり、システム全体としての多元入力ベクトル $\boldsymbol{u}$ を *CHIAN*に与えるとエージェント群内でネットワーク的情報伝播が行われエージェント群出力ベクトル $(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ が生起し、その内、可観測エージェント群の出力ベクトル $\boldsymbol{y}$ を外部から観測できると考える。

すなわち非可観測のエージェント群の出力ベクトル $\boldsymbol{x}$ はファジィ測度の集合 $\boldsymbol{\mu}_x$ を用いた $\boldsymbol{u},\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}$ のショケ積分と

して

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}; \mu_x) \quad (2)$$

と表される。同様に可観測エージェント群では

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}; \mu_y) \quad (3)$$

(3) *CHIAN* の知識形成法の基本的考え方

CHIAN を生活様態の推定機構として構成するには意味のある知識をネットワーク構造と各エージェントのファジィ測度に反映させなければならない。そのためには、システム構成者の先験知識を埋め込む手法、および学習的に知識を同定する手法が考えられる。

【先験的知識埋め込み】 多元センサモジュールの空間的分散配置による情報取得であることを活かして、時間的差分値・空間的相対値などへの変換情報の考慮、大まかなファジィ論理的統合表現の活用が有効である。

【融合機構の学習的形成処理】 先験的知識が明確に与えにくい場合には学習的同定による知識獲得が有用である。その場合、既得の同定結果を踏まえながら新たな教師データの積み上げで更なる学習を行ってゆくというアルゴリズムが必要になる。単一エージェントのファジィ測度の同定のみならず、多数のしかも複雑に絡み合った構造における各エージェントの学習的同定が必要になり、しかも可観測エージェントの出力のみが教師データとして与えられるとする。

単一エージェントにおいて入力群と出力の組($\{r(s)|s \in S\}$, y)がいくつか与えられたときに$\{\mu(A)|A \subset S\}$を学習的に同定する手法は既に提案してきた。そこでは(1-a)式を

$$y = C(r, \mu) = \sum_{p=1}^{m} \varphi_p \mu_p \quad (4)$$

とみなし観測値 $(\boldsymbol{r}_k, y_k)$に基づくファジィ測度の修正分を

$$\Delta\mu_i^{(k)} = \alpha \cdot (\varphi_i^{(k)} / \sum_j \varphi_j^{(k)}) \cdot \delta_k \quad (5)$$

$$\delta_k = y_k - C(\boldsymbol{r}, \mu) \quad (6)$$

で求める手法である。同様の考え方で(1-b)式を用いると、ファジィ測度が分かっているときに観測値 y_k を用いて、$\boldsymbol{r}_k$を学習的に推定することも出来よう。

図 2 のようなネットワークにおいて、多元入力データ $\boldsymbol{u}$ を*CHIAN*に与えるとエージェント群内でネットワーク的情報伝播が行われ可観測エージェント群のデータ $\boldsymbol{y}$ を外部に取り出せると考え、$(\boldsymbol{u},\boldsymbol{y})$の組をいくつか教師データとして与えられて、各エージェントのファジィ測度を求めるための基本的アルゴリズムを考える。

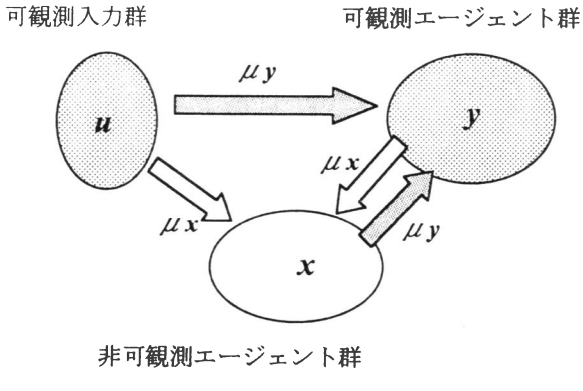


図2 *CHIAN*における多変数の関係構造

【基本的同定アルゴリズム】

図2による同定アルゴリズムを考える。$(\boldsymbol{u}_k, y_k)$, k=1,…,Nの組をデータとして与えられ、μ_x, μ_yならびに$\boldsymbol{x}_k$を学習的に推定する。

①初期の $\hat{\mu}_x^0$, $\hat{\mu}_y^0$ を仮設定する。

②k=1 と置く

③$(\boldsymbol{u}_k;\ \hat{\mu}_x^0,\ \hat{\mu}_y^0)$から前向きに $\hat{\boldsymbol{x}}_k^0$、$\hat{y}_k$ を推定する。

④$(\boldsymbol{u}_k, \hat{\boldsymbol{x}}_k^0;\ \hat{y}_k, y_k)$から $\hat{\mu}_y^1$ を同定する。

⑤$(\hat{y}_k, y_k;\ \hat{\mu}_y^0)$から後向きに $\hat{\boldsymbol{x}}_k^1$ を推定する。

⑥$(\boldsymbol{u}_k, y_k;\ \hat{\boldsymbol{x}}_k^0, \hat{\boldsymbol{x}}_k^1)$から $\hat{\mu}_x^1$ を同定する。

⑦収束するまで $\hat{\mu}_x^0 \leftarrow \hat{\mu}_x^1$, $\hat{\mu}_y^0 \leftarrow \hat{\mu}_y^1$、

$k = k+1$ (ただし if $k=N$, then $k=1$)と置き、③へ戻る。

3. 実生活場面のセンシングデータによる知識形成の検討

多元センシングシステムを実生活場面に設置してそのセンシングデータを検討することにより、それら情報に基づいて生活行動様態を推測するための知識の定性的(言語的) 表現を試み、それらを情報融合機構に埋め込む形態を考慮した学習的同定法の要件を検討した。

図 3 にはある世帯の和式の居間における多元センシング実験の状況を示しており、部屋の構造、家具・器具等の配置、模擬生活行動の移動軌跡を示している。またその行為系列を表1に示した。その結果、図4のようなセンサ群のデータが得られ、それらから生活行動の推測のための定性的知識表現を図5のように構成した。

各エージェント出力として室空間の「あるエリアでの滞在」、「あるエリアの通過」、「室内全体を動き回り」「TV作動」などを考えそれを各センサのレベル（例えば

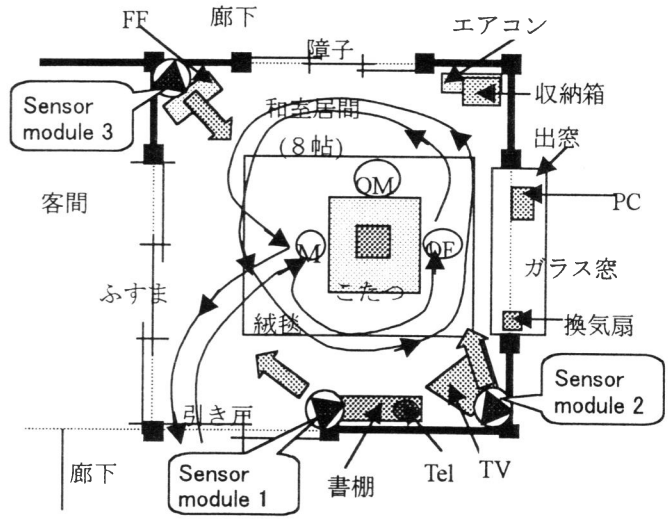
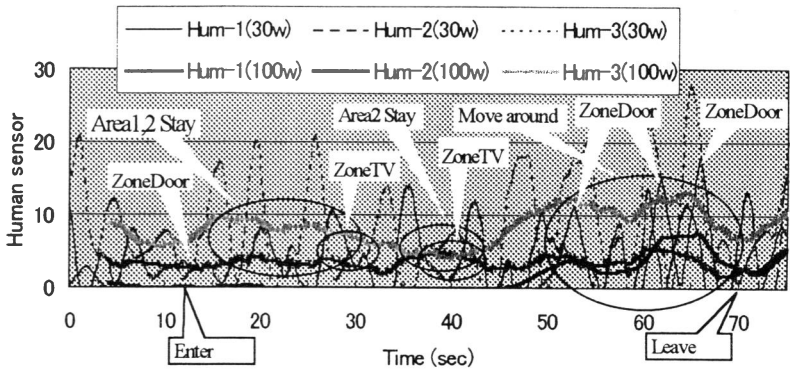


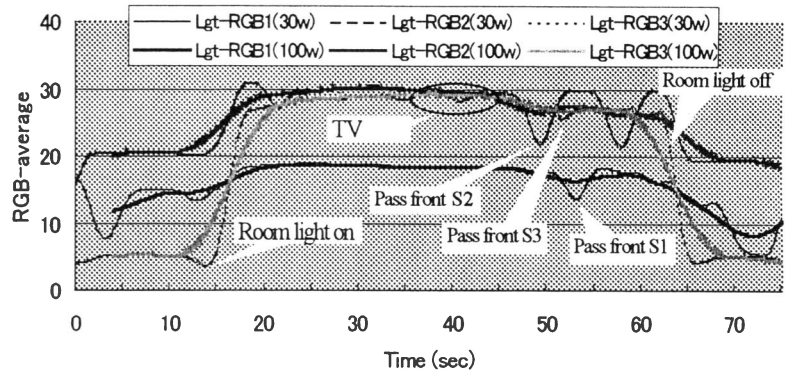
図3 計測された室空間の状況

表 1 実居住空間での模擬行動系列例

時間 (秒)	行　動
3	退室&ドア閉め
3 – 9	室外の会話
12	入室
12-14	M-位置への移動
13-15	独り言&点灯
15-23	OF-位置への移動
18	隣室からの音声
23-24	独り言& OF-位置への着席.
30	独り言
31-33	TV に体を伸ばす
34	TV オン
41,43,45	独り言
46	TV オフ
47	OF-位置での立ち上がり
48	隣室からの音声
48-53	A 位置への反時計方向移動
53-61	反時計回りの周回
59	隣室からの音声
63-65	M-位置での消灯
66	独り言
66-68	入口への移動
69-70	退室&ドア閉め
71-	人々入室 & 話し合い



(a) 人体センサ (30, 100 ステップ幅平滑処理後)



(b) 光センサ (30, 100 ステップ幅平滑化処理

図 4　実居住空間での模擬行動時の人体センサ、色センサ出力例

[H1Lm+]は「焦電センサ 1 信号の長期平滑化レベルが中位以上」を、[L3Rp+]は「カラーセンサ 3 の赤信号レベルの平均からの偏差が明らかに正である」こと）と他のエージェント出力を論理的 and (&)や or(/)で統合しているのである。これらから、上位階層への多段の情報融合の流れをもつ擬似的階層構造を前提とする学習的同定アルゴリズムを確立する必要のあることが分かる。

4．*CHIAN*の学習的同定アルゴリズムの洗練化

2節の基本アルゴリズムを、ニューラルネットにおける誤差逆伝播アルゴリズムに類似のものと考え、擬似階層構造に対して処理可能なように洗練化を図る。以下、非可観測、可観測エージェントを区別せずにその出力を x と置く。

(1) 多段階的情報融合機構への対応

再帰的自己参照も含みながら多段階的情報融合機構における各エージェントのショケ積分の導出表現は形式的には

$$x = f(x) \qquad (7)$$

となり、これを漸近的に求解するアルゴリズムを構成する。

$$J = |x - f(x)|^2 \;\rightarrow\; min \qquad (8)$$

なる x を求めることができれば多段階層構造や再帰的自己参照の存在する構造があってもその平衡解が求まる。最急降下法的に漸近して行く手法をとると、繰り返し数を t として、

$$\begin{aligned} x^{(t+1)} &= x^{(t)} - \beta\,(\partial J/\partial x)|_{x=x(t)} \\ &= x^{(t)} - \beta\,\{I - (\partial f(x)/\partial x)|_{x=x(t)}\}(x^{(t)} - f(x^{(t)})) \\ &= x^{(t)} + \beta\,\{(\partial f(x)/\partial x)|_{x=x(t)} - I\}(x^{(t)} - f(x^{(t)})_I) \end{aligned} \qquad (9)$$

```
[Area-1-Stay ]=[H1Lm+]
[Area-1-Pass]=[H1Ls]&[H1Sm+]
[Move around]=[Area-1-Stay]&[Area-2-Stay]
              &[Area-3-Stay]
……
[TV-work]
      ={[L3Rp+]/[L3Gp+]/[L3Bp+]}&[S2Mm+]
……
```

図 5　行動理解ルールの情報融合機構埋込み可能性

(2) 誤差逆伝播による測度の同定

(a) 各エージェントについて、その出力の影響先のすべてのエージェントの出力が直接・間接の観測に基づく推定誤差を見積れている場合、逆に当該のエージェント出力の誤差分を見積るものとする。これを繰り返してすべてのエージェントにおける、直接・間接の観測に基づく推定誤差の収束化を図る。

今、エージェント i に着目する。その出力先のエージェント群を $D(i)$ とすると、エージェント $j \in D(i)$ の出力の観測に基づく推定誤差を δ_j とすれば

$$\delta_i = \Sigma_{j \in D(i)}\{\delta_j \,\Delta\mu^j_{(p,p+1)}\}$$

$$=\Sigma_{j\in D(i)}\{\delta_j(\mu^j_{(p)}-\mu^j_{(p+1)})\} \quad (10)$$

ここに p, $p+1$ はエージェント j の入力チャンネルの部分集合 $A_{(p)}$ - $A_{(p+1)}$ にエージェント i からのチャンネルが含まれるとする。なお、便宜的に可観測エージェントにはその先に恒等エージェントがあり

$D(i)=\{j\}$ (シングルトン);

$\delta_j=d_j-x_j$ (d_jは観測値)

$\Delta\mu^j_{(p,p+1)}=1$

とする。他のエージェントについては $\delta_i=0$ を初期値としてすべての $\{\delta_i\}$ が収束するまで計算を繰り返す。

(b) 各エージェントについてそのエージェント出力の推定誤差に基づきそれを導出できるようなそのエージェントへの入力チャンネルのファジィ測度の修正分を求める。

$E=(1/2)\Sigma_{j\in O}(\delta_j)^2$

とするとエージェント i の入力チャンネルの第 p 部分集合に関するファジィ測度の修正は

$$\Delta\mu^i_{(p)}=-\eta(\partial E/\partial\mu^i_{(p)})$$

$$=\eta\,\delta_i\Delta f^i_{(p,p-1)}$$

$$=\eta\,\delta_i(f^i_{(p)}-f^i_{(p-1)}) \quad (11)$$

のように与えられる。これをすべてのエージェントについて行う。

5. モデル居住空間での模擬生活行動による予備的検討

モデル居住空間（6帖プレハブ、入口の反対コーナーに椅子・机・卓上灯を配置、中央天井に蛍光灯）における模擬生活行動センシング実験を行った。多元センサモジュールは光、音センサを一体化（人体センサを含まず）し、入口・通路・机部の3個所に配置し1/8秒間隔で収集した。

まず先験的知識として、各生活動作・行動に対応したエージェントの情報融合機構を与えた。例えば

【室内灯ON】＝［机照度M^+］∧［入口差分照度m^+］
∧通路差分照度m^+］∧[机差分照度S+]

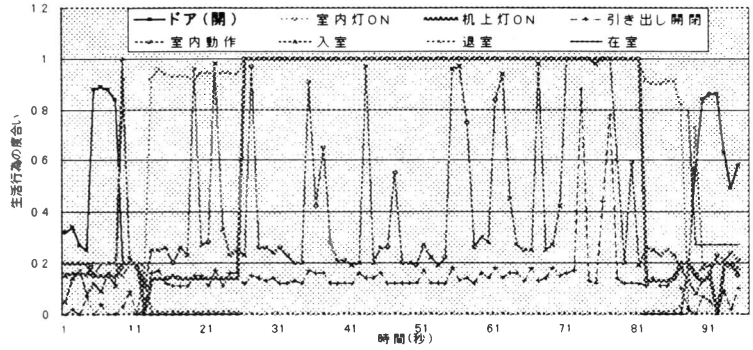
【退室】＝［入口照度NS(-t)］∧［入口照度S］
∧（～【室灯明】）

【 】：エージェント出力、∧：and、∨:or

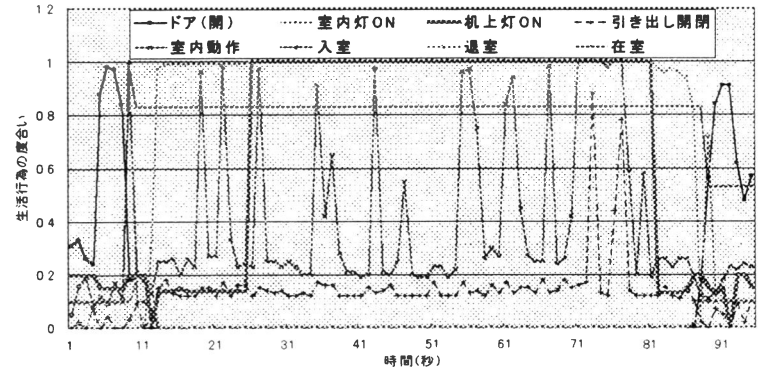
［ ］：センシング情報特徴、～：「否定」

NS：“負小”、M：“中”、m+：“相対的中以上”、(-t)：前時点

つぎにモデル行動として、扉を開けて入室直後、室内灯スイッチON、歩行移動後さらに机に着席、卓上灯ON後、本を朗読、引出し開閉、卓上灯OFF後、机を離れ、歩行移動後、入口へ戻り、室内灯OFF後、退室という行動を観測した。この時センシング情報から先験的知識を埋め込んだ*CHIAN*により生活動作を推定したのが図7(a)であり、モデル行動のうちドア開閉、在室、室内灯・卓上灯操作を観測できるとし教師データに見立ててファジィ測度を学習し、それによる*CHIAN*で再びに生活動作を推定したのが図7(b)である。先験的知識より洗練された知識が形成されているのがわかる。



(a) 先見的知識により形成された*CHIAN*による生活行動推



(b) 学習的知識形成による*CHIAN*を用いた生活行動推定例

図7　モデル居住空間実験での知識形成タイプと行動推定

6. おわりに

柔軟な情報融合を行えるショケ積分エージェントネットの学習的同定アルゴリズムを実生活様態の推定機構として活用可能なようにするための洗練化手法を提案した。実居住空間での生活様態センシングデータについて本手法の適用を重ねてアルゴリズムを確立して行きたい。なお本研究はNEDO人間行動適合型生活環境創出システム技術プロジェクトの支援を受けて行ったものである。

［参考文献］

[1] 中村和男, 小池清之：生活計測のための柔軟な情報統合機構　－基本的考え方－、第13回FSS、1997.

[2] 中村和男, 小池清之, 山田耕一：生活計測のための柔軟な情報統合機構－ショケ積分エージェントネット－、第14回FSS、1998.

[3] 中村和男、鈴木泉：ショケ積分エージェント・ネットの学習的同定、第15回FSS、1999.

＜連絡先＞
〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1
長岡技術科学大学経営情報系　中村和男
TEL (0258)47-9357　　FAX (0258)47-9350
Email　nakamura@kjs.nagaokaut.ac.jp

TF3−1

モーメント補正によるファジィ区間データからの一元配置分散分析

One-way layout ANOVA from Fuzzy Interval Data using Moment Corrections

小西 幹彦
Mikihiko Konishi
広島国際大学
Hiroshima International University

奥田 徹示
Tetsuji Okuda
大阪工業大学
Osaka Institute of Technology

浅居 喜代治
Kiyoji Asai
大阪府立大学名誉教授
Honorary Professor of Osaka Prefecture University

Abstract: For the Method to compare with the several populations, the analysis of variance, ANOVA, has been used. And, there is the one-way layout ANOVA which is used in the test of population means. On the other hand, there is a case that the human vagueness is included in the observed data. We treat these data as fuzzy interval data. But, in usual, the ANOVA cannnot treat thus data. So, in this paper, we investigate the method of one-way layout ANOVA from fuzzy interval data by using the proposed methods for fuzzy interval data. And, the usefulness of our method is investigated by the computer simulation.

1 はじめに

データを観測する場合，得られるデータは常に正確な値であるとは限らず，あいまいさを含む形でデータが観測されることもある．また，あいまいさを含めた形で観測されたデータでも，本来はある1点を示すデータであるが，観測条件などによりその1点が正確に観測できなかったという場合も考えられる．そこで，あいまいさを含むデータから正確なデータを処理した場合と同程度の結果を得ることができれば，有用であると思われる．

一方，いくつかの母集団を比較する方法に分散分析があり，母平均の検定として一元配置分散分析が用いられている．しかし，一元配置分散分析はあいまいさを含むデータを取り扱うことは考慮されていない．そこで，本研究ではあいまいさを含むデータから一元配置分散分析を行う方法を検討する．そして，正確なデータを用いて得られる結果と比較し，本手法の有効性を検討する．

2 ファジィ区間データ

通常の観測では，明確に示される値 x^0 がデータとして観測され，従来の統計解析ではこの値を用いて処理が行われる．しかし，観測条件などの問題により，x^0 を正確に観測することが難しい場合も考えられる．このような場合，適当な幅を持つ区間データとして観測すれば，観測が若干容易になると考えられるが，通常の区間では境界が明確に示されるため，境界付近で発生したデータに対しては，その値を正確に観測して境界値との比較により属する区間を判断しなければならない．そこで，本研究では [1] で提案されているような，境界のあいまいなファジィ区間データを取り扱うことを考える．

ファジィ区間データは，区間 H_i の中心値を x_i としてその両側に大きさ $h/2$ の幅を持つ区間 $H_i = [x_i - h/2, x_i + h/2]$ で表される区間データで，隣り合う区間 H_{i+1} の中心値 x_{i+1} と $x_{i+1} = x_i + h/2$ の関係にある．したがって，2つの区間 H_i, H_{i+1} には重複する範囲があり，境界を明確に示すことのできないファジィ区間となる．そこで，区間 H_i として観測されたファジィ区間データを H_i 上で定義されるファジィ事象 χ_i で表すことにする．なお，本研究ではファジィ区間データ χ_i のメンバシップ関数を

$$\chi_i(x) = \max\left\{0, 1 \wedge \left(-\frac{1}{2e}|x| + \frac{h}{8e} + \frac{1}{2}\right)\right\} \quad (1)$$

とする．このメンバシップ関数は，H_i の中心値 x_i について $\chi_i(x_i) = 1$ となる台形型メンバシップ関数である．ただし，e は台形の形状を表すパラメータで $0 < e \leq h/4$ である．また，式 (1) は $x = 0$ を中心とするファジィ区間データのメンバシップ関数で，x_i を中心とするファジィ区間データ χ_i のメンバシップ関数は $\chi_i(x) = \chi(x - x_i)$ となる．

表 1: 一元配置分散分析のデータ

水準	A_1	$\cdots$	A_i	$\cdots$	A_p
	x_{11}	$\cdots$	x_{i1}	$\cdots$	x_{p1}
	x_{12}	$\cdots$	x_{i2}	$\cdots$	x_{p2}
	≀		≀		
データ数	n_1	$\cdots$	n_i	$\cdots$	n_p
標本平均	$\overline{x}_1$	$\cdots$	$\overline{x}_i$	$\cdots$	$\overline{x}_p$
全体の平均	$\overline{x}$				

3 ファジィ区間データによる一元配置分散分析

一元配置分散分析は，表 1のようなデータを取り扱い，すべての水準の平均が等しいとみなせるかどうか，つまり，帰無仮説 $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \cdots = \mu_p$ に対する検定である．なお，このデータはすべての水準において分散が等しい正規分布に従うと仮定される．そして，すべてのデータに対する残差平方和を分解し，

$$\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij}-\overline{x})^2 = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij}-\overline{x}_i)^2 + \sum_{i=1}^{p} n_i(\overline{x}_i-\overline{x})^2 \quad (2)$$

とする．これは

全変動 (S_T) = 水準内変動 (S_E) + 水準間変動 (S_A)

となっている．また，

$$F = \frac{S_A/(p-1)}{S_E/(n-p)} = \frac{V_A}{V_E} \quad (3)$$

とすれば，Fは帰無仮説 H_0 の下で自由度 $(p-1, n-p)$ の F 分布に従う．このことを利用して，一元配置分散分析では等平均の検定がおこなわれる．なお，分散分析の結果は表 2のような分散分析表にまとめられる．

ところで，これまでに提案されているファジィ区間データの処理方法は，ファジィ区間の中心値を代表値とし，この代表値を用いた処理結果に対して補正を加える形となっており，様々な統計的手法へ応用されている ([2] など)．本研究でも同様に，代表値の処理結果に対して補正を加える形で分散分析を行なう方法を考える．

表 2: 分散分析表

変動要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
水準間変動	S_A	ν_A	V_A	F
水準内変動	S_E	ν_E	V_E	

まず，分散分析は表 2を作成することになるが，データから求められる値は水準間変動の平方和 S_A と水準内変動の平方和 S_E である．そして，これらの値と自由度を用いて F 値が求められるが，自由度はデータに含まれるあいまいさには依存しない．そこで，S_A と S_E をファジィ区間データの代表値から求められれば，分散分析が可能と考えられる．なお，データはすべての水準において分散が共通であることから，すべての水準においてファジィ区間の幅 h が同じであるとする．

ところで，これまでの研究 ([1] など) で明らかにされているように，ファジィ区間データにより得られる分散，つまり，2 次のモーメントには偏りが生じる．そこで，この偏りを取り除く補正量を Δ とする．なお，すべての水準でファジィ区間の幅 h を等しいとしていることから，補正量 Δ も一定となる．そして，式 (1) のメンバシップ関数に対する補正量は

$$\Delta = -\frac{h^2}{3}\left(\frac{1}{16}+\frac{e^2}{h^2}\right) \quad (4)$$

となる．

次に，S_T 及び S_E の期待値を求めれば，

$$E\{S_T\} = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i} E\{(X_{ij}-\overline{X})^2\} = (n-1)(\sigma^2+\Delta) \quad (5)$$

$$E\{S_E\} = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i} E\{(X_{ij}-\overline{X}_i)^2\} = \sum_{i=1}^{p}(n_i-1)(\sigma_i^2+\Delta) \quad (6)$$

が得られる．そこで，観測されたファジィ区間データから S_T 及び S_E を求める場合，

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij}-\overline{x})^2 \quad (7)$$

表 3: シミュレーション条件

	x_1	x_2	x_3	x_4
データ数	100	80	100	120
平均	50.0	48.0	50.0	52.0
標準偏差	10.0			
区間の幅	20.0			

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{1}{n_i - 1}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij} - \overline{x}_i)^2 \tag{8}$$

として，

$$\begin{aligned} S_T &= (n-1)(\hat{\sigma}^2 + \Delta) \\ &= \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij} - \overline{x})^2 + (n-1)\Delta \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} S_E &= \sum_{i=1}^{p}(n_i - 1)(\hat{\sigma_i}^2 + \Delta) \\ &= \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij} - \overline{x}_i)^2 + (n-p)\Delta \end{aligned} \tag{10}$$

とすればよい．また，式 (2) の関係より

$$S_A = S_T - S_E = \sum_{i=1}^{p} n_i(\overline{x}_i - \overline{x})^2 + (p-1)\Delta \tag{11}$$

となる．つまり，ファジィ区間データから分散分析を行なう場合，式 (2) の関係は

$$\begin{aligned} &\left\{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij} - \overline{x})^2 + (n-1)\Delta\right\} \\ &\quad = \left\{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij} - \overline{x}_i)^2 + (n-p)\Delta\right\} \\ &\quad + \left\{\sum_{i=1}^{p} n_i(\overline{x}_i - \overline{x})^2 + (p-1)\Delta\right\} \end{aligned} \tag{12}$$

となる．

4 シミュレーションによる検討

ここで，本手法の有効性をコンピュータシミュレーションにより数値的に検討する．

まず，4つの水準を考え，表3の条件でそれぞれ独立に乱数を発生させ，これを正確に観測できた場合に得られるデータ (実データ) とする．そして，これらのデータを [3] に示されている方法によりファジィ区間データに変換し，3で述べた方法を用いて一元配置分散分析を行う．なお，ここでは次の 3 つの方法により計算を行う．

(a) 実データから通常の方法で計算

(b) 代表値から通常の方法で計算

(c) 代表値から補正を考慮して計算

つまり，(a) は本来得られるべき結果であり，(b) 及び (c) はデータにあいまいさを伴った場合の結果となる．しかし，(b) は代表値を通常の値として処理しているため，データに含まれるあいまいさを無視した誤った処理方法となっている．そして，(c) が本研究で提案している処理方法である．なお，(a) を '実データ'，(b) を '代表値'，(c) を '本手法' と表すことにする．そして，'実データ' の結果を基準として '代表値' 及び '本手法' の結果から本手法の有効性を数値的に検討する．

以上の条件の下で行ったシミュレーション結果を，表 4に示す．この結果より，最終的な判断として用いられる F 値は，'代表値' よりも '本手法' の方がかなり '実データ' の値に近くなっている．そして，この条件では棄却限界は $F(3,396)$ となるが，これを $F(3,\infty)$ として数値表より求めると，表5となる．したがって，表4の場合，有意水準1.0%においては '代表値' のみ検定結果に相違が生じることになる．また，F 値を求める過程において得られるすべての値について，'代表値' によるものは '実データ' に対して偏りが生じているが，補正量を用いた '本手法' は偏りが取り除かれ，かなり近似できていることがわかる．

次に，平均的な視点から検討するために，表 3の条件で同様のシミュレーションを 1000 回行い，それぞれの値の平均を算出すると，表 6 のようになった．まず，F 値であるが，'本手法' は '代表値' に比べ '実データ' に対してかなり近似されていることがわかる．なお，これらの結果ではいずれの方法でも検定結果は同じとなるが，'本手法' は '実データ' に対する近似精度が高いため，F 値が棄却限界に近い場合でも最終的な判断を誤る可能性は低いものと思われる．

表 4: シミュレーション結果

(a) 実データ

統計量

	x_1	x_2	x_3	x_4
平均	51.42	47.67	48.82	51.69
標準偏差	10.38	8.64	9.77	9.83

分散分析表

	平方和	自由度	平均平方	F 値
水準間変動	1115.1	3	371.71	3.9243
水準内変動	37509.1	396	94.72	

(b) 代表値

統計量

	x_1	x_2	x_3	x_4
平均	51.50	48.00	48.70	52.00
標準偏差	11.32	9.14	10.41	10.13

分散分析表

	平方和	自由度	平均平方	F 値
水準間変動	1169.0	3	389.67	3.6561
水準内変動	42206.0	396	106.58	

(c) 本手法

統計量

	x_1	x_2	x_3	x_4
平均	51.50	48.00	48.70	52.00
標準偏差	10.85	8.55	9.90	9.60

分散分析表

	平方和	自由度	平均平方	F 値
水準間変動	1137.8	3	379.25	3.9438
水準内変動	38081.0	396	96.16	

表 5: $F(3,\infty)$ の棄却限界

有意水準	5.0%	2.5%	1.0%	0.5%
棄却限界	2.605	3.116	3.782	4.279

5 おわりに

本研究では，これまでに提案されている補正を用いて，ファジィ区間データから一元配置分散分析を行う方法について検討した．そして，その方法を用いてコンピュータシミュレーションを行い，有効性の検討を行った．その結果，本研究で提案した補正量を用いる方法では，ファジィ区間データからも正確なデータが観測された場合と同等の結果が得られることが明らかとなった．

表 6: シミュレーション結果(1000 回の平均)

(a) 実データ

統計量

	x_1	x_2	x_3	x_4
平均	50.00	47.96	50.03	52.03
標準偏差	9.98	9.98	9.97	10.00

分散分析表

	平方和	自由度	平均平方	F 値
水準間変動	1125.9	3	375.28	3.7662
水準内変動	39689.3	396	100.23	

(b) 代表値

統計量

	x_1	x_2	x_3	x_4
平均	50.01	47.97	50.03	52.03
標準偏差	10.50	10.51	10.49	10.54

分散分析表

	平方和	自由度	平均平方	F 値
水準間変動	1151.7	3	383.91	3.4804
水準内変動	43954.1	396	111.00	

(c) 本手法

統計量

	x_1	x_2	x_3	x_4
平均	50.01	47.97	50.03	52.03
標準偏差	9.99	10.00	9.98	10.03

分散分析表

	平方和	自由度	平均平方	F 値
水準間変動	1120.5	3	373.50	3.7413
水準内変動	39829.1	396	100.58	

参考文献

[1] 奥田, 古殿, 浅居: ファジィ観測データに基づく統計的推定, 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No. 5, pp.564–571 (1990)

[2] 小西, 田中, 奥田, 浅居: ファジィ区間データによる χ^2 適合度検定, 日本経営工学会誌, Vol. 49, No. 4, pp.236–253 (1998)

[3] 小西, 奥田, 古殿, 浅居: AIC によるファジィ区間データからの統計的モデル選択, 日本ファジィ学会誌, Vol. 8, No. 4, pp.706–719 (1996)

[問い合わせ先]

〒 724-0695 広島県賀茂郡黒瀬町学園台 555-36
広島国際大学 医療福祉学部 医療経営学科
小西 幹彦
TEL : 0823-70-4648, FAX : 0823-70-4612
E-mail : m-konisi@hw.hirokoku-u.ac.jp

TF3−2

GPSを用いた天気予測ニューラルネットワークシステムの基礎的研究

A Foundamental Study of Neural Network System for Conjecturing Weather Using GPS

田中　成典*　　古田　均*　　内野　幸生**

Shigenori Tanaka　　Hitoshi Furuta　　Kousei Uchino

*関西大学総合情報学部，**関西大学大学院総合情報学研究科

*Faculty of Informatics, Kansai University, **Graduate School of Informatics Kansai University

Abstract

Recently, Global Positioning System is used in the field of survey engineering. But, the measure of GPS contains an error of observation, because of being the delayed microwave. The delayed microwave is caused by water vapour. We noticed that the water vapour influenced GPS data. In present study, we develop the system for identifying weather using the GPS data.

1　まえがき

汎地球測位システム（GPS：Global Positioning System）は，船舶や航空機などが運行中に位置を計測するための衛星航法システムである．近年，GPSは測量分野で活用[1]されている．GPS測量は，高精度に2点間の斜距離，すなわち基線を測る事ができる．しかし，その計測結果には，電波の遅れによる観測値の誤差が内在している．観測の誤差要因として，衛星の位置，受信機の時計，衛星に積まれている時計や，電離層，マルチパス，そして大気中の水蒸気などによる電波遅延が考えられる．水蒸気以外の誤差要因に関しては，ある程度誤差を除去することができる．ただし，水蒸気に関しては，それが変幻自在な動態のため，現在の技術では完全な把握はできていない．

そこで，本研究では，水蒸気によって変化するGPSの観測データに内在する誤差[2]を用いて，ニューラルネットワーク技術を併用することにより天気予測を逆同定するシステムの研究開発を目指す．さらに，誤差と天気を関係付けたネットワークの精度向上を模索する．

2　予備実験計画

本研究では，本実験を遂行するための準備段階として，GPSデータから天気を逆同定するパイロットシステムの構築（図1）を試みる．

局所地域の天気短期予測を行うに当たって，必要となるデータ項目を検討する必要がある．そこで，本研究では，GPSデータと天気予測の逆同定についての予備実験（図2）を行う．まず，約半年間を通じて，同時刻同地点のGPS測量を実施する．次に，水蒸気によるGPS電波の遅延により生じる斜距離のばらつき誤差と，天気との関係をニューラルネットワークで関係付ける．さらに，GPSデータと測量時の天気との逆同定を検証する．実験に用いるデータは，約半年間を通じてほぼ毎日，午後2時から1時間測量を実施することによって収集する．2点間の斜距離，基線ベクトルであるdx,

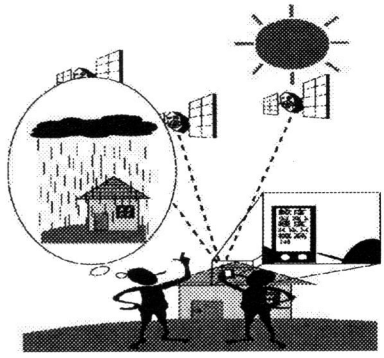


図1　研究概要図

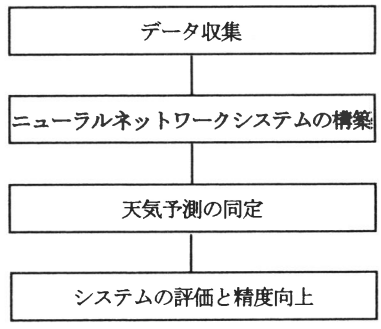


図2　予備実験の工程

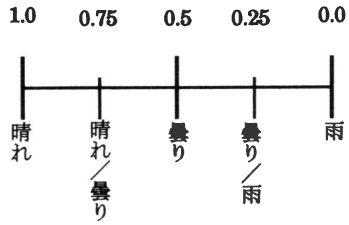


図3　天気のファジィ量

dy, dz, dh, 斜距離の品質精度を示すレシオ，衛星配置指数であるPDOPと，測量時の天気について記録し，これらのデータを用いてパイロットシステムの開発を行う．

3　天気予測システムの構築

入力項目に，測量結果である斜距離，dx, dy, dz, dh, レシオ，PDOPを，そして出力項目に，測量時の天気情報を用いて，ニューラルネットワーク技術によりそれらを関連付ける．ネットワークは，階層型ネットワークを採用する．入力データは，全て正規化した値とした．また，出力データは，図3に示すような晴れから雨の5段階で天気のファジィ量とした．

実験データは，1998年11月11日から1999年5月26日までの約半年間で収集した121データを用いて，項目毎のデータ数を統一してシステムを構築[3]した．天気項目ごとのデータ数を表1に示す．雨項目のデータ数が他の項目に対して少ないため，雨のデータ数にならって天気項目のデータ数を統一した．その結果，学習データパターンと推定データパターンを対とした3組のデータパターンを用いた．

4　天気予測結果

天気のファジィ量を5段階にして，全天気項目での解析を行った．

推定結果を図4(a)-(c)に示す．縦軸は実測による天気ファジィ量を，横軸には推定結果のファジィ量を取った．また，平均二乗誤差と相関係数からシステムの推定精度を併記した．

表1　項目毎のデータ数

天気の評価	実測データ数	推定データ数
晴れ	39	7
晴れ/曇り	36	7
曇り	30	7
曇り/雨	9	7
雨	7	7
合計	121	35

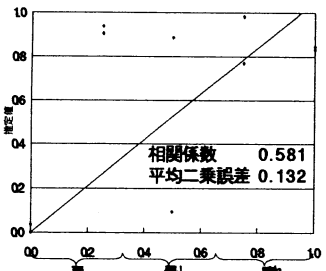


図4(a)　推定結果

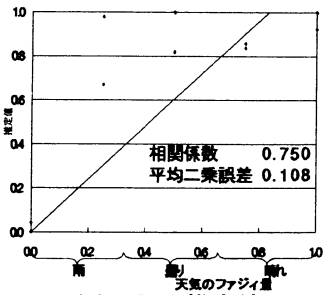


図4(b)　推定結果

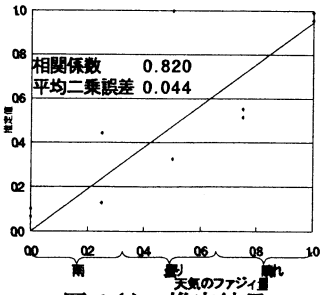


図4(c)　推定結果

5　システムの評価

解析結果から約60%の割合でGPSデータから天気のファジィ量を逆同定することができるとわかった．特に，雨と晴れの項目については，ある程度良い結果が得られた．しかし，曇りを含む項目（曇り／雨，曇り，曇り／晴れ）に関しては，あまり良い結果が得られなかった．

6　あとがき

本研究では，予備実験によって収集したデータを用いて天気予測パイロットシステムの開発を行った．その結果，GPSデータからある程度の天気予測が可能であることがわかったが，三つの新たな課題が見い出された．まず，データ数が少ないため，今後も継続して観測を行う必要がある．次に，予備実験においては，およそ100メートルの基線を計測したが，基線の解析結果のばらつきが非常に小さかった．今後の本実験では，データに差を出すために，約600メートルの基線を考慮し計測を行う予定である．最後に，GPSデータだけから天気予測を行うには，限界があると考えられるため，天気を構成している気象要素（気温，気圧，湿度，風向，風速）についてもデータ収集を行う予定である．本実験では，さらに精度の良いシステムを構築することができると考える．なお，本研究は，平成11年度関西大学総合情報学部「卒業研究2」の補助を得た．

参考文献

[1]土屋 淳，辻 宏道：やさしいGPS測量，日本測量協会，1997.

[2]大谷 竜：GPS気象学への応用，日本航海学会，1999.

[3]田中 成典：建設技術者のための知識情報処理の実践，関西大学出版部，1999.

[問い合わせ先]

〒569-1095　大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1

(TEL) 0726-90-2404

(FAX) 0726-90-2491

TF3－3

デジタル画像を用いた写真測量システムの基礎的研究

A Foundamental Study on Photogrammetry System by Digital Pictures

村木 広和* 田中 成典** 古田 均** 北川 悦司* 野田 肇**
Hirokazu Muraki Shigenori Tanaka Hitoshi Furuta Etsuji Kitagawa Hajime Noda
*関西大学大学院総合情報学研究科，**関西大学総合情報学部
*Graduate School of Informatics, Kansai University, **Faculty of Informatics, Kansai University

Abstract

With an advance of computer technologies, 3D CAD and CG have been noticed in recent years. This tendency, at the same time, leads the increase of interest toward a photogrammetry technique which is used to acquire 3D data from 2D digital pictures. By using this technique, the measuring an object from a distance which had been difficult, but now can be easily occured.

In present study, we have established a new technology by using automatic decision method of best passpoints. This technique offers anyone to obtain 3D data easily.

1 はじめに

近年，コンピュータの発展に伴い３次元の CAD や CG が注目されてきた．特に，デジタルカメラの発展に伴い，２次元の画像データを用いて，３次元データを取得するための写真測量技術に関心が高まってきた．この技術を用いることにより，従来，計測が困難であった物体までの距離や物体自身の高さなどを簡単に求めることが可能となる．

本研究では，デジタルカメラの種類や撮影方法に拘らず，誰もが精度の高い３次元データを容易に取得することができる写真測量システムの研究開発を目指す．

2 システムの概要

航空写真を用いた空中写真測量では，撮影高度の約1／5000の誤差で地上の位置を計測することができるまでに向上している．しかし，地上写真測量では，同様の手法を用いた場合，精度の高い３次元データを取得することが困難である．これは，撮影写真の被写界深度が大きいことに起因すると考えられる．そこで，本システムでは，既報[1][2]で体系化されている立体写真測量の共面条件を用いて投影中心を結ぶ方法（図１）をベースに，自動的に最適なパスポイントを決定することによって被写界深度の計測誤差を少なくする手法を考案する．

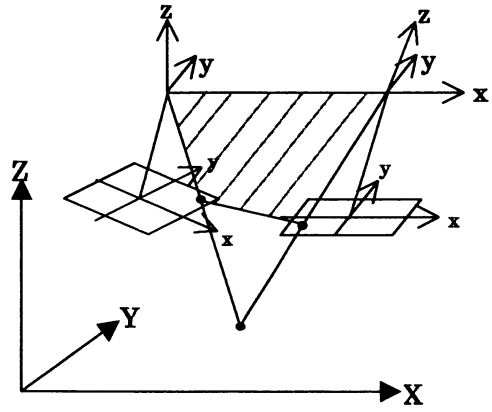


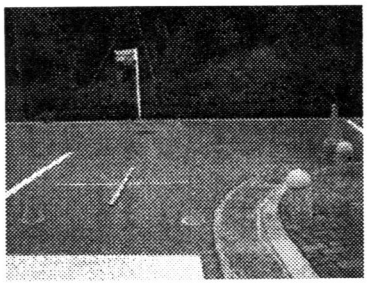
図１ 共面条件を用いて投影中心を結ぶ方法

3 従来の写真測量を用いた解析

写真測量では，基準点や距離などを測るためのパスポイント（計測パスポイント）のみでは精度の高い３次元データを取得することはできない．精度の高い３次元データを取得するためには，写真全体にバランス良くパスポイントを取る必要がある．２枚の近接地上写真（図２）を用いて，パスポイントをバランス良く９点取り，従来の写真測量の方法によって地物の計測を行った．その結果，表１に示すように，精度の高くない３次元計測データしか取得できなかった．そこで，パスポイントが多くても精度が向上しないという点に着目し，自動的に最適なパスポイントを決定することにより被写界深度の計測誤差を少なくできる方法を考案する．



(a)左から撮影した写真



(b)右から撮影した写真

図２ 近接地上写真

表１ 解析結果（従来の写真測量）

パスポイント間	実測値(m)	解析値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
点1-点2間	1.66	1.55232	-0.10768	-6.48684
点2-点3間	9.15	2.57675	-6.57325	-71.83879
点3-点4間	1.63	0.77108	-0.85892	-52.69463
点1-点4間	9.12	2.35296	6.76704	74.19999

4　全解探索を用いた解析

最適なパスポイントを決定することは，専門家でもかなり困難である．そこで，本システムでは，パスポイントを 10 点前後取ることによって自動的に最適なパスポイントの組み合わせを決定する手法を考案した．まず，1）写真の４隅を取る．ただし，基準点や計測パスポイントが４隅にある時は採用しない．次に，2）写真の４隅の中点を取る．ただし，基準点や計測パスポイントが４隅の中点にある時は採用しない．最後に，3）前項の 1）と 2）で採用した点を加えて合計 10 点前後になるように，基準点や計測パスポイント以外の点にパスポイントを取る，といった３つの手続きに従ってパスポイントを決定する．ｎ点のパスポイントを用いた標定計算では，2^n-1 通りの組み合わせから，絶対標定により求められた基準点の座標と最初に与えられた基準点の座標との残差が最小となる組み合わせを見い出し，それを最適解とした．システムの流れを図３に示す．

従来の写真測量を用いた解析と同様に，図２の写真を用いてパスポイントを９点取り，自動的に最適なパスポイントを決定する手法を用いた．その結果，表２に示すように，平均誤差が数パーセントに収まり，高精度の３次元データを取得することができた．

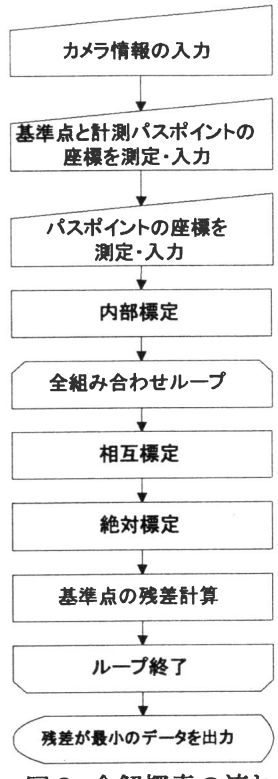


図３ 全解探索の流れ

表２ 解析結果（全解探索を用いた写真測量）

パスポイント間	実測値(m)	解析値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
点1-点2間	1.66	1.74311	0.08311	5.00639
点2-点3間	9.15	9.19218	0.04218	0.46101
点3-点4間	1.63	1.72057	0.09057	5.55665
点1-点4間	9.12	8.90323	0.21677	2.37690

5　おわりに

本研究では，自動的に最適なパスポイントを決定することによって，デジタルカメラの種類や撮影方法に関係なく，誰もが容易に３次元データを取得することを可能にした．しかし，曲面などの計測パスポイントを多く取る必要がある場合などでは，かなりの計算時間が必要となる，といった問題点がある．これは，今後の課題である．

参考文献

[1]解析写真測量委員会編：解析写真測量（改訂版），日本写真測量学会，1997.4.

[2]カール・クラウス：写真測量，技術書院，1993.7.

[問い合わせ先]

〒569-1095　大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

（TEL）0726-90-2404

（FAX）0726-90-2491

TF4−1

クラスターサイズの調整機能をもつファジィc-平均法

Fuzzy c-Means with Variables for Cluster Sizes

宮本定明
Sadaaki Miyamoto
筑波大学機能工学系
University of Tsukuba

馬屋原一孝
Kazutaka Umayahara
北陸先端科学技術大学院大学
JAIST

This paper proposes a variation of fuzzy c-means by introducing size variables for clusters, whereby misclassifications are reduced when clusters of different sizes exist. The method using the entropy term as well as the standard fuzzy c-means are discussed. The algorithm uses three stages of the alternating optimizations. Moreover another variable corresponding to variances of groups in a statistical model can be introduced.

1. はじめに

ファジィc-平均法の一つの欠点はクラスターのサイズが均等になるように分類が行われることである．このため，サイズの近いクラスターが近接しているときに，サイズの小さいクラスターの要素がサイズの大きいほうにとりこまれる現象が起きる．この欠点を解決するため，ここではクラスターサイズ調整の変数をもつファジィc-平均法を提案する．

2. 準備

クラスタリングされる個体を $x_k = (x_k^1, \ldots, x_k^p)^T$ $(1 \le k \le n)$ と表し，クラスターを C_i あるいは単に i $(1 \le i \le c)$ で表す．クラスタリングされるべき対象が p 次元ユークリッド空間の点 $x_k = (x_k^1, \ldots, x_k^p)$, $k = 1, \ldots, n$ で表されるとする．$U = (u_{ij})$ を $c \times n$ 行列とし，クラスター中心を $v_i = (v_i^1, \ldots, v_i^p)$ と書く．さらに $V = (v_1, \ldots, v_c)$ と表す．クリスプおよびファジィc-平均法ではクラスタリングのため最適化すべき目的関数 $J(U,V)$ を定め，交互最適化 **FC1**, **FC2** を行う．ただし，$\bar{U}$ と $\bar{V}$ の初期値を適宜与える．

FC1. $\min_{U \in M} J(U, \bar{V})$ を解き，最適解を $\bar{U}$ とする．

FC2. $\min_{V} J(\bar{U}, V)$ を解き，最適解を $\bar{V}$ とする．解 $(\bar{U}, \bar{V})$ が収束しているならば終了．そうでなければ **FC1** にもどる．

ただし，$M = \left\{ (u_{ik}) : u_{ik} \in [0,1], \sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1, \forall k \right\}$ であり，目的関数として，まずエントロピー法 [2] におけるもの

$$J(U,V) = \Big\{ \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} u_{ik} \|x_k - v_i\|^2 + \lambda^{-1} u_{ik} \log u_{ik} \Big\} \tag{1}$$

を考える．このとき，**FC1** および **FC2** における最適解は次式で与えられる．

$$u_{ik} = \frac{e^{-\lambda \|x_k - \bar{v}_i\|^2}}{\sum_{j=1}^{c} e^{-\lambda \|x_k - \bar{v}_j\|^2}}, \quad v_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} \bar{u}_{ik} x_k}{\sum_{k=1}^{n} \bar{u}_{ik}} \tag{2}$$

3. クラスターサイズ調整変数の導入

U, V の他に $\alpha = (\alpha_1, \cdots, \alpha_c)$ をもつ目的関数

$$\begin{aligned} J(U,V,\alpha) &= \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} u_{ik} \|x_k - v_i\|^2 \\ &\quad + \lambda^{-1} \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} u_{ik} \log \alpha_i^{-1} u_{ik} \end{aligned} \tag{3}$$

を考える．α の制約条件は

$$A = \Big\{ \alpha : \sum_{i=1}^{c} \alpha_i = 1, \alpha_i \ge 0, i = 1, \ldots, c \Big\} \tag{4}$$

とする．交互最適化として，次の変形を考える．ただし，$\bar{U}, \bar{V}, \bar{\alpha}$ の初期値は適宜与える．

FC'1. 最適化問題 $\min_{U \in M} J(U, \bar{V}, \bar{\alpha})$ を解き，最適解を $\bar{U}$ とする．

FC'2. $\min_{V} J(\bar{U}, V, \bar{\alpha})$ を解き，最適解を $\bar{V}$ とする．

FC'3. $\min_{\alpha\in A} J(\bar{U},\bar{V},\alpha)$ を解き，最適解を $\bar{\alpha}$ とする．解 $(\bar{U},\bar{V},\bar{\alpha})$ が収束しているならば終了．そうでなければ **FC'1** にもどる．

このとき，最適解は次のようになる．なお，以下では $\bar{u}_{ik}, \bar{v}_i, \bar{\alpha}_i$ をそれぞれ u_{ik}, v_i, α_i と書くが，このように略記しても混乱を生じない．

$$u_{ik} = \frac{\alpha_i e^{-\lambda\|x_k-v_i\|^2}}{\sum_{j=1}^{c}\alpha_j e^{-\lambda\|x_k-v_j\|^2}}, \quad (5)$$

$$\alpha_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}}{n} \quad (6)$$

ただし，v_i の最適解は前節の最適解と同一の形になる．

4. 標準的なファジィc-平均法の場合

Bezdek らによるファジィc-平均法 [1] の場合，目的関数として (1) ではなく，

$$J(U,V) = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m\|x_k-v_i\|^2 \quad (7)$$

$(m>1)$ が用いられる．この関数を変形して，サイズ変数 $\alpha=(\alpha_1,\cdots,\alpha_c)$ を導入することを考えよう．

まず，(7) に対する **FC2** の最適解が

$$u_{ik} = \left[\sum_{j=1}^{c}\left(\frac{\|x_k-v_i\|^2}{\|x_k-v_j\|^2}\right)^r\right]^{-1} \quad (8)$$

$$= \frac{e^{-r\log\|x_k-v_i\|^2}}{\sum_{j=1}^{c} e^{-r\log\|x_k-v_j\|^2}} \quad (9)$$

(ただし，$r=\frac{1}{m-1}$) であることに注意しよう．

エントロピー法においてサイズ変数 α が最適解を (2) から (5) に変化させたことからの類推によって，標準的な最適解が (9) から

$$u_{ik} = \frac{\alpha_i e^{-r\log\|x_k-v_i\|^2}}{\sum_{j=1}^{c}\alpha_j e^{-r\log\|x_k-v_j\|^2}} = \frac{\alpha_i\|x_k-v_i\|^{-2r}}{\sum_{j=1}^{c}\alpha_j\|x_k-v_j\|^{-2r}}$$

に変わるような目的関数が望ましい．そこで，

$$J(U,V,\alpha) = \sum_{i=1}^{c}\alpha_i\sum_{k=1}^{n}(\alpha_i^{-1}u_{ik})^m\|x_k-v_i\|^2 \quad (10)$$

$(m>1)$ とおく．また，簡単のため，$d_{ik}=\|x_k-v_i\|^2$ とする．このとき，**FC'2**, **FC'3**, **FC'4** における最適解は次式で与えられる．ただし，簡単化のため $r=\frac{1}{m-1}$ と置いている．

$$u_{ik} = \left\{\sum_{j=1}^{c}\left(\frac{\alpha_j}{\alpha_i}\right)\left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}}\right)^r\right\}^{-1} \quad (11)$$

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m} \quad (12)$$

$$\alpha_i = \left[\sum_{j=1}^{c}\left\{\frac{\sum_{k=1}^{n}(u_{jk})^m d_{jk}}{\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m d_{ik}}\right\}^m\right]^{-1} \quad (13)$$

5. おわりに

本稿におけるサイズ変数の考え方は，ファジィc-平均法の変形のすべてについて適用できる．よって，可能性は大きいと思われる．

また，クラスターのサイズだけでなく，広がりを調節する変数 $\eta=(\eta_1,\cdots,\eta_c)$ を導入することも可能である．その場合，第2節の目的関数において $d_{ik}\to d_{ik}/\eta_i^2$ と置き換え，式 (3) の右辺を U,V,α および η を変数にもつ目的関数 $J(U,V,\alpha,\eta)$ と考える．アルゴリズム **FC'** においてはこの目的関数の交互最適化を行う際，制約条件 $E=\{\eta:\sum_i\eta_i=1,\ \eta_i\geq 0,\forall i\}$ のもとで $\eta_1,\cdots,\eta_c$ の最適解を求めるステップ **FC'4** を付け加えればよい．

エントロピー法による u_{ik} は正規混合分布によるベイズ分類規則 [2] と類似した形をもっているが，ファジィ分類モデルを用いているため，自由度が大きい．

参考文献

[1] J. C. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum, 1981.

[2] 宮本 定明，クラスター分析入門：ファジィクラスタリングの理論と応用，森北出版，東京，1999.

問い合せ先
〒 305-8573 茨城県つくば市
筑波大学機能工学系
宮本 定明
TEL:0298-53-5346
FAX:0298-53-5207
email:miyamoto@esys.tsukuba.ac.jp

TF4−2

正則化された標準ファジィc-平均法と可能性クラスタリング

Regularized Fuzzy c-Means and Possibilistic Clustering

宮本定明
Sadaaki Miyamoto
筑波大学機能工学系
University of Tsukuba

馬屋原一孝
Kazutaka Umayahara
北陸先端科学技術大学院大学
JAIST

高田治
Osamu Takata
筑波大学工学研究科
University of Tsukuba

Probabilistic partition and possibilistic partition have been considered in methods of fuzzy c-means. When the entropy method is used, a single objective function produces two optimal solutions corresponding to the two partitions, while the objective function in the standard c-means provide a trivial optimum for the possibilistic partition. This paper proposes a regularized objective function derived from the standard c-means with the multiplier $m = 2$. The solutions for the both partitions are derived and their theoretical properties are discussed.

はじめに

ファジィc-平均法における問題点の一つとして，ファジィ分割の制約をどう評価するかということがある．このことから，可能性アプローチ（possibilistic approach）[5] が提案され，ロバストクラスタリングの観点から考察されている [2]．また最近，Höppner ら [3] は，確率的制約と可能性的制約を対比させて述べる立場を明らかにしている．

ファジィc-平均法には，標準的な方法の他にエントロピー項を用いる方法 [6] があるが，後者については単一の目的関数を用いて確率制約と可能性制約の双方について適切な 2 種類の解を得ることができる．これに対して前者では，確率制約と可能性制約の場合では同じ目的関数を用いることができない．

ここでは，標準的なファジィc-平均法に正則化項を導入し，標準的なファジィc 平均法についても，同一の目的関数によって確率制約と可能性制約の両方に対応する定式化を得ることができることを示す．

準備

クラスタリングされるべき対象が p 次元実空間 $\boldsymbol{R}^p$ の点 $x_k = (x_k^1, \ldots, x_k^p)$, $k = 1, \ldots, n$ で表されるとする．また，$\boldsymbol{R}^p$ の変数を一般に $x = (x^1, \ldots, x^p)$ などで表す．クラスターを C_i あるいは単に i $(1 \leq i \leq c)$ で表す．$U = (u_{ij})$ をクラスターのメンバーシップを表す $c \times n$ 行列とし，クラスター中心を $v_i = (v_i^1, \ldots, v_i^p)$ と書く．さらに $V = (v_1, \ldots, v_c)$ と表す．

クリスプおよびファジィc-平均法ではクラスタリングのため最適化すべき目的関数 $J(U, V)$ と U に対する制約条件 M を定め，次の形の交互最適化を行う．ただし，$\bar{U}$ と $\bar{V}$ の初期値は適宜与える．

FC1. $\min_{U \in M} J(U, \bar{V})$ を解き，最適解を $\bar{U}$ とする．

FC2. $\min_{V} J(\bar{U}, V)$ を解き，最適解を $\bar{V}$ とする．解 $(\bar{U}, \bar{V})$ が収束しているならば終了．そうでなければ **FC1** にもどる．

目的関数として，通常の c-平均法では

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^m D_{ik} \tag{1}$$

$(m > 1$ は定数$)$ が用いられる．ただし，$D_{ik} = \|x_k - v_i\|^2$ である．本稿では，この目的関数を用いる場合を標準的ファジィc-平均法あるいは標準的方法と呼ぶ．

また，エントロピー項を用いた c-平均法 [6] を一般化して

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} D_{ik} + \lambda^{-1} \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} \log \gamma^{-1} u_{ik} \tag{2}$$

$(\gamma > 0$ は定数$)$ を考える．本稿では，これを用いる場合をエントロピー c-平均法あるいはエントロピー法と呼ぶ．

制約条件としては，通常のファジィc-平均法で用いられる確率的制約 [3]

$$M_{prb} = \left\{ (u_{ik}) : u_{ik} \in [0,1],\ \forall i,k,\ \sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1,\ \forall k \right\} \tag{3}$$

および，可能性制約 [3]

$$M_{pos} = \left\{ (u_{ik}) : u_{ik} \in [0,1],\ \forall i,k \right\} \tag{4}$$

の2つを考える．確率的制約での条件 $\sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1$ が可能性制約では省かれている．

注意．Höppner ら [3] の原文では確率的クラスター分割（probabilistic cluster partition）と可能性的クラスター分割（possibilistic cluster partition）と書かれている．

M_{prb} を用いたとき，**FC2** における最適解は，(1) については

$$u_{ik} = \left[\sum_{j=1}^{c} \left(\frac{D_{ik}}{D_{jk}} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right]^{-1}, \tag{5}$$

ただし，上式は $x_k = v_i$ となる場合は定義されないので，$x_\ell = v_i$ となる x_ℓ がある場合はその $u_{i\ell}$ について $u_{i\ell} = 1$，他のクラスター j について $u_{j\ell} = 0$ とする例外的な処理を行う．また，**FC2** については

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^m} \tag{6}$$

となる．

エントロピー法については

$$u_{ik} = \frac{e^{-\lambda D_{ik}}}{\sum_{j=1}^{c} e^{-\lambda D_{jk}}}, \quad v_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik} x_k}{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}} \tag{7}$$

で与えられる．

次に，M_{pos} を用いたとき，(2) については **FC1** における最適解は，

$$u_{ik} = K e^{-\lambda D_{ik}} \tag{8}$$

($K = \gamma e^{-1}$) となる．また，**FC2** における最適解は，M_{prb} における (6)，(7) と同じ形になる．特に，$\gamma = e$ とすると $K = 1$ と簡単になるので，以後，とくにことわらない限り $K = 1$ と仮定する．

いま，$\boldsymbol{R}^p$ で定義された関数 $U_i^e(x)$ $(i = 1, \ldots, c)$ を

$$U_i^e(x) = K e^{-\lambda \|x - v_i\|^2} \tag{9}$$

で定義すれば，M_{pos} による u_{ik} は $u_{ik} = U_i^e(x_k)$ で与えられるが，同時に V が固定されていると考えると，M_{prb} による u_{ik} は

$$u_{ik} = \frac{U_i^e(x_k)}{\sum_{j=1}^{c} U_j^e(x_k)} \tag{10}$$

と比で表される．

これに対して，(1) については，**FC2** における最適解は自明な解 $U = 0$ となり，適切な定式化を与えない．そこで，Krishnapuram ら [5] では，(1) の代わりに

$$J(U,V) = \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^m D_{ik} + \sum_{i=1}^{c} \eta_i \sum_{k=1}^{n} (1 - u_{ik})^m \tag{11}$$

($\eta_i > 0$ は定数) を考えている．この場合，**FC1** の最適解は

$$u_{ik} = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{ik}}{\eta_i} \right)^{\frac{1}{m-1}}} \tag{12}$$

である．また，**FC2** の最適解は (6) の形をもつ．

このように，エントロピー法では，可能性制約から得られる関数 $U_i^e(x)$ の比 (10) で確率制約による u_{ik} が表現されるが，標準的な c-平均法ではこのような対応関係はみられず，確率制約と可能性制約では異なる目的関数が用いられている．

注意： 上記の最適解において，$\bar{u}_{ik}$，$\bar{v}_i$ 等は u_{ik}，v_i 等の横棒なしの字で置き換えている．このように簡単化しても混乱を生じないので，以下でもこのように省略した書き方を用いる．

標準ファジィc-平均法の正則化

目的関数として (1) を用いる標準的なファジィc-平均法では，$x_k = v_i$ となるとき特異性が解に現われ，例外処理が必要であった．また，M_{pos} を用いた場合，自明な解しか得られなかった．これに対して，エントロピー項を用いた (2) では，エントロピー項を加えたため，このような特異性は現われず，かつ，M_{pos} を用いたときの解 (8) の比 (10) を用いて M_{prb} による解が表現された．

このように，標準的な目的関数には上に述べたような特異性が存在する．そこで，エントロピー項を

加えたような操作によって，標準的なファジィc-平均法に一種の正則化を行い，エントロピーファジィc-平均法に対比できるような性質が得られるかどうかを考えてみよう．

そこで，次の目的関数を考える．

$$J(U,V)=\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^2D_{ik}+\zeta^{-1}\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}(1-u_{ik})^2 \tag{13}$$

($\zeta>0$ は定数)．この目的関数は，(11) に類似しているが，(11) における乗数 m が $m=2$ に固定されている点が制限されている．また一方，(13) における ζ は (2) における λ と類似の役割を果たす正則化パラメータである．(なお，(11) における定数 η_i が省略されているが，これは D_{ik} を D_{ik}/η_i で置き換えることで解決可能であるので，(11) による定式化を制限していない．)

この目的関数と M_{pos} を用いた場合，**FC1** の解は

$$u_{ik}=\frac{1}{1+\zeta D_{ik}} \tag{14}$$

で与えられる．**FC2** の解は $m=2$ とした場合の (6) になることは明らかである．

次に，M_{prb} を用いた場合，**FC1** の解は次式で与えられる．

$$u_{ik}=\left\{\sum_{j=1}^{c}\frac{1+\zeta D_{ik}}{1+\zeta D_{jk}}\right\}^{-1} \tag{15}$$

いま，関数 $U_i^s(x;\zeta)$ を $(i=1,\ldots,c)$

$$U_i^s(x;\zeta)=\frac{1}{1+\zeta\|x-v_i\|^2} \tag{16}$$

で定義すると，M_{pos} を用いた場合の解は

$$u_{ik}=U_i^s(x_k;\zeta), \tag{17}$$

M_{prb} を用いた場合の解は

$$u_{ik}=\frac{U_i^s(x_k;\zeta)}{\sum_{j=1}^{c}U_j^s(x_k;\zeta)} \tag{18}$$

となる．(17)，(18) はそれぞれエントロピー法における (9)，(10) に対応しており，この方法では M_{pos}，M_{prb} 両方の制約に対する解が得られている．

正則化分類関数の性質

正則化された目的関数から得られる解は，パラメータ ζ^{-1} が小さいとき，もとの問題の解 (5) を近似している．実際，次の命題が得られる．

命題 1. $V=(v_1,\ldots,v_c)$ は固定されているとする．また，関数 $\mathcal{U}_i^0(x)$ を

$$\mathcal{U}_i^0(x)=\left[\sum_{j=1}^{c}\left(\frac{\|x-v_i\|^2}{\|x-v_j\|^2}\right)^{\frac{1}{m-1}}\right]^{-1} \tag{19}$$

(ただし，$x\neq v_i$ for all $1\leq i\leq c$) とし，

$$\mathcal{U}_i^s(x;\zeta)=\frac{U_i^s(x;\zeta)}{\sum_{j=1}^{c}U_j^s(x;\zeta)} \tag{20}$$

とする．このとき，$x\neq v_i$ for all $1\leq i\leq c$ なるすべての $x\in\boldsymbol{R}^p$ に対して

$$\lim_{\zeta\to\infty}\mathcal{U}_i^s(x;\zeta)=\mathcal{U}_i^0(x)$$

が成立する．□

なお，この命題および以下の命題の証明は比較的簡単であるので省略する．

通常，ファジィ化された解からクリスプな分類を得るときは最大メンバーシップによる割り当て，すなわち，標準的な方法の場合は

$$\mathcal{U}_i^0(x)>\mathcal{U}_j^0(x)\quad(\forall j\neq i)$$

の場合に x をクラスター i に割り当てる．このとき，i に割り当てられる x の領域は v_i を中心とするボロノイ集合 [4]

$$\mathsf{V}_i=\{x\in\boldsymbol{R}^p:\|x-v_i\|<\|x-v_j\|,\ \forall j\neq i\}$$

となる [6]．$\mathcal{U}_i^s(x;\zeta)$ についても同様の性質が成り立つ．

命題 2. 命題 1 のように $V=(v_1,\ldots,v_c)$ を固定する．このとき，

$$\mathsf{V}_i=\{x\in\boldsymbol{R}^p:\mathcal{U}_i^s(x;\zeta)>\mathcal{U}_j^s(x;\zeta),\ \forall j\neq i\}$$

が成立する．□

標準的ファジィc-平均法の場合，x が原点から無限に遠ざかるに従って，メンバーシップは $1/c$ に近づくことが知られている [6]．(これに対して，エントロピーを用いた場合，このような性質はみられない．) 正則化された目的関数から得られる $\mathcal{U}_i^s(x;\zeta)$ についても同じ性質がみられる．

命題 3.

$$\lim_{\|x\|\to\infty}\mathcal{U}_i^s(x;\zeta)=\frac{1}{c}$$

が成立する．□

このように，標準的なファジィc-平均法については，$m=2$のときを考えれば，可能性クラスタリングにおける項と同様の項を正則化パラメータζとともに加えることによって，エントロピー法のような可能性制約と確率制約の解どうしの関係が得られることがわかった．また，このように正則化された解は，もとのファジィc-平均法の解を近似していることも明らかになった．

ところで，エントロピー項を用いた場合に得られる解は，その形からガウス分布における密度関数に類似の形をもっている．これに対して，正則化された標準的ファジィc-平均法の場合は，密度関数に比べることはできるだろうか．1次元の場合，分類関数は，

$$U_i^s(x;\zeta)=\frac{1}{1+\zeta(x-v_i)^2}$$

となるので，コーシー分布の密度関数 [8] と類似の形をもっていることがわかる．このように，数理統計における代表的な分布とファジィc-平均法の分類関数との間に対応がつけられるのである．

おわりに

正則化は，ファジィクラスタリングの手法を理解する上で必須の概念と考えられる．本稿では，標準的ファジィc-平均法に正則化項を導入することによって，確率的制約と可能性制約における最適解の間の関連を明らかにした．この関連は，エントロピー法 [6] に対比される整合性をもっている．

また，ここでは省略したが，混合分布モデル [6] や決定的アニーリングによるクラスタリング [7] などの解の形とも共通点がある点が興味深い．

本稿では，基本的なファジィc-平均法について述べたが，ファジィc-平均法には様々なヴァリエーションがある [1]．それらについてもここでの提案は同様に適用できるため，応用範囲は広い．

参考文献

[1] J. C. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum, New York, 1981.

[2] R.N.Davé, R.Krishnapuram, Robust clustering methods: a unified view, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol.5, No.2, pp. 270–293, 1997.

[3] F. Höppner, F. Klawonn, R. Kruse, T. Runkler, *Fuzzy Cluster Analysis*, Wiley, Chichester, 1999.

[4] T. Kohonen, *Self-Organizing Maps, 2nd Ed.*, Springer, Berlin, 1997.

[5] R. Krishnapuram, J.M. Keller, A possibilistic approach to clustering, *IEEE Trans. on Fuzzy Syst.*, Vol.1, No.2, pp. 98–110, 1993.

[6] 宮本 定明，クラスター分析入門:ファジィクラスタリングの理論と応用，森北出版，東京，1999.

[7] K. Rose, E. Gurewitz, G. Fox, A deterministic annealing approach to clustering, *Pattern Recognition Letters*, Vol.11, pp. 589–594, 1990.

[8] S.S.Wilks, *Mathematical Statistics, 2nd ed.*, Wiley, New York, 1962.

問い合せ先
〒305-8573 茨城県つくば市
筑波大学機能工学系
宮本 定明
TEL:0298-53-5346
FAX:0298-53-5207
email:miyamoto@esys.tsukuba.ac.jp

TF4−3

不確定性を含むデータのファジィクラスタリングにおける中心の計算

Calculation of Centers in Fuzzy Clustering of Data with Uncertainties

高田 治 Osamu Takata 筑波大学 University of Tsukuba
宮本 定明 Sadaaki Miyamoto 筑波大学 University of Tsukuba
馬屋原 一孝 Kazutaka Umayahara 北陸先端科学技術大学院大学 JAIST

Abstract. The aim of the present paper is to discuss fuzzy clustering of data with uncertainties. We consider deterministic uncertainties in a data unit. Two basic methods of standard fuzzy c-means and entropy method are considered. When handling the data with uncertainties, we consider two types of distances between sets: nearest neighbor and farthest neighbor. Using these distances, clustering methods for data with uncertainties are proposed. Exact optimization algorithms for cluster centers based on the two distances are developed. In a numerical example, results for the data with uncertainties and without uncertainties are compared.

1 はじめに

ファジィクラスタリングの中で代表的なファジィc-平均法 [1] については，これまで様々な研究がなされてきたが，最近，各個体に不確定性を含むデータに対するアルゴリズムの研究が盛んになってきている [2, 3, 4]. しかしながら，それらには厳密さや一般性について制約がある. 本稿では，従来の定式化より一般性かつ厳密性をもち，多数かつ多次元のデータに適用できる方法を考察する.

ファジィc-平均法を不確定性を含むデータを扱うことができるように拡張する. 各個体がクリスプな区間の直積で表されるようなデータを扱う. まず，最も極端な最長距離法，最短距離法の 2 種類の集合間の距離を用いて目的関数を定義する. 目的関数を厳密に最適化するためには，交互最適化のそれぞれのステップで，個体のクラスターへの帰属度と，クラスター中心がそれぞれ厳密に最適化されなければならない. しかしながら不確定性を含むデータを扱う場合には，クラスター中心に関する最適化は，目的関数がクラスター中心に関して単純な 2 次関数の形をしていないため，従来のファジィc-平均法同様に簡単に最適解を求めることができない. そこで，クラスター中心に関する最適化のアルゴリズムを新たに開発し，それを用いて目的関数の最適化を行う. このアルゴリズムを用いることで，目的関数を厳密に最適化できる.

不確定性を含むデータを準備し，不確定性を含んだまま本手法でクラスタリングした結果と，同じデータについて代表点をとって不確定性を含まないとした場合に，通常のファジィc-平均法を用いてクラスタリングした結果を比較する.

2 ファジィc-平均法

分類すべきデータを p 次元ユークリッド空間上の個体の集合 $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ と表し，データの各個体を

$$x_k = (x_k^1, x_k^2, \ldots, x_k^p) \tag{1}$$

と表す. これらの点を c 個に分類する. クラスター中心 $v_i = (v_i^1, v_i^2, \ldots, v_i^p)$ はまとめて $V = (v_1, v_2, \ldots, v_c)$ と表す. また，v_i を中心とするクラスター i に x_k が所属する度合いを表すメンバーシップを u_{ik} で表し，行列 $U = (u_{ik})$ を定義する. u_{ik} は次の集合 M_f に属すると仮定される.

$$M_f = \{(u_{ik}) \mid u_{ik} \in [0,1], \sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1, k = 1, 2, \ldots, n\}. \tag{2}$$

ファジィc-平均法では U と V に関する目的関数を最小化することにより分類を行う. 標準的なファジィc-平均法 [1]，エントロピー法 [5] では，目的関数

$$J^m(U,V) = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m d_{ik} \tag{3}$$

$$J^\lambda(U,V) = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} u_{ik} d_{ik} + \lambda^{-1}\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}\log u_{ik} \tag{4}$$

をそれぞれ最小化する. それぞれの目的関数で使われている d_{ik} はユークリッドノルムの二乗である.

$$d_{ik} = \| x_k - v_i \|^2 = \sum_{l=1}^{p}(x_k^l - v_i^l)^2. \tag{5}$$

これらの目的関数は 2 つの変数 (U,V) の関数であり，一度に最適化することができないので交互最適化が一般に用いられる.

FCM1. U と V の初期値 $\bar{U}$,$\bar{V}$ を適当に決める.

FCM2. V を $\bar{V}$ に固定し, $U \in M_f$ に関して $J(U,\bar{V})$ を最小化し, 最適解 $\bar{U}$ を求める.

FCM3. U を $\bar{U}$ に固定し, V に関して $J(\bar{U},V)$ を最小化し, 最適解 $\bar{V}$ を求める.

FCM4. 最適解 $(\bar{U},\bar{V})$ が収束していれば終了. そうでなければステップ **FCM2** に戻る.

FCM2 における解は, 標準的なファジィc-平均法とエントロピー法ではそれぞれ

$$\bar{u}_{ik} = \left[\sum_{j=1}^{c}\left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}}\right)^{\frac{1}{m-1}}\right]^{-1}, \bar{u}_{ik} = \frac{e^{-\lambda d_{ik}}}{\sum_{j=1}^{c} e^{-\lambda d_{jk}}} \quad (6)$$

で与えられ, **FCM3** における解は

$$\bar{v}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n}(\bar{u}_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^{n}(\bar{u}_{ik})^m}, \quad \bar{v}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n}\bar{u}_{ik}x_k}{\sum_{k=1}^{n}\bar{u}_{ik}} \quad (7)$$

で与えられる.

3 最長距離法と最短距離法

分類すべきデータを $M=(M_1,M_2,\ldots,M_n)$ と表す. 不確定性を含む各個体 M_k は, 区間のデカルト積で表される.

$$M_k = [f_{k1}^1, f_{k2}^1] \times \cdots \times [f_{k1}^p, f_{k2}^p]. \quad (8)$$

既存のファジィ c-平均法の目的関数 (3), (4) ではクラスタリングすべきデータは不確定性を含まない (1) の x_k である. この代りに不確定性を含む (8) の M_k をあてはめてみる. 制約条件 (2) の形は変わらないが, それぞれの目的関数で使われている (5) のユークリッドノルムの二乗 d_{ik} を定義し直す必要がある.

2 種類の目的関数 (3), (4) は

$$J^m(U,V) = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m D_{ik} \quad (9)$$

$$J^\lambda(U,V) = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}u_{ik}D_{ik} + \lambda^{-1}\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}u_{ik}\log u_{ik} \quad (10)$$

のように定義し直し, その中で用いるユークリッド距離の二乗は

$$D_{ik} = D_2(M_k,v_i)^2 = \| M_k - v_i \|^2 \quad (11)$$

と定義する. $D_2(M_k,v_i)^2$ を求めるには, 各々の軸方向にそれぞれ独立にユークリッド距離の二乗 $D_2^l(M_k,v_i)^2$ を求め, それらを加え合わせればよい.

クラスター中心 v_i は 1 つの要素からなる集合であり個体 M_k の各成分は区間つまり集合である. $D_2^l(M_k,v_i)^2$ を集合間の距離を用いて定義する. 次の集合 K と集合 L の間の距離 $d(K,L)$ を用いる.

最長距離法 (Farthest Neighbor)

$$d(K,L) = \max\{d(x,y) : \ for\ all\ x \in K, y \in L\}$$

最短距離法 (Nearest Neighbor)

$$d(K,L) = \min\{d(x,y) : \ for\ all\ x \in K, y \in L\}$$

これらの距離を用いて $D_2^l(M_k,v_i)^2$ を定義する. 最長距離法を用いた場合は,

$$D_2^l(M_k,v_i)^2 = \max\{(v_i^l - f_{k1}^l)^2, (v_i^l - f_{k2}^l)^2\}$$

最短距離法を用いた場合は,

$$D_2^l(M_k,v_i)^2 = \begin{cases} 0, & (f_{k1}^l \le v_i^l \le f_{k2}^l) \\ \min\{(v_i^l - f_{k1}^l)^2, (v_i^l - f_{k2}^l)^2\}, & (otherwise) \end{cases}$$

のように定義される. このようにして集合間の距離を用いて (11) の D_{ik} が定義され, 不確定性を含むデータに対するファジィc-平均法の目的関数 (9), (10) が定義された.

4 クラスター中心に対する最適化

目的関数が定義されたので, それを最適化することを考える. 既存のファジィc-平均法同様アルゴリズム **FCM** を用いて, 2 つの変数 (U,V) を交互最適化することにより最適解を求める. **FCM2** における解は, 既存のファジィc-平均法の解 (6) と同様に標準的なファジィc-平均法, エントロピー法ではそれぞれ,

$$\bar{u}_{ik} = \left[\sum_{j=1}^{c}\left(\frac{D_{ik}}{D_{jk}}\right)^{\frac{1}{m-1}}\right]^{-1}, \bar{u}_{ik} = \frac{e^{-\lambda D_{ik}}}{\sum_{j=1}^{c} e^{-\lambda D_{jk}}} \quad (12)$$

で与えられる. D_{ik} は (11) で与えられる.

ところが **FCM3** の解は (7) と同様に求めることができない. (9), (10) における D_{ik} は集合間の距離を用いて定義され, これらの目的関数はクラスター中心 v_i に関して単純な 2 次関数ではない. そこで, 目的関数

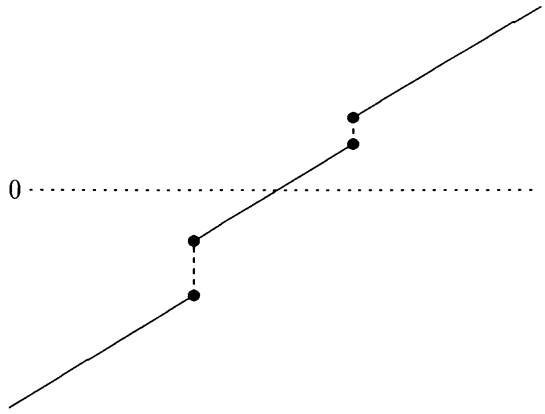


図 1: (13) 式の図 (最長距離法)

(9), (10) に対する **FCM3** の最適解を求めるアルゴリズムを新たに開発する.

v_i に関する一階偏導関数をそれぞれの目的関数に対して求める.

$$\frac{\partial J^m(U,V)}{\partial v_i^l} = \sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m \frac{\partial}{\partial v_i^l} D_2^l(M_k, v_i)^2. \qquad (13)$$

$$\frac{\partial J^\lambda(U,V)}{\partial v_i^l} = \sum_{k=1}^{n}(u_{ik}) \frac{\partial}{\partial v_i^l} D_2^l(M_k, v_i)^2. \qquad (14)$$

最長距離法を用いた場合には, (13) 式は図 1 のように区分線形な形状をしており, 単調増加している. つまり, 目的関数 (9), (10) は変数 v_i に関して凸関数である. この目的関数を最小にする v_i を求めるには, 一階偏導関数が 0 の値をとる v_i を探索すればよい.

探索のためのアルゴリズムを以下に示す. 以下のアルゴリズムでは (13) 式に対して探索を行っているが, (14) 式に対しても $m = 1$ と置くことにより同様に探索を行うことができる. (13) 式は線形な区間で v_i^l に関して共通の傾き $\sum_{k=1}^{n} 2(u_{ik})^m$ を持っていることに注意する. また, $X_k^l = (f_{k1}^l + f_{k2}^l)/2$ と置き, $X_1^l \le \cdots \le X_k^l \le \cdots \le X_n^l$ のように並びかえる.

Algorithm (Searching v_i^l in Farthest Neighbor)

begin
  $U := \sum_{k=1}^{n} 2(u_{ik})^m$;
  $J_k := (u_{ik})^m(-2)(f_{k1}^l - f_{k2}^l)$;
  $S := \sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m(-2)(f_{k2}^l - X_1^l)$;
  $k := 0$;
  while (1) **do begin**
    $k := k + 1$;
    $S := S + J_k$;
    if $S > 0$ **then** $\bar{v}_i^l := X_k^l$; **break**;
    $S := S + U(X_{k+1}^l - X_k^l)$;
    if $S > 0$ **then** $\bar{v}_i^l := X_{k+1}^l - \frac{S}{U}$; **break**;
  end;
  output $\bar{v}_i^l$ as the l-th coordinate of the cluster center v_i
end.

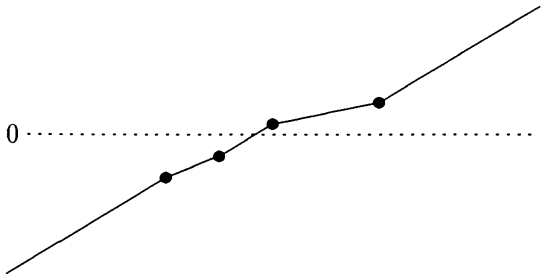


図 2: (13) 式の図 (最短距離法)

このアルゴリズムでは, 図 1 のような形状をした不連続な一階偏導関数 (13) 式が 0 を横切る位置を探索する. そこで, 図 1 における不連続点 (•) を下から順序探索する. 探索中に不連続点で縦軸つまり (13) 式の値が 0 を超えた場合は上記のアルゴリズム中の上側の **break** で, その不連続点の位置をクラスター中心として出力する. 連続な区間で 0 を超えた場合は下側の **break** で (13) 式が 0 となる位置をクラスター中心として出力する.

最短距離法を用いた場合は, (13) 式は図 2 のような形状をしており, 単調増加することがわかり, 目的関数は変数 v_i に関して凸関数であることがわかる. 先ほどと同様に一階偏導関数が 0 の値をとる v_i を探索すればよい. まず f_{k1}^l と f_{k2}^l を小さい順にソーティングし, $X_1^l \le \cdots \le X_j^l \le \cdots \le X_{2n}^l$ のように並びかえる.

Algorithm (Searching v_i^l in Nearest Neighbor)

begin
  $U := \sum_{k=1}^{n} 2(u_{ik})^m$;
  $S := \sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m 2(X_1^l - f_{k1}^l)$;
  $j := 0$;
  while ($S < 0$) **do begin**
    if $X_j^l = f_{k1}^l$ **then** $U := U - 2(u_{ik})^m$;
    if $X_j^l = f_{k2}^l$ **then** $U := U + 2(u_{ik})^m$;
    $S := S + U(X_{j+1}^l - X_j^l)$;
    $j := j + 1$;
  end;
  $\bar{v}_i^l := X_j^l - \frac{S}{U}$
  output $\bar{v}_i^l$ as the l-th coordinate of the cluster center v_i
end.

このアルゴリズムでは, 図 2 のような形状をした連続な一階偏導関数 (13) 式が 0 を横切る位置を探索する. 図 2 における X_j^l(•) を下から順序探索する. 探索中に縦軸つまり (13) 式の値が 0 を超えた場合はループを抜け, (13) 式が 0 となる位置をクラスター中心として出力する.

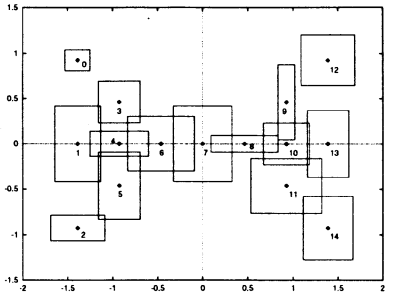


図 3: バタフライデータ(不確定性あり)

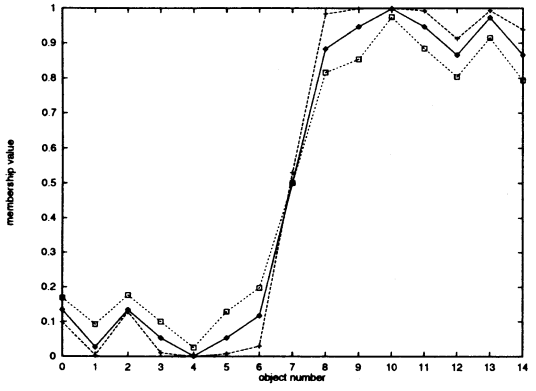


図 4: バタフライデータに対するクラスタリング結果 (オブジェクト番号 k に対するメンバシップ u_{1k}, **FCM**)

5 分類結果の比較

簡単なバタフライデータと呼ばれる不確定性を含まないデータを，既存のファジィc-平均法でクラスタリングした結果と，同じデータに中心から両側に対称に不確定性を仮定した 図 3 のようなデータを本手法で 2 つにクラスタリングした結果を示す.

クラスタリング手法は，標準的なファジィc-平均法 (パラメータ $m = 2.0$) を用いた. 図 4 はその結果である. 横軸はデータ番号で，縦軸は右側のクラスターに対するメンバシップ値を表している. 不確定性を含むデータに対する最長距離法，最短距離法を用いた結果はそれぞれ□，＋で表される. また，見やすくするために点線で結んでいる. 不確定性を含まないデータに対する結果は◇で表され，実線で結んでいる.

図にみられるように，同じデータでも不確定性を含まない場合と不確定性を仮定した場合はかなり違った結果を示す. また最長距離法を用いたメンバーシップと最短距離法を用いたメンバーシップは異なっており，不確定性を含まない場合のメンバーシップを両側からはさんでいる. なお，エントロピー法を用いた結果は紙面の都合で省略する.

6 おわりに

ファジィクラスタリングにおける不確定性を含むデータの扱い方を提案した. 各個体がクリスプな区間の直積で表されるデータを，ファジィc-平均法でクラスタリングする手法を考えた.

最長距離法，最短距離法の 2 種類の集合間の距離を用いて，不確定性を含むデータとクラスター中心との間の距離を定義し，目的関数を定義した. 目的関数を **FCM** のアルゴリズムで厳密に最小化するために，クラスター中心に関する最適化のアルゴリズムを新たに開発した.

個体に不確定性を含むデータを扱うことは確率論では不可能で，ファジィ手法を用いて初めて可能になる. ここで示したように両極端の性質をもつ距離のペアを用いることで，本解析手法は，より包括的なものとなっている.

参考文献

[1] J.C.Bezdek, *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*, Plenum, New York, 1981.

[2] R.J.Hathaway, J.C.Bezdek and W.Pedrycz, A parametric model for fusing heterogeneous fuzzy data, *IEEE Trans., on Fuzzy Syst.*, Vol.4, No.3, pp.270-281, 1996.

[3] K.-M. Lee, K.-M. Lee, J.-H. Lee and H. Lee, Fuzzy clustering for fuzzy data using dissimilarity measure, *Proc. of IFSA '99*, August 17-20, Taipei. Taiwan ROC, Vol.II, pp.879-883, 1999.

[4] S. Miyamoto and Y. Agusta, L_1 based fuzzy c-means for data with uncertainties, *Computing Science and Statistics*, Vol.29, No.2, pp.409-414, 1997.

[5] S. Miyamoto and M. Mukaidono, Fuzzy c-means as a regularization and maximum entropy approach, *Proc. of IFSA '97*, June 25-30, Prague, Czech, Vol.II, pp.86-92, 1997.

問い合せ先

〒 305-8573
茨城県 つくば市 天王台 1-1-1
筑波大学大学院 工学研究科 宮本研究室
高田 治
TEL (0298)53-6553
FAX (0298)53-5207
E-mail takata@esys.tsukuba.ac.jp

TF5−1

ファジィクラスタリングによるスイッチング線形判別

Switching Linear Discriminant with FCM Clustering

○ 山川あす香，大迫　真実，呉　志賢，本多　克宏，市橋　秀友
A.Yamakawa, M.Ohsako, C.- H. Oh, K.Honda and H.Ichihashi
大阪府立大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : In this paper a new approach to discriminant analysis is proposed, in which the Fuzzy c-Means clustering algorithm is simultaneously applied. The data set is fuzzily partitioned in order for good use of linear discriminat, that is, many cluster centers are placed close to decision boundaries. Minimization of the within-group sum-of-squared-error and maximization of the canonical correlation coefficients yield the memberships to fuzzy clusters whose centers are near to the boundaries. A numerical example using Iris data by Anderson shows that the cluster centers tend to gather near decision boundaries when the weight coefficient for the canonical correlation becomes large.

1. はじめに

本研究では正準判別分析における線形判別関数の分かりやすさを生かした非線形判別法として，できるだけうまく線形判別できるようにいくつかのクラスタにデータを分割する方法を提案する．判別がうまく行えるように複数のクラスタに分割するには，判別が困難な2群の境界領域にクラスタを形成すればよい．Andersonのアヤメのデータを用いた数値例で提案法によって判別境界にクラスタが形成されることを示す．

2. 判別分析のためのFCVクラスタリング法

正準相関分析[1]は，回帰分析，主成分分析，判別分析を含んだ最も一般的な多変量解析法とされている．そこで，この手法をクラスタ分析法に取り入れて判別境界にファジィクラスタが形成される手法を提案する．いま，J個の標本（データ）が得られていて，それぞれがI個のクラス（群）のいずれかに属するとする．クラスを表す変量を$x_1, x_2, \cdots, x_I$とし，そのクラスに属する場合は1.0そうでない場合は0.0の実数値を与える．またJ個の標本についてK個（$I<K$）の変量$x_{I+1}, x_{I+2}, \cdots, x_{I+K}$が測定されているとする．このとき$I$個の変量からなるベクトルを$\boldsymbol{x}_a$，$K$個の変量からなるベクトルを$\boldsymbol{x}_b$とする．

$$\boldsymbol{x}_a = (x_1, x_2, \cdots, x_I)^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{x}_b = (x_{I+1}, x_{I+2}, \cdots, x_{I+K})^{\mathrm{T}}$$

ただし，上付き文字Tは転置を表す．これらの変量$\boldsymbol{x}_a$，$\boldsymbol{x}_b$に対して次のような線形結合を考える．

$$\begin{aligned} y_{cp} &= a_{c1p}(x_1 - v_{c1}) + \cdots + a_{cIp}(x_I - v_{cI}) \\ &= \boldsymbol{a}_{cp}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_a - \boldsymbol{v}_{ca}) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} z_{cp} &= b_{c1p}(x_{I+1} - v_{cI+1}) + \\ &\quad \cdots + b_{cKp}(x_{I+K} - v_{cI+K}) \\ &= \boldsymbol{b}_{cp}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_b - \boldsymbol{v}_{cb}) \end{aligned} \tag{2}$$

ただし，$\boldsymbol{v}_{ca} = (v_{c1}, v_{cb}, \cdots, v_{cI})^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{v}_{c2} = (v_{cI+1}, v_{cI+2}, \cdots, v_{cI+K})^{\mathrm{T}}$であり，$\boldsymbol{v}_c = (\boldsymbol{v}_{ca}, \boldsymbol{v}_{cb})$はクラスタ$c$の中心（平均）である．変量$y_{cp}$，$z_{cp}$，$p = 1, \cdots, P$（$P < I$）を第$p$正準変量といい，正準変量$y_{cp}$，$z_{cp}$の相関係数を正準相関係数という．本研究では正準相関係数が最大になるように，変量$\boldsymbol{x}_a$，$\boldsymbol{x}_b$の係数ベクトル$\boldsymbol{a}_c$，$\boldsymbol{b}_c$とクラスタへのメンバシップ値u_{cj}を求める．判別の困難なクラスタはクラスの境界付近に形成されるもので，そこには2群の標本が多く属していて，それらが左右に分かれるように係数$\boldsymbol{b}_{cp}$を求めるとy_{cp}とz_{cp}の相関係数は大きくなる．そのようなクラスタ分析のための目的関数（ラグランジュ関数）を次のように定める．

$$\begin{aligned} L = \sum_{c=1}^{C} \Bigg(& \alpha \Bigg(\sum_{p=1}^{P} \boldsymbol{a}_{cp}^{\mathrm{T}} \sum\nolimits_c^{ab} \boldsymbol{b}_{cp} \\ & - \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{P} \lambda_{cp}^{a} (\boldsymbol{a}_{cp}^{\mathrm{T}} \sum\nolimits_c^{aa} \boldsymbol{a}_{cp} - 1) \\ & - \frac{1}{2} \lambda_{cp}^{b} (\boldsymbol{b}_{cp}^{\mathrm{T}} \sum\nolimits_c^{bb} \boldsymbol{b}_{cp} - 1) \Bigg) \Bigg\} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} & - (1-\alpha) \sum_{j=1}^{J} u_{cj} \| \boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{v}_c \|^2 \\ & - \beta \sum_{j=1}^{J} u_{cj} \log u_{cj} \Bigg) - \sum_{j=1}^{J} \gamma_j \Big(\sum_{c=1}^{C} u_{cj} - 1 \Big) \end{aligned} \tag{4}$$

ただし，$\sum_c^{ab} = (\sigma_{cik}^{ab}), i = 1, 2, \cdots, I, k = I+1, I+$

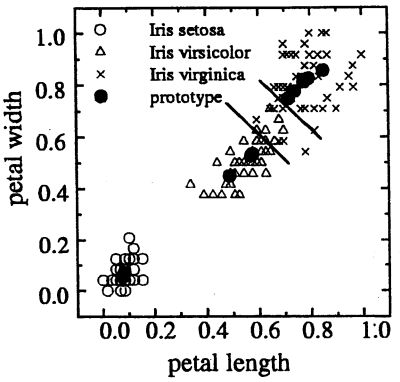


図 1: $C = 12, \alpha = 0.3, \beta = 0.8$

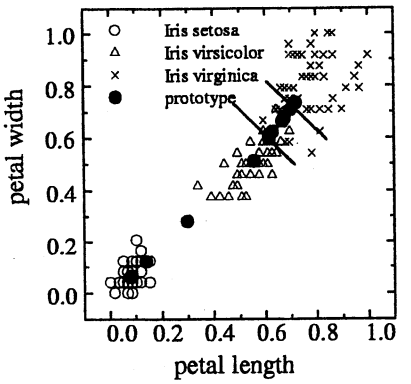


図 2: $C = 12, \alpha = 0.9, \beta = 0.8$

$2, \cdots, I \div K$ で,

$$\sigma_{cik}^{ab} = \sum_{j=1}^{J} u_{cj}(x_{ji} - v_{ci})(x_{jk} - v_{ck}) \qquad (5)$$

である. $\sum_c^{aa} = (\sigma_{cik}^{aa}), i = 1, 2, \cdots, I, k = 1, 2, \cdots, I$, $\sum_c^{bb} = (\sigma_{cik}^{bb}), i = I+1, I+2, \cdots, I+K, k = I+1, I+2, \cdots, I+K$についても同様に定義される. ここで, αは正準相関分析とクラスタ中心からの距離のトレードオフを決めるパラメータ, βはファジィ度を制御するパラメータで, λ_c^a, λ_c^b, γ_jはラグランジュ乗数である. 式 (4) の＊1は, y_{cp}とz_{cp}の分散が1であり, ＊2はクラスタ中心からの距離を表しいている. また, エントロピーの項はファジィc-Means法でのメンバシップ値のべき乗の代わりに用いたもので, 同等なものであることが宮本ら[2]により示されている. $\partial L/\partial \boldsymbol{a}_c = 0$,$\partial L/\partial \boldsymbol{b}_c = 0$ より$\lambda_c = \lambda_c^a = \lambda_c^b$として,

$$(\textstyle\sum_c^{aa})^{-1} \sum_c^{ab} (\sum_c^{bb})^{-1} (\sum_c^{ab})^T \boldsymbol{a}_c = \lambda_c^2 \boldsymbol{a}_c \qquad (6)$$

なる固有値問題の第p固有値 ($p = 1, \cdots, P$) より第p正準変量を得ることができる.

3. 数値例

R.A.Fisherが線形判別関数の研究に用いたAndersonのアヤメの3群判別データを提案法に適用した. 入力変数は4つの特徴量とアヤメの3品種の7変数で, この3品種を変量$\boldsymbol{x}_a$,4つの特徴量を変量$\boldsymbol{x}_b$とする.

クラスタ数$C = 12$, $\beta = 0.8$ とし $\alpha = 0.3$ と $\alpha = 0.9$ としたときの結果をそれぞれ 図1と 図2に示す. ただし, アヤメのデータは2つの特徴量のみでよく分離されていることが知られているので, $x_3 - x_4$平面にプロットした. 黒丸はクラスタ中心を表す.

$\alpha = 0.0$ のときはクラスタリングのみを行う従来法に等しく, α を大きくすると, 正準相関係数を最大にするようクラスタ中心が求まる. クラスの境界部分に注目すると, $\alpha = 0.3$ と比較して $\alpha = 0.9$ のときにクラスタ中心の数が増加している. 得られたクラスタ中心を用いて, 各クラスタ毎にFisherの線形判別を行った. トレーニングデータについての誤判別件数は1件で, 識別率は99.3%となった. 通常の線形判別では識別率98.0%である.

次に, 3品種, 13特徴量のワインデータ178個を提案法に適用し, クラスター数を$9, 12, 15, \cdots$と増加させた. クラスター数を9とし, 提案法を適用した場合に得られたクラスター中心を用いて, フィッシャーの線形判別を用いて判別した場合, 判別率は99.438%になった. クラスター数18とした場合, 識別率100%となった.

4. おわりに

容易に線形判別できるように, 複数のクラスタを判別が困難な2群の境界領域につくる手法を提案した. 数値例では, Andersonのアヤメのデータとワインのデータを提案法に適用し, 従来法の識別率と比較することによって提案法の有効性を示した.

参考文献

[1] H.Hotelling: "Analysis of a complex of statistical variables into principal components," *J.Educ. Psychol.*, Vol.24, pp 417-441 and pp 498-520 (1933)

[2] 宮本定明, 馬屋原一孝, 向殿政男: "ファジィc-平均法とエントロピー正則化法におけるファジィ分類関数," 日本ファジィ学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 548-557 (1998)

[問い合わせ先]
〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学大学院 工学研究科
電気・情報系専攻 経営工学分野　　市橋　秀友
TEL:0722-54-9352　FAX:0722-54-9915
E-mail: ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

TF5−2

KL情報量による正則化を用いるファジィクラスタリング

Fuzzy clustering with regularization by K-L information

○ 宮岸聖高，安富 善彦，市橋秀友，本多克宏
○ K.Miyagishi, Y.Yasutomi, H.Ichihashi and K.Honda
大阪府立大学　大学院工学研究科
Graduated school of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : This paper discusses about similarity between the Gaussian mixture model with EM algorithm and the FCM based on the Mahalanobis distance with the entropy regularization. We show that the same algorithm as the EM algorithm can be derived from a modified FCM with regularization by K-L information.

1. はじめに

本研究では，ファジィクラスタリングのためのFCM法[1]でのエントロピーによる正則化[2]をKL情報量による正則化に変更することによって，ガウス混合モデルにおけるEMアルゴリズム[3]が導かれることを議論し，KL情報量正則化の意味を議論する．

2. ガウス混合モデルとKL情報量による正則化FCM法

正規分布やχ^2分布などの単一の分布型を仮定しない確率密度関数の推定法にガウス混合モデルがある．密度関数は複数の正規分布の凸結合で表される．したがって，クラスター中心の周りにデータが分布するようにクラスターに分割するファジィクラスタリングによく似た方法であると考えられる．n個の個体（パターン，サンプル）の特徴量をs次元データベクトル$\boldsymbol{x}_k$，c個の正規分布の平均をs次元ベクトル$\boldsymbol{v}_i$とする．ガウス混合モデルは密度関数を

$$g(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{c} \pi_i p_i(\boldsymbol{x}) \tag{1}$$

$$p_i(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}|A_i|^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{v}_i)^T A_i^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{v}_i)\right) \tag{2}$$

と表して，未知パラメータである行列A_i，平均$\boldsymbol{v}_i$，π_i，事後確率u_{ik}を最尤法によって求める．EMアルゴリズムは，対数尤度

$$Q = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}\log\pi_i + \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}\log p_i(\boldsymbol{x}_k) \tag{3}$$

を最大化する解を求めるアルゴリズムである．本研究では，まずFCM法でのエントロピーによる正則化をKL情報量による正則化に変更することによって，ガウス混合分布におけるEMアルゴリズムが導かれることを示す．個体kがクラスターiに属する度合いをメンバシップu_{ik}，クラスター中心を$\boldsymbol{v}_i$とし，個体からクラスター中心までの距離をd_{ik}とする．エントロピー正則化FCM法の目的関数のエントロピー項をKL情報量に変更し，制約条件をラグランジュ関数に含めて

$$J_{\lambda\tau} = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}d_{ik} + \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}\log|A_i| + \lambda\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}\log\frac{u_{ik}}{\pi_i} - \sum_{k=1}^{n}\eta_k\Big(\sum_{i=1}^{c} u_{ik} - 1\Big) - \tau\Big(\sum_{i=1}^{c}\pi_i - 1\Big) \tag{4}$$

$$d_{ik} = (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{v}_i)^T A_i^{-1}(\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{v}_i)$$

とすると，最適性の必要条件より，

$$u_{ik} = \frac{\pi_i \exp\left(-\frac{1}{\lambda}d_{ik}\right)|A_i|^{-\frac{1}{\lambda}}}{\sum_{j=1}^{c}\pi_j\exp\left(-\frac{1}{\lambda}d_{jk}\right)|A_j|^{-\frac{1}{\lambda}}} \tag{5}$$

$$\pi_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}}{\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} u_{jk}} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} u_{ik} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{v}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}\boldsymbol{x}_k}{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}} \tag{7}$$

が導かれる．計算アルゴリズムは式(5)〜式(7)の繰り返しとなり，ガウス混合分布におけるEMアルゴリズムと同様になる．したがって，分布（確率密度）を求めるのか集合（メンバシップ）を求めるのかの相違はあるが密接な関係にあると言える．EMアルゴリズムとの相違はファジィ度を制御するための係数λがある点である．すなわち，文献[4]は類似する方法であるが提案法ではπ_iを推定する方法である．

式(5)のメンバシップ関数は，従来のエントロピー正則化のFCM法に比べてπ_iが分母分子に掛かっている．式(6)より，π_iはクラスターiの容量を表している

と考えられるので，KL情報量による正則化ではクラスター容量についても最適化を図っているといえる．

3. 数値例

以下のような数値実験を行った．まず，2次元200個のパターン(サンプル，データ)を作成した．ただし，パターンは平均0分散1に基準化されている．パターンの集合は185個と15個の2つの円形クラスターからなっている．$\lambda = 1.46$，終了判定条件を$\max\{|v_i^{NEW} - v_i^{OLD}|\} < 0.001$とした．エントロピー正則化FCM法では87回，KL情報量正則化FCM法では14回で収束し，$\pi_1 = 0.925$，$\pi_2 = 0.075$となった．これは元のデータの割合と一致している．エントロピー正則化FCM法，KL情報量正則化FCM法のクラスタリング結果を図1と図2に示す．図中，○はメンバーシップ値が0.5以上でクラスター1に属するパターン，×はクラスター2に属するパターンを表している．また，図3と図4でデータ領域の分類関数の様子を示す．濃淡は分類関数の値の最大値を表しており，色が濃い部分ほど，両方のクラスターへ均等に属していることを示している．

従来のメンバシップのべき乗を用いるFCM法，エントロピー正則化FCM法では二つのクラスターの中心を結ぶ直線に垂直な等分線がクラスターの境界となっているので図1では左の大きなクラスターの一部が右の小さなクラスターに取り込まれているが，提案法では図2のように左右のクラスターにうまくクラスタリングされている．また，図3と図4の分類関数の様子から境界が小さいクラスターの方へ移動していることが分かる．このように，提案法によりクラスターの容量を考慮しながらクラスタリングを行うことで，大きさに差があるクラスターを適当に分割することができている．

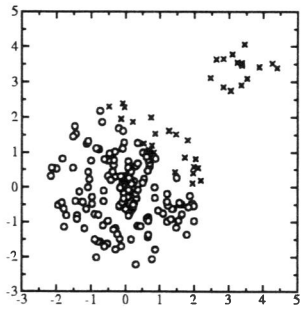


図 1: エントロピー正則化FCM法の結果

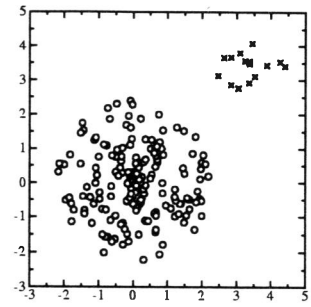


図 2: KL情報量による正則化FCM法の結果

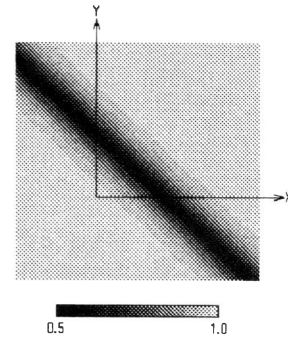


図 3: エントロピー正則化FCM法の分類関数

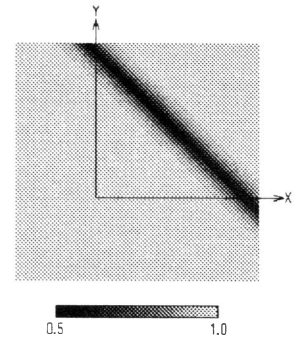


図 4: KL情報量による正則化FCM法の分類関数

参考文献

[1] J.C.Bezdek: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press (1981)

[2] 宮本定明: クラスター分析入門, ファジィクラスタリングの理論と応用，森北出版(1999)

[3] R.L.Streit and T.E.Luginbuhl, Maximum likelihood training of probabilistic neural networks , *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol.5, No.5, pp.764-783(1994)

[4] D. E. Gustafson and W. Kessel: Fuzzy Clustering with a Fuzzy Covariance Matrix; *Proc. of IEEE-CDC*, Vol.2, pp761-766 (1979)

［問い合わせ先］ 〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学大学院工学研究科 市橋 秀友
TEL:0722-54-9352 FAX:0722-54-9915
E-mail: ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

一般講演論文

9月8日（金）

FA1−1

ファジィチューニングによる動的学習パラメータを有する適応型Q-Learning
Adaptive Q-Learning Method with Dynamic Parameters Tuned by Fuzzy Reasoning

○前田 陽一郎
Yoichiro MAEDA
大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract — An active search in the reinforcement learning disturbs the learning process when learning proceeds and converges to a partial search area. Therefore, it is important to balance between searching behavior of the unknown knowledge and using behavior of the obtained knowledge. In this research, we propose an adaptive Q-learning method tuning the learning parameters of reinforcement learning by fuzzy rules. We also report some results of artificial ants simulation using this method.

1 緒 言

近年ロボット制御あるいは機械制御の分野で、強化学習法の研究が盛んに行われている。強化学習には Sutton の TD 法 [1]、畝見の実例に基づく強化学習法 [2]、Watkins の Q-Learning[3] などが提案されている。その中でも Q-Learning は代表的な手法であるが、その発展形として Dyna[4]、TPQ-Learning[5]、CQ-Learning[6]、Q(λ)-Learning[7] 等がある。これらは Q-Learning の欠点の克服を目指して提案された手法である。しかしながら、Dyna や TPQ-Learning は非決定性を適切にとり扱えない点、CQ-Learning では報酬を一箇所でしか与えられないことおよびタスクが予めサブタスクに分解されていることを仮定している点、 Q(λ)-Learning では離散マルコフ決定過程下での最適性が保証されているわけではない点、などの問題がある。

澤田ら [8] の研究では Boltzmann 分布を用いて行動を決める際のパラメータである Boltzmann 温度を、学習過程とタスク達成過程の自律的構成に実時間性を持たせるパラメータとする。そしてロボットが自律的に Boltzmann 温度を変化させることで、報酬の履歴から現在の状態が未知であるか既知であるかを判断する。澤田氏は 2 つの移動ロボットの協調運搬実験にこの手法を用いて、その有効性を検証している。

さらに強化学習においては、状態空間が大きい場合積極的な探索が望まれるが、学習が進み探索するべき空間が絞られてくると積極的な探索は学習の妨げになるという問題も指摘されている。そのため未知知識を収集するための行動と既知知識を利用した行動という矛盾した 2 目的のバランスを考えることが重要になってくる。そこで本研究ではこの 2 目的のバランスをとるために学習パラメータをファジィルールにより適切にチューニングする適応型 Q-Learning を提案する。本手法を用いて人工蟻の採餌シミュレーションを行ったので、この結果についても報告する。

2 適応型 Q-Learning の提案

強化学習の枠組みでは学習者は未知の状況に置かれたときも情報を得るために何らかの行動を起こすことが必要となる。また環境の変化への対応や最適解の追求を行わせるには、それまでの学習によって獲得した行動パターンには執着せず積極的な探索を行うことも必要となる。これらの状況への対応方法は学習の能力に大きく影響する。すべての強化学習機構には何らかの形で探検戦略が組み込まれており、たとえば Dyna[4] のような参照表を用いる方法では探索を好む戦略を採ることで比較的容易に最適解を学習することができる。しかしながら出力の選択肢が増加した場合、絶えず探索を好むような戦略は有効ではない。

一般的に環境の変動に対する学習を考える際、探検による未知知識の収集と既知知識を利用した適応的な行動という相反する 2 目的のバランスが極めて重要である。学習初期は探検が有効であるが、学習が充分に行われた後は探検よりも既知知識に従った方が良いことは明らかである。

2.1 学習率、割引率、温度定数のチューニング手法

本手法ではファジィルールでチューニングした学習率 α、割引率 γ、温度定数 T を Q-Learning と Boltzmann 分布に基づく確率的な行動選択法に用いる。Q-Learning の Q 値の更新式である

$$\Delta Q(x_t, a_t) = \alpha(r_t + \gamma \max_b Q(x_{t+1}, b) - Q(x_t, a_t)) \quad (1)$$

においてのパラメータ α、γ について考える。まず γ は割引率であり $0 \leq \gamma \leq 1$ の定数である。本手法では評価式に、過去から現在までの重み和を用いたので γ は過去に得られた報酬をどの程度考慮するのかを決めるパラメータとなる。値が大きいほど過去を重要視する。つまり過去の経験を生かし、次回により多くの報酬が得られるであろう方向へ学習が進む。α は学習率で $0 \leq \alpha \leq 1$ の定数である。α は現在と過去を考慮した報酬をどの程度反映させるのかを決める。値が大きいとその場その場を重要視した学習 (完全学習) をすることになる。

さらに Boltzmann 分布に基づく確率的な行動選択法

$$P(a|x) = \frac{\exp(Q(x,a)/T)}{\sum_{b \in possibleactions} \exp(Q(x,b)/T)} \quad (2)$$

の T は温度定数であり、値が大きいほど行動はよりランダムになる。これらは強化学習の性能を左右する重要なパラメータである。表 1 に各パラメータと学習の関係を示す。比較的探索領域が広い場合には α、γ を小さく、T を大きくとれば収束は遅いが良い解が得られる。逆に探索領域が狭い場合は α、γ を大きく T を小さくとれば収束の速い学習が可能である。

一般的に学習初期の段階では探索領域が広く収束期には探索領域が狭くなると仮定できる。探索領域が変動することから 3 つのパラメータを動的にとることでさらに良い学習が期待できる。つまり学習初期では積極的な探索を行うため α、γ を小さく T を大きくとる。学習を進めることで既知の知識に従うため α、γ を大きく T を小さくしていく。パラメータの制御の方法はいくつか考えられ、単純に式を用いて操作しても良いが、本研究ではシステム開発者である人間のノウハウを埋め込んだファジィルールを用いてこれらのパラメータを操作する。

本手法のアルゴリズムフローを図 1 に示す。獲得した状態からボルツマン分布による確率的行動選択を行い、Q 値の変更幅を求めるが、その際用いる学習パラメータ、学習率 α、割引率 γ、温度定数 T をファジィルールによりチューニングする。その後、終了判定が成立するまで試行を繰り返す。

表 1. α, γ, T と学習の関係

学習率 α	低	高
割引率 γ	低	高
温度定数T	高	低
性　質	慎重な学習 積極的探索 未知知識の収集 ランダムな行動	大胆な学習 消極的探索 既知知識の利用 堅実な行動

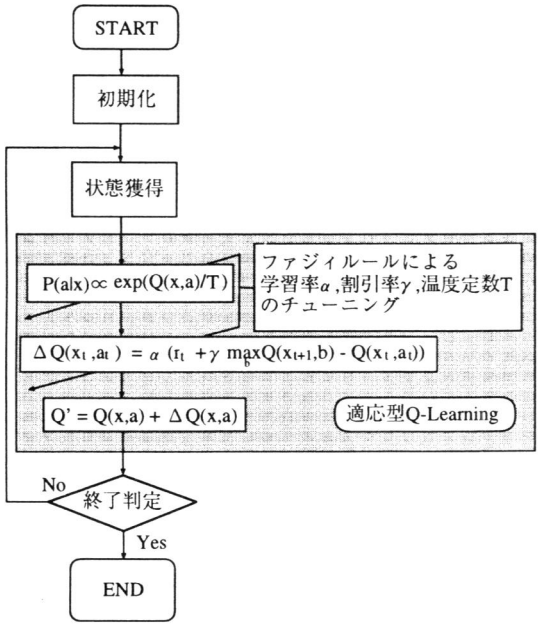


図 1. 適応型 Q-Learning のアルゴリズムフロー

3　人工蟻の採餌シミュレーション

本手法の有効性を確認するために人工蟻の採餌シミュレーションを行った。ここではこのシミュレーションの方法および結果について説明をする。

3.1　シミュレーション条件

図 2 のように $n \times n$ のフィールドをつくり、いくつかの地点に餌 (報酬) を置く。蟻 (エージェント) は左上を出発点として報酬を得ながら右下のゴールへと向かう。学習者がとれる行動は上下左右のうちいずれかであり、また過去に訪れたことのある場所 (状態) には移動できない。現在の状態から上下左右のうち餌のある状態に移動 (行動) したときだけ一律 100 の報酬が与えられる。実際に Q 値が更新されるのはゴールしたときであり、ゴールできなかった場合学習は進まないものとする。

3.2　動的学習パラメータのファジィチューニングルール

本手法はファジィルールを用いて学習率 α、割引率 γ、温度定数 T をチューニングし、動的パラメータとする。まずメンバシップ関数の前件部を図 3 に示す。前件部に関しては α、

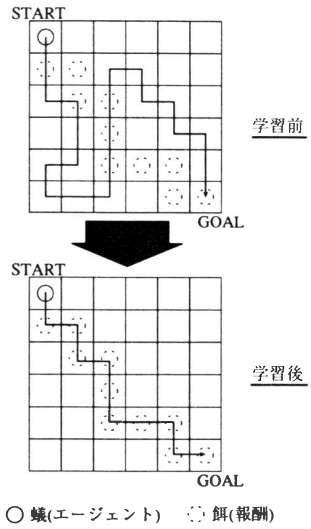


図 2. シミュレーション環境

γ、T のファジィルールに対してすべて共通のものを用いており状態 x における最大の Q 値である $maxQ(x)$ と試行回数 $Trial$ の 2 つからなる。

次に学習率 α、割引率 γ および温度定数 T の後件部シングルトンを図 4a)、図 4b) および図 4c) にそれぞれ示す。本研究で用いたファジィルールについてはシミュレーション結果において示す。

人工蟻は現在位置を獲得し、適応型 Q-Learning により学習を行うが、蟻が行動不可能な場合、学習が失敗し Q 値の更新をとりやめる。行動可能な場合はゴールを目指しながら学習を繰り返す。

3.3　シミュレーション結果

本シミュレーションでは比較のためファジィルールによるチューニングを行わない場合の結果も示す。チューニングをしない場合、パラメータは定数となる。その時の学習率 α, 割引率 γ, 温度定数 T の値はそれぞれ $\alpha = 0.8, \gamma = 0.4, T = 30$ としている。これらは単純な Q-Learning を用いたときの未知知識の収束と既知知識の利用としての学習においてある程度バランスのとれた値である。これを基準にシミュレーション結果を示していく。

結果のグラフは x 軸に試行回数 Trial、y 軸に成功率 success rate を示している。成功率は一試行で獲得できた報酬の割合である。

$$\text{成功率} = \frac{\text{獲得できた報酬の数}}{\text{フィールドに存在する全報酬の数}}$$

まずファジィルールによるチューニングを行わない単純な Q-Learning を用いた場合のグラフを基準として、以下にファジィルールによるチューニングを行った場合の結果を示す。また各パラメータにおいて 4 種類のファジィルールを与えてシミュレーションを行った。

学習率 α のみ、割引率 γ のみ、温度定数 T のみをファジィチューニングした場合に与えたファジィルールを表 2～ 表 4 に、シミュレーション結果を図 5～ 図 7 にそれぞれ示す。

以上の結果から

- 学習率 α
  表 2 の (c)Ard のファジィルール
- 割引率 γ
  表 3 の (c)Grd のファジィルール
- 温度定数 T
  表 4 の (b)Tlu のファジィルール

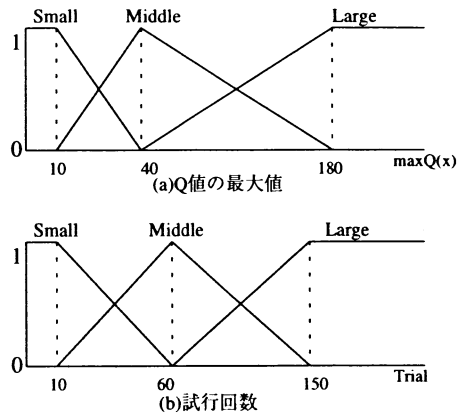
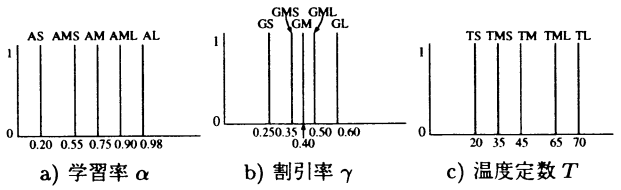


図 3. 前件部メンバシップ関数



a) 学習率 α　b) 割引率 γ　c) 温度定数 T

図 4. 後件部シングルトン

のファジィルールが良い結果を出していることがわかる。

さらに学習率 α、割引率 γ、温度定数 T のすべてのパラメータを良い結果を出した上記のファジィルールでチューニングしたときのシミュレーション結果を図 8 に示す。以上の結果より、いずれの場合もファジィチューニングを行ったほうが良好な結果が得られた。

3.4 考察

まず図 5~7 において各パラメータを単独でチューニングすることでパラメータごとの特徴が出ることを確認した。学習初期では学習率 α、割引率 γ を小さく、温度定数 T を大きくとり、学習が進むに従って、学習率 α、割引率 γ を大きく、温度定数 T を小さくしていくことでバランスの良い学習を行なうことができた。

温度定数 T を見ると Tlu のファジィルールが最も良い結果を示している。他のルールを用いた場合の結果は決して良いものではなく、ルールによる違いが比較的大きく現われている。割引率 γ は Gld のファジィルールと Grd のファジィルールが良かった。収束する段階では Gld のファジィルールの方が成功率が高かったが、その後試行を重ねるに従ってどんどん成功率が下がっている。今回は最終的に解が安定する方を選び、Grd のファジィルールを良好とした。学習率 α は最終的な解の安定という点で見ると Alu のファジィルールが良かった。しかしながら、α については解の安定よりも収束の速さにおいて、Ard のファジィルールがかなり良好であったので、これを選んだ。以上の結果より、温度定数 T が最も顕著な差が現れ、学習率 α が最も差がなかったことがわかった。これにより、温度定数 T が Q-Learning の学習性能を改善する上で最も重要なファクタであることも確認された。

最後にこれら 3 つのパラメータ全てをチューニングした場合は、図 8 に示すとおりほぼ 100%に近い成功率で立ち上がりも極めて良好であった。尚、学習開始時の段階でファジィを使わない場合より若干低い成功率となっているが、これはこの間に探索を広く行っているためわずかに下がっているものと考えられる。

本シミュレーションにより、単純な Q-Learning を用いるよりも Q-Learning のパラメータをファジィルールを用いてチューニングした適応型 Q-Learning の方が、学習初期の未知知識の収集と収束期の既知知識の利用という観点からバランスのとれた学習を実現できることを確認した。

4 結 言

本研究では強化学習法のアルゴリズムの一つである Q-Learning を用いて未知知識の収集と既知知識の利用という 2 目的のバランスをとるために、ファジィルールによってチューニングされた動的学習パラメータ (学習率 α、割引率 γ、温度定数 T) をもつ適応型 Q-Learning を提案した。そしてその有効性を確認するために人工蟻の採餌シミュレーションを行った。

その結果、今回提案した適応型 Q-Learning は従来の Q-Learning よりも効率の良い学習が実現できることを確認した。学習率 α、割引率 γ、温度定数 T のそれぞれについて学習性能改善に与える効果を調べたところ、T が成功率の改善に最も大きく影響することも確認できた。また、α は立ち上がり性能の改善に効果があり、γ は T と α の中間的な性能を有することも確認され、これらのパラメータの特徴を生かしたチューニングが可能であることもわかった。

しかしながら、今回のシミュレーションでは高い成功率を示していたものの、本手法では学習後は既知知識の利用を重要視するため、事実上学習をやめてしまうといった問題点も確認された。このため今後の課題としては、パラメータをチューニングするファジィルールの改善、3 つの学習パラメータのチューニングの重みづけの検討、等があげられる。

参考文献

[1] R.S.Sutton: Learning to Predict by the Methods of Temporal Difference , *Machine Learning* , Vol.3, pp.9-44 (1994)

[2] 畝見 達夫: 実例に基づく強化学習法, 人工知能学会誌, Vol7, pp.141-151 (1992)

[3] C.J.C.H.Watkins and P.Dayan: Q-Learning, Machine Learning , *Technical Note* , Vol.8, pp279-292 (1992)

[4] R.S.Sutton: Integrated Architecture for Learning, Planning, and Reacting Based on Approximating Dynamic Programing , *Proc. of 7th International Conference on Machine Learning* , pp.216-224 (1990)

[5] R.A.McCallum: Using Transitional Proximity for Faster Reinforcement Learning , *Proc. of 9th International Conference on Machine Learning* , pp.316-321 (1992)

[6] S.P.Singh: Transfer of learning by Composing Solutions of Elemental Sequential Tasks , *Machine Learning 8* , pp.323-339 (1992)

[7] J.Peng: Efficient Memory-Based Dynamic Programing , *Proceedings of the 12th International Conference on Machine Learning* , pp.438-446 (1995)

[8] 澤田 務: 温度付き強化学習における学習パラメータに関する特性の研究, 第 *16* 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.1, pp.407-408 (1998)

＜連絡先＞

〒 572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学 総合情報学部 情報工学科 前田 陽一郎
Tel & Fax : 072-825-4698(直通)
E-mail : maeda@mdlab.osakac.ac.jp

表 2. α のファジィルール

(a)Aldのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	AM	AMS	AS
Middle	AML	AM	AMS
Large	AL	AML	AM

(b)Aluのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	AL	AML	AM
Middle	AML	AM	AMS
Large	AM	AMS	AS

(c)Ardのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	AS	AMS	AM
Middle	AMS	AM	AML
Large	AM	AML	AL

(d)Aruのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	AM	AML	AL
Middle	AMS	AM	AML
Large	AS	AMS	AM

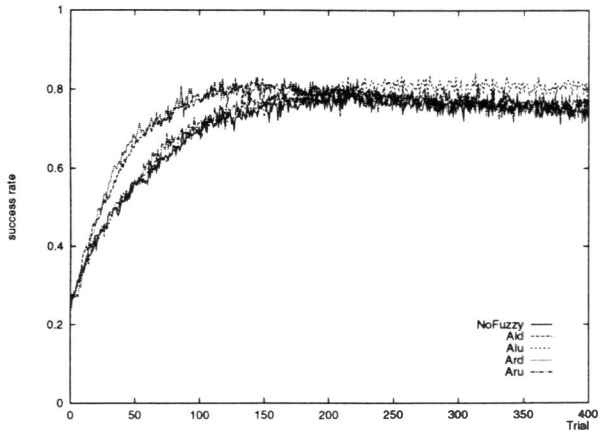


図 5. シミュレーション結果 (1) [α のみ]

表 3. γ のファジィルール

(a)Gldのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	GM	GMS	GS
Middle	GML	GM	GM
Large	GL	GML	GML

(b)Gluのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	GL	GML	GML
Middle	GML	GM	GM
Large	GM	GMS	GS

(c)Grdのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	GS	GMS	GM
Middle	GM	GM	GML
Large	GML	GML	GL

(d)Gruのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	GML	GML	GL
Middle	GM	GM	GML
Large	GS	GMS	GM

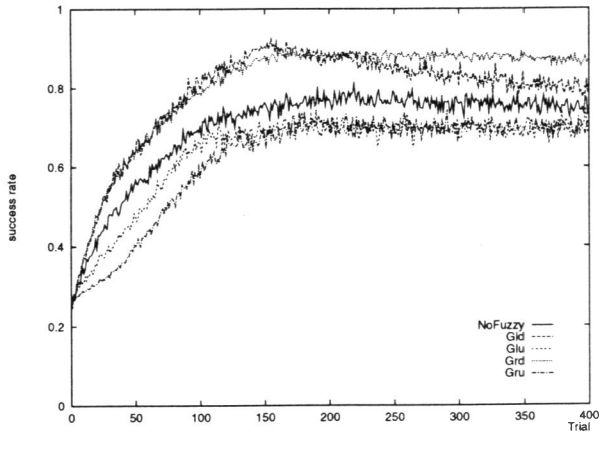


図 6. シミュレーション結果 (2) [γ のみ]

表 4. T のファジィルール

(a)Tldのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	TMS	TS	TS
Middle	TML	TM	TMS
Large	TL	TML	TM

(b)Tluのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	TL	TML	TM
Middle	TML	TM	TMS
Large	TMS	TS	TS

(c)Trdのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	TS	TS	TMS
Middle	TMS	TM	TML
Large	TM	TML	TL

(d)Truのファジィルール

Trial \ maxQ(s)	Small	Middle	Large
Small	TM	TML	TL
Middle	TMS	TM	TML
Large	TS	TS	TMS

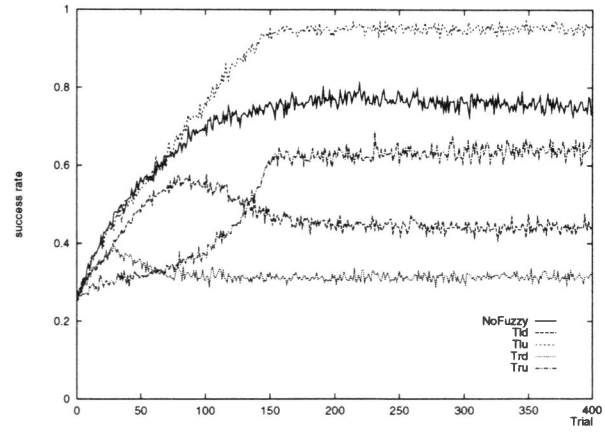


図 7. シミュレーション結果 (3) [T のみ]

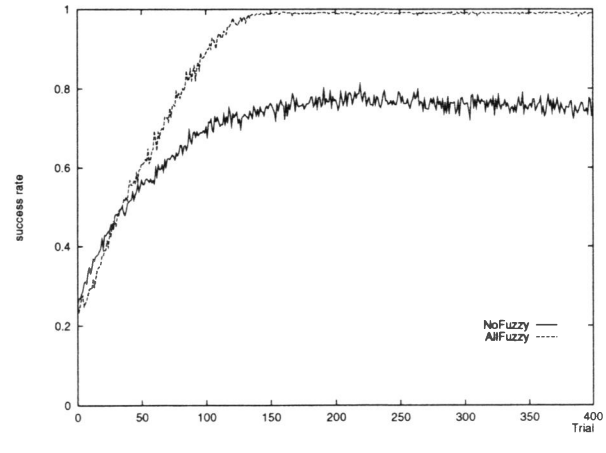


図 8. シミュレーション結果 (4) [α,γ,T 全て]

FA1−2

認知記憶に基づく英会話学習法

Utilizing Cognitive Memory in Studying Spoken English

市橋 秀友
H.Ichihashi
大阪府立大学 大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : The necesity of English ability grows rapidly in Japan. Mnemonics are artificial aids for memory for ill-structured material which is largely disconnected. Mnemonics are often used to memorize English words. We utilize Method of Loci in which items to be recalled are imaginably placed in a larger image, such as a room, a post office and a staion that are well known place or landscape. Best mnemonics are those that are humorous, quirky and outlandish.

1. はじめに

英会話の能力を必要とされる時代が近づいている．米国では計算機を使える能力の有り無しで収入が大きく変わることを意味する Digital divide という言葉が流行しているのに対して，日本では English divide が始まろうとしている．語学習得には状況と関連した知識としての学習が必要で，現在の日本で行われているような，実践的な文脈と切り離された少数の例文による語彙教育では，年間100から200語しか学習できないのに対して，native speaker は日常の活動を通した学習で，年間平均5000語を学習しているといわれている．

しかし，現実にわれわれが語学学習に割ける時間はそれほど多くなく，日本人は日本語に堪能であることも求められるので，各個人の職業や仕事に必要な本来の学習が疎かになってしまう．そこで，本研究では英会話の短期速習法として，認知科学的知見をフルに活用した方法を提案する．

2. 記銘

記銘は長期記憶貯蔵への情報の取り込みで，学習であり検索過程を含まない．「単語」の記憶に関連する文脈(context)は環境文脈，意味文脈，主観的文脈の三つからなるとされていて，文脈は意識にあまり上らないが，記憶の検索の際にどのような文脈で知覚され符号化されたかが大きな影響力をもっている．語の解釈，イメージ化，物語化，自分の体験と関連付けるなどは情報を貯蔵するための変換で，このような変換は符号化（コード化）と呼ばれる．

精緻化リハーサル(elaborative rehearsal)は，項目を他の事柄と関連づけたり，イメージを思い描く活動を含む．場所法(method of loci)と呼ばれる記憶術の方法では，自分が熟知している道筋に目標物（自宅から駅までの玄関，門，角のたばこ屋，公衆電話…）を定めておき，その場所に憶えるべき対象の視覚的なイメージを思い浮かべる．そして，それを手がかりとして記憶する．この方法は以下に述べる認知科学的知見に則した効率的記憶法と考えられる．

F.I.M.Craik and E.Tulving, 1975の実験では提示済みの項目とまだ提示していない項目をランダムに提示して，以前に提示された項目であるかを回答させる再認テストの結果は，意味条件，音韻条件，形態条件の順に高い成績となった．深い処理を受けた情報が長い期間を経ても利用可能であると考えられている（処理水準のモデルlevel of process）．

場所法との関連では認知地図(cognitive map)の研究が重要である．哺乳類などの比較的高等な動物にとって場所の知覚と記憶が，生きていく上での重要な機能のひとつである．D.S.Olton らは，立てた短い円筒状の容器（台）の８つの窓から放射状に設けられた短い廊下（放射状迷路）のある装置の容器の部分にネズミをいれ，廊下の端に置かれた餌をとらせる実験を行った．窓はカーテンで餌が見えないようにされている．ほとんどのネズミは数回の試行で８個すべてを各廊下を一回ずつ訪れるだけで餌をとることができるようになった．しかも，ネズミはランダムな順序で窓を選択した．ネズミの認知地図に訪問した順序が記憶されていると考えられる．ネズミの海馬に認知地図を表していると思われるニューロン（場所細胞）が見つけられている．海馬体のCA1という領域にある錐体細胞が場所ニューロンで，特定の場所に行ったときにだけ発火する．記憶の大半を占めるエピソード記憶には，場所が必須の要素として入っていること，場所情報がしばしば記憶を呼び起こす際のインデックスとして機能していることから，場所ニューロンが記憶のメカニズムに大きく

関わっていると考えられる．場所認知の手がかりは光，音，建物，その他の多次元の感覚刺激が総合されたものである．

3. 想起

想起あるいは記憶情報の検索は，連想（連合，association）の糸をたどることによりなされる[連合主義]．先に提示した刺激（プライマー，プライム刺激）が後で提示した刺激（ターゲット刺激）の処理を促進することはプライミング(priming)と呼ばれる．たとえば，「R　B　W」や「こ　　たき」などの穴埋め課題（単語完成課題word completion task）に先立って，ターゲットの単語を意図を持たずに，課題と関連のないものとして，無意識的に気づかず見た場合も単語完成率が向上し，直接プライミング効果が認められることが知られている．

メンタルモデル（頭に描く具象的な像）は学習対象に関する単なる知識の寄せ集めではなく，一貫性をもって相互に関連づけられた知識の集合である．われわれは，身近な問題なら具体的な心象を描くことが出きる．メンタルモデルを構築し柔軟に活用できる人ほど問題が容易に解ける．D.E.Kieras and S.Bovairは多くのライトとスイッチからなるコントロールパネルで，ライトの点灯手続きを学習させた．仮想的な宇宙船の構造や機能と関連づけて学習したグループと，機械的に学習したグループでは，前者が学習されやすく，忘れにくく，新しい手続きが案出されやすい．モデルが形成され，関連づけと推論が可能になった．

4. 保持と忘却

J.G.Jenkins and K.M.Dallenback(1924)の実験では無意味綴りの記銘後，睡眠していた条件の下では，2時間後から8時間後まで再生成績の低下は見られなかった．覚醒条件では時間とともに低下した．時間の経過による記憶痕跡の減衰が忘却の主要な要因ではないと考えられている．

忘却は情報の消失ではなく，検索が困難になることによるという説がある（検索失敗説）．類似の材料を憶える場合は，記憶するリストの数が多くなるほど，再生成績は低下する．しかし，記憶項目のカテゴリーを手がかりとして与えたり，再認テストを行うなどの，より強力な手がかりの下で記憶をテストした場合，保持期間中の精神活動の量に依存しない．忘却されたように見える情報も，十分に強力な想起の手がかりが存在すれば，検索され，想起される可能性がある．

事故で脳震盪を起こしたり，精神病の治療に用いられる電気けいれん療法を受けるとその直前の記憶が失われるが，直前より前の記憶や以後の記憶には障害がなく，短期記憶も正常であることが多い．短期記憶が長期記憶に移行する過程が一時的に阻害されたと考えられる．D.E.Hebbは短期記憶はニューロン間で電気信号が行き来する状態であり，次第に物質的解剖学的変化が起こり，脳機能の一時停止によって失われない長期記憶（記憶痕跡）となるという考えを提唱した．この期間は固定期間(consolidation period)と呼ばれ，記憶の固定には一定期間の正常な脳活動が必要で，海馬を中心とする側頭葉内側部が関わっていると考えられている．この期間の長さには諸説があるが，ヒトでは数時間ないし数日とされている．

5. 英文を憶える

手順ならびに留意点をまとめると，(1)場所法に基づき，検索のための手がかりとなる内容を視覚的イメージとして心に描く．(2)場所を訪ねる順序（認知地図）を同時に記憶する．(3)リハーサルによって銘記，記憶の固定を行う．(4)記憶が深まるとともに検索手がかりを意識せずに，場所のみから検索できるようになる．(5)記憶が完全でない部分に新たな検索手がかりをイメージする．(7)就寝まえにリハーサルすると記憶が固定しやすい．(8)起床前は検索が容易になる．リハーサルが短時間ででき効率がよい．(9)CDを用いて聴覚的にプライミングを行う（通勤時間）．(10)速読によるプライミングを行う．

検索手がかりの例：373. Only a few employees opted for an extended lunch hour.[浜寺諏訪ノ森のトヨタ販売で]視覚的にOPTの文字をイメージ．449. One-third of Americans are suffering from (obesity)．[浜寺公園前の交差点で]体格のいい王君がビサカードを持っているのをイメージ．682. The (assignment) was ordained by the chief executive officer. [叡福寺の階段で]浅居先生がおでんを販売されているのをイメージ．

参考文献

[1] 市川伸一他，岩波講座・認知科学5：記憶と学習，岩波書店(1994)

[2] 太田信夫，第10章：言語の心理学，知識・知能と情報（板橋秀一編著），近代科学社(1992)

［問い合わせ先］〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学 大学院工学研究科 電気・情報系専攻
経営工学分野　市橋秀友
TEL: 0722-54-9352　FAX: 0722-54-9915
E-mail: ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

FA1−3

確率的因果モデルにおける条件付因果確率の学習

A learning method of conditional causal probabilities in probabilistic causal models

山田耕一
Koichi YAMADA

長岡技術科学大学 経営情報系
Dept. of Management & Information Systems Science, Nagaoka University of Technology

ABSTRACT: Methods to model uncertain causal relations among events in systems of some interest, and to predict / diagnose unknown events from the known have been studied. The paper proposes a method to construct a hierarchical probabilistic causal model by learning conditional causal probabilities from the observed data including causes and effects.

1．はじめに

分析対象となる事象群の因果関係に基づくモデル化と，観測事実から未知事象を予測・診断する問題は，システム分析における普遍的作業の一つである．工学分野における因果関係表現は数式モデルによるものが最も一般的であるが，事象が離散的で因果関係に不確実性が含まれる場合は，因果構造をネットワーク表現し，因果の不確実性を確率によって表現する方法がよく用いられる．

確率による因果の不確実性表現では，ビリーフネットワーク[1]のように条件付確率を用いることが多い．しかし，原因 A による結果 B の条件付確率 $P(B|A)$は A 以外の原因が B を引き起こす場合も含む確率評価であるため，人間が考える因果の確率とは認知的に異なる．そこで「A が起き，A が原因となって B を引き起こす事象」を因果事象，原因による因果事象の条件付確率を条件付因果確率と名付け，条件付因果確率によって因果の不確実性を表現する方法が提案されている[2]．最近では，条件付因果確率に類似の条件付因果可能性を用いる方法も提案されている[3,4]．

本稿では，因果構造が値非対称因果モデル[4]によって表現される場合に，与えられたデータから条件付因果確率を学習する方法を提案する．

2．確率的因果モデル

2.1 条件付因果確率

u_i $(i=1,\ldots,I)$, v_j $(j=1,\ldots,J)$を事象とし，u_iの生起が v_jの生起の原因になり得るとする．このとき u_i, v_j をそれぞれ**原因事象**，**結果事象**と呼ぶ．また，以下の式を満たす $v_j:u_i$によって u_i が v_jを引き起こす事象を表し，これを**因果事象**と呼ぶ[2]．

$$v_j:u_i \leftrightarrow (v_j:u_i)\wedge u_i \leftrightarrow (v_j:u_i)\wedge v_j \leftrightarrow (v_j:u_i)\wedge u_i \wedge v_j \quad (1)$$

$$\overline{v_j:u_i} \wedge \overline{u_i} \leftrightarrow \overline{u_i} \quad (2)$$

$$\overline{v_j:u_i} \wedge \overline{v_j} \leftrightarrow \overline{v_j} \quad (3)$$

ただし，$\wedge, \vee, \leftrightarrow$はそれぞれ連言，選言，同値を表し，$\overline{u_i}, \overline{v_j}, \overline{v_j:u_i}$はそれぞれ $u_i, v_j, v_j:u_i$の否定である．

また，x_i, y_jを $U_i=\{u_i,\overline{u_i}\}, V_j=\{v_j,\overline{v_j}\}$ の要素を値とする変数とし，それぞれを原因，結果と呼ぶ．さらに u_i, v_jが以下の式を満たすとき，x_i と y_jは**値非対称因果モデル**に従うという[4]．

$$v_j \leftrightarrow \bigvee_i (v_j:u_i) \quad (4)$$

$$v_j:\overline{u_i} \leftrightarrow \overline{v_j}:u_i \leftrightarrow \overline{v_j}:\overline{u_i} \leftrightarrow False \quad (5)$$

ただし，$False$は偽を表す．

なお，(4)式の否定を取ると次式が得られる．

$$\overline{v_j} \leftrightarrow \bigwedge_i (v_j:u_i) \quad (6)$$

値非対称因果モデルという名は，(4), (6)式からわかるように y_jの値となる $v_j,\overline{v_j}$が非対称的な因果生起の仕組みを持つことを意味する．本稿ではこれ以降単に因果モデルと呼ぶ．

さて，$U_i=\{u_i,\overline{u_i}\}, V_j=\{v_j,\overline{v_j}\}$上の確率分布をそれぞれ $p(x_i), p(y_j)$，$Z_{ij}=\{v_j:u_i, \overline{v_j:u_i}\}$上の確率分布を $p(z_{ij})$としよう．このとき，x_iが与えられた条件下での z_{ij}の確率分布 $p(z_{ij}|x_i)$を**条件付因果確率分布**と呼ぶ．また，ある z_{ij}に対し任意の $z_{i'j'}$（$i'\neq i$または $j'\neq j$）と $x_{i'}$（$i'\neq i$）の連言 Δ_{ij}を z_{ij}の文脈と呼び，条件付因果確率分布が(7)式を満たすとき，z_{ij}は確率的に**因果独立**という．

$$p(z_{ij}|x_i)=p(z_{ij}|x_i\wedge\Delta_{ij}) \quad (7)$$

ここで，$p(z_{ij}|x_i\wedge\Delta_{ij})=p(z_{ij}|x_i,\Delta_{ij})$である．

2.2 確率的因果モデル

確率的因果モデル *ProbCM* とは，次の４つ組で定義される．

$$ProbCM=(U,V,P_m,P_c) \tag{8}$$

U, V は，それぞれ可能な原因事象の集合と結果事象の集合で，$U=\{u_1,...,u_I\}$, $V=\{v_1,...,v_J\}$ である．P_m, P_c はそれぞれ原因の周辺確率分布の集合と条件付因果確率分布の集合で，$P_m=\{p(x_1),...,p(x_I)\}$, $P_c=\{p(z_{ij}\mid u_i)\mid i=1,...,I, j=1,...,J\}$ である．明らかに $p(v_j:u_i\mid \overline{u_i})=0$, $p(\overline{v_j:u_i}\mid \overline{u_i})=1$ である．

なお，本稿における確率的因果モデルでは，次の仮定が満たされるものとする．

1) $x_i,(i=1,...,I)$ は互いに確率的に独立．

2) 任意の z_{ij} は確率的に因果独立．

3．確率的因果モデルの学習

3.1 周辺確率分布と条件付因果確率の学習

3.1.1 学習データ

(8)式における U と V が与えられるとき，確率的因果モデルの構築は，$p(x_i)$ と $p(z_{ij}\mid u_i)$ を求める問題に帰着される．本稿ではこれらの確率分布を与えられたデータから学習する．ただし，学習に用いるデータは，構築された確率的因果モデルの利用時と同じ状況において収集されたデータでなければならない．例えば本モデルを異常診断に使うことを想定すると，診断の実行は何らかの症状（結果）が観測されたとき，あるいは何らかの故障（原因）が起きたときであろう．よって診断実行の状況を Ω とすると，これは次式で与えられる．

$$\begin{aligned}\Omega &\leftrightarrow \bigvee_i u_i \vee \bigvee_{i,j} v_j \leftrightarrow \bigvee_i u_i \vee \bigvee_{i,j}(v_j:u_i)\\ &\leftrightarrow \bigvee_{i,j}\{u_i \vee (v_j:u_i \wedge u_i)\} \leftrightarrow \bigvee_i u_i\end{aligned} \tag{9}$$

また，学習データの集合を $D=\{\boldsymbol{d_1},...,\boldsymbol{d_K}\}$ とし，各 $\boldsymbol{d_k}$ を，

$$\boldsymbol{d_k}=(x_1,.....,x_I,y_1,...,y_J),\ x_i\in\{u_i,\overline{u_i}\},\ y_j\in\{v_j,\overline{v_j}\}. \tag{10}$$

で表すと，少なくとも一つの i において $x_i=u_i$ でなければならない．さらに，あらゆる状況における事象生起を平均して得られる確率分布を $p_0(\bullet)$ で表現すると，確率的因果モデル利用時の確率分布は $p(\bullet)=p_0(\bullet\mid\Omega)$ であり，明らかに次式が成立する．

$$\sum_i p(u_i)\geq 1 \tag{11}$$

$$\begin{aligned}p(v_j:u_i\mid u_i)&=p_0(v_j:u_i\mid u_i\wedge\Omega)\\ &=p_0(v_j:u_i\mid u_i\wedge\bigvee_k u_k)=p_0(v_j:u_i\mid u_i)\end{aligned} \tag{12}$$

なお，本稿では学習用データに欠損値はないものとする．

3.1.2 周辺確率分布の学習

原因 x_i の周辺確率分布 $p(x_i)$ は次式によって求める．

$$p(u_i)=Coun(u_i)/K \tag{13}$$

$$p(\overline{u_i})=1-p(u_i) \tag{14}$$

ただし，$Coun(u_i)$ は，$x_i=u_i$ である $\boldsymbol{d_k}$ の数を表す．

3.1.3 条件付因果確率の学習

条件付因果確率分布 $p(z_{ij}\mid u_i)$ の数は $I\times J$ であるが，ここではある一つの j のみに着目し，I 個の $p(z_{ij}\mid u_i)$ を学習する方法について検討する．添字による混乱を避けるため，これ以降しばらく添字 j を 0 に固定する．

まず，$suf(A)$ を $A\subseteq U$ に含まれる u_i の添字集合とし，$p(v_0\mid A)$ を，

$$p(v_0\mid A)=p(v_0\mid a) \tag{15}$$

$$a\leftrightarrow \bigwedge_{i\in suf(A)} u_i \wedge \bigwedge_{i\in suf(U-A)} \overline{u_i} \tag{16}$$

とすると，$p(v_0\mid A)$, $p(\overline{v_0}\mid A)$ は次式で得られる[2]．

$$p(v_0\mid A)=1-\prod_{i\in suf(A)}\overline{c_{i0}} \tag{17}$$

$$p(\overline{v_0}\mid A)=\prod_{i\in suf(A)}\overline{c_{i0}}=1-p(v_0\mid A) \tag{18}$$

ただし，$c_{i0}=p(v_0:u_i\mid u_i)$, $\overline{c_{i0}}=p(\overline{v_0:u_i}\mid u_i)=1-c_{i0}$．

さて，上述の $p(\overline{v_0}\mid A)$ は，与えられた D から経験的確率として次のように得られる．

$$p(\overline{v_0}\mid A)=\frac{|\{\boldsymbol{d_k}\mid \boldsymbol{d_k}(y_0)=\overline{v_0},\boldsymbol{d_k}\in D_A\}|}{|D_A|} \tag{19}$$

ただし，$\boldsymbol{d_k}(y_0)$ はベクトル $\boldsymbol{d_k}$ における y_0 の値を表し，D_A は次式で与えられる．

$$\begin{aligned}D_A=\{\boldsymbol{d_k}\mid \boldsymbol{d_k}\in D,\ &\boldsymbol{d_k}(x_i)=u_i\ for\ \forall i\in suf(A),\\ &\boldsymbol{d_k}(x_i)=\overline{u_i}\ for\ \forall i\in suf(U-A)\}\end{aligned} \tag{20}$$

ここで，空を除く U の任意の部分集合 A_h, ($h=1,...,2^I-1$) について $p(\overline{v_0}\mid A_h)=\overline{p_h}$ とすると，与えられた D から最大で 2^I-1 個の方程式 e_h が得られる．

$$e_h\ :\ \prod_{i\in suf(A_h)}\overline{c_{i0}}=\overline{p_h} \tag{21}$$

さて，学習の目的は I 個の $\overline{c_{i0}}$, $(i=1,...,I)$ を求めることである．そのためには $\overline{c_{i0}}$ を変数とみて e_h の連立方程式を説けばよいが，e_h の数は最大で 2^I-1 個あり，$I=1$ の場合を除き方程式数が多すぎる．データ標本から求めた経験的確率は通常母集団の確率に完全に一致しないため，2^I-1 のすべての式を満たす I 個の $\overline{c_{i0}}$ が存在することは一般に期待できない．そこで，最大で 2^I-1 個ある方程式の中からどのように適切な I 個を選択するかについて議論する．

3.1.4 経験的確率の信頼性評価

$\overline{c_{i0}}$を求めるための適切な方程式e_hを選択するために，前節で求めた$\overline{p_h}$の信頼性を評価する．具体的には$\overline{p_h}$の区間推定を行い，信頼区間の幅が小さな$\overline{p_h}$を持つe_hの信頼性が高いとする．まず，a_hを，

$$a_h \leftrightarrow \bigwedge_{i\in suf(A_h)} u_i \wedge \bigwedge_{i\in suf(U-A_h)} \overline{u_i} \tag{22}$$

とし，a_hが起きた条件下で$\overline{v_0}$がおきる真の確率をp_0とする．また，学習用データの中でa_hが真である$\boldsymbol{d_k}$の数を$n_h = |D_{A_h}|$，そのn_h個の$\boldsymbol{d_k}$中，$\boldsymbol{d_k}(y_0) = \overline{v_0}$であるの数を$X$とすると，$X$は2項分布$B(n_h, p_0)$に従う．$X$の平均値は$n_h p_0$，標準偏差は$\sqrt{n_h p_0(1-p_0)}$である．このとき，$n_h$の値が大きいならば次の確率変数$W$は正規分布$N(0,1)$に従う[5]．

$$W = \frac{X - n_h p_0}{\sqrt{n_h p_0(1-p_0)}} \tag{23}$$

よって有意水準α（$0<\alpha<1$）に対して次式を満たすx_0を正規分布表から得ることができる．

$$P\left(\frac{|X - n_h p_0|}{\sqrt{n_h p_0(1-p_0)}} < x_0\right) = 1-\alpha \tag{24}$$

したがって経験的確率が$\overline{p_h} = X/n_h$であることを考えると次式が得られる．

$$P\left(p_0 - x_0\sqrt{p_0(1-p_0)/n_h} < \overline{p_h} < p_0 + x_0\sqrt{p_0(1-p_0)/n_h}\right) = 1-\alpha \tag{25}$$

ここで，x_0はαのみに依存する定数であるため，$\overline{p_h}$の有意水準αでの信頼区間の幅は$p_0(1-p_0)/n_h$のみによって決まる．しかし真の確率p_0は不明であるから，本稿ではこれを$\overline{p_h}$で代用し，

$$\beta_h = \overline{p_h}(1-\overline{p_h})/n_h \tag{26}$$

によって式e_hの信頼性を評価する．つまりβ_hの値が小さいほど$\overline{p_h}$の信頼区間の幅が小さく，e_hの信頼性が高い．ただし，前述のようにW（あるいはX）を正規分布として見なすにはn_hがある程度大きくなければならない．n_hがどの程度の大きさで正規分布と見なせるかはp_0(あるいは$\overline{p_h}$)によって異なるが，p_0が0.5に近いほど小さな数でよいことが知られている[5]．そこで本稿では次式で与えるγ_hがあるしきい値以上であるとき，β_hを信頼性評価に用いる．γ_hがしきい値未満であるe_hは，しきい値以上のe_hより信頼度が低いとするが，それらの中ではn_hの大きなe_hの信頼性が高いとする．

$$\gamma_h = \begin{cases} n_h \overline{p_h}, & \text{if } \overline{p_h} \le 0.5 \\ n_h(1-\overline{p_h}), & \text{if } \overline{p_h} > 0.5 \end{cases} \tag{27}$$

3.2 連立積方程式の構築と解法

3.2.1 連立積方程式の解法

$\overline{c_{i0}}$の値を求めるためには信頼度の高いe_hによる連立方程式を構成してそれを解けばよいが，信頼度の高い順にI個のe_hを単純に選択する訳にはいかない．すべての$\overline{c_{i0}}$の値を得るためには，すべての$\overline{c_{i0}}$が連立方程式内に存在し，しかも冗長な式（他の式から導くことのできる式）があってはならない．そこで，信頼度の高いe_hから順に，冗長なものを排除しつつI個のe_hを選択することを考える．非冗長なe_hがI個選択されればすべての$\overline{c_{i0}}$はそのI個の式の中に現れ，連立方程式を解くことができる．

簡単のため変数$\overline{c_{i0}}$をx_i，x_i,(i=1,...,I)の集合をX_{all}と表記し，X_{all}内に含まれる1つあるいは複数の異なる変数の積に値を与える式，つまりe_hを積式と呼ぶ．例えば$x_1x_2x_3 = a$，$x_4 = b$（a,bは定数）は積式である．与えられたDから求めたすべての積式の集合はE_{all}で表し，E_{all}内の積式は前節で計算した信頼性が高い順（優先度順）にソートされている．また，e_hが含む変数の集合を$x(e_h)$，積式の集合$E \subseteq E_{all}$に対し$x(E) = \bigcup_{e_h \in E} x(e_h)$と定義する．

まず右辺定数が0である積式の集合を$E_z \subset E_{all}$，E_{nz}を$E_{nz} = E_{all} - E_z$とし，$X_z = \{x_i \mid x_i \in x(E_z), x_i \notin x(E_{nz})\}$に含まれる$x_i$の値を0とする．$E_{all}$が$X_{all}$から構成可能なすべての積式を含み，$\overline{p_h}$が母集団の確率に完全に一致する場合を除き$x_i = 0$とは断定できないが，本稿では与えられたデータ量が十分にあると想定し，近似的に$x_i = 0$とする．そして以下ではE_{nz}内の積式から$X_{nz} = X_{all} - X_z$に含まれる変数の値を求める問題を扱う．なお，これ以降積式の集合$E \subseteq E_{nz}$を連立積方程式と呼び，E内の各積式をある変数について解いた式，例えば$x_1 = ax_2^{-1}x_3^{-1}$をx_1の解式と呼ぶ．特に右辺が定数のみからなる解式を解と呼び，解および解式の集合をSによって表す．

連立積方程式の解法には連立一次方程式のGauss法に類似した方法を用いる．最初は，*a*)E_{nz}から最も優先度の高い積式を取り出してある変数に関する解式（または解）を求め，その解式のみを要素とする解式集合Sを作る．次以降では，*b*)E_{nz}から最も優先度の高い積式e_hを取り出し，e_h内に解式の得られている変数があればそれらを代入して変数を消去し，残る変数の中の一つについて解式を求め，その解式をSに含める．この*b*)の処理を繰り返すことによってX_{nz}に含まれるすべての変数の解式あるいは解を順に得ることができるが，解式を一つ得る度に変数を一つ消去可能になるため，解式の右辺に現れうる変数の数が一つずつ減っていき，最後の変数については必ず解が得られる．したがって，最後の変数に

ついての解が得られた時点で，その解をそれまで得られた解式に順に代入することにより，他のすべての変数の解を得ることができる．

ところで，前述のようにE_{nz}には冗長な積式，つまり他から導くことの可能な積式が数多く含まれる．例えば先の処理 *b)*において選択した積式e_hがこれまでに得た解式集合 S に対して冗長であるとする．この場合，代入によって解式の得られている変数をすべて消去し整理すると，積式e_hの変数はすべて消去されて定数項のみが残る．そのためe_hの冗長性は上述の解法時に容易に判定できる．

3.2.2 連立積方程式の冗長性

前節に示した連立積方程式の解法そのものに組み合わせ計算は含まれないが，積式集合E_{nz}の要素数は最大で2^l-1個に達し，その大半は冗長な積式である．よって，記号処理的に連立積方程式を解きながらすべての冗長な式を排除するのは多大の処理時間が必要になると考えられる．そこで本稿では対象となる積式e_hの処理を行う前に，簡便に冗長証明可能なものを排除することにする．冗長性に関して以下の定理が成立する．

【定理 3.1】

連立積方程式 E において$|E| > |x(E)|$が成立するとき，Eは冗長な積式を含む．

【定理 3.2】

以下の式が成立するとき，連立積方程式 E は冗長な積式を含む．

$$\exists F \subseteq E;\ |E| > |x(E)| - |A_F| + 1,\ F \neq \varnothing$$

$$A_F = \begin{cases} \{x_i \mid x_i \in x(e_h), x_i \notin c(e_k), \forall e_h \in F, \forall e_k \in (E-F)\}, \\ \qquad\qquad \text{if} \quad F \neq E \\ \{x_i \mid x_i \in x(e_h), \forall e_h \in E\},\ \text{if } F = E \end{cases}$$

E が冗長な積式を含まないとき，$E \cup \{e_h\}, e_h \notin E$ について上述の２つの定理のどちらかが成立すれば，E に対してe_hが冗長と判定できる．

4．おわりに

因果構造が値非対称因果モデルによって表現される場合に，与えられたデータから条件付因果確率を学習する方法を提案した．この学習方法の実装・評価はまだ行っていないが，講演時には提案手法を用いて学習した結果について報告する予定である．

参考文献

[1] J. Pearl : Fusion, Propagation, and Structuring in Belief Networks, *Artificial Intelligence* **29**, 241/288 (1986)

[2] Peng, Y., Reggia, J. A. : *Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving*, Springer-Verlag (1990)

[3] 山田耕一：条件付因果可能性とその因果逆問題への適用，日本ファジィ学会誌，**11**-1, 104/111 (1999)

[4] 山田耕一：２種類の異なる因果モデルによる可能性的因果整合問題とその解の性質，日本ファジィ学会誌，**12**-1, 84/93 (2000)

[5] 野中敏雄，笹井敏夫：統計学入門，日新出版 (1985)

【問い合わせ先】

〒940-2188　長岡市上富岡町 1603-1

長岡技術科学大学 経営情報系　山田 耕一

Email : yamada@kjs.nagaokaut.ac.jp

FA2−1

部分観測マルコフ決定過程における位置ベクトルを用いた強化学習手法の提案

A New Method for Reinforcement Learning with Position Vector in Partially Observable Markov Decision Process

亀井且有・清本盛明

Katsuari Kamei and Moriaki Kiyomoto

立命館大学理工学部情報学科
Computer Science, Ritsumeikan University

Abstract In this paper, we propose a new method for the reinforcement learning with a position vector in Partially Observable Markov Decision Process (POMDP). Firstly, this method adopts a position vector as inside sensory information for an agent. And, the agent can learn the most suitable action without falling into POMDP. Secondly, by recognizing a detour using the position vectors and restraining the reward assignment for the detours, the reward is given only in the effective rules, then the effective learning is carried out. Finally, we compare the new method with conventional methods, and show the effectiveness of the new method.

Keywords: Reinforcement Learning , Partially Observable Markov Decision Process , Reward Assignment.

1 はじめに

強化学習とは，報酬という情報を手がかりにし試行錯誤的に未知環境へ適応していく機械学習の一つである．強化学習は環境に対するモデルや教師データを必要とせず，学習者であるエージェント自身が自律的に学習を行う．このため，近年では，ロボットなどのエージェントに対する行動獲得が期待されている．

強化学習はマルコフ決定過程（Markov Decision Process：MDP）を前提としており，マルコフ性の保証された環境においては優れた学習結果をもたらしている．しかし，より一般的に未知環境を考えた場合，マルコフ性の保証はない．つまり，より幅広い環境での学習を可能とするためには部分観測マルコフ決定過程（Partially Observable Markov Decision Process：POMDP）での学習が不可欠である．部分観測マルコフ決定過程は隠れマルコフ問題，フレーム問題，エイリアス問題などと呼ばれ，これらの問題を含む環境を非マルコフ的環境[1]とも呼ぶ．この問題は，部分観測により行動を決定するエージェントが不完全知覚状態を有することに起因している．非マルコフ的環境において効果的な学習を行うことは，強化学習を応用，実装する際に不可欠であり，この環境における研究はすでに報告されている[2, 3, 4, 5]．

本稿では，位置ベクトルを導入したルール構造と迂回行動に対する報酬割り当てを抑制する手法を提案する．つぎに，マルコフ環境において従来手法との比較を行い，迂回行動に対する報酬割り当ての抑制の有効性を確認する．さらに，非マルコフ的環境に提案手法を適用し，従来方では不可能であった迷路問題を解決できることを示す．

2 提案手法

2.1 位置ベクトルを導入したルール構造

強化学習には Q-Learning[6] を代表とする環境同定型と Profit Sharing Plan (PSP)[7] を代表とする経験強化型がある．本提案手法はエージェントの状態-行動をエピソードとして保存する PSP に着目する．PSP では，報酬獲得までにエージェントの知覚した環境と，そこでとった行動はエピソードとして保存される．

提案手法では，ルール前件部に内部入力としてエージェントの位置ベクトルを導入する．この位置ベクトルは，行動出力をもとにエージェント内部で生成されるものである．提案手法によるエピソードのモデルを Fig.1 に示す．

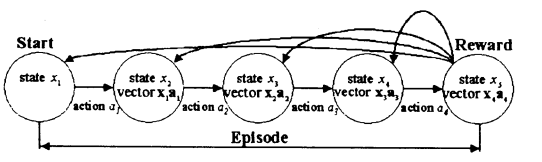


Fig. 1: Episode model of proposed method

Fig.1 において，行動開始時点の状態を x_1 とし，行動 a_1 をとり，遷移後の状態における位置ベクトル

x_1a_1 を求め，これをエピソードに残す．以上の状態遷移を繰り返し，報酬獲得後には状態と位置ベクトルに対するルールに報酬を割り当てる．ここで従来手法と提案手法の *if-then* ルールを (1) 式，(2) 式にそれぞれ示す．

if 環境 *then* 候補行動集合 (1)

if 環境 and 位置ベクトル *then* 候補行動集合 (2)

提案手法のルールベースは (2) 式に示す環境と位置ベクトルをもとに重み付き候補行動集合を生成する *if-then* ルール集合である．

2.2 重みの更新

本稿では重みの更新に Profit Sharing で一般的に用いられる更新式を用いた．ある行動をとる重み w を (3) 式に，強化値 f_i を (4) 式にそれぞれ示す．行動の選択には式 (5) で与えられる Boltzmann 分布に基づく確率選択を用いた．

$$w_{new} = w_{old} + f_i \tag{3}$$

$$f_i = r\gamma^i \quad (0 < \gamma < 1) \tag{4}$$

$$P(a) = \frac{\exp(\frac{w}{T})}{\sum_{allactions} \exp(\frac{w}{T})} \tag{5}$$

ただし，r は報酬，γ は割引率である．f_i は i 番目のルールが受け取る強化値である．これは，報酬獲得に近いルールほど強化され，エピソードを溯るにつれ報酬を割り引いた強化値となる．(5) 式において $P(a)$ は現在の状態において行動 をとる確率であり．T は温度定数と呼ぶ定数であり，この値により探索の度合いが決まる．

2.3 無効ルールの抑制と迂回系列

あるエピソードにおいて，同一の感覚入力に対して異なるルールが選択されているとき，その間のルール系列を迂回系列（detour）という[9]．迂回系列に含まれるルールへ報酬を割り当てることは，明らかに望ましくない．エピソードが MDP である場合，エージェントは正しい迂回系列の認識が可能である．しかし POMDP においては正しい迂回系列の認識ができない．POMDP における迂回系列の例を Fig.2 に示す．

Fig.2 において状態 x，x' は不完全知覚状態である．そのため，従来手法でエージェントの観測する迂回系列は x'-y-y となる．しかし，これは正しい迂回系列でない．x，x' を同一環境と判断してしまう以上，正しく迂回系列である x'-y-y-x の認識は不可能である．

また，迂回系列を除いた行動系列は，学習途中であっても最適解の候補系列である．この候補系列を利用すれば，十分な学習回数が望めない場合や準最適解が数多く存在する環境においても，最適解の発見が期待できる．

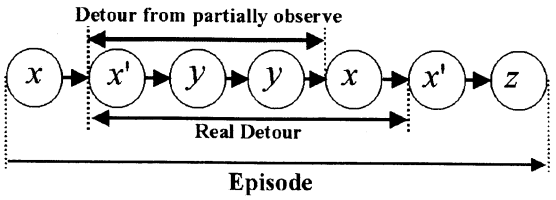


Fig. 2: An example of detour in POMDP

2.4 迂回系列の認識

本稿では以下に示す (6) 式に基づきエピソード中の迂回系列の認識を行う．エピソードの長さを L とする．任意の i，j ($j < i < L$) に対して

$$\sum_{n=i}^{j}(x_{n+1}a_{n+1} - x_na_n) = 0 \tag{6}$$

これを満たす i 番目から j 番目の部分系列は迂回系列とする．(6) 式の意味は，エピソードにおける i 番目のルールの位置ベクトルを x_ia_i，j 番目を x_ja_j としたとき，i 番目を原点とした位置ベクトルの和が 0 であるというものである．

このような i，j が存在するとき，その部分系列を迂回系列とみなし，この系列に対して報酬割り当ての抑制を行う．

2.5 提案手法のアルゴリズム

以上に述べたように，提案手法は位置ベクトルを含むルール構造と，迂回系列に対する報酬割り当ての抑制により構成される．以下に，提案手法のアルゴリズムを示す．

step1 環境から感覚入力を受け取りエージェントの位置ベクトルを生成する．

step2 ルールベースを参照し該当するルールがなければ新規のルールとする．

step3 行動選択を行い報酬を得ない限り step1 へ戻る．

step4 エピソードに対して (6) 式を当てはめ，迂回系列を除いた系列を生成する．

step5 step4 で得た系列に対し報酬の割り当てを行う．また，この系列は最適解の候補である．

step6 学習の終了条件を満たさなければ step1 へ戻る．

step1 から step3 は一般的な強化学習の手順である．step4，step5 は迂回系列に対して全く報酬を割り当てない場合である．迂回系列をある程度考慮する場合は通常の報酬から割り引いた値を与えればよい．

3 従来手法との比較

3.1 比較実験

従来手法との比較を行うため，Fig.3 に示す環境を用いる．実験環境は正方形の区画を組み合わせたもので 11 × 8 区画から構成される．この環境において，エージェントは自身を中心とした周囲 8 近傍の区画が感覚可能である．時間は離散的に遷移するものとし，1 ステップ単位でカウントし，1 ステップにつきエージェントは上下左右いずれかに 1 区画移動か停止を選択する．初期位置をスタート（S）とし，ゴール（G）に達したとき報酬が与えられる．報酬獲得後，1 試行が終了し学習を行う．学習の終了は同一ステップでの試行が 10 回連続で起こったときとする．また，従来手法，提案手法ともに重みの更新に Profit Sharing を用い，同一のパラメータを使用した．Table 1 に結果を示す．ただし，結果は実験 10 回の平均である．

3.2 実験結果の比較

Table 1 に示すように学習回数において，ほとんど差が見られなかった．学習されたステップ数は共に 15.0 と最短ステップで学習が終了している．状態数は従来手法では 32 状態，提案手法では 40 状態となっている．これは，環境内でエージェントの存在しうる状態は，すべて位置ベクトルが異なるためである．つまり，提案手法は環境内で存在しうる状態すべてにおいてルールの形成が可能になったことを示している．

Fig.4 に提案手法の 10 試行目までの学習例を示す．Fig.4 において第 1 試行で報酬獲得に要したステップ数は 895 ステップである．通常はこのエピソードに参加したすべてのルールに報酬分配を行うが，Fig.5 に示すように提案手法は迂回行動に対する報酬割り当ての抑制を行った結果，報酬を与えたルール数は 17 であった．このような学習の初期段階における試行錯誤的行動においても提案手法は効率的に報酬を割り当てることが可能となっている．これは，計算量の減少という面で提案手法の効率性を示している．また，この 1 試行目の 17 個の系列は最適解の候補系列であり，8 試行目には最適解である 15 個も出現している．学習を途中で中断せざるを得ない場合や，収束に必要な十分な試行が望めない場合，また準最適解が多数存在する場合においても，提案手法は迂回行動を除いた有効な行動系列のみを抽出でき，よって学習のごく初期段階であっても，この有効な行動に着目することにより，最適解あるいはそれに近い行動を得ることができる．

Table 1: Result of experiments

	Trials	Steps	Statements
Conventional Method	312.8	15.0	32
Proposed Method	324.7	15.0	40

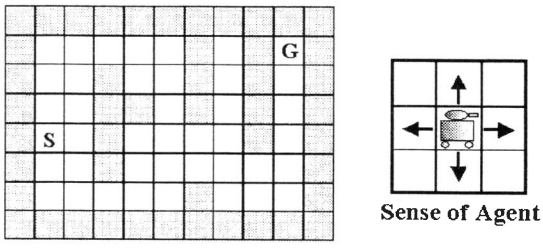
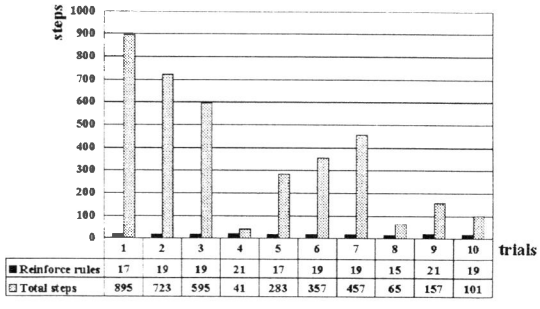


Fig. 3: Model of detour in POMDP



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
■Reinforce rules	17	19	19	21	17	19	19	15	21	19
□Total steps	895	723	595	41	283	357	457	65	157	101

Fig. 4: Sample of result in first 10 trial by proposal method

4 非マルコフ的環境への適用

4.1 最短経路獲得実験

4.1.1 実験環境

ここでは Fig.6(a),(b) に示す非マルコフ的環境に提案手法を適用する．迷路環境において，エージェントは自身を中心とした周囲 8 近傍の区画が感覚可能である．その他の条件も 4.1 での実験と同じである．

実験環境（a）において，最短経路を行動したとき不完全知覚状態が生じ，部分観測では同一環境でありながら，とるべき行動が異なる状態が生じる．このような環境において従来手法での学習は困難である．

実験環境（b）は，四隅を除くすべての状態において同一環境が存在し，実験環境（a）よりもさらに非マルコフ性の強い環境といえる．

4.1.2 実験結果

提案手法による実験環境（a），(b）での学習結果 (実験 10 回の平均) を Table2 に示す．ここで，共に実験 10 回において常に最短ステップで学習が終了して

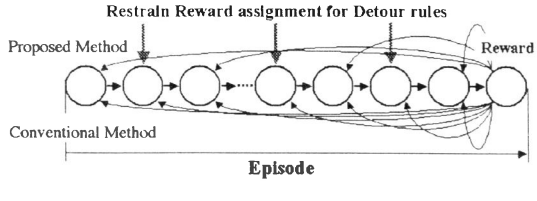
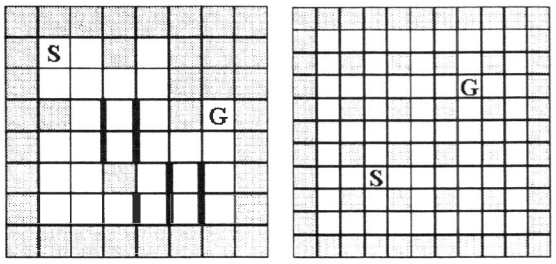


Fig. 5: Model of Reward assignment



(a) (b)

Fig. 6: Experimental environments (a) and (b)

いる．これはFig.4での 結果と同様，環境内でエージェントの存在しうる状態すべてにおいてルールの形成が可能になったためである．当然ながら，これらの環境では従来手法は収束することはできない．

Table 2: Result of experiments

	Trials	Steps
Environment(a)	37.6	9.0
Environment(b)	50.6	8.0

5 おわりに

本稿では位置ベクトルを導入したルール構造と，エピソード中の迂回行動に対する報酬割り当ての抑制を行う手法を提案した．迷路実験において，非マルコフ的環境においても常に最適解の獲得が確認でき，効果的なルール形成が行われた．また，従来からの課題の１つであったが，迂回行動に対する報酬割り当ての抑制の有効性が確認された．

提案手法は行動選択や重みの更新は従来のものを用いるため，従来手法からの導入が容易であるといえる．本稿では重みの更新にProfit Sharingを用いたが，報酬獲得後にルールの一括強化を行うタイプのアルゴリズムであれば，提案手法の組み込みは可能である．また，迂回系列に対する報酬割り当ての抑制を考えなければ逐次更新型の強化学習にも適用が可能であると考えられる．

References

[1] 山村 雅幸，宮崎 和光，小林 重信：強化学習の特徴と発展の方向；システム/制御/情報学会誌，Vol.39，No.4，pp.191-196（1995）

[2] T.Chrisman: Reinforcement learning with perceptual aliasing: The Distinctions Approach；*Proceedings of the 10th National Conference on Artificial Intelligence*,pp.183-188（1992）

[3] R.A.McCallum: Instance-Based Utile Distinctions for Reinforcement Learning with Hidden State；*Proceedings of the 12th National Conference on Artificial Intelligence*,pp.387-395（1995）

[4] 畝見 達夫: 実例に基づく強化学習法; 人工知能学会誌,Vol.7, No.4，pp.141-151（1992）

[5] 木村 元，山村 雅幸，小林 重信: 部分観測マルコフ決定下での強化学習：確率的傾斜法による接近；人工知能学会誌,Vol.11，No.5，pp.761-768（1996）

[6] C.J.C.H.Watkins, P.Dayan: Technical Note：Q-Learning；*Machine Learning*,Vol.8，No.3，pp.279-292（1992）

[7] Grefenstette,J.J.: Credit Assignment in Rule Discovery Systems Based on Genetic Algorithms *Machine Learning*,Vol.3，pp.225-245（1988）

[8] 畝見 達夫: 強化学習; 人工知能学会誌,Vol.9，No.6，pp.830-835（1994）

[9] 宮崎 和光，山村 雅幸，小林 重信: 強化学習における報酬割り当ての理論的考察，人工知能学会誌，Vol.9,No.4,pp.580-587（1994）

[問い合わせ先]

〒 525-8577
滋賀県草津市野路東 1-1-1
立命館大学理工学部情報学科
亀井且有
Tel:077-561-2699, Fax:077-561-2861
E-mail:kamei@cs.ritsumei.ac.jp

FA2−2

ファジィ環境評価ルールを用いた強化学習の提案と応用
A Proposal and an Application of Reinforcement Learning with Fuzzy Environment Evaluation Rules

○星野 孝総
Yukinobu Hoshino

立命館大学理工学部
Computer Science
Ritsumeikan University
hoshino@spice.cs.ritsumei.ac.jp

亀井 且有
Katsuari Kamei

立命館大学理工学部
Computer Science
Ritsumeikan University
kamei@spice.cs.ritsumei.ac.jp

Abstract The machine learning is proposed to learn techniques of specialists. A machine has to learn techniques by trial and error when there are no training examples. Reinforcement learning is a powerful machine learning system, which is able to learn without giving training examples to a learning unit. But it is impossible for the reinforcement learning to support large environments because the number of *if-then* rules is a huge combination of a relationship between one environment and one action. We propose new reinforcement learning with fuzzy evaluation environment. This machine learning system is made up from a fuzzy evaluation, an environment simulator and search. We dealt with Lights Out as an example of target environments.

1 はじめに

熟練者の技術を習得する技術として，機械学習が研究されている．熟練者の教師データがない場合，エージェントは試行錯誤によって学習を進めなければならず，このような未知環境に対する学習手法として，強化学習が提案され，広く研究されている．Q-learningは環境同定から報酬が遅れることから，実際の報酬に行動連鎖を含めない，未来に対する報酬の見積もり値を強化する手法である．Profit-sharingが報酬割り当てによって，行動連鎖を保証するのに対し，Q-learningは，環境と行動を対にしたルールをQ値で評価し，政策・行動を決定する．しかし，ルールが入出力関係を表現しているため，取得したルールを有効に利用できない．さまざまな環境に対する場合，ルールを有効利用する手法を強化学習に組み込む必要がある．筆者らは，ファジィ環境評価型強化学習手法を文献[1][2]で提案し，チェスゲームへの応用を通して複雑で巨大な環境に対する有効性を示した．これは，動的環境に対する環境同定手法をファジィ評価と先読みアルゴリズムを用いて実現し，報酬遅れに対して，環境同定による強化を重視した手法である．本論文では，他の環境としてパズルゲームの一種であるLightsOutを用いる．さらに，先読みアルゴリズムの一般化を行い，本手法の有効性を検証する．

2 Q-learning

環境同定型強化学習の代表的手法であるQ-learningは，ルール適用時，次環境評価値と報酬からQ値を更新する．エージェントは行動を決定できない場合であっても，存在する環境を同定しなければならず，環境に対して効率的な評価値を必要とする．この評価値を算出する関数を評価関数という．エージェントは(1)式に示される評価値を最大になるように行動する．

$$V = \sum_{i=t}^{\infty} \gamma^{i-t} r_i \qquad (1)$$

ここで，Vは評価である．γは割引率，r_iは時刻tで得られる報酬である．環境同定型では，評価関数の効率が重要になる．Q-learningは，ある環境aにおける行動bに対して報酬の見積もり値$Q(a,b)$を算出し，その報酬の見積もりの大きい行動を選択する手法である．また，Q値の更新は，(2)式に示すように現在の環境に対する報酬に基づいて更新項を計算する．

$$Q(a,b) = (1-\alpha)Q(a,b) + \alpha(r + \gamma Q^{max})$$

(Q^{max} : 次の行動の最大 Q 値)　　(2)

ここで，α は非学習率である．環境同定型強化学習は報酬の与え方や，Q 値の環境同定の効率により学習特性が大きく変化する．Q 値は対象とする環境の次環境の最大 Q 値 (Q^{max}) によって更新される．エージェントは試行錯誤を繰り返し，Q 値を更新して学習をすすめる．Q 値は環境と行動を対に持つので，学習初期では未知環境に進入し，ルールを集める．このように Q-learning は，環境のモデル化と行動の強化を同時に行う．

3　ファジィ環境評価強化型強化学習

Q-learning は TD 法 (Temporal Difference method) の発展型である．TD 法は環境評価値 V を行動遷移確率の総和で強化する．行動遷移確率の総和は行動連鎖を保証する．TD 法は環境評価値 V を用いるため，環境のモデルを必要とする．Q-learning は，Q 値を環境と行動の対で持つため，環境のモデルを必要としない．一般に，環境に対する行動の種類は多様であり，さらにその行動による遷移先環境は決定的である．同じ遷移先環境に対しては，異なる Q 値を持つ Q-learning は学習困難となる．そこで本論文では，遷移先環境の環境評価を，報酬の見積もり値に対応さた強化学習アルゴリズムを提案する．本手法は，遷移先環境の環境評価を Q-learning の概念を用いて学習する手法である．遷移先環境の環境を評価するルールは環境評価ルールと呼び，(3) 式で定義する．

$$if \text{ 環境ベクトル } then \text{ 環境評価} \qquad (3)$$

3.1　環境シミュレータ

環境評価ルールを用いる場合，行動を生成する機構が必要となる．提案手法では，環境と行動から遷移先環境を生成できる機構を採用する．この機構を環境シミュレータと呼ぶ．環境シミュレータは環境と行動を入力とし，遷移先環境を出力とするシステムである．ただし，遷移先環境を出力できない行動ベクトルが入力された場合，その行動はエージェントがとれない行動とする．環境シミュレータは，ニューラルネットワーク，数学的モデル，ファジィモデルなどで表現できる．ここで，環境評価ルールと環境シミュレータを用いた強化学習を環境評価強化型強化学習と呼び，その概念を図 1 に示す．

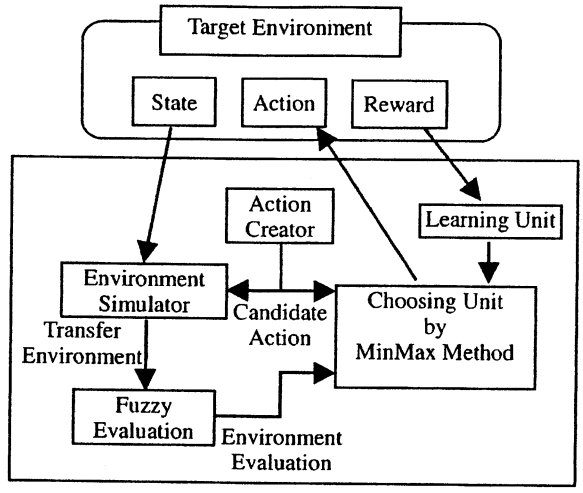


図 1 Diagram of Environment Evaluation Reinforcement Learning

3.2　ファジィ環境評価ルール

環境評価強化型強化学習における環境ベクトル $\boldsymbol{q}$ を，(4) 式で与える．

$$\text{環境ベクトル} \boldsymbol{q} \stackrel{\text{def}}{=} (q_1, q_2, \ldots, q_j, \ldots, q_N) \qquad (4)$$

環境評価強化型強化学習における環境評価ルールを (5) 式で与える．

$$\begin{aligned} R_i: \quad if \quad & \text{環境ベクトル } \boldsymbol{q} \text{ is } \boldsymbol{p}_i \\ & then \text{ 環境評価 } is \ w_i \\ & \boldsymbol{p}_i \stackrel{\text{def}}{=} (p_{1i}, p_{2i}, \ldots, p_{ji}, \ldots, p_{Ni}) \end{aligned} \qquad (5)$$

i 番めのルール R_i は，環境が $\boldsymbol{p}_i$ のとき，環境評価値が w_i であることを表している．ここで，環境評価ルールにもとづいてファジィ推論により，遷移先環境評価値 $E(\boldsymbol{q})$ を求める手法を提案し，ファジィ環境強化型強化学習と呼ぶことにする．さらに，ファジィ環境評価ルールを用いて，環境評価型強化学習をファジィ環境評価型強化学習に拡張する．任意な環境 $\boldsymbol{q}$ と環境評価ルール R_i の前件部 $\boldsymbol{p}_i$ から適合度 μ_{ji} を (6) 式により算出する．

$$\mu_{ji} = \begin{cases} 1 - \dfrac{|p_{ji} - q_j|}{l} & |p_{ji} - q_j| < l \\ 0 & |p_{ji} - q_j| \geq l \end{cases} \qquad (6)$$

さらに適合度 μ_{ji} から類似度 $\hat{\mu}_i$ を (7)(8) 式で求め，環境 $\boldsymbol{q}$ における遷移先環境評価値 $E(\boldsymbol{q})$ を (9) 式ように類似度 $\hat{\mu}_i$ を重みとする環境評価値 w_i の重み付き平

均で与える．また，環境評価ルールが発火しない遷移先環境は未知環境となる．この未知環境 $\boldsymbol{q}$ が入力された場合でも，提案手法は遷移先環境評価値 $E(\boldsymbol{q})$ を算出できる．

$$m_i = N - \sum_{j=1}^{N}(\mu_{ji}) \tag{7}$$

$$\widehat{\mu}_i = \begin{cases} \left(1 - \dfrac{m_i}{L}\right)^{PP} & L > m_i \\ 0 & L \leq m_i \end{cases} \tag{8}$$

$$E(\boldsymbol{q}) = \begin{cases} \dfrac{\sum_i (w_i \widehat{\mu}_i)}{\sum_i \widehat{\mu}_i} & \sum_i \widehat{\mu}_i > 0 \\ 0 & \sum_i \widehat{\mu}_i = 0 \end{cases} \tag{9}$$

3.3 探索アルゴリズム

行動を決定できない環境において，エージェントは限られた環境評価ルールにもとづいて行動を選択しなければならない．ファジィ環境評価強化型強化学習は，環境シミュレータの計算結果である遷移先環境とファジィ環境評価ルールによる遷移先環境評価値 $E(\boldsymbol{q})$ から先読み木を生成し，ゲーム理論の先読み手法を用いて行動選択を行う．先読み手法には，MinMax 探索を応用した Max 探索を用いる．MinMax 探索の場合，相手の存在と Min 手が保証された環境を想定している．一般環境では，これらの条件が満たされない．環境は行動によってで変化するためである．図 3 は 3 手先読み評価の例

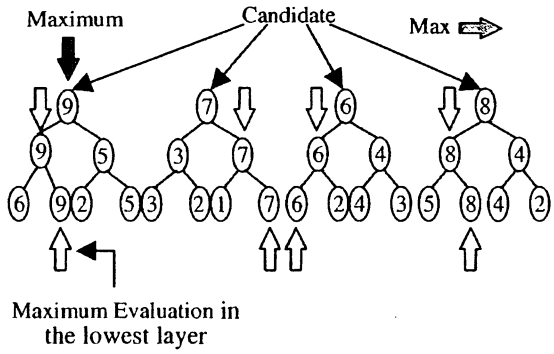


図 2 Max Search Algorithm

である．まず，一定以上の評価を持つ環境のゲーム木を生成する．遷移先環境が特定できない場合はその枝を刈る．そして，末端の評価から Max 手を上層に継承する．次に継承された評価値の Max 手をさらに上の層に継承する．こうして各候補手まで継承した評価値で手を決定する．ファジィ環境評価強化型強化学習の行動選択は Max 探索を用いて，候補行動と対の環境評価を求め，その最大値を E^{max} とする．算出された E^{max} は行動を起こした時の未来に対する報酬の見積もり値であり，環境評価値の強化に利用できる．

3.4 評価値の強化

ファジィ環境評価ルールの環境評価値は，報酬と環境同定により強化され，(10) 式によって与えられる．

$$w_i = (1-\alpha)w_i + \alpha(r + \gamma E^{max}) \tag{10}$$

α は非学習率である．また，r は環境に対する期待報酬である．E^{max} は行動選択器によって選択された環境評価値である．これは行動を起こした時の未来における報酬の見積もり値と考えることができる．また，γ は割引率であり，行動連鎖のつながりを示している．α と γ は，それぞれ [0,1] の値をとる．ファジィ環境評価強化型強化学習は，推論で用いた環境評価ルールを強化し，その期待報酬は環境の状態のみで判断される．また，環境評価ルール R_i 後件部の環境評価値 w_i は各行動毎に強化される．したがって，報酬を受けない環境では，ファジィ環境評価強化型強化学習はルール R_i の類似度 $\widehat{\mu}_i$ および E^{max} から環境評価値 w_i を強化する．

4 LightsOut への応用

強化学習はゲームの世界においてバックギャモンで大きな成果を上げ，ほぼ人間の世界のチャンピオンに匹敵するほどの実力を持っている言いわれている．本研究では，行動が特定できない環境として LightsOut と呼ばれるパズルゲームを用いる．LightsOut は 5 マス×5 マスの押しボタンで構成されている．ボタンにはライトが取り付けられている．ボタンを押すと押した場所と，上下左右のライトが反転する．ゲームは全てのライトが消えた時を終了となる．強化学習のパラメータは $\alpha = 0.2$, $d = 0.9$ とした．また，メンバーシップの広がりをそれぞれ $l = 1$,$L = 10$,$PP = 5$ とした．Max 探索における先読みは候補手 25，深度 2 とた．ルールは盤面を前件部とし，盤面評価値を後件部とした．ルールに用いる環境パラメータについては，光っているボタンを 1 で表現し，消えているボタンを 0 で表現した．したがって，環

境パラメータは 25 個のバイナリで表現した．したがって，(7),(8) 式において，$N = 25$ となる．

$$\text{ボタン} = 0 : \text{消えている}, 1 : \text{光っている}$$

$$\text{環境} = (\text{ボタン}_1, \text{ボタン}_2, \text{ボタン}_3, \ldots)$$

強化学習の学習は各行動終了後におこなった．つまり行動する毎に学習することにした．ゲームは 10 回ボタンを押し，途中で全てのボタンが消えた時に報酬として $r = +1$，最後までボタンが付いていた場合罰として $r = -1$，その他は $r = 0$ とした．したがって，ゲーム中ほとんどの場合，ファジィ環境評価による環境同定により学習が進む．二つの環境を用意して実験をこなった．

4.1 実験 1

実験 1 は図 3(a) に使用した環境を示す．この環境は 2 手で終了する簡単な環境である．ゲームは 10000 試合行い,10 試合連して解を発見した場合終了した．ライトが光っている時を 1, 消えている時を 0 として表現している．実験は，121 試合で終了した．獲得した解は (3,1),(3,5) となった．結果を図 3(b) に各遷移先環境と評価値を示す．

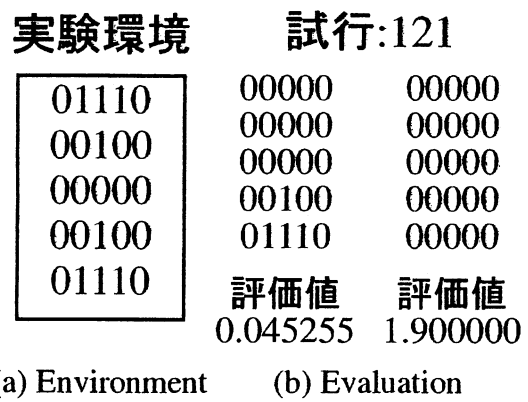


図 3 Experiment 1

4.2 実験 2

実験 1 で作成したルール用い，さらに難関な環境で実験した．図 4 に使用した環境と，評価値結果を示す．この環境は 5 手で終了する困難な環境である．ゲームは 10000 試合行い,10 試合連して解を発見した場合終了した．先読み深度外であるため，環境評価と環境同定が最も重要になる．実験は，18 試合で終了した．獲得した解は (1,1),(5,1),(5,5),(3,5),(1,5) となった．

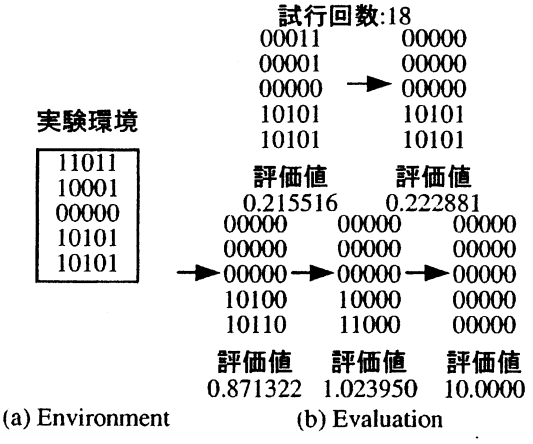


図 4 Experiment 2

5 おわりに

本論文では，文献 [1][2] で提案したファジィ環境評価強化型強化学習を LightsOut 環境に応用した．本論文では，バイナリのクリスプ値集合環境のファジィ評価や，これまで課題とされていた探索アルゴリズムの一般化を試みた．熟練者の技術を試行錯誤的に習得する事を考える時，追加ルールの有効利用と，動的環境に対する環境同定は避けられない．これらは，強化学習を知能システムへ適応するために重要である．また，環境シミュレータは，ニューラルネットワーク，数学的モデル，ファジィモデルなどで表現できる．そこで，今後はモデリング手法を取り入れたモデルレス型の提案を予定している．さらに，多くの環境へ応用を試みる．

参考文献

[1] 星野孝総, 亀井且有: ファジィ環境評価ルールを用いた強化学習の提案とチェスへの応用; 第 10 回ソフトサイエンスワークショップ予稿集, p.98-101 (2000)

[2] Yukinobu Hoshino, Katsuari Kamei: A Proposal of Learning System with Fuzzy Rules Under Large Environments; Processing Of International Joint Conference on Neural Network 99 (1999)

[お問い合わせ]
星野孝総
立命館大学理工学部
滋賀県草津市野路東 1-1-1

FA2－3

ミンコフスキーノルムによる重み付多分割層ファジィモデルの構造学習

Structural Learning of Multi-Layer Fuzzy Model with Weight by Minkowski Norm

鄒　軍安　　亀井且有　　井上和夫
Jun-an ZOU　　Katsuari KAMEI　　Kazuo INOUE

立命館大学情報学科
Computer Science, Ritsumeikan University

Abstract : The fuzzy model, which has multi-layer structure, has the feature that the generation of fuzzy rules is easy, also under the actual condition. However, it is indicated that redundant fuzzy rules exist by the generation technique increasing the division layer one by one. In this paper, we propose the multi-layer fuzzy model which has weight in the last reasoning part, and by tuning up the weight using the evaluation function based on Minkowski norm aim at cutting down the redundant fuzzy rules. Moreover, the validity was verified by applying to the modeling of the ceramic kiln.

1. はじめに

直接に実数値を出力できる特長を持つ簡略化ファジィルールは制御システムの領域によく応用されている．そのファジィルールの前件部であるメンバーシップ関数によって分けたファジィ分割数の増加に伴って，精度のより高いファジィモデルの生成が可能である．しかしながら，現実環境に近い教師データを用いた場合に，従来法によるファジィルールをチューニングするのはうまく行わない．教師データ配置の疎な領域に，ファジィルールを生成する必要な情報が少ないので，その領域に対応するファジィルールの推論誤差が大きくなり，極端の場合にファジィルールの生成できないこともある．この問題に対して分散型簡略化ファジィルールが提案された[6]．しかしながら，この手法により得られるファジィルールの数は普通のファジィルールの生成手法より相当に多くなり，冗長なファジィルールが存在すると考えられる．本論文に，そのファジィルールを各分割層の出力に重み付に修正し，ミンコフスキーノルムに基づいた評価関数を用いてその重みをチューニングすることによって，冗長なファジィルールを削除することを目指す．

2. 重み付多分割層ファジィモデル

分散型簡略化ファジィルールでは，その各分割層のファジィ出力の平均値を取ることによって，最終の推論出力を求めることである[6]．すなわち，異なる分割数を持っている各分割層は最終推論出力の値に同等な重要度を占めている．事実上，各分割層のファジィモデルの精度がその分割数の差別によってそれぞれ不同になるのは当然である．したがって，分散型簡略化ファジィルールの精度は各分割層間の相殺性によってある分割層のファジィルールより低いこともあると考えられる．本論文で，分散型簡略化ファジィルールの各分割層の推論出力に重みを付けることによって，推論誤差の大きいである分割層の重要度を小さく，推論誤差の小さいである分割層の重要度を大きくすることができる重み付多分割層ファジィモデルを提案する．このモデルによって，多分割層ファジィモデルの汎化性を保ちながら，多分割層間の相殺性をある程度に抑制できると考えられる．また，3節で述べる手法を用いて，その重みの学習によって推論誤差がかなり大きい分割層を削除でき，簡潔なファジィ分割層が得られる．

ファジィ分割層の順番号を $l = L_{\min}, \cdots, L_{\max}$ とすると，l 分割層にのファジィモデルは以下のように表現される．

$$R_k^l : \textit{if } x_1 \textit{ is } A_{1,j}^{1l} \textit{ and } x_2 \textit{ is } A_{2,j}^{2l} \cdots \textit{ and } x_m \textit{ is } A_{m,j}^{ml} \textit{ then } y^l \textit{ is } \omega_k^l \quad (1)$$

ただし，R_k^l は l 分割層上のファジィルールラベル(k =1, 2, …, M^l)，M^l は式 (2) で与えられる l 分割層にあるファジィルールの数である．

$$M^l = \prod_{i=1}^{m} p^{il} \quad (2)$$

$A_{il,j}^{il}$ (i =1, 2, …, m, j^{il}=1, 2, …, p^{il}) は l 分割層にのメンバーシップ関数で，m は入力変数の数，p^{il} は l 分割層に入力変数 x_i のファジィ分割数である．

l 分割層において k の具体的な計算式は次式で与えられる．

$$k = \sum_{i=1}^{m-1} \left\{ (j^{il} - 1) \prod_{r=i+1}^{m} p^{rl} \right\} + j^{ml} \quad (3)$$

このとき，各分割層にファジィルールの前件部適合度 μ_k^l および推論結果 y^l を次のように与える．

$$\mu_k^l = \prod_{i=1}^{m} A_{il,j}^{il}(x_i) \quad (4)$$

$$y^l = \frac{\sum_{k=1}^{M^l} \mu_k^l \cdot \omega_k^l}{\sum_{k=1}^{M^l} \mu_k^l} \tag{5}$$

また，重み付多分割層ファジィモデルの最終推論結果 y を次式で与える．

$$y = \sum_{l=L_{\min}}^{L_{\max}} h^l \cdot y^l \tag{6}$$

ただし，h^lはlファジィ分割層の推論結果の重みである．この重みに対しての学習によって，推論誤差の大きいであるファジィ分割層の重みを小さくすることができると考えられる．

そのモデルをファジィ・ニューラルネットワークで表すと図 1 に示す．

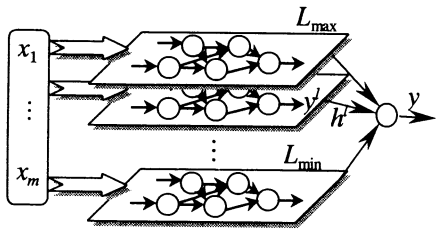


図 1 分散型ファジィ・ニューロ表現

ただし，最終ノード出力は式(6)により計算される．$L_{\min}$，…，$L_{\max}$ ファジィ分割層の中身は普通のファジィ・ニューラルネットワーク[6]である．図 1 からわかるように，重み付多分割層ファジィモデルの構成はファジィ・ニューラルネットワークの多層構造と考えられる．したがって，ニューラルネットワークの学習方法を本提案に容易に適用することができる．

3. ミンコフスキーノルムにもとづくファジィルールの削減手法

重み付多分割層ファジィモデルの生成手法として，デルタルールによる逐次分割数増加の手法がある[5][6]．すなわち，学習の推論誤差がしきい値を満たすまでに，最大分割層の分割数を１つずつ増やすことによってファジィ分割層を増加する手法である．

デルタルール[10]によると，評価関数

$$E_1 = \frac{1}{2}(y - y^*)^2 \tag{7}$$

の値E_1を減少させるため，次の式によってファジィルールの後件部ω_k^lとファジィ分割層の重み h^lに対してチューニングすればよい．

$$\omega_k^l(t+1) = \omega_k^l(t) - \frac{K_\omega}{h^l} \cdot \frac{\partial E_1}{\partial \omega_k^l} \tag{8}$$

$$h^l(t+1) = h^l(t) - K_h \cdot \frac{\partial E_1}{\partial h^l} \tag{9}$$

ただし，y^*は教師データの出力で，yは教師データの入力に対応するファジィ推論出力である．K_ωはω_k^lのチューニングに用いる係数であり，K_hはh^lのチューニングに用いる係数であり，tはチューニングする回数を示す．

また，式 (5)，(6)，(7) によって

$$\frac{\partial E_1}{\partial \omega_k^l} = h^l \cdot (y - y^*) \cdot \frac{\mu_k^l}{\sum_{k=1}^{M^l} \mu_k^l} \tag{10}$$

$$\frac{\partial E_1}{\partial h^l} = (y - y^*) \cdot y^l \tag{11}$$

になる．

この手法によって得られたファジィモデルは同定精度や汎化能力にも優れたの性能を持ち，非線形関数のような複雑なシステムをも表現ができると考えられる[6]．しかしながら，生成されたファジイルールの数が従来法より多く，過剰なファジィルールが存在し，推論する計算時間は長くなると考えられる．その長所を保持するまま不足を克服するため，その冗長なファジィルールを削除する必要があると考えられる．

重み付多分割層ファジィモデルでは，図 1 に示したように分割層の重みh^lが零になったら，それに対応するネットワークのリンク重みが零になり，また，このリンクはネットワークから取り除くことができることになる．ついに，それに対応するファジィ分割層を削除もできる．

ここで，ミンコフスキーノルムの特性[8][9]にもとづく評価関数を提案し，多分割層中に冗長な分割層を削除することによって簡潔なファジィ・ニューラルネットワークを得ることを目指す．

ミンコフスキーノルムに関して，以下の性質があるする．

$0<R_m<1$ とすると，次の最小化問題

$$\min \quad 1 - \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} (1 - R_m)^s \right\}^{\frac{1}{s}} \tag{12}$$

は$S \to \infty$とき

$$\min \left\{ \min \; R_m \mid m = 1, 2, \cdots, M \right\} \tag{13}$$

となる．式(13)に示すように $S \to \infty$にしたがって，最小値の R_m はさらに小さくなる．また，式(12)は

$$\min \qquad - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} (1 - R_m)^s \tag{14}$$

と等価な最小化問題である．

ここで，式(14)にもとづいた次の評価関数を提案する．

$$E_2 = - \frac{1}{s \cdot A} \sum_{l=L_{\min}}^{L_{\max}} \left(1 - \frac{|h^l|}{B} \right)^s \tag{15}$$

ただし，

$$A = L_{\max} - L_{\min} + 1 \tag{16}$$

$$B = \max\{h^l \mid l = L_{\min}, \cdots, L_{\max}\} \tag{17}$$

S を比較的大きな値にした E_2 を式(7)の評価関数に加えることにより，h^l が小さいものを更に小さくすることができる．

$$E = E_1 + \eta \cdot E_2 \tag{18}$$

ただし，ηは小さい正数である．評価関数 E_1 に E_2 を用いることにより，同定誤差が小さくなるにしたがって，ファジィ分割層の

重み h^l は小さいものが更に小さくなる．チューニング規則式(9)を次の式に修正する．

$$h^l(t+1) = h^l(t) - K_h \cdot \frac{\partial E_1}{\partial h^l} - K_m \cdot \frac{\partial E_2}{\partial h^l} \tag{19}$$

ただし，K_m も h^l のチューニング係数である．$\partial E_2 / \partial h^l$ は式(15)によると，

$$\frac{\partial E_2}{\partial h^l} = \frac{1}{B \cdot A} \cdot \mathrm{sgn}(h^l) \cdot \left(1 - \frac{|h^l|}{B}\right)^{s-1} \tag{20}$$

になる．

ただし，sgn(・)は符号関数である．

まず，S=1 とし，式(8)，(19)を繰り返して演算することにより，評価誤差を最小にするようなファジィ分割層が残り，部分的冗長なファジィ分割層を削除することになる．次に S を大きくして，続いてチューニングを行い，不要なファジィ分割層を削除する．すなわち，S を段階的に大きくすることにって，最小評価誤差を保持しながら，冗長なファジィルールを削除できる．

そのファジィルールの抽出手順は次にまとめる．

[Step 1]

逐次分割数増加手法[7]，すなわち，学習推論誤差がしきい値を満足できるまでに，ファジィ分割数を 1 つずつ増加する手法を用いて，最小分割数 P_{MIN} を求める．重み付多分割層ファジィモデルは最小分割層 L_{MIN} の分割数が 2 分割，…，最大分割層 L_{MAX} の分割数が P_{MIN} で構成する．

[Step 2]

式(6)によって教師データに対応するファジィ推論値を求め，式(8)によってファジィルールの後件部 ω_k^l をチューニングする．

[Step 3]

チューニングした後件部 ω_k^l を用いて，ファジィ推論値を更新する．式(19)によって，ファジィ分割層の重みをチューニングする．

[Step 4]

学習誤差がしきい値 δ より小さくなるまでに，[Step2]，[Step 3]を繰り返す．

[Step 5]

続けて学習できるまでしきい値 δ を下げる．指数 S が最大値 S_MAX までに，S を階段的に増やす．[Step 2]に戻る．

4. 非線形関数の同定実験

ここに，次の非線形関数[6]に対しての同定実験によって本手法の有効性を説明する．

① Linear and Quadratic

$$y = \begin{cases} -x; & -1 \le x < 0 \\ x^2; & 0 \le x \le 1 \end{cases} \tag{21}$$

② Fractional

$$y = 2^{-2/3}(1.27x + 0.27)^2\{1 - (1.27x + 0.27)\}^{2.3} \quad -1 < r < 1 \tag{22}$$

教師データに疎な領域が存在することを模擬するために，入力の変域 [-1,1] を等分割して得られた43組データから連続 r 組のデータを取り除いて，すなわち，残った($43-r$) 組のデータを教師データとする．その同定実験の条件と結果は表 1 と表 2 に示す．

表 1 関数①の実験条件と結果（ r = 5 ）

S	-	-	1	5
K_ω	0.01	0.01	0.01	0.01
K_h	0.000	0.035	0.035	0.035
K_m	0.000	0.000	$0.5*10^{-4}$	$0.5*10^{-4}$
δ	0.003	0.003	0.003	0.0028
D	0.00264	0.00285	0.00260	0.00244
h_2	0.1250	**0.0001**	**0.0000**	**0.0000**
h_3	0.1250	0.3944	0.5687	0.5915
h_4	0.1250	0.2950	0.2292	0.2416
h_5	0.1250	0.2736	0.2092	0.2208
h_6	0.1250	0.1906	0.1591	0.1638
h_7	0.1250	0.1490	0.1076	0.0718
h_8	0.1250	0.0968	0.0835	0.0913
h_9	0.1250	**0.0511**	**0.0342**	**0.0003**

表 2 関数②の実験条件と結果(r = 4)

S	-	-	1	5
K_ω	0.025	0.025	0.025	0.025
K_h	0.000	0.015	0.015	0.015
K_m	0.000	0.000	$0.25*10^{-4}$	$0.25*10^{-4}$
δ	0.003	0.003	0.003	0.0025
D	0.00556	0.00270	0.00288	0.00243
h_2	0.0526	**0.0158**	**0.0000**	**0.0000**
h_3	0.0526	0.1702	0.2314	0.2361
h_4	0.0526	0.1494	0.0930	0.0915
h_5	0.0526	0.1326	0.0990	0.1039
h_6	0.0526	0.1405	0.1235	0.1421
h_7	0.0526	0.1007	0.0862	0.0990
h_8	0.0526	0.0787	0.0658	0.0759
h_9	0.0526	0.0641	0.0528	0.0503
h_{10}	0.0526	0.0734	0.0673	0.0787
h_{11}	0.0526	0.0663	0.0620	0.0675
h_{12}	0.0526	**0.0424**	**0.0340**	**0.0000**
h_{13}	0.0526	**0.0256**	**0.0159**	**0.0000**
h_{14}	0.0526	**0.0266**	**0.0181**	**0.0000**
h_{15}	0.0526	0.0629	0.0625	0.0787
h_{16}	0.0526	**0.0371**	**0.0321**	**0.0000**
h_{17}	0.0526	**0.0143**	**0.0062**	**0.0000**
h_{18}	0.0526	**0.0052**	**0.0000**	**0.0000**
h_{19}	0.0526	**0.0316**	**0.0254**	**0.0000**
h_{20}	0.0526	0.0581	0.0557	0.0877

ただし，表 1 と表 2 に評価誤差 D は入力空間 [-1, 1] に均等的に得られた Q (Q = 150) 組の評価データを用いて，次の式によって計算した．

$$D = \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q} |y_q - y_q^*| \tag{23}$$

表 1 と表 2 において，第 1 列のデータはファジィ分割層重みが均等である場合[6]にの実験条件と結果で，第 2 列のデータは後件部 ω_k^l と分割層重み h^l に対してデルタルールによってチューニングした後の結果である．第 3 列のデータはデルタルールと削減手法(S=1)によってチューニングした結果で，第 4 列のデータは第 3 列のデータの上に，続いて S=5 としてチューニングした結果である．

表 1 と表 2 にの太字で示したように，提案した手法によって，

評価誤差があまり変わらないと同時に，分割層重みの小さいであるファジィ分割層が削減できるようになった．

5. 陶器焼成炉への応用

陶器焼成炉は熱容量が非常に大きいで，炉内の温度と雰囲気の相互干渉によりその燃焼特性が複雑に変化する非線形なシステムである[2]．このようなシステムに対してファジィ制御[1]，ニューラルネットワーク[2]などにより自動制御を施す場合，その係数或いはルールをチューニングするため，シミュレーション用のモデルが必要である．物理・化学法則を基本として幾らの近似と省略によってそのモデルを求めることができることはすでに発表された[1][3][4]．本論文で，重み付多分割層ファジィモデルを用いて単に入出力関係から工業プロセスに適切なモデルを求めることを試みる．

本研究に使用した陶器焼成炉では，入力は燃料ガス供給量F (l/min)と炉内に入れる空気量を調整できるエアダンパの開度D (cm)で，出力は炉内の温度T(℃)，炉内の雰囲気を示す指数である酸素濃度O_2 (%/100)と一酸化炭素濃度CO (%/100)である．利用上の利便性を図るために，それぞれの出力に対してそれぞれのファジィモデルを構築する．

$$T(k+1) = f_1(T(k),\ F(k),\ D(k)) \tag{24}$$

$$O_2(k+1) = f_2(O_2(k),\ F(k),\ D(k)) \tag{25}$$

$$CO(k+1) = f_3(CO(k),\ F(k),\ D(k)) \tag{26}$$

陶器焼成炉の入出力データ 396 組の中に，その二分の一のデータをファジィモデルのチューニングに．残りの二分の一のデータを評価に使用した．それぞれモデル同定を行った上述の関数に対して評価したの結果を図 2 と図 3 に示す．

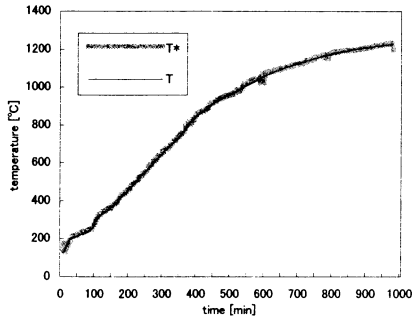


図 2 温度曲線

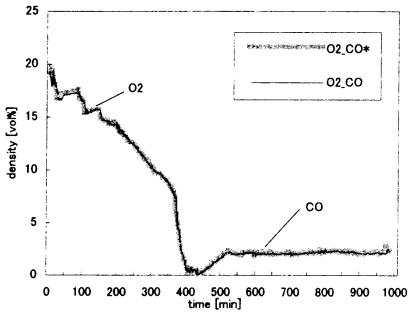


図 3 雰囲気曲線

ただし，図 2 と図 3 に示した曲線T*とO_2_CO*が陶器焼成炉の実際の出力で，T と TO_2_CO がファジィモデルの推論出力である．また，図 3に濃度の零値を境にして，前半部分は酸素濃度，後半部分は一酸化炭素濃度を示す．図 2 と図 3 から分るように，本論文に提案した手法を用いることによって工業プロセスに十分適当なモデルを得ることができると考えられる．

6. むすび

本研究では，各分割層に重みを付く多分割層ファジィモデルから過剰なファジィ分割層をミンコフスキーノルムにもとづく評価関数を用いた削減する手法を提案した．また，非線形関数の同定と陶器焼成炉への応用によってこの手法の有効性を検証した．

参考文献

[1] 粂田，伊藤，小川，中島，亀井，井上：陶器焼成炉のモデリングとファジィ制御，システム制御情報学会論文誌，Vol.7，No.4，pp.122-133 (1994)

[2] 亀井，木下：ファジィルール構造化ニューラルネットワークの陶器焼成炉温度・雰囲気制御への応用，システム制御情報学会論文誌，Vol.10，No.1，pp.44-46 (1997)

[3] 橋本，大島：バッチプロセス制御の現状と将来，システム／制御／情報，Vol.35，No.3，pp.123-131 (1991)

[4] 西谷：モデル予測制御の応用，計測と制御，Vol.28，No.11，pp.996-1004 (1989)

[5] 石渕，野崎，田中：分散型ファジィルールを用いたパターン認識，システム制御情報学会論文誌，Vol.4，No.12，pp.517~526 (1991)

[6] 鄒，亀井，井上：分散型簡略化ファジィルールの自動生成，日本ファジィ学会誌，Vol.11，No.6，pp.1119-1127 (1999)

[7] 市橋，渡辺：簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御，日本ファジィ学会誌，Vol.2，No.8，pp.429-437 (1990)

[8] 大谷，市橋，三好，長坂，金海：M－アポトーシスによるニューロ・ファジィGMDHの構造明確化学習，システム制御情報学会論文誌，Vol.11，No.5，pp.251-260 (1998)

[9] 三好，市橋，本多：M－アポトーシスによるリカレント型ＲＢＦネットワークの構造明確化学習，電子情報通信学会誌，Vol.J81－D－Ⅱ，No.6，pp.1345-1353 (1998)

[10] 野村，林，若見：デルタルールによるファジィ推論の自動チューニング手法と障害物回避への応用，日本ファジィ学会誌，Vol.4，No.2，pp.379-388 (1992)

[問い合わせ先]

〒525-8577　滋賀県草津市野路東 1-1-1

立命館大学理工学部情報学科

鄒　軍安

TEL: +81-77-561-2796

FAX: +81-77-561-2669

E-mail: zou @ contlab.cs.ritsumei.ac.jp

FA3−1

学習過程に着目したファジィ経路選択モデルの検討

A fuzzy route choice model considering with learning process

安田浩明
Yasuda HIROAKI

岐阜大学大学院
Graduate School of Gifu University

秋山孝正
Takamasa AKIYAMA

岐阜大学工学部土木工学科
Gifu University

The advanced information techniques of ITS are introduced to produce the efficient traffic on urban road network. The precise description of decision of the drivers is an important subject to propose the proper traffic management. Generally, the perceived travel time for the paths of the OD pairs is gradually reformed through the learning process with the experience of the drivers. The basic model is created to formulate the route choice decision of drivers in time series. As the human perception can be illustrated as the number with certain range, the fuzzy travel time description might be introduced. The previous model is easily extended to demonstrate the realistic situation in route choice of drivers. It is known from the results of analysis that fuzzy UE is observed in some different conditions of decision process.

1．はじめに

近年の情報通信機器の進展に伴い、高度道路交通システム(ITS)の導入が進んでいる。なかでも、ナビゲーションシステムなどの交通情報に基づく、自律的な道路交通管理は中心的な技術となっている。このような交通管理において、運転者の経路選択時の意思決定過程に対応した運用方法が必要である。

本研究では運転者の交通挙動を記述するモデルを構築し、経験的知識の蓄積にともない変化する経路選択現象を分析する。とくに運転者の認知所要時間のあいまい性と、不確実な状況下での意思決定に注目する。具体的にはファジィ所要時間を導入した経路選択モデルを提案する。特に学習に伴うファジィ数の形状変化を検討することで、運転者の現実的判断を分析することが可能となる。これより、経路選択の経路選択の意思決定構造を解明し、適切な経路誘導方法を検討するための資料とすることができる。

また、道路網交通量が「ほぼ均衡した」事象に相当する「ファジィ交通均衡」が発生する可能性について検討する。

2．経路選択モデルの構築

2．1　ファジィ経路選択モデルの概要

ここでは、運転者の意思決定プロセスを記述したファジィ経路選択モデルを提案する。図−1はモデルにおける1期の間に実行される算定内容を示したものである。

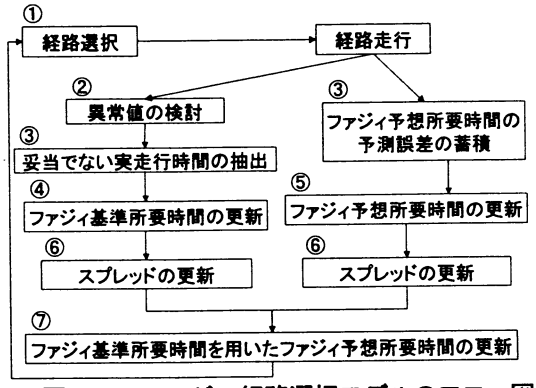
運転者は自身が認識するファジィ予想所要時間Eを比較することにより経路を選択する。そこで、本研究では可能性指標、必然性指標を用いて、経路選択指標を定める[1]。

$$
\begin{aligned}
&r = f(\lambda_l, \lambda_r) \\
&r_r = (1-\lambda_r)\cdot Pos(S > E) + \lambda_r \cdot Nes(S > E) \\
&r_l = (1-\lambda_l)\cdot Pos(S \geq E) + \lambda_l \cdot Nes(S \geq E)
\end{aligned} \qquad (1)
$$

ここで、λ_r, λ_l：組み合わせパラメータ

これは、ファジィ予想所要時間Eの右側への広がりに関係するr_rと左側への広がりに関係するr_lを組み合わせたものを経路選択指標rとするものである。

運転者は経路選択指標rが最も大きい経路を走行する。



図−1　ファジィ経路選択モデルのフロー図

2．2　経験によるファジィ所要時間の更新

運転者は経路を走行することによって認知所要時間に対応するファジィ所要時間の中央値を更新するとともに、ファジィ所要時間のスプレッドも更新するものとする。これは、ドライバーが所要時間に対する認知幅を変化させることに対応している。

ファジィ基準所要時間Sの中央値は、蓄積した実走行時間を用いて更新する。これを、以下のように定式化する。

$$
\begin{aligned}
&t_{S,k+1} = (1-\alpha)t_{S,k} + \alpha \bar{t}_{R,k} \\
&\text{ここで、}\ t_{S,k}：k\text{期の}S\text{の中央値} \\
&\qquad \bar{t}_{R,k}：k\text{期までの実走行時間の平均値} \\
&\qquad \alpha：\text{パラメータ}\ (0 \leq \alpha \leq 1)
\end{aligned} \qquad (2)
$$

ファジィ予想所要時間Eの中央値は、蓄積した予測誤差を用いて更新する。具体的には、以下のように定式化する。

$$
\begin{aligned}
&t_{E,i,k+1} = t_{E,i,k} - \beta \Delta \bar{t}_{E,i,k} \\
&\text{ここで、}\ t_{E,i,k}：k\text{期の経路}i\text{の}E\text{の中央値} \\
&\qquad \Delta \bar{t}_{E,i,k}：k\text{期までの経路}i\text{の予測誤差の平均値} \\
&\qquad \beta：\text{パラメータ}\ (\beta \geq 0)
\end{aligned} \qquad (3)
$$

また、運転者は渋滞時などの通常値といえない実走行時間を経験として考えない。そこで、実走行時間の平均値と分散によって、実走行時間を経験として取り扱うか否かを規定する。

$$\bar{t}_R - \delta\sigma \le t_{R,k} \le \bar{t}_R + \delta\sigma \quad (4)$$

ここで、σ：過去の実走行時間の分散
$\bar{t}_R$：過去の実走行時間の平均値
$t_{R,k}$：k期の実走行時間
δ：パラメータ　$(\delta > 0)$

実走行時間がこの範囲に収まらない場合には、その実走行時間は無視し、経験として取り扱わないものとする。

さらに、数期連続して走行しなかった経路について、ファジィ予想所要時間Ｅの見誤りをファジィ基準所要時間Ｓに基づいて更新する。モデル計算では以下のようである。

$$t_{E,i,k+1} = t_{E,i,k} - \gamma\,\Delta t_{SE,k} \quad (5)$$

ここで、$\Delta t_{SE,k}$：ＳとＥの相違
γ：パラメータ　$(\gamma \ge 0)$

ファジィ所要時間のスプレッドの更新量は、実走行時間とファジィ所要時間の交点のメンバシップ関数値によって規定する。更新量を規定する関数は以下のように定める。

$$f(\mu) = 0.1 \cdot \left(\frac{1}{1+\exp\{-10(2\mu-1)\}} - 0.5 \right) \quad (6)$$

ここで、μ：交点のメンバシップ 関数値

これは、交点のメンバシップ関数が0.5以上であったらスプレッドを広げる更新を行い、0.5未満であったらスプレッドを狭める更新を行うといった離散的な関数を連続関数で表したものである。たとえば、図－２のように交点のメンバシップ関数値が小さい場合には、スプレッドを広げるように更新を行うことになる。

３．経路選択行動に関する分析

３．１　計算ケースの概要

ここでは、ＯＤ間に３経路が存在する場合を考える。ＯＤ交通量を6000台として運転者は１日１回走行し、100日間繰り返し走行する。各経路の交通量に対応する所要時間は、ＢＰＲ関数を用いて表現する。

$$t^i = t_0^i\{1 + 0.15(x^i/Q^i)^4\} \quad (7)$$

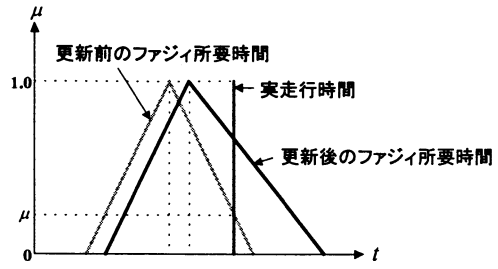
ここで、t^i：経路iの所要時間
Q^i：経路iの交通容量
x^i：経路iの交通量
t_0^i：経路iのゼロフロー時の所要時間

また、運転者は実走行時間と予測誤差について過去５期分を記憶し、それ以前の経験は忘却するものとする。また、非走行経路のファジィ予想所要時間Ｅの更新は過去５期間連続して走行しなかった経路について行う。

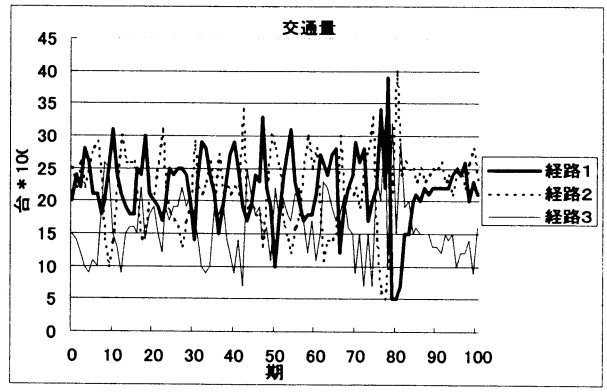
３．２　経路選択行動に関する分析

このときの各経路の経路交通量は振動を続けた。運転者の経路選択行動を詳細に見ると、初期の20期程度まではどの運転者も経路を頻繁に変更している。しかしながら、それ以降は数期から10数期間同一経路を連続して走行した後、経路を数回変更している。その後はさらに同一経路を走行しつづけている。このように経路変更が同一時期に起こらないため、経路交通量が変動を続けるものと考えられる。

また、運転者のファジィ予想所要時間のスプレッドは経路所要時間の変動が大きい経路については広く、変動の小さい経路については狭くなっている。これは、運転者が経路に対する認識を経路交通量の変動にも対して変化した結果であると考えられる。



図－２　スプレッドの更新の例



図－３　各期の交通量の変化（更新量：1/2）

そこで、スプレッドの更新量による経路交通量の変化について検討する。スプレッドの更新量を半分にした場合の各経路の交通量を図－３に示す。80期を過ぎた頃から多少の変動があるものの交通量の安定が見られた。経路を頻繁に変更している運転者は少なく、ほとんどの運転者が同一経路を走行し続けている。

スプレッドの更新量の大小は経路交通量の安定性への影響が大きい。とくに、スプレッドの更新量が大きい場合にはファジィ所要時間のスプレッドが変化しやすくなる。それによって、経路変更が活発に行われ経路交通量が変動すると考えられる。

４．おわりに

本研究では、運転者の所要時間認知のあいまい性に着目し、ファジィ所要時間を用いた行動モデルによる分析を試みた。これより、所要時間の幅（スプレッド）の変化を考慮することにより、現実的な運転者の経路選択行動の記述の可能性があることがわかった。

今後の課題として以下の点が挙げられる。

① 経路選択行動に関するアンケート調査及び、経路選択実験などによる実証的分析
② 確率的な複数の運転者挙動に関する分布を明示的に考慮した交通現象記述方法の導入

参考文献

1）野村朋子・秋山孝正：ファジィ測度を用いた交通量配分法に関する検討、第 14 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.833-834、1998

問い合わせ先
〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸１－１
岐阜大学工学部土木工学科都市工学講座
安田浩明
TEL 058-293-2443　FAX 058-230-1528
E-mail:yas@cc.gifu-u.ac.jp

FA3−2

カオス的時系列の短期予測法の改良とその応用

Improvement of Short-term Prediction Methods on Chaotic Time-series and Application

木戸 和彦
Kazuhiko Kido
創価大学大学院 工学研究科
Graduate Student of Engineering, Soka University

Abstract

It is wellknown that long-term prediction on chaotic time-series is impossible because of the extreme sensitivity, with respect to an initial value, of their behaviors. But the short-term prediction of them is possible to some extent. In this paper, after pointing out some problems previous methods of short-term prediction involve, we present an improved prediction method on chaotic time-series by using neurocomputing. A criterion for deciding whether a given data are from chaotic time-series or not is also given.

1.はじめに

カオスの研究の１つにカオス的時系列データの短期予測問題がある．主な短期予測の方法には，グラム・シュミットの直交化法やテセレーション法などがあげられるが，その多くはパラメータの取り方によって予測不可能になったり，次元が高くなるに伴って計算時間が急激に増大するといった問題を抱えている．

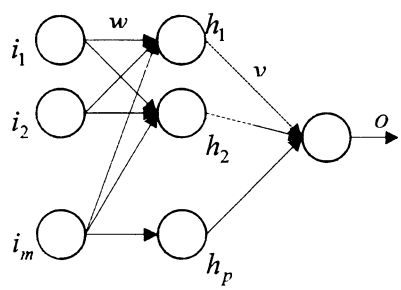
そこで，比較的問題点の少ないニューロコンピューティングを用いる予測法に着目した．

本研究では，以前発表した論文『ニューロコンピューティングを用いたカオス的時系列の短期予測』の中で提案した，提案１による予測法を改良し，その有効性を確認するために，代表的なカオス的振る舞いをする時系列モデルの短期予測に適用し，更に評価関数を付け加えることで，従来の方法との予測精度の差を明確にした．

また，実際の時系列データへの応用として，株価，気象データなどに適用した結果を示した．

2.ニューラルネットワークの構造

予測を行う際に用いるニューラルネットワークの構造を示す．図のiは入力層への入力，hは中間層からの出力，oは出力層からの出力，wは入力層と中間層の間の結合荷重，vは中間層と出力層の間の結合荷重を示す．このニューラルネットワークは，入力層のユニット数をm，中間層のユニット数をp，出力層のユニット数を１とした，３層からなる階層型神経回路網である．



3. 提案１による予測法

今，ある時系列データを提案１による予測法では，まず，元の時系列データを$x_i(i=1,2,\cdots,10)$とし，x_iからx_{11}を予測する問題を考える．

提案１による予測法では，まず，元の時系列データにタケンスの埋め込み定理を適用し，３次元再構成状態空間に埋め込みを行う．すると，元の時系列データは，

$[x_{i-2},x_{i-1},x_i](i=3,4,\cdots,10)$と書き直すことができる．

ここで，最初のニューラルネットワークに次のパターンを学習させる．（ただし，入力ユニット数（＝入力値の数）が３の場合）

入力値		教師信号
$[x_1,x_2,x_3]$	$[x_2,x_3,x_4]$	$[x_4,x_5,x_6]$
$[x_2,x_3,x_4]$	$[x_3,x_4,x_5]$	$[x_5,x_6,x_7]$
⋮	⋮	⋮
$[x_5,x_6,x_7]$	$[x_6,x_7,x_8]$	$[x_8,x_9,x_{10}]$

ここで，全ての学習を終了した時点での結合荷重を保存しておく．次に予測として，入力値を$[x_6,x_7,x_8][x_7,x_8,x_9][x_8,x_9,x_{10}]$，結合荷重を今保存したものとし，同じニューラルネットワークに１度だけ計算させる．その結果の内，１番最後のものを予測値x_{11}とする．

次に，埋め込み次元を４，５，…と上げていき，７次元に埋め込みをする．すると元の時系列データは，

$[x_{i-6},x_{i-5},\cdots,x_i](i=7,8,9,10)$と書き直すことができる．ここで，３次元の場合と同様に次のパターンを学習させ，終了した時点での結合荷重を保存しておく．

入力値		教師信号
$[x_1,\cdots,x_7]$	$[x_2,\cdots,x_8]$	$[x_3,\cdots,x_9]$	$[x_4,\cdots,x_{10}]$

そして予測として入力値を$[x_2,\cdots,x_8][x_3,\cdots,x_9][x_4,\cdots,x_{10}]$，結合荷重を今保存したものとし，同じニューラルネットワークに１度だけ計算させる．その結果の内，１番最後のものを予測値x_{11}とする．

これが提案１による予測法である．

4.改良点

今回の研究では，元のニューラルネットワークの中間層のユニット数を入力層のユニット数と一致させずに，中間層のユニット数を様々に変動できるようにした．そのことにより，予測精度の向上を期待した．

5.数値実験

改良された予測法の有効性を確認するため，代表的なカオス的振る舞いをする時系列モデルの短期予測に適用した．

時系列モデル

$$x_{n+1}=ax_n(1-x_n)\quad(0\le a\le 4,0\le x_0\le 1)$$

参考文献

[1] D.E.Rumelhart, G.E.Hinton and R.J.Williams : Nature,323,pp533-536 (1986)

[2] 木戸：ニューロコンピューティングを用いたカオス的時系列の短期予測，第14回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 pp763-764(1998)

[3] K.Kido : Short-term prediction on chaotic time-series using neurocomputing, proceedings of the first western pacific and third Australia-Japan workshop,pp278-284(1999)

[4] 木戸：ニューロコンピューティングを用いたカオス的データの短期予測，数値解析研究所講究録 1043 決定理論とその関連分野，京都大学数理解析研究所，pp50-58(1998)

FA3−3

鉄棒ロボットの学習型ファジィ制御システムの開発

Development of Learning Fuzzy Control System of Horizontal Bar Robot

藤村　俊平, 笠井　義友, 村上　周太, 島川　学

Syunpei Fujimura, Yositomo Kasai, Shuta Murakami, Manabu Shimakawa

九州工業大学　　工学部

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: In this paper, we propose the design of learning fuzzy control system. In this system we adjust parameters of fuzzy sets for a fuzzy model and a fuzzy controller by using GA. At first, the fuzzy model is designed by GA. Second, the fuzzy controller is repeatedly designed by control simulation for the fuzzy model and by using genetic parameter searching. Finally, in this paper the effectiveness of our proposed system is discussed from simulation results.

1. はじめに

世の中のある分野において、その分野の名人の技術は長年の修練という試行錯誤を繰り返し、習得できるものである。この行為（学習）を計算機上において実現することはできないのだろうか。

本研究は、この試行錯誤的な学習制御を実現するために、人間の直感に近い制御方法であるファジィ制御と、選択、交叉、突然変異などの繰り返しにより進化していくGAを用い、対象に対する制御知識のない状態から、人間と同じように試行錯誤的な学習を繰り返し行う事で制御ルールを獲得していく学習型ファジィ制御システムの開発を試みる。

2. 鉄棒ロボット

本研究において、制御対象として鉄棒ロボットを用い、鉄棒ロボットを大回転させることを目標とする。鉄棒ロボットは図1のようなモデルで表される非線形なシステムである。

x－y平面上において、鉄棒ロボットは次の(1)式に示す非線形方程式で表される。

ここに、$\theta=(\theta_1,\theta_2)^T$ ，　$\tau=(\tau_1,\tau_2)^T$

但し、$\tau_2=0$

$$H(\theta)\ddot{\theta}+h(\theta,\dot{\theta})+D\dot{\theta}+g(\theta)=\tau \qquad (1)$$

ここで、

$$H(\theta)=\begin{bmatrix}H_1 & H_2\\ H_3 & H_4\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}I_1+m_1l_{G1}^2+I_2+m_2(l_1^2+l_{G2}^2+2l_1l_{G2}C_2) & I_2+m_2(l_{G2}^2+l_1l_{G2}C_2)\\ I_2+m_2(l_{G2}^2+l_1l_{G2}C_2) & I_2+m_2l_{G2}^2\end{bmatrix}$$

$$h(\theta,\dot{\theta})=\begin{bmatrix}h_1\\ h_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-m_2l_1l_{G2}(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2+\dot{\theta}_2^2)S_2\\ m_2l_1l_{G2}\dot{\theta}_1^2S_2\end{bmatrix}$$

$$D=\begin{bmatrix}D_1 & 0\\ 0 & D_2\end{bmatrix}$$

$$g(\theta)=\begin{bmatrix}g_1\\ g_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}m_1gl_{G1}S_1+m_2g(l_1S_1+l_{G2}S_{12})\\ m_2gl_{G2}S_{12}\end{bmatrix}$$

$S_1=\sin\theta_1$ ，　$S_2=\sin\theta_2$ ，　$C_2=\cos\theta_2$ ，　$S_{12}=\sin(\theta_1+\theta_2)$

$l_{G1}=l_1/2$ ，　$l_{G2}=l_2/2$ ，$I_1=(1/3)m_1l_{G1}^2$ ，　$I_2=(1/3)m_2l_{G2}^2$

とする。

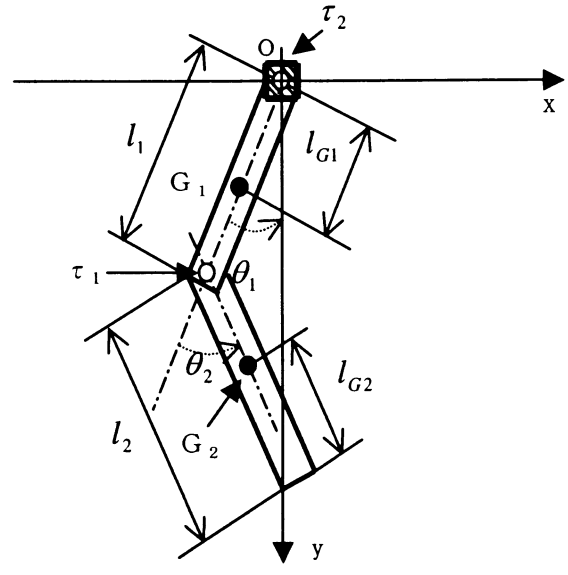


図1　鉄棒ロボットシミュレータ

本研究のシミュレーションでは、以下のパラメータを使用する。

表1.鉄棒ロボットシミュレータのパラメータ

リンク1の質量	m_1	2.3	kg
リンク2の質量	m_2	1.3	kg
回転軸oから重心G_1までの距離	l_{G1}	0.10	m
結合部から重心G_2までの距離	l_{G2}	0.13	m
重心G_1周りの慣性モーメント	I_1	0.0133	$Kg \cdot m^2$
重心G_2周りの慣性モーメント	I_2	0.0316	$Kg \cdot m^2$
回転軸とベアリングの摩擦係数	D_1	0.06	$Kg \cdot m^2/s$
結合部の摩擦係数	D_2	0.06	$Kg \cdot m^2/s$
重力加速度	g	9.8	m/s^2

3. 遺伝的アルゴリズムを用いた学習型ファジィ制御システム

学習型ファジィ制御システムの学習過程を以下に示す。

(1)鉄棒ロボットをランダムに操作し、そのときの操作量、角度、角速度のデータ群を取得する。

(2)鉄棒ロボットの初期ファジィモデルを作成する。前件部メンバーシップ関数のパラメータを遺伝子とする初期個体集団を生成し、GAによりメンバーシップ関数のパラメータ調整を行う。後件部は関数型推論法により、後件部線形式のパラメータを重み付き最小二乗法により同定する。各個体ごとに評価を行い、最終世代の最大適応度個体を最良ファジィモデルとする。

(3)ファジィ制御装置の制御則を作成する。前件部メンバーシップ関数のパラメータと、後件部のシングルトンを遺伝子とする初期個体集団を生成し、GAにより各個体ごとに作成したファジィモデルを制御、評価する。後件部の操作量は簡略推論法により推論する。最終世代の最大適応度の個体をファジィコントローラとする。

(4)ファジィコントローラにより鉄棒ロボットシミュレータを制御し、このときに得られたデータをモデリング時に使用したデータ群に加え、さらにファジィモデリングを行う。

(5)以上の動作を繰り返し、最終的に得られた制御ルールを最良コントローラとする。

4. GAによる最適制御ルールの導出

4.1 ファジィモデルの生成

ファジィモデルの構造を以下に示す。

$$MR\,i : \text{if } \tau(k) \text{ is } A_{i1},\ \theta_1(k) \text{ is } A_{i2},\ \theta_2(k) \text{ is } A_{i3},$$
$$\Delta\theta_1(k) \text{ is } A_{i4},\ \Delta\theta_2(k) \text{ is } A_{i5}$$
$$\text{then } \theta_1(k+1)=a_{i1}z_1+a_{i2}z_2+a_{i3}z_3+a_{i4}z_4+a_{i5}z_5$$
$$\theta_2(k+1)=b_{i1}z_1+b_{i2}z_2+b_{i3}z_3+b_{i4}z_4+b_{i5}z_5$$

但し、$\tau(k)$:操作量、$\theta_1(k)$:リンク1の角度
$\theta_2(k)$:リンク2の角度、$\Delta\theta_1(k)$:リンク1の角速度、$\Delta\theta_2(k)$:リンク2の角速度
k:サンプル時間0.02sec

z_i:後件部同定の説明変数

$z_1=\tau(k)$, $z_2=\theta_1(k)$, $z_3=\theta_2(k)$,
$z_4=\Delta\theta_1(k)$, $z_5=\Delta\theta_2(k)$

a_{ij}, b_{ij}:後件部線形式のパラメータ

A_{ij}:前件部ファジィ集合、3分割メンバーシップ関数（$i=1,2,\cdot\cdot,n$; $j=1,2,\cdot\cdot,5$）

ファジィモデリングにおいて、初世代の60個体をランダムに生成し、それらの遺伝子情報を各個体における操作量τ、角度θ_1、θ_2,角速度$\Delta\theta_1$、$\Delta\theta_2$の各メンバーシップ関数のパラメータl_k、r_k、h_k($k=\tau$、θ_1、θ_2、$\Delta\theta_1$、$\Delta\theta_2$)の値とする。図2にメンバーシップ関数のパラメータの位置を示す。

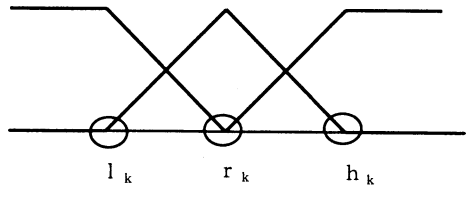


図2　メンバーシップ関数のパラメータ

これらの個体に対してファジィモデルルール後件部線形式のパラメータを鉄棒ロボットシミュレータを制御したときに得られた操作量、角度、角速度の各データ群をもとに関数型推論法によりパラメータを同定する。このとき得られたファジィモデル60

個に対して、モデルの評価関数および適応度関数を以下の式(2)、(3)とする。

$$f_{model}=\frac{\sum(\theta_{1m}(k)-\theta_{1r}(k))^2+\sum(\theta_{2m}(k)-\theta_{2r}(k))^2}{2} \qquad (2)$$

$$g_{model}=\frac{1}{1+a\cdot f_{model}/m} \qquad (3)$$

ここで、θ_{1m}、θ_{2m}:モデルからの角度応答；

θ_{1r}、θ_{2r}:シミュレータからの角度応答

a:パラメータ，　m:データ数

とする。

そして、適応度の上位4個体をエリートとして次世代に残し、その他の個体はルーレット選択により高い適応度の個体が子を残せるように選択をし、交叉、突然変異を繰り返し、最終世代の最大適応度個体を最良ファジィモデルとする。

4. 2 ファジィ制御ルールの生成

ファジィ制御ルールの構造を次に示す。

CR i : if $\theta_1(k)$ is B_{i1}, $\theta_2(k)$ is B_{i2}, $\Delta\theta_1(k)$ is B_{i3}

$\Delta\theta_2(k)$ is B_{i4}, then $\tau(k)$ is b_i

ここで、B_{ij}:前件部ファジィ集合、

b_i:後件部シングルトン

とする。

ファジィコントローラにおいて、初世代の40個体をランダムに生成する。各個体は角度、角速度のメンバーシップ関数のパラメータ値と、後件部シングルトン値を遺伝子情報とする。ここで、最良ファジィモデルで得られた角度、角速度のメンバーシップ関数の広がり(l～h)に含まれる範囲でファジィ制御ルールの前件部変数である角度、角速度のメンバーシップ関数のパラメータを乱数を用いて決定する。また後件部シングルトンはランダムに生成する。

次に、最良ファジィモデルを制御対象として、40個体のファジィコントローラで簡略推論法によるファジィ制御をする。コントローラの評価関数および適応度関数を式(4)および(5)で示す。

$$f_{ctrl}=e_{Rj\min}+e_{Lj\min}+\frac{\sum e_{Rj}+\sum e_{Lj}}{n} \qquad (4)$$

$$e_{Rj}=\theta_1\big|_{\dot{\theta}_1=0} \qquad (0\le\theta_1\le\pi)$$

$$e_{Lj}=2\pi-\theta_1\big|_{\dot{\theta}_1=0} \qquad (\pi\le\theta_1\le 2\pi)$$

$$e_{Rj\,\min}=\min\ \theta_1\big|_{\dot{\theta}_1=0}$$

$$e_{Lj\,\min}=\min\ 2\pi-\theta_1\big|_{\dot{\theta}_1=0}$$

n : $\dot{\theta}_1=0$ になる回数

$$g_{ctrl}=\frac{1}{1+f_{ctrl}} \qquad (5)$$

そして、上位4個体をエリートとして次世代に残し、その他をルーレット選択により選択し、選択された個体間で交叉、突然変異を繰り返す。最終世代での最大適応度の個体を最良制御ルールとして鉄棒ロボットシミュレータを制御する。このときのシミュレータの応答を先のモデリングで使用したデータに加え、再びモデリングを行い、ファジィ制御ルールの作成作業を繰り返すことで、ファジィ制御ルールの学習を行う。

以上の過程を繰り返すことで、鉄棒ロボットが大回転できるまでの過程を実現する。

5. 学習制御結果

5.1 初期学習

5.1.1 初期ファジィモデル

以下に鉄棒ロボットシミュレータからの角度応答と、初期最良ファジィモデルの角度応答の比較を図5.1、図5. 2に示す。

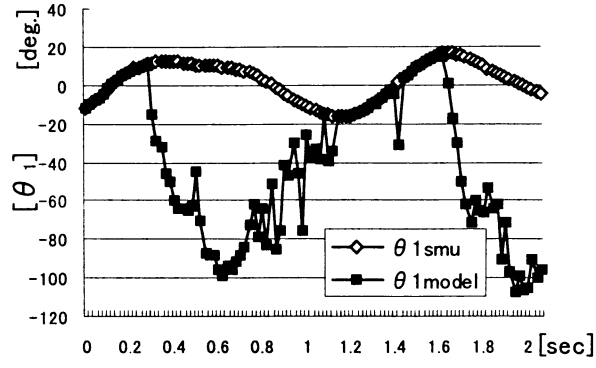


図5.1　初期最良ファジィモデルの
角度θ_1応答比較

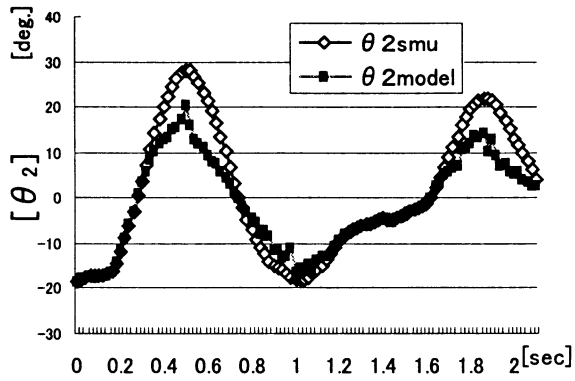


図5．2　初期最良ファジィモデルの角度θ_2応答の比較

5.1.2　初期ファジィコントローラ

最終世代の最大適応度のファジィ制御ルールを初期コントローラとし、シミュレータを制御したとき、θ_1の応答を図5．3に示す。

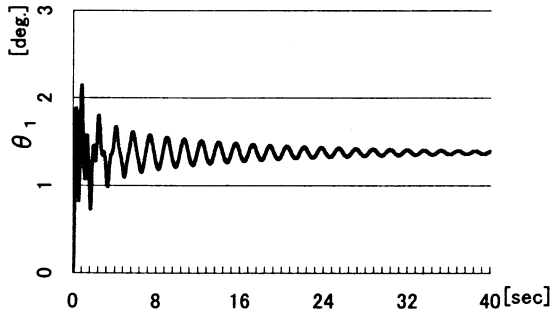


図5．3　コントローラによるシミュレータの制御結果

5.1.3　最終学習結果

3回の学習過程を経て得られた最良ファジィコントローラによる制御結果を図5.4に示す

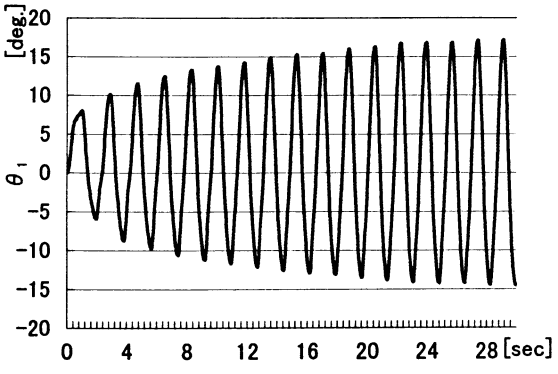


図5．4　学習後の最良コントローラによるθ_1の応答

6．シミュレーション結果の考察

(1)　ファジィモデル

図5.1の初期最良ファジィモデルの結果からは、モデルと実際の系との間にかなりのばらつきが現れた。これはモデリングデータが少ないため、あるデータに当てはまらない規則が生じ、その規則の重み行列の成分が存在しないため、後件部線形式のパラメータがすべて0となるためと思われる。また、最良ファジィモデルをGAを用いて同定する際、40世代でしか行わなかったため、真に最良と思われるモデルを同定することができなかった。これは世代数が不十分であったと思われる。このため、本手法においてある程度のデータ数や世代数が必要である。

(2)　ファジィ制御ルール

ある程度のファジィ制御ルールを導出することはできたが、鉄棒ロボットが回転に至るような制御ルールを見出すことはできなかった、主な理由として、コントローラの良し悪しを決定する評価関数をθ_1のみ使用して作成したためと考えられる。よって、評価関数を作成する際、θ_2をも組み込む必要がある。

7．まとめ

本研究において、前件部メンバーシップ関数を3分割しているため、x－y平面は4象限があるので、3分割で鉄棒ロボットの状態を記述するには不十分と思われる。分割数を増やすとルール数が多くなるので、ルールを統合する処置を施す必要がある。

参考文献

[1]　山田尚史、村上周太、島川学、学習型ファジィ制御システムの開発、第18回　SICE九州支部学術講演会予稿集、p383～386、1999
[2]　菅野道夫、ファジィ制御、日刊工業新聞社、1988
[3]　日本ファジィ学会編、講座ファジィ⑤ファジィ制御、日刊工業新聞社、1993

[問い合わせ先]
〒804-8550　北九州市戸畑区仙水町1-1
九州工業大学　工学部　電気工学科　情報工学教室
村　上　周　太
Tel&Fax 093-884-3244
E-mail: murakami@comp.kyutech.ac.jp

FB1−1

ファジィ識別システムの構築と学習

Construction and Learning of Fuzzy Classification Systems

○新居 学　田中 喜美子　石渕 久生

Manabu Nii　Kimiko Tanaka　Hisao Ishibuchi

大阪府立大学大学院 工学研究科

Osaka Prefecture University

Abstract In this paper, we propose a construction method of compact fuzzy rule-based classification systems with high classification performance for pattern classification problems. The proposed method has two stages; (i) a construction stage of a fuzzy rule-based classification system, and (ii) a learning stage of each fuzzy if-then rule. In the first stage, the proposed method selects a small number of fuzzy if-then rules using a genetic algorithm for construct a fuzzy rule-based classification system. In the second stage, the membership functions of antecedent fuzzy sets and the certainty grade of each fuzzy if-then rule are adjusted.

1 はじめに

本研究では，パターン識別問題に対して小型で高性能なファジィ識別システムを構築する手法を提案する．提案手法では，まず，少数のファジィIf-Thenルールで構成されるファジィ識別システムを遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて構築する．次に，構築されたファジィ識別システムの性能向上を目的として，ファジィIf-Thenルールのメンバーシップ関数の調整と確信度の修正を行う．ファジィ識別システムの構築では，正答数最大化とルール数最小化を目的とする2目的GA[1]を用いて適切なファジィルールを選択することにより，小型のファジィ識別システムを構築する．ファジィ識別システムの学習法としては，ファジィルールの確信度を調整する手法[2]や，ファジィルールの条件部ファジィ集合のメンバーシップ関数の形状と確信度を同時に調整する手法[3]が，すでに提案されている．これらの学習手法と比較した場合での本研究の学習手法の特徴は，メンバーシップ関数の移動量と確信度の修正量が解析的に求められるという点にある．

2 ファジィ識別システムの構築

ファジィ識別システムは，学習用パターンからファジィIf-Thenルールを生成することにより構築される．このとき，問題の高次元化や属性に対するファジィ分割数の増加に伴い，生成されるファジィIf-Thenルールの数が非常に多くなる．そこで，GAを用いて適切なファジィIf-Thenルールのみを選択する手法[1]が提案されている．本研究では，文献[1]と同じ方法を用いて，本研究で提案する学習手法を適用するファジィ識別システムを構築する．

GAの目的は，少数で高性能なファジィIf-Thenルール集合を得ることである．ここで，ファジィIf-Thenルールの全体集合をS_{ALL}とする．S_{ALL}の部分集合Sにより正しく識別される学習用パターン数を$NCP(S)$，部分集合Sに含まれるルール数を$|S|$とすると，ルール選択手法における2つの目的は以下のようになる．

$$\text{Maximize } NCP(S), \quad \text{Minimize } |S|$$

これらの2つの目的関数を正の重みW_{NCP}とW_Sを用いて結合することにより，以下のように適応度関数を定義する．

$$Fitness(S) = W_{NCP} \cdot NCP(S) - W_S \cdot |S| \tag{1}$$

また，ルール集合Sを長さN（$N = |S_{ALL}|$）の列により次のように表現し，GAにおける個体として扱う．

$$S = s_1 s_2 \cdots s_N \tag{2}$$

$$s_r = 0 \text{ or } 1,\ r = 1, 2, \cdots, N \tag{3}$$

ここで，$s_r = 1$は，「r番目のルールを含む」を示し，$s_r = 0$は，「r番目のルールを含まない」を示す．なお，遺伝的操作等アルゴリズムの詳細は文献[1]を参照されたい．

3 ファジィ識別システムの学習

GAにより構築された少数のファジィルールからなる識別システムに対して，識別性能の向上を目的として学習を行う．提案手法では，ファジィルールの学習はファジィ識別システムにより誤識別された学習用パターンが正しく識別されるように行われる．いま，ある学習用パターン$\mathbf{x}_p = (x_{p1}, \cdots, x_{pn})$がファジィ識別システムにより誤識別されたとする．このとき，R_wをパターン$\mathbf{x}_p$を誤識別したファジィルールとし，R_kをパターン$\mathbf{x}_p$を正しく識別する可能性が最も高いファジィルールとすると，次のような関係が成り立つ．

$$\prod_{i=1}^{n} \mu_{ki}(x_{pi}) \cdot CF_k < \prod_{i=1}^{n} \mu_{wi}(x_{pi}) \cdot CF_w \tag{4}$$

学習用パターン$\mathbf{x}_p$が正しく識別されるためには，式(4)の不等号を逆にした次の関係式が成り立たなければなら

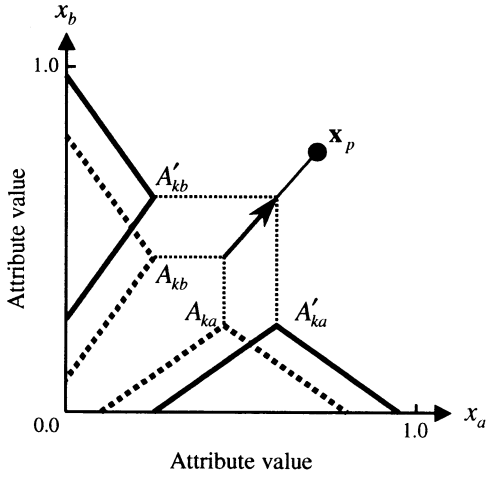


図 1: 学習法 3 のメンバーシップ関数の調整

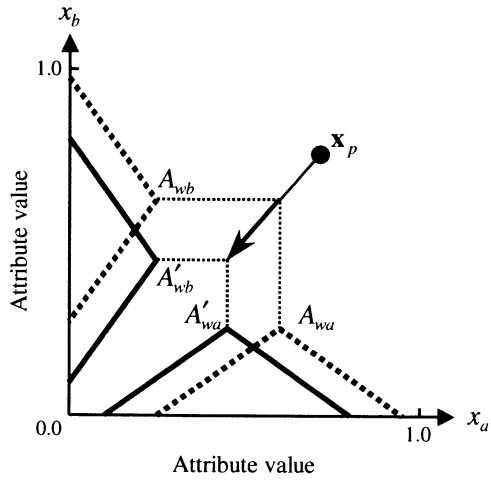


図 2: 学習法 4 のメンバーシップ関数の調整

ない.

$$\prod_{i=1}^{n} \mu_{ki}(x_{pi}) \cdot CF_k > \prod_{i=1}^{n} \mu_{wi}(x_{pi}) \cdot CF_w \tag{5}$$

式 (5) を満たすために，本研究では以下の 4 つの学習法を考える.

[学習法 1]

式 (5) が成り立つようにファジィルール R_k の確信度 CF_k を以下の式により増加させる（ε_1 は正の微小量）.

$$CF_k := \frac{\prod_{i=1}^{n} \mu_{wi}(x_{pi}) \cdot CF_w}{\prod_{i=1}^{n} \mu_{ki}(x_{pi})} + \varepsilon_1 \tag{6}$$

[学習法 2]

式 (5) が成り立つようにファジィルール R_w の確信度 CF_w を以下の式により減少させる.

$$CF_w := \frac{\prod_{i=1}^{n} \mu_{ki}(x_{pi}) \cdot CF_k}{\prod_{i=1}^{n} \mu_{wi}(x_{pi})} - \varepsilon_1 \tag{7}$$

このような修正後，パターン $\mathbf{x}_p$ が他のファジィルールにより誤識別される場合には，新たに誤識別しているファジィルールも同様の手順で修正する．このような操作をパターン $\mathbf{x}_p$ が正しく識別されるまで繰り返す.

[学習法 3]

式 (5) が成り立つようにファジィルール R_k の適合度 $\prod_{i=1}^{n} \mu_{ki}(x_{pi})$ を増加させる．すなわち，条件部ファジィ集合のメンバーシップ関数を図 1 のようにパターン $\mathbf{x}_p$ へ近づける.

[学習法 4]

式 (5) が成り立つようにファジィルール R_w の適合度 $\prod_{i=1}^{n} \mu_{wi}(x_{pi})$ を減少させる．すなわち，条件部ファジィ集合のメンバーシップ関数を図 2 のようにパターン $\mathbf{x}_p$ から遠ざける．このような修正後，パターン $\mathbf{x}_p$ が他のファジィルールにより誤識別される場合には，新たに誤識別しているファジィルールも同様の手順で修正する操作をパターン $\mathbf{x}_p$ が正しく識別されるまで繰り返す.

4 おわりに

本研究では，小型で高性能なファジィ識別システムの構築手法を提案した．提案手法では，GA を用いて構築された小型のファジィ識別システムに対して，条件部ファジィ集合のメンバーシップ関数の調整と確信度の修正を行うことにより，少数のファジィルールからなる高性能なファジィ識別システムを構築することが可能となる．今後の研究課題として，ファジィルールの学習を GA に組み込むことを検討している.

参考文献

[1] 石渕久生, 村田忠彦 : "2 目的 GA による言語的識別ルールの選択", 日本ファジィ学会誌, Vol. 7, No. 5, pp. 1041–1049 (1995)

[2] 野崎　賢，石渕久生，田中英夫: "学習型ファジィ識別システムによる知識獲得", 日本経営工学会誌, Vol. 45, No. 5, pp. 430–441 (1994)

[3] 石渕久生，森澤武彦: "ファジィ識別システムにおけるメンバシップ関数の調整", システム制御情報学会論文誌, Vol. 10, No. 5, pp. 223–235 (1997)

問い合わせ先

〒 599-8531　大阪府堺市学園町 1 － 1
大阪府立大学大学院　工学研究科
石渕　久生
TEL (0722)54-9350
FAX (0722)54-9915
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

FB1−2

パターン識別問題における遺伝的機械学習による知識獲得

Knowledge Acquisition by a Genetics-Based Machine Learning Method in Pattern Classification Problems

○中島 智晴
Tomoharu Nakashima

大阪府立大学大学院 工学研究科
Dept. of Industrial Engineering
Osaka Prefecture University

石渕 久生
Hisao Ishibuchi

大阪府立大学大学院 工学研究科
Dept. of Industrial Engineering
Osaka Prefecture University

Abstract In this paper, we propose a genetics-based machine learning method for extracting linguistic rules for pattern classification problems. The proposed method is the hybridization of the Michigan approach and the Pittsburgh approach. In the proposed method, classification performance is maximized and the number of fuzzy if-then rules is minimized. We show the effectiveness of the proposed method by computer simulations.

1 はじめに

ファジィ If-Then ルールを用いてパターン識別を行う手法が，石渕ら[1]により提案されている．例えば，次のルールは，5次元 2 クラスパターン識別問題に対するファジィ If-Then ルールの一例である．

$$\text{Rule } R_j: \text{If } x_1 \text{ is } \textit{medium} \text{ and } x_5 \text{ is } \textit{small} \text{ then Class 2 with } CF = 0.48 \quad (1)$$

ここで，R_j はルールのラベル，CF はルールの確信度である．また，遺伝的アルゴリズムを用いてパターン識別に必要なファジィ If-Then ルールを数値データから自動的に生成・選択する方法も提案されている[2,3]．これらの遺伝的機械学習手法は，ミシガンアプローチとピッツバーグアプローチの2つに分類することができる．本研究では，これらのアプローチを組み合わせたハイブリッド手法を提案する．

2 提案手法

2.1 コード化

本研究では，ファジィ If-Then ルールの条件部ファジィ集合として，図1に示す6つの言語値を用いることにする．これらの言語値に対して，0～5の記号を割り当てることによりコード化を行う．例えば，式(1)のファジィ If-Then ルール R_j は，30001とコード化される．ファジィ If-Then ルールの結論部は条件部に適合する学習用パターンから自動的に決定される[1]のでコード化しない．ルール集合のコード化は，ルール集合に含まれている各ルールを前述の方法でコード化し，それらを結合させることにより行われる．

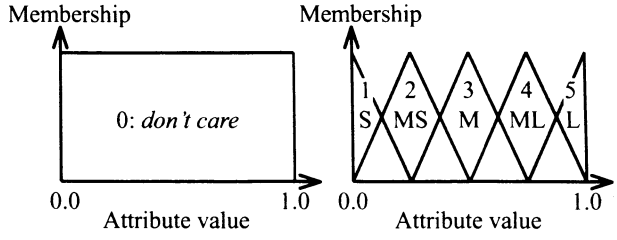


図1 言語値のメンバシップ関数

2.2 アルゴリズム

提案手法のアルゴリズムでは，個体はファジィ If-Then ルールの集合である．すなわち，ピッツバーグアプローチの枠組みを用いている．また，新しいルールを生成するために，ミシガンアプローチを各個体に適用する．提案アルゴリズムは以下の手順から構成されている．

(1) ファジィ If-Then ルールの条件部ファジィ集合を図1の言語値（0～5）からランダムに選ぶことにより，N_{rule} 個のルールからなる N_{set} 個のルール集合を生成する．

(2) 次の適応度関数により，各ルール集合 S_i に適応度

を与える.

$$f(S_i) = NCP(S_i) - W_S \cdot |S_i|, \quad i = 1,2,\ldots,N_{\text{set}} \quad (2)$$

ここで, $NCP(S_i)$ はルール集合 S_i により正しく識別された学習用パターンの数, $|S_i|$ はルール集合 S_i に含まれるファジィIf-Thenルールの数, W_S は非負の重みである. また, 最も適応度が高いルール集合をエリート個体とする.

(3) 選択操作により, $N_{\text{set}}/2$ 対の親個体を選択する. このとき, ルール集合 S_i は次式の選択確率で交叉操作で用いられる親として選択される.

$$P(S_i) = \frac{f(S_i) - f_{\min}(\Psi)}{\sum_{S_j \in \Psi} \{f(S_j) - f_{\min}(\Psi)\}} \quad (3)$$

ここで, Ψ は個体群(すなわち, $S_i \in \Psi$, $i = 1,\ldots,N_{\text{set}}$)であり, $f_{\min}(\Psi)$ は Ψ に含まれているルール集合の中で最も小さい適応度を表す.

(4) 各対の親から, 交叉確率 P_{cross} で交叉操作を適用し, 新しいルール集合の生成を行う. なお, この交叉操作により, ルール集合に含まれるファジィIf-Then ルールの数が変わりうる. 新しい個体群に含まれる各ルール集合 S に対して, 以下のミシガンアプローチ(a)-(d)を実行し, N_{rep} 個のルールを入れ替える.

a. 各ルールに対して, 次式により適応度を割り当てる.

$$f(R_j) = NCP(R_j) \quad (4)$$

ここで, $NCP(R_j)$ はルール R_j により正しく識別された学習用パターンの数である.

b. 選択操作により, $N_{\text{rep}}/2$ 対の親個体を選択する. このとき, 各ルールは, 次式で与えられる確率により, 交叉における親として選択される.

$$P(R_j) = \frac{f(R_j) - f_{\min}(S)}{\sum_{R_i \in S} \{f(R_i) - f_{\min}(S)\}} \quad (5)$$

ここで, $f_{\min}(S)$ は, ルール集合 S に含まれているルールの適応度の最小値である.

c. 選択された一対のルールから, 一様交叉により一対の新しいルールを生成する. 更に, 突然変異操作を行う. 交叉操作と突然変異操作により条件部が決定されたルールの結論部クラスと確信度は, 文献[1]の方法により決定される.

d. 上記 b,c で新しく生成されたルールを, S の中で適応度の低い N_{rep} 個のルールと入れ換える.

(5) 新しく生成された個体群の中から, ランダムにひとつのルール集合を選択し, 前世代のエリート集合と入れ替える.

(6) 終了判定. 本研究では, あらかじめ決められた世代に達したとき終了する. 終了条件を満たさない場合は, (2)に戻る.

3 おわりに

本研究では, 高性能なルール集合の獲得方法として, ミシガンアプローチとピッツバーグアプローチの二つの遺伝的機械学習法を組み合わせた手法を提案した. なお数値実験結果は, 発表当日に報告する予定である.

参考文献

[1] 石渕 久生, 野崎 賢, 田中 英夫: 分散型ファジィルールを用いたパターン認識, システム制御情報学会論文誌, Vol. 4, No. 12, pp. 517-526 (1991)

[2] 石渕 久生, 山本 直久, 野崎 賢, 田中 英夫: 遺伝的手法によるファジィ If-Then ルールの選択, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J76-A, No. 10, pp. 1465-1473 (1993)

[3] 石渕 久生, 中島 智晴, 村田 忠彦: ファジィ識別システム構築のためのミシガンアプローチとピッツバーグアプローチの比較, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J80-A, No. 2, pp. 379--387 (1997)

[問い合わせ先]
〒599-8531
大阪府堺市学園町1－1
大阪府立大学 工学部 経営工学科
計算知能工学研究室
中島 智晴
Tel: 0722-54-9351 Fax: 0722-54-9915
E-mail: nakashi@ie.osakafu-u.ac.jp

FB1−3

数値・文字混成データの論理的解析について

Logical Analysis of Data with Numerical and Nominal Attributes

高木 昇　　中島 恭一

Noboru Takagi　Kyoichi Nakashima

富山県大学工学部電子情報工学科

Dept. of Elec. & Informatics, Toyama Prefectural University

Abstract: This paper focuses on fuzzy rule-based classification systems on a data with numerical and nominal objects, and they are implemented by multiple-valued logic functions. A fuzzy rule-based classification system is a classifier system of a given data, and it consists of a set of fuzz if-then rules. Many studies have discussed on a way for constructing a fuzzy rule-based classification system when a data is given. This paper employs multiple-valued logic functions to construct fuzzy rule-based classification systems, i.e., a given data will be approximated by a multiple-valued logic function. The problem of finding such an approximated multiple-valued logic function is a combinatorial optimaization problem. So, genetic algorithm will be employed to find such function. Every multiple-valued logic function will be obtained in a sum-of-product form, and the form directly represents a fuzzy rule-based classification system.

1 はじめに

ある適当な有限集合 A が与えられ, A の各点 a に $[0,1]$ のある値 $F(a)$ が唯一つ割り当てられているとき, この n 項関係 $F: A \to [0,1]$ を不完全記述関数と呼ぶことにする. 本文の目的は, 任意に与えられた不完全記述関数 F を, ファジィIf-Thenルールをを用いて近似的に表現することである. 本文で取り扱う問題は, 一般的に, 不完全記述なデータ集合からそのデータ集合に内在する論理的関係をファジィIf-Thenルールの形式で抽出する研究, と位置付けすることができる. この種の問題は, 大量なデータ集合から意味のある情報を取り出すための研究として最近注目を集めている知識発見 [1], データ・マイニング, あるいはデータの論理的解析 [2] といった研究分野や, 更にはパターン識別における識別関数 [3] などと密接に関連している.

データの論理的解析手法はブール関数を応用して文献 [2] などで活発に議論されている. ここでは, ブール関数を応用しているため, 一般にデータの属性値は正例または負例をあらわす, いわゆるブール型の属性値しかゆるされない. しかし, データ集合には, その属性が実数値を取る数値属性や, 或は数値以外の色 (赤, 青, 黄) などを取る属性も考えられる. 本文では, このような数値以外の属性を文字属性と呼ぶことにする. 本文の目的は, 数値属性や文字属性が混在している, 一般的なデータ集合に対して, ファジィIf-Thenルールを応用して, データ集合に内在する情報を論理的に解析する手法を提案する.

2 諸定義

数値真理値の集合を 0 から 1 の閉区間で与え, これを記号 V で表す. 即ち, $V = [0,1]$ で定義する. 2 値論理において, 論理演算 AND($\wedge$) および OR($\vee$) は基本的な論理結合子であるが, 本文では, これら 2 値論理演算 AND($\wedge$), OR($\vee$) を以下の定義にしたがって, 数値真理値集合 V 上の論理演算に拡張定義する.

$$\left.\begin{array}{rcl} x \wedge y & = & \min(x,y) \\ x \vee y & = & \max(x,y) \end{array}\right\} \quad (1)$$

但し, $x, y \in V$.

次に, 論理式を定義する.

定義 1 論理式は, 以下のように帰納的に定義される.

(1) 変数 $X_1, \ldots, X_n$ および定数 0, 1 は論理式である.

(2) G および H が論理式ならば $(G \wedge H)$ および $(G \vee H)$ も論理式である.

(3) (1) および (2) の有限回の操作によって得られるもののみが論理式である.

簡略化のため, 論理式を記述する場合には, しばしば $\wedge$ を省略することがある. また, 任意の論理式 f において, 各変数 $X_1, \ldots, X_n$ に V の数値真理値が与えられれば, f は明らかに集合 V^n から V への写像として取り扱うことができる. 以降, 簡単のため, 論理式とそれが表現する V 上の写像とを同一視することにする. 従って, V 上の同じ写像を表現する異なる論理式 f, g は互いに等しい論理式であると解釈され, $f = g$ と表記される.

論理演算 AND($\wedge$) および OR($\vee$) の定義式 (1) により, 論理式に関して以下に示す等式が一般に成立する.

べき等律: $x \wedge x = x, x \vee x = x$ (2)

交換律: $x \wedge y = y \wedge x, x \vee y = y \vee x$ (3)

結合律: $x \wedge (y \wedge z) = (x \wedge y) \wedge z,$
$x \vee (y \vee z) = (x \vee y) \vee z$ (4)

吸収律: $x \wedge (x \vee y) = x, x \vee (x \wedge y) = x$ (5)

分配律: $x \vee (y \wedge z) = (x \vee y) \wedge (x \vee z),$
$x \wedge (y \vee z) = (x \wedge y) \vee (x \wedge z)$ (6)

従って, 代数 $\langle V, \wedge, \vee \rangle$ は分配束を成す.

定数 1, 0 および V の値を取る各変数 X_i $(i = 1, \ldots, n)$ はリテラルと呼ばれる. いくつかのリテラルを AND($\wedge$) で結合した論理式は積項という. ある積項 α に同一のリテラル L が二個以上存在するとき, べき等律により, 積項 α はリテラル L が唯一つしか存在しない積項と等しい. 従って, 本文では, 積項には同一のリテラルが二個以上存在しないものと仮定する. いくつかの積項が OR($\vee$) で結合された論理式は積和形式と呼ばれる. 積和形式もべき等律によって, 同一の積項が複数個存在しない積和形式と等しいので, 本文では積和形式には同一の積項が複数個存在しないものと仮定する. 論理演算 $\wedge, \vee$ の間には等式 (2) ~ (6) が成立しているので, 任意の論理式には, それと等しい積和形式が少なくとも一つ存在する.

3 ファジィIf-Thenルールによるデータの論理的解析

n 個の属性 $x_1, \ldots, x_n$ が存在するデータ集合について考える. 一般に, n 個の属性には, 数値データを取り扱っている属性とそうでない属性, 即ち, 性別 (男または女) や色 (赤, 青, 黄) など, その属性値が離散的でかつ属性値の間に順序関係が存在しないような属性が存在する. 本文では, このような属性値が離散的でかつ順序関係が存在しないような属性を文字属性と呼ことにする. 以下, 数値属性と文字属性が混在するような n 個の属性を持つ一般的なデータ集合について議論する. なお, 本節では記述の簡単のため, n 個の属性 $x_1, \ldots, x_n$ のうち, はじめの θ 個 $(\theta < n)$ の属性 $x_1, \ldots, x_\theta$ を数値属性, 残りの $n - \theta$ 個の属性 $x_{\theta+1}, \ldots, x_n$ を文字属性と仮定する.

本文で対象とするデータ集合には分類クラスが存在し, データ集合の各データはいずれか一つの分類クラスに属するものとする. 分類クラスが p 個存在した場合, 分類クラスの集合を $C(p) = \{1, 2, \ldots, p\}$ で記述することにする.

各属性 x_i $(i = 1, \ldots, n)$ の定義域を記号 D_i で表す. このとき, データ集合のあるデータの属性値がそれぞれ $a_1 \in D_1, \ldots, a_n \in D_n$ であれば, このデータは直積集合 $D_1 \times \cdots \times D_n$ のある点 $(a_1, \ldots, a_n)$ で記述することができる. 以上のことから, データ集合は, $D_1 \times \cdots \times D_n$ の有限部分集合 D から 分類クラスの集合 $C(p)$ への不完全記述関数 $F : D \to C(p)$ として数学的に記述することができる.

次に, ファジィ集合を応用したパターン識別システム (以下, パターン識別システム) について述べる.

パターン識別システムとは, 表1に示されるようなファジィIf-Thenルールの集まりである.

$R^k_1, \ldots, R^k_{m_k}$ $(k = 1, \ldots, p)$ は分類クラス k に対するファジィIf-Thenルールである. ここで, $D_1 \times \cdots \times D_n$ のある点 $(x_1, \ldots, x_n)$ が分類クラス k に属する度合 $f_k(x_1, \ldots, x_n)$ は以下に示す積和形式によって求められる.

$$y^k_i(x_1, \ldots, x_n) = x_1^{A^k_{i1}} \wedge \cdots \wedge x_n A^k_{in} \quad (7)$$

$$f_k(a_1, \ldots, a_n) = \bigvee_{i=1}^{m_k} y^k_i(x_1, \ldots, x_n) \quad (8)$$

ここに, $x_j^{A^k_{ij}}$ は x_j が D_j 上のファジィ/クリスプ集合

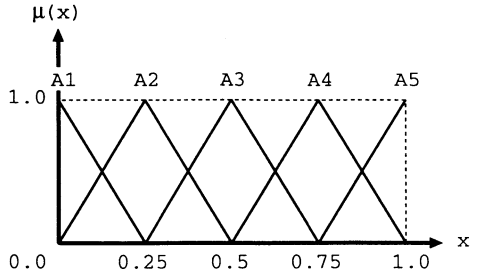


図 1: ファジィ分割

A^k_{ij} に所属する度合を表すメンバーシップ関数である. $f_k(x_1, \ldots, x_n)$ $(k = 1, \ldots, p)$ の最も大きい値によってデータ $(x_1, \ldots, x_n)$ の分類クラスは決定される. なお, 第2の定義に従えば, メンバーシップ関数 $x_j^{A^k_{ij}}$ は論理式 (8) のリテラルである. 故に, 以下 $x_j^{A^k_{ij}}$ をリテラルと呼ぶ.

式 (7) におけるリテラル $x_j^{A^k_{ij}}$ の定義について述べる. まず始めに, $j \leq \theta$ の場合, つまり, 属性 x_j が数値属性の場合について述べる. このとき, A^k_{ij} は $x_j^{A^k_{ij}}$ によって特徴付けられる D_j 上のファジィ集合である. 本文では, ファジィ集合のメンバーシップ関数として三角形メンバーシップ関数を採用する. 但し, $A^k_{1j}, \ldots, A^k_{m_k j}$ が D_j のファジィ分割となるように各三角形メンバーシップ関数 $x_j^{A^k_{ij}}$ を定義する. 図1に定義域 $[0, 1]$ が 5 つの三角形ファジィ集合によってファジィ分割される例を示す. 次に, $j > \theta$ の場合, つまり, 属性 x_j が文字属性の場合について述べる. このとき, A^k_{ij} は D_j のクリスプな部分集合である. 従って, $x_j^{A^k_{ij}}$ は次式で定義される D_j から $\{0, 1\}$ への定義関数である.

$$x_j^{A^k_{ij}} = \begin{cases} 1 & x_i \in A^k_{ij} \text{ のとき} \\ 0 & \text{その他} \end{cases}$$

式 (7) および式 (8) により, 表1の分類クラス k に対するファジィIf-Thenルールは論理式として表現される. 故に, データ集合である不完全記述関数 F を近似的に表現する論理式を求めれば, データに内在する知識が論理的に解析することが可能となる.

先に述べたように, データ集合は不完全記述関数 $F : D \to C(p)$ として記述される. ここで, 与えられたデータ集合 F から次に示すような p 個のデータ集合 F_k $(k = 1, \ldots, p)$ を導入する.

$$F_k : D \to \{0, 1\};$$

$$F_k(a_1, \ldots, a_n) = \begin{cases} 1 & F(a_1, \ldots, a_n) = k \text{ のとき} \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (9)$$

多少冗長な記述ではあるが, F も $F_1, \ldots, F_p$ も同じデータ集合を記述していることは明らかである. 以上により, 我々の目的は, 各 $k = 1, \ldots p$ に対して, 次式で定義される平均二乗誤差 $e(f_k)$ が最小となるような積和形式 f_k を求める問題に帰着される.

$$e(f_k) = \sum_{(a_1, \ldots, a_n) \in D} (f_k(a_1, \ldots, a_n) - F_k(a_1, \ldots, a_n))^2$$

表 1: パターン識別システム

$$
\begin{array}{lllll}
R_1^1: & \text{If } x_1 \text{ is } A_{11}^1 & \text{and} \cdots \text{and} & x_n \text{ is } A_{1n}^1, & \text{then "Class is 1" is } y_1^1 \\
 & \vdots & & & \\
R_{m_1}^1: & \text{If } x_1 \text{ is } A_{m_1 1}^1 & \text{and} \cdots \text{and} & x_n \text{ is } A_{m_1 n}^1, & \text{then "Class is 1" is } y_{m_1}^1 \\
 & \vdots & & & \\
R_1^p: & \text{If } x_1 \text{ is } A_{11}^p & \text{and} \cdots \text{and} & x_n \text{ is } A_{1n}^p, & \text{then "Class is } p\text{" is } y_1^p \\
 & \vdots & & & \\
R_{m_1}^p: & \text{If } x_1 \text{ is } A_{m_p 1}^p & \text{and} \cdots \text{and} & x_n \text{ is } A_{m_p n}^p, & \text{then "Class is } p\text{" is } y_{m_p}^p
\end{array}
$$

但し, $x_1, \ldots, x_n$ は属性を表す入力変数; y_i^k $(i = 1, \ldots, m_k;\ k = 1, \ldots, p)$ は各ファジィIf-Thenルールの出力変数; A_{ij}^k $(i = 1, \ldots, m_k;\ j = 1, \ldots, n;\ k = 1, \ldots, p)$ は, $j \leq \theta$ ならば D_j 上のファジィ集合, $j > \theta$ ならば D_j の部分集合である.

上記の問題は組み合わせ最適化問題であるので, この組み合わせ問題を遺伝的アルゴリズムを用いて解くことにする.

4 遺伝的アルゴリズムとパターン識別システム

4.1 コード化

式(8)を直接 0, 1 の 2 進数列によってコード化する. 以下, コード化の詳細について述べる.

まず, 始めに各リテラル $x_j^{A_{ij}^k}$ のコード化を説明する. x_j が数値属性の場合を考える. 定義域 D_j が s 個のファジィ集合 $A_1, \ldots, A_s$ によってファジィ分割されていたとする. つまり, ファジィ集合 A_{ij}^k は $A_1, \ldots, A_s$ のいずれかである. このとき, 各ファジィ集合に割り当てられた添字 $l = 1, \ldots, s$ の 2 進数を用いて $x_j^{A_{ij}^k}$ の遺伝子コードとする. また, 属性 x_j が式(7)に存在しない場合には, これを Don't Care として取り扱い 2 進数 "0" によってコード化する. 対応するファジィ集合の存在しない 2 進数列に禁止コードとする. 次に, x_j が文字属性の場合について述べる. クリスプ集合 A_{ij}^k にある属性値が存在する場合には, その属性値に対応するビットに 1 を割り当て, 存在しない場合には 0 を割り当てた 2 進数列によって $x_j^{A_{ij}^k}$ をコード化する.

以上により, (7) 式の y_i^k は各 $x_j^{A_{ij}^k}$ に対応する 2 進数列の集合によってコード化される. (8) 式の論理式 f_k で記述されたファジィIf-Thenルールは, 各 y_i^k の 2 進数列の集合によってコード化されることになる.

例 1 3 属性 x_1, x_2, x_3 から成るデータについて考える. ここに, x_1, x_2 は数値属性, x_3 は文字属性と仮定する. 数値属性 x_1 および x_2 は図1に示す 5 つの三角形ファジィ集合 $A_1 \sim A_5$ によりその定義域がファジィ分割されているとする. なお, 各数値属性の属性値は, 予め最大値が 1, 最小値が 0 となるように, 閉区間 $[0, 1]$ の値に正規化されてある. 文字属性 x_3 は属性値 $\{a, b, c\}$ を取ると仮定する. このとき, (7) 式のリテラルは, 表 2 に示される 2 進数列によってコード化される. なお, この例では, "110" および "111" は数値属性に対して禁止コードである.

表 2: 論理式のコード化

数値属性		文字属性	
Fuzzy Set A	x^A	Crisp Set A	x^A
DC	000	$\emptyset$	000
A_1	001	$\{a\}$	001
A_2	010	$\{b\}$	010
A_3	011	$\{c\}$	100
A_4	100	$\{a, b\}$	011
A_5	101	$\{a, c\}$	101
禁止	110	$\{b, c\}$	110
禁止	111	$\{a, b, c\}$	111

このとき,

$$
\begin{aligned}
x_1^{A_1} x_2^{DC} x_3^{\{a\}} &\rightarrow 001 : 000 : 001 \\
x_1^{A_5} x_2^{A_3} x_3^{\{b,c\}} &\rightarrow 101 : 011 : 110
\end{aligned}
$$

なので, 論理式 $f = x_1^{A_1} x_2^{DC} x_3^{\{a\}} \vee x_1^{A_5} x_2^{A_3} x_3^{\{b,c\}}$ は

$$001 : 000 : 001\text{–}101 : 011 : 110$$

と 2 進数列にコード化される.

4.2 交叉および突然変異

交叉は二点交叉を用いた. 数値属性には一般に禁止コードが含まれるので, 論理式を表す 2 進数列の任意のビットで交叉することはできない. つまり, 交叉点がリテラルの境界に現れるように制約を設けている. なお, 本文では交叉確率 p_c を設定し, $p_c = 0.8$ とした.

突然変異は各リテラル毎に施される. つまり, 突然変異確率 $p_m = 0.05$ で各リテラルはランダムに他のリテラルに置き換えられる.

例 2 例 1のデータについて, 積和形式

$$
\begin{aligned}
f_1 &= x_1^{A_1} x_2^{A_5} x^{\{a,b\}} \vee x_1^{DC} x_2^{A_3} x_3^{\{c\}} \\
f_2 &= x_1^{A_2} x_2^{DC} x_3^{\{a\}} \vee x_1^{A_4} x_2^{A_2} x_3^{a,b,c}
\end{aligned}
$$

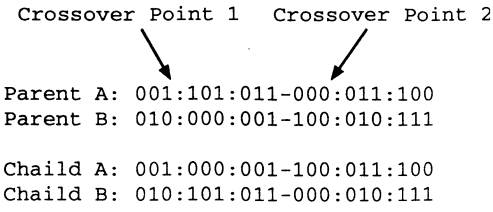


図 2: 交叉の例

表 3: 薬のデータの例

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	薬の種類
0.14	女	高	高	0.74	0.19	Y
1.00	男	高	高	0.54	0.92	B
0.58	女	正常	高	0.73	0.48	Y
0.58	男	高	正常	0.00	1.00	A
0.41	男	高	正常	0.26	0.39	X

は 2 進数列

001 : 101 : 011–000 : 011 : 100

010 : 000 : 001–100 : 010 : 111

にコード化される. このとき, 交叉は図 2に示すようにして実行される.

5 計算機実験とその評価

本節では, 薬のデータを用いて, 本手法の有効性について議論する.

薬のデータは, 患者についてのデータおよび A, B, C, X, Y という 5 種類の薬 (分類クラス) から成るデータである. クラス A に属する患者のデータは 23 個, B は 16 個, C は 16 個, X は 54 個, Y は 91 個で, 合計 200 個の患者のデータが存在している. 患者は同一の病気にかかっており, どの種類の薬に対して好反応を示したかによって各薬のクラスに分類されている. 実際のデータは表 3に示すテキスト形式になっており, 属性は,

x_1: 年齢
x_2: 性別
x_3: 血圧
x_4: 血中のコルステロール
x_5: 血中のナトリウム濃度
x_6: 血中のカリウム濃度

に対応している. 属性 x_1, x_5, x_6 は数値属性で, それ以外は文字属性である. なお, 表 3において, 数値属性については, その最大値が 1, 最小値が 0 となるように予め正規化してある.

200 個全てのデータを学習用データとして, 各薬のクラスに対する (8) 式の積和形式を遺伝的アルゴリズムを用いて導出する.

まず, 各積和形式 f_A, f_B, f_C, f_X, f_Y を導出するための学習用データとなる不完全記述関数 F_A, F_B, F_C, F_X, F_Y を (9) 式により薬のデータから作成する. 各学習用データ $F_A \sim F_Y$ に対して, 1000 世代の遺伝的アルゴリズムを 10 回実行し, 各薬のクラスに対して 10 個の積和形式を導出する. 導出された 10 個の積和形式のうち, 半数の 5 個以上の積和形式に現れる積項を, そのクラスにおいて意味のある積項として抽出する. この結果, 各クラスで得られた積和形式は以下の通りである.

$$f_A = x_3^{\{\text{高}\}} \quad (10)$$

$$f_B = x_1^{MS} x_3^{\{\text{高}\}} x_6^{MS} \quad (11)$$

$$f_C = x_3^{\{\text{低}\}} x_4^{\{\text{高}\}} x_6^{MS} \quad (12)$$

$$f_X = x_3^{\{\text{低, 正常}\}} x_6^{MS} \quad (13)$$

$$f_Y = x_6^{ML} \quad (14)$$

以上より, 次のパターン識別システムが抽出され, 薬のデータに内在する知識が論理的に記述されている.

R_1: If x_3 is { 高 }, then Class is A

R_2: If x_1 is MS and x_3 is { 高 } and x_6 is MS, then Class is B

R_3: If x_3 is { 低 }, x_4 is { 高 }, x_6 is MS, then Class is C

R_4: If x_3 is { 低, 正常 }, x_6 is MS, then Class is X

R_5: If x_6 is ML, then Class is Y

上記のパターン識別システムにより, 200 個の薬のデータを認識させたところ, 143 個のデータが正しく認識された. 認識率は 71.5% である.

6 まとめ

本文では, データの論理的解析という研究分野の一つとして, データをファジィIf-Then ルールによって近似的に表現する手法を遺伝的アルゴリズムを応用した形で提案した. 本手法では, 平均二乗誤差が小さいといった意味においては, 比較的良好な解を求めることが可能である. 今後の課題としては, 既存の他の手法との比較検討, あるいは, 大規模データに対応可能な高速なアルゴリズムの開発など数多くの問題が考えられる.

参考文献

[1] U. M. Fayyad, G. Piatetsky-Shaprio, P. Smyth and R. Uthurusamy, *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, The MIT Press, 1996.

[2] 茨木俊秀, 牧野和久, "データの論理的解析とブール関数," 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 97, No. 416, pp. 39-44, 1997.

[3] R. Gnanadesikan, *Metheods for Statistical Data Analysis of Multivariate Ovservations*, Wiley-Interscience, 1997.

[問い合わせ先]
〒 939-0398 富山県射水郡小杉町黒河 5180
富山県立大学工学部電子情報工学科　高木 昇
Tel: (0766)56-7500 内線 461
Fax: (0766)56-8022
E-mail: takagi@pu-toyama.ac.jp

FB2−1

心理測定法によるエッジ検出手法の比較評価

Comparison and Evaluation of Edge Detection Methods through Psychological Experiments

大崎 美穂　　杉山岳弘　　大野英明

Miho Ohsaki　Takahiro Sugiyama　Hideaki Ohno

静岡大学 情報学部

Faculty of Information, Shizuoka University

Abstract: However previous researches on image recognition proposed image processing methods, there are many cases in which these methods were not evaluated fairly. Therefore, we propose to compare image processing methods at a view point of how they are effective for humans with psychological techniques to establish fair evaluation methodology. As a first step, this research focused on an edge detection, one of important image processing methods, and showed the design of our evaluation procedure. We adjusted the parameters of edge detection methods with our proposed optimizing method and evaluated the processed images with these methods based on how good humans feel them. The ranking of edge detection methods on effectiveness for humans and hints to improve them were obtained.

1　はじめに

画像認識において領域分割、エッジ検出、細線化などの初期処理は重要である。これまでに、各処理で多くの手法が提案されているが、これらには大きな2つの問題があると考えられる。

1つは、多くの研究が手法の適応範囲および限界を明確にしていないことである。すなわち、何を対象とした手法であるのか、どういった応用で有効に働くのかなどの議論があまりなされていない。もう1つは、手法の提案者が自分の手法に合う画像を用い、自分の判断で手法を有効としている点である。他の手法との客観的で公平な比較評価を行わなければ、提案した手法の有効性に疑問が生じてしまう [1]。

特定の応用が定まれば、それに応じた画像処理手法の比較評価はある程度は可能であろう。しかし、上述のように汎用性を求めた手法や適応範囲が明確でない手法が提案されている状況では、何らかの方法で画像処理手法を客観的に評価する必要がある。そこで、本研究では人間にとって本当に良いのかという観点から、心理測定法の技術を用いて画像処理手法を定量的に評価する方法を提案する。人間による客観的な評価方法が確立すれば手法の公平な評価だけでなく、評価過程を通して人間の視覚メカニズムに関する知見や手法改善のヒントも得られるであろう。

本稿では、実際に濃淡画像のエッジ検出手法を対象にして、提案するシステムにより比較評価を行った。

2　画像処理の評価方法の提案

2.1　基本的な考え方

本研究では各画像処理で提案された処理手法をそれぞれ比較評価し、最終的に総合評価を行う (図1参照)。評価基準は「処理結果が人間にとってどの程度良いか」とし、過去にIECのインタフェース改善で行った評価と同様の手順を用いる [2]。

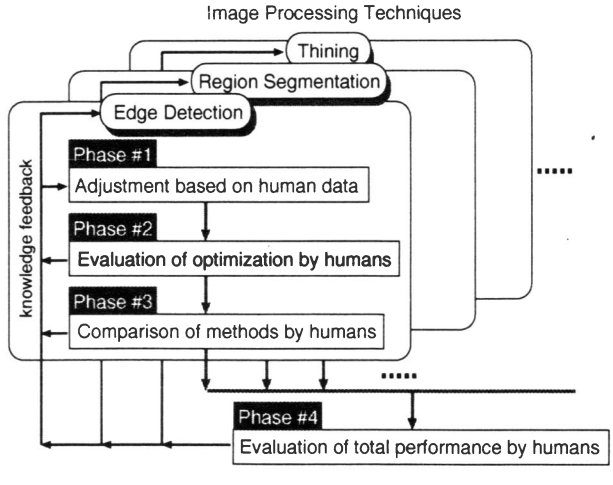


図 1: 画像処理手法の評価手順

各処理手法には適した画像があると考えられるので、入力画像と手法との関係をあまり考慮しない従来の評価とは異なり、どの画像にどの処理手法が有効かを調べる。例えばエッジ検出の場合、Canny, Deriche などの処理手法で chair, room な

どのカテゴリに分けた画像を処理し、これらを比較して手法の特徴と有効性を調べる (Phase#3)。領域分割、細線化なども同様の手順を経る。

ここで、画像処理には処理パラメータの設定が必要である。パラメータ設定が最適でない状態で処理手法の評価が低い場合、手法が有効でないのか、設定のせいで機能していないだけなのかを分離できない。そこで、まず各処理手法のパラメータを調整し、パラメータが最適設定になっているかを確認する。従来のように手動でパラメータ調整を行うと、評価の公平性や再現性に問題があるため、人間のデータを収集し処理手法に依存せず人間のデータに基づいて調整を行う方法を用いる (Phase#1)。そして、パラメータ設定が平等に最適化されていることを確認する (Phase#2)。

以上をまとめると、画像処理ごとに「#1 処理パラメータの設定→ #2 パラメータ最適化の確認 → #3 処理手法の比較評価」となる。最終的には、#1–#3 を経て画像処理ごとに最も良い処理手法を得て、これらを組み合わせた画像認識の性能を評価する (Phase#4)。さらに従来の誤差による評価と異なり、提案する評価方法では人間の視知覚・認知についての知見を得られる。そこで、各 Phase で「どこに注目したか」「どうすれば手法が改善されるか」などを調査し、パラメータ調整法や処理手法の改善に用いる。

今回は提案する評価方法と評価結果を具体的に示すため、画像認識で重要と言われているエッジ検出手法に注目し、エッジ検出手法の評価を行う。

2.2 エッジ検出手法の評価方法

ここでは、エッジ検出手法を対象とした評価の各 Phase について詳しく述べる。

#1 では人間による正解画像を得て、それに基づくエッジ検出手法のパラメータの調整を行う (図 2の上段)。エッジ検出手法 $Method\text{-}E_i$ ごとに、エッジ選択システム操作によって正解画像 $Image\text{-}H_i$ が、正解画像を用いたパラメータ調整法 $Method\text{-}A$ によってエッジ検出手法のパラメータが、調整済みのエッジ検出手法から処理画像 $Image\text{-}A_i$ が、それぞれ得られる。ただし、入力画像の種類によってエッジ検出手法の性能が異なる可能性を考慮し、いくつかの画像カテゴリをあらかじめ決め、カテゴリごとに複数の入力画像を用いる。

#2 では、#1 で得られた人間による正解画像 $Image\text{-}H_i$ と調整済みのエッジ検出手法による最適化画像 $Image\text{-}A_i$ を比較し、エッジ検出手法の

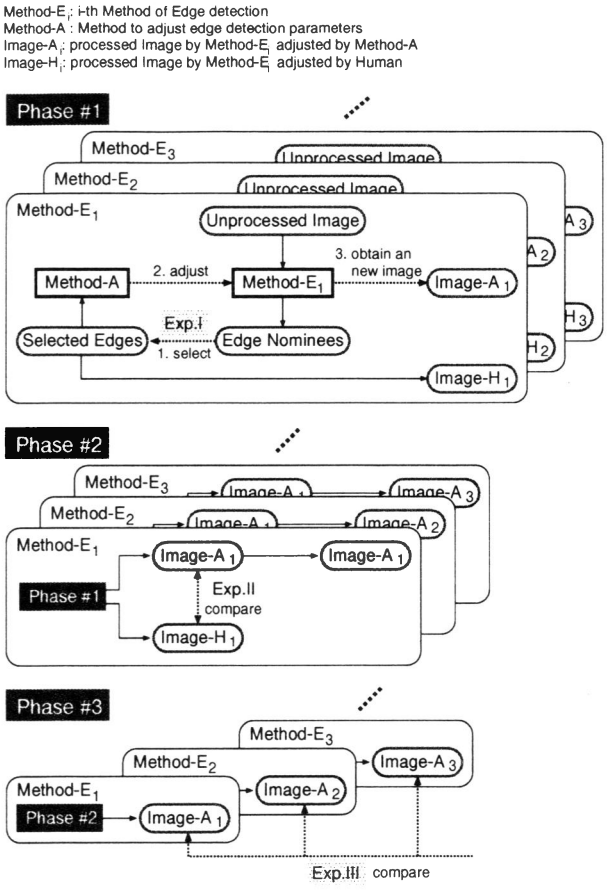


図 2: エッジ検出手法の評価の手順

パラメータ設定が最適かを調べる (図 2の中段)。事前の予備実験から、比較対象なしで、もしくは数値化してエッジ画像を評価することは困難であると分かったため、二点比較法による評価とした。被験者はランダムに提示された正解画像、原画像、最適化画像のセットを見て、正解画像と最適化画像のどちらがより正しいエッジを検出しているか、もしくは同程度かを答える。得られた選択回数は符号検定によって有意差検定される。最適化画像が正解画像と同程度ならば、調整手法によってパラメータが最適化されたと確認できる。

#3 では、#2 で設定が最適であると確認された最適化画像 $Image\text{-}A_i$ をエッジ検出手法間で比較し、どの入力画像に対してどの手法が有効かを調べる (図 2の下段)。#2 と同様に、被験者は i 番目の処理画像 $Image\text{-}A_i$、原画像、j 番目の処理画像 $Image\text{-}A_j$ のセットを見て、$Image\text{-}A_i$ と $Image\text{-}A_j$ ではどちらがより正しいエッジを検出しているか、もしくは同程度かを答える。そして入力画像のカテゴリごとに符号検定して、各手法の有効性

がどの程度かが得られる。

2.3 エッジ選択システムの提案

我々は #1 における人間のエッジデータを収集するシステムとして、エッジ候補を算出し人間がエッジを選択するシステムを開発した (図3参照)。このシステムでは原画像とエッジ検出手法で得られたエッジ候補画像が提示され、操作者はこれらを比較しながら「正しいエッジとして検出すべき」「検出してもしなくても良い」の2種類をマウスで選択する。

人間の操作には「正しいエッジ」の定義と理解が必要なため、操作者には画像の情報を与えるのに必要十分なエッジを選択するよう指示し、事前に様々なエッジ画像を見せて正しいエッジに対する基準を持ってもらう。

複数の人間が繰り返しこのシステムを操作して得られた選択率 (検出すべき: 1.0、してもしなくても良い: 0.5、すべきでない: 0.0) を平均することで、人間による正解画像がエッジ検出手法ごとに得られる。

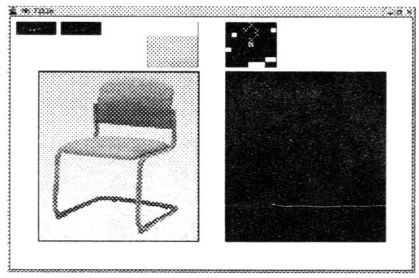


図 3: エッジ選択システムのインタフェース画面

2.4 パラメータ調整手法の提案

次に、エッジ選択システムで得られたデータに基づきエッジ検出手法のパラメータを調整する手法を提案する。この手法では、エッジ点の判定方法としてヒステリシス法 [3] を用い、2つのパラメータ $T_1, T_2 (T_1 > T_2)$ について検出の誤り率が小さくなるように調整する。検出の誤り率は「検出すべき」エッジを検出しなかった誤り率と「検出すべきでない」エッジを検出してしまった誤り率との平均により定義する。

パラメータの調整は基本的に全範囲探索であるが、coarse-to-fine に行う。図4に示すように、パラメータの有効範囲について、最初は大まかに誤り率の低い範囲を絞り込んでいき徐々に範囲を狭め、最終的に探索した範囲内で誤り率が最も小さくなるように T_1, T_2 を調整する。

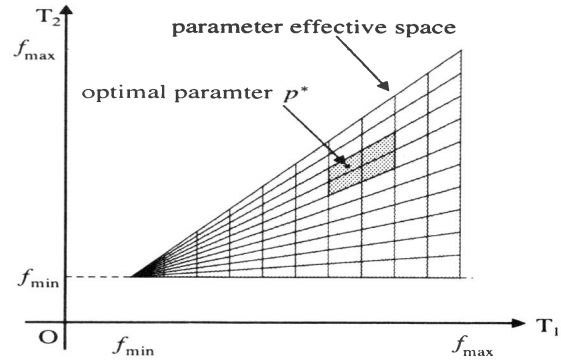


図 4: エッジ検出手法のパラメータ最適化

3 実験

3.1 実験条件

エッジ検出手法の比較評価として、Phase#1–#3 に対応する実験 I–III を行う。全実験では5つのエッジ検出手法 (Canny, Deriche, Fukui, Marr-Hildreth, Sugiyama-Abe)[3]、5つの画像カテゴリ (chair, shelf, sofa, table, room)、良いエッジ画像の基準 (正しいエッジが検出され、間違ったエッジが検出されていない) を用いる。

実験 I: エッジデータの収集

エッジ選択システムで被験者が正しいエッジを選択し、得られたデータに基づきエッジ検出手法ごとに各カテゴリの正解画像とパラメータ設定を求める。用いた画像は、比較的複雑と考えられる room10 枚、その他のカテゴリ 5 枚の計 60 枚、提示はランダム、1 画像あたり繰り返し 2 回、被験者は 10 名、1 名あたりの操作は 100 回である。

実験 II: パラメータ最適化の確認

実験 II では、実験 I で得た正解画像とパラメータ設定したエッジ検出手法による最適化画像を比較し、うまく設定できたかを調べる。用いた心理測定法は二点比較法、被験者は対提示された正解画像と最適化画像を比較し良い方を選択する、同程度なら選択しないという作業を繰り返す。得られた選択回数を符号検定することで、エッジ検出性能に有意な差があるかを調べる。用いた画像は room5 枚、その他のカテゴリ 2 枚の計 13 枚、エッ

ジ検出手法5種類、各エッジ検出手法で処理した画像ごとに正解画像と最適化画像の対比較を行う。提示はランダム、1画像対の繰り返し10回、被験者5名、1名あたりの評価 $13 \times 5 \times 10 \div 5 = 130$ 回である。

実験 III: エッジ検出手法の比較評価

実験IIIでは、実験IIで設定を確認した最適化画像をエッジ検出手法ごとに比較し、各エッジ検出手法の有効性を調べる。実験手順は実験IIと同様である。用いた画像はroom10枚、その他のカテゴリ5枚の計30枚、エッジ検出手法10対、ある手法で処理した画像と他手法で処理した画像の比較を行う。提示はランダム、1画像対の繰り返し20回、被験者5名、1名あたりの評価 $30 \times 10 \times 20 \div 5 = 1200$回 である。

3.2 結果と検討

実験Iでは人間によるエッジデータから正解画像と最適化画像が得られたがここでは省略し、実験II、IIIの結果のみ表1の上下段に示す。ただし、エッジ検出手法は頭文字で表している (C: Canny, D: Deriche, F: Fukui, M: Marr-Hildreth, S: Sugiyama-Abe)。

表 1: 上より、実験II、IIIの結果

	C	D	F	M	S
正解画像が良い	1	1	2	3	3
同じ	4	4	3	2	2

カテゴリ	順位
chair	F < M < D, S < C
sofa	F < M < D < S, C
shelf, table, room	F < M < D, S, C

表1の上段は、各エッジ検出手法で正解画像と最適化画像を比較したデータを検定し、どちらが良いかをカテゴリ数でカウントしたものである。最適化画像が正解画像より良いことはあり得ないので、これらが同程度に良いと判断された回数が多ければパラメータ調整が最適であると言える。表1の上段より、Canny, Deriche, Fukuiではパラメータ設定がほぼ最適化されており、Fukui, Marr-Hildreth, Sugiyama-Abeでは最適化されていない場合がある。ただし、エッジ検出手法自体の性能限界のためどんなに最適化しても正解画像に近付かない可能性もあり、今後、最適化画像を専門家が手動でパラメータ設定した画像と比較し、この点を検討したい。表には示していないが各カテゴリでは異なる傾向が見られ、パラメータ設定は画像の種類に依存すると考えられる。入力画像を自動で分類し、それに応じてパラメータを調整する方法が必要であろう。

表1の下段は、各カテゴリでエッジ検出手法を比較したデータを有意差検定し、有効性の順位にまとめたものである。エッジ検出手法の有効性はカテゴリに依存せず、全体としてCanny, Sugiyama-Abe, Derichеが性能が高く、Marr-Hildreth、Fukuiが低いという傾向が得られた。

4 まとめ

画像認識分野では画像処理ごとに様々な処理手法が提案されているが、実画像を用いて客観的な比較評価を行っているものは少ない。そこで我々は、人間に近い処理結果であるかを基準とした処理手法の定量的な評価を提案し、エッジ検出手法で実際に評価実験を行った。人間によるデータに基づくエッジ検出手法のパラメータ設定、心理測定法による設定の最適化確認とエッジ検出手法の比較評価、の3つの実験を行った結果、エッジ検出手法の有効性を順位付けることができた。

今後は、パラメータ調整法とエッジ検出手法の性能の分離、パラメータ設定と画像カテゴリの関係の検討を行うとともに、他の画像処理にも同様の方法論を展開したい。

参考文献

[1] 阿部圭一, "画像処理アルゴリズムの性能評価に関する一考察", 信学技報, PRU94-15, pp.71-77, 1994

[2] 高木英行, 大崎 美穂, "インタラクティブEC操作者の疲労低減手法," ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, pp.47-52, 福岡 (1998年3月).

[3] 杉山岳弘, 阿部圭一, "エッジベクトル抽出器と複数エッジの解析", 電子情報通信学会論文誌, D-II, vol.J80-D-II, No.6, pp.1379-1389, 1997

【連絡先】
〒 432-8011 静岡県浜松市城北 3-5-1
静岡大学 情報学部 情報科学科
大崎美穂
Tel.: 053-478-1488, Fax: 053-478-1499
E-mail : miho@cs.inf.shizuoka.ac.jp

FB2−2

ファジィ推論を用いた腰部ＭＲ画像からの硬膜嚢の抽出

Extraction of the cauda equina from MR lumbar image with Fuzzy Inference

○寺尾　道治† 畑　豊† 田中　正道‡
○Michiharu TERAO† Yutaka HATA† Masamichi TANAKA‡

†姫路工業大学工学部情報工学科
‡姫路赤十字病院整形外科・リハビリテーション科
†Department of Computer Engineering, Himeji Institute of Technology
‡Department of Orthopedic Surgery and Rehabilitation, Himeji Red Cross Hospital

Abstract: This paper proposes a fuzzy rule-based approach for extracting the cauda equina (C.E.) from MR lumbar image. After we apply three-dimensional Gaussian Filter to original image for emphasizing the C.E., watershed-segmentation divides the image into some pieces that consisting of the C.E. or other tissues. Our fuzzy rule-based method infers whether the piece contains the C.E. or not from anatomical information: the C.E. has high intensity, the C.E. exists symmetry and the C.E. connects with adjacent piece on neighbor slices. Our experimental result on two subjects shows that our method can successfully extract the C.E..

１．はじめに

硬膜嚢は，脳から脊椎に沿って伸びている脊椎神経を覆い保護する役割を持つ．脊椎が変形して脊椎の支持機能に異常をもたらす側弯症や加齢的変形が主因となる変形性脊椎症のような症例では，脊椎の湾曲を矯正したり，支持機能を回復するための器具を打ち込む．その際，脊椎神経を誤って傷つけると重篤な障害を引き起こすため，硬膜嚢の位置と形状を正確に認識できるシステムの開発が望まれている．

そこで本文では，ファジィ推論を用いた硬膜嚢の抽出法を提案する．画像を小さな部品(piece)に分割し，硬膜管から伸びる神経根が左右対称に存在するという知識をもとに，それぞれの piece を分離，抽出する．

２．準備

本実験では GE Medical Systems 社の MR 装置 Genesis Signa 1.5T を用いて撮影された水平断層像を使用する．データ構成は，画素数 512×512×70，濃度階調 1024，スライス厚 2.0mm，FOV は 260mm×260mm である．原画像の一例，本研究で用いるデータの撮影座標系，硬膜嚢周辺の構造をそれぞれ図 1-3 に示す．

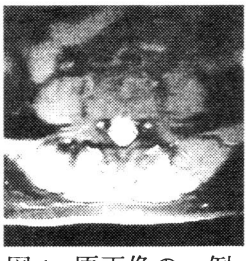


図 1: 原画像の一例

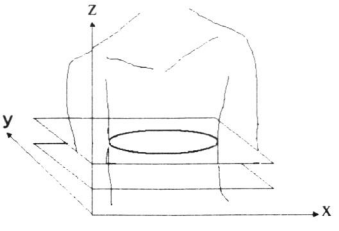


図 2: データの座標系

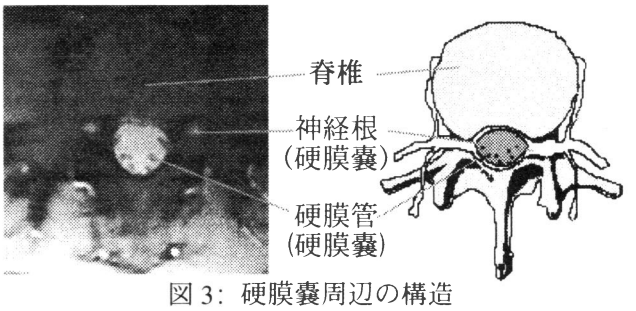


図 3: 硬膜嚢周辺の構造

３．ファジィ推論を用いた抽出法

3.1 概略

ここでは硬膜嚢のうち，太さが微細で抽出が困難と考えられる神経根の抽出法について解説する．神経根の内部は脳脊髄液に満たされており，神経根の中心部に近いほど，高い濃度値を示す．本方法では、この濃度分布が正規分布にしたがうものと仮定し，3 次元のガウスフィルタと全画素との一致度を求めることで，正規分布を持った神経根の強調を行う．次に，以下の 2 ステップによって，神経根とその他の領域との境界を決定する．

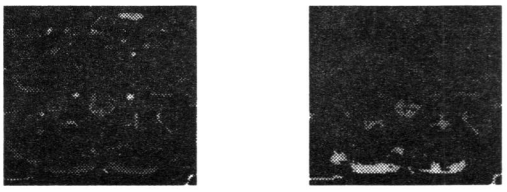
Step1: piece への分割
　正規分布をもった領域を一つの piece として，スライス毎に神経根を含む piece を生成する．

Step2: 神経根と判断できる piece の抽出
　ファジィ推論を用いて，先の処理で得られた piece のうち神経根と判断されたものを抽出する．

3.2 piece への分割

watershed-segmentation[1]を用いて，各 piece に分割する．Watershed-segmentation では，濃度値などの任意の特徴値の高い部分から，低い部分へと領域拡張

を行い，特徴値の谷にあたる部分を境界とすることで，領域を分割する手法である．先のフィルタ処理により正規分布を持つ領域を強調した画像に対して適用することで，神経根の断面がひとかたまりの piece をなすように分割できる．神経根が強調された画像が分割される様子を図 4 に示す．



(a) 神経根強調画像　　(b)分割された領域

図 4: watershed-segmentation による領域分割

3.3 神経根と判断できる piece の抽出

神経根を含む piece の濃度平均値は高く，神経根は硬膜管を中心に左右一対ずつ存在しているので，同一スライス上では比較的高い濃度値を持った piece が左右対称に一組存在している．そこで，ある piece に注目したとき，同一スライス上に存在する他のひとつと次のような推論を行う．

(Rule 1)　If　濃度平均値が高い
　　Then 神経根への所属度が大きい

(Rule 2)　If　2つの piece 間の濃度平均値の差と分散の差がともに小さく，かつ 2 つの piece 間の重心を結ぶ線分の中点が画面中央に近い
　　Then 神経根への所属度が大きい

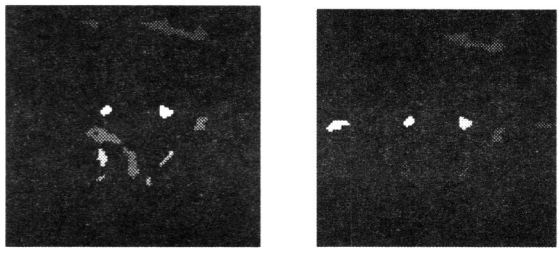
これらの推論値の代数積を注目している piece の推論値とする．スライス上の残りの piece と総当たりにこの推論を行い，最大値をその piece の二つのルールから得られる最終的な推論値とし，これを i_1 とする．次に，神経根は体軸方向に伸びた管であるため z 軸方向への連結数が多い．そこで，スライスの前後で，piece 同士に交わりがある場合，これを連結しているとみなし，連結数が多いほど，神経根である度合いが大きいとみなす．これをファジィルールで表現すると，

(Rule 3)　If　連結数が多い
　　Then 神経根への所属度が大きい

このルールから選られる推論値を i_2 とする．(Rule 1)と(Rule 2)から求めた推論値 i_1 と(Rule 3)からもとめた推論値 i_2 の代数積を求めることで各 piece の神経根に属する最終的な所属値を決定する．

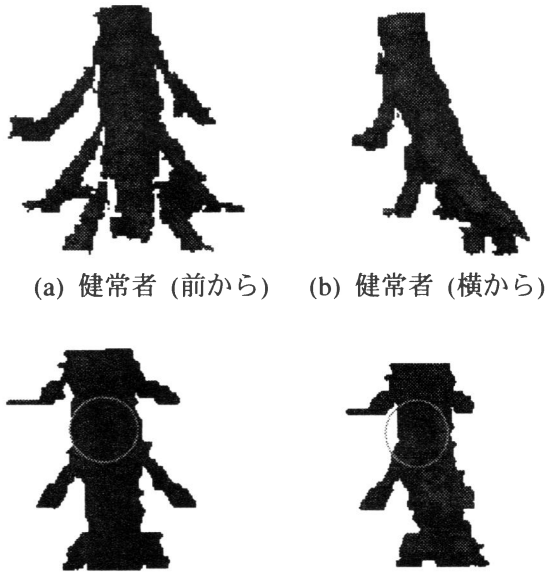
4．実験結果

本方法を腰部 MR 画像に適用し，硬膜嚢の抽出実験を行った．各知識により得られた神経根推論値，硬膜嚢の抽出結果を図 5 (a),(b)，及び図 6 (a)-(d)に示す．疾患者は椎間板ヘルニアのため，硬膜管が変形している様子が分かる．本実験ではフィルタの一辺の幅を 29pixel,分散を 12 とした．処理時間は Silicon Graphics 社の O_2 (R10000, 255MHz)で約 10 分であった．



(a) 対称性の評価　　(b) 連結性の評価

図 5: 各推論値



(a) 健常者 (前から)　(b) 健常者 (横から)

(c) 疾患者 (前から)　(d) 疾患者 (横から)

図 6: 本方法による抽出結果

5．むすび

本文では，ファジィ推論を用いた硬膜嚢の抽出法を提案した．これにより，従来医師が経験により推察していた硬膜嚢の形状を容易に把握することが可能となった．今後の課題は，CT 画像から抽出した脊椎との合成方法の開発である．

参考文献

[1] J.C.Russ, The Image Processing Handbook. 2nd edition, CRC Press, Inc., 1994.

[2] W. Park, E. A. Hoffman, M. Sonka, "Segmentation of Intrathoracic Airway Trees: A Fuzzy Logic Approach," IEEE Trans. Medical Imaging, vol. 17, no. 4, pp. 489-497, Aug. 1998.

[問い合わせ先]
〒671-2201 兵庫県姫路市書写2167
姫路工業大学工学部情報工学科 寺尾 道治
TEL:0792-67-4986　FAX:0792-67-4986
E-mail: terao@comp.eng.himeji-tech.ac.jp

FB2−3

画像処理によるスプレーカン検出法のリサイクルシステムへの応用

Application of Detecting Method on Spray-can by Using Image Processing to Recycling System

平松 久佳* 玉野 和保* 林 一久** 藤吉 誠**

Hisayoshi Hiramatsu* Kazuho Tamano* Kazuhisa Hayashi** Makoto Fujiyoshi**

*広島工業大学 工学部 **日立造船（株）

*Hiroshima Inst. of Tech. **Hitachi Zosen Corp.

Abstract: The image processing is the most suitable for classification of cans or bottles in the recycling system because of safety and flexibility. A proposed algorithm of image processing for the classification is formed on the basis of comparison between images of the object and the reference that displays standardized spray-can. In this system, the Hough-transformation and Fast Fourier Transformation are applied for images divided into small circles. This paper shows improved algorithm that detects only spray-can from the image displaying cans and bottles by recognition of the spray-can based on detection rules, and makes clear that this system can pick up only spray-can faithfully from the image displaying the refuse matters.

1 はじめに

資源ごみのリサイクルシステムにおける資源ゴミの選別作業の自動化法として、画像処理法は柔軟性および作業の安全性から最適である。 本報告で提案する画像処理法は、あらかじめスプレーカンの形状を参照データとしてデータベースに登録し、複数の物体を含む入力画像の中からその物体のみを抽出する方法で構築している。 物体は、小領域に分割した撮影画像にハフ変換とフーリエ変換を施し、これと同じ変換操作を施した参照画像のスペクトルとの相関を求めることで、抽出する [1,2]。

抽出した画像から、目的とするスプレーカンであることの認識は、参照データで与えたスプレーカンの形状構成より作成した形状認識ルールに基づき、特定する。 この認識法により、ハフ変換とフーリエ変換により抽出された、統計的に類似な様々な形状の物体の検出から、目的とするスプレーカンのみを認識し、取り出すことができる。 また、本認識法は、物体を背景と完全に分離しないで、複数の物体を同時に検出できる利点がある。 本報告では、この認識法に基づく物体の高効率検出法の基本アルゴリズムを紹介するとともに、それを用いた検出結果について報告する。

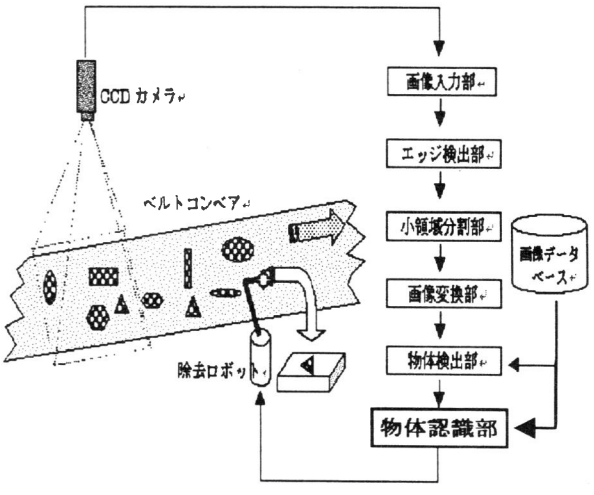


図 1 特定物体除去までのモデル

2 物体の検出

物体の検出は回転量算出と平行移動量算出の 2 段階の処理で構成している。 参照画像として理想的に輪郭の得られる 2 値画像をデータベースに登録し、入力画像とともにエッジ検出、エッジの方向検出、小領域に分割、ハフ変換、FFT、相互相関、小領域の融合、ピークの検出の各処理を順次処理し、対象物体画像の回転角候補を算出する。 この手法には、図 2 に示すような正六角形配置に画像を分割し、1 領域中に含まれる雑音の量を軽減することで効率的

な回転各候補算出を実現する方法を採用している[1]。 平行移動量はエッジと輝度画像を重み付きで足し合わせたデータによるテンプレートマッチングを行うことで実現する。

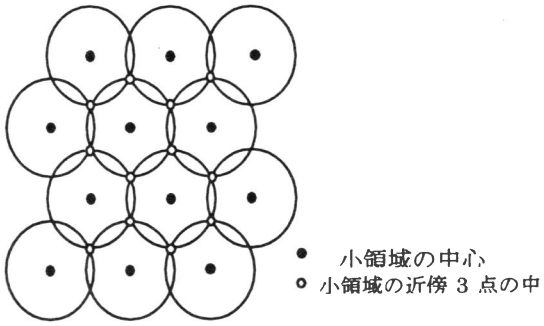


図２　小領域分割と３点の中心

3　スプレーカンの形状ルール

検出した図形とスプレーカン画像との一致は、図３に示すスプレーカンの形状に基づく形状ルールを、参照データに類似した物体を含む検出結果に適用することで判定する。 ここで“スプレーカン”という概念には多種多様な形状が含まれるため,スプレーカン形状の具体例として図３の spray1 および spray2 で表した一般的なノズル付きのスプレーカンと、キャップを閉めた状態のスプレーカンのルールを用意した。構成したスプレーカンの各モジュールは下位のモジュールからの情報をセンシングし,目標であるスプレーカンという抽象概念にたどり着くまで上位概念に向けて存在するか否かの判別を繰り返す。本研究では物体検出のためにエッジの方向をすでに算出しているために、このデータを用いてルールを開始するようにルールを設計した。

4　認識実験

本認識・検出法を基に、資源ゴミからスプレーカンのみを認識・検出する実験を行った。 図４(b)にその結果の一例を示す。 実験結果により、本手法が図４(a)の形状を持つスプレーカンに類似した物体が含まれているにもかかわらず、スプレーカンだけを認識し良好に検出できることが検証できた。

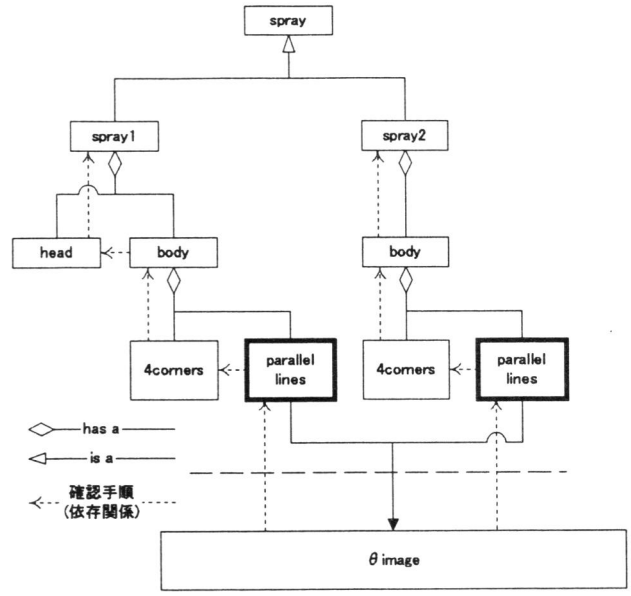
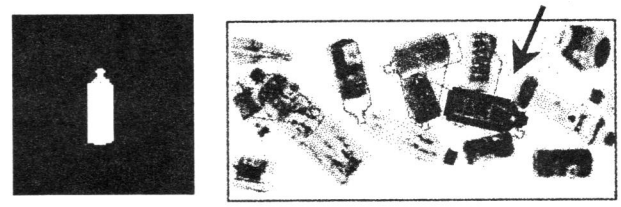


図３　スプレーカンの形状判別ルール



(a)　(b) 検出結果(細) 認識結果(太)

図４ (a) 参照画像、(b) 検出結果と認識結果

5　おわりに

本報告で提案した物体認識・検出手法により、複数の物体が混入した画像から、類似形状物を区別し、スプレーカンのみを認識し検出できることが実験により検証できた。

6　参考文献

[1] 平松 久佳、玉野 和保、林 一久、藤吉 誠：リサイクルシステムにおけるスプレーカンの画像処理による検出法 ,電気・報関連学会中国支部第 50 回連合大会論文集,p.452-453(1999)

[2] 大西 弘之,鈴木 寿,有本 卓: ハフおよびフーリエ変換を用いた回転と平行移動の検出, 電子情報通信学会論文誌, Volj80-D-II, No.7, pp.1668--1675 (1997)

[3] 斎藤 守,山田 信司,藤川 輝昭,遠藤 肇：資源ごみ処理施設における不適物検出システムの開発, 科学と工業, 72(9), pp.395--402 (1998)

[4] 吉田 泰彦,酒井 秀男,小川 謙二,山田 紘一,石井 淳二：破砕処理施設における不適物検出システム, 日立造船技法, 第 57 巻, 第 3 号, pp.178--182 (1996)

FB3−1

一般化tノルムに基づいたファジィ関係不等式の解法とその静止画像情報圧縮への応用

Solution of Fuzzy Relational Inequality based on Generalized T-norm Operation and its Application to Image Compression/Reconstruction

延原 肇　　高間康史　　廣田薫
Hajime NOBUHARA, Yasufumi TAKAMA, and Kaoru HIROTA

東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻
Department of Computational Intelligence and Systems Science
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Abstract : Two methods of image reconstruction based on the solution of the fuzzy relational inequality with a generalized t-norm are proposed. One method focuses on the image sharpness, while the other attempts to improve the smoothness of the reconstructed image. Compared with the previous method based on the greatest solution of the fuzzy relational equation, the image quality is improved by the flexible adjustment of the t-norm parameter. In the image compression and reconstruction experiment, the root means square error of the two proposed methods is decreased to 45.1% and 60.0% compared with the previous one.

1 はじめに

ファジィ関係式の理論を基盤とした画像圧縮・再構成法 (ICF)[3] が提案されて以降, その性能向上に関する研究が行われている [5].

本研究でも, ICF における再構成画像の品質向上を目的として, ICF の再構成条件の緩和を行い, その枠組の中で新たにファジィ関係不等式に基づいた2つの画像再構成法を提案する. これらの解法は, 一般化tノルムの特性に基づき導出し, 一方の解法は, 再構成画像の鮮鋭度を重視しており, もう一方の解法は再構成画像の滑らかさを重視している. さらに, ファジィ関係のエネルギー [1] およびファジィエントロピー [1] の観点より, これらの画像再構成法を解析し, 再構成画像の画像品質が向上することを理論的に考察する.

画像圧縮・再構成実験において,2つの提案法, 従来の ICF および DCT(Discrete Cosine Transform) [7] の比較を, 圧縮時間・再構成時間および再構成画像の品質という観点より行う.

2 ファジィ関係不等式の解法に基づいた画像再構成

ファジィ関係式に基づいた画像圧縮法 (ICF)[3], およびその高速画像再構成法 [5] では, 画像の各画素値を $[0,1]$ に正規量子化することにより, 画像全体をファジィ関係 $R \in F(\mathbf{X} \times \mathbf{Y})$ ($\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \ldots, x_M\}$, $\mathbf{Y} = \{y_1, y_2, \ldots, y_N\}$) として取り扱う.

このファジィ関係 R とファジィ集合族 $\mathbf{A} = \{A_i \in F(\mathbf{X}) \mid i \in \mathbf{I} = \{1, 2, \ldots, I\}\}$, $\mathbf{B} = \{B_j \in F(\mathbf{Y}) \mid j \in \mathbf{J} = \{1, 2, \ldots, J\}\}$ の各ファジィ集合 A_i,B_j を,

$$G(i,j) = \max_{y \in \mathbf{Y}} \left\{ \left\{ \max_{x \in \mathbf{X}} (R(x,y) \textcircled{t} A_i(x)) \right\} \textcircled{t} B_j(y) \right\}, \quad (\in [0,1]) \tag{1}$$

と合成することにより, 画像サイズ $M \times N$ から $I \times J$ への画像圧縮を実現する. ここで $\textcircled{t}$ は, 連続なtノルムとする.

画像再構成は, ファジィ関係式 (1) を満足するファジィ関係 $R \in F(\mathbf{X} \times \mathbf{Y})$ を探索する問題に対応する. [3][5] では, 再構成画像として解析的に求めることのできる最大解を採用している. 図1のグラフに点線で示すように, 最大解は多数のピークを持つ急峻な特性を持ち, これが再構成画像上に白い格子縞となり発生するため, 画像品質が劣化する. 本研究では, 図1のグラフに破線で示すような, 原画像に近い特性を持つ解を与える方法, すなわち画像品質向上のための再構成法を示す.

ファジィ関係式 (1) を満足する解集合 $\mathbf{R} \subset F(\mathbf{X} \times \mathbf{Y})$ の中から, 解析的にかつ最大解よりも原画像に近い特性を持つ解を見つけることは困難であるため, 再構成条件を緩和する. 最大解 $\hat{R}$ は, $\mathbf{R}$ の要素のうちファジィ関係のエネルギーが最大になるように構成される

[1]. 本論文における, ファジィ関係のエネルギーは,

$$E(R) = \frac{1}{MN}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} R(x_m, y_n), \qquad (2)$$

で計算するものとする.

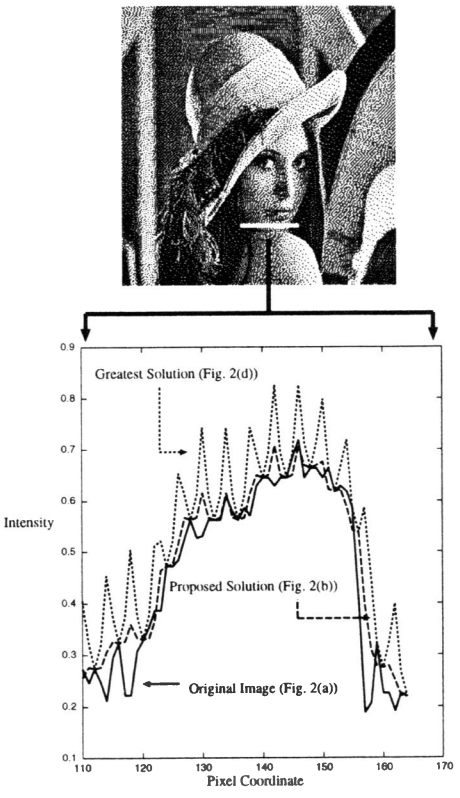


図1 ： 原画像と各手法による再構成画像の比較

最も理想的な再構成画像, すなわち原画像 R_o は $\mathbf{R}$ の中に存在する. よって最大解のファジィ関係のエネルギー $E(\hat{R})$ との間に

$$E(R_o) \leq E(\hat{R}), \qquad (3)$$

なる関係が成立する. 再構成画像の品質を向上させるためには, $E(R_o)$ に近い特性を持つ解が得られるように再構成条件を緩和すれば良い. よって, ファジィ関係式 (1) を,

$$G(i,j) \geq \max_{y\in\mathbf{Y}}\left\{\left\{\max_{x\in\mathbf{X}}(R(x,y) \textcircled{t} A_i(x))\right\} \textcircled{t} B_j(y)\right\}, \qquad (4)$$

なるファジィ関係不等式 [2] とし, 画像再構成を式 (4) を満足するような解を探索する問題に再定式化する. ファジィ関係式 (1) の解空間に比べ, ファジィ関係不等式 (4) の解空間はファジィ関係のエネルギーが低くなる方向に広がるため, 画像品質の高い再構成画像が見つけやすくなる.

[2][6] で示されるファジィ関係不等式の解法は, 解 (ファジィ関係) の各関係値が区間として求められるため, 画像再構成の手法として用いることはできない. 本研究では, ファジィ関係不等式 (4) を満足する解の各関係値が一意に定まり, かつ $E(R_o)$ に近い特性を持つ解を構成する方法を提案する.

2.1 t ノルムの順序変更によるファジィ関係不等式の解法 (提案法 1)

ファジィ関係不等式 (4) における t ノルムを $\textcircled{t}_1$ とする. $\textcircled{t}_1$ よりも順序の大きい, すなわち

$$\forall a, b \in [0,1] \quad a \textcircled{t}_1 b \leq a \textcircled{t}_2 b, \qquad (5)$$

なる t ノルム $\textcircled{t}_2$ を選択し,

$$R^*(x,y) = \min_{(i,j)\in\mathbf{I}\times\mathbf{J}}\left\{\left(A_i(x) \textcircled{t} B_j(y)\right) \varphi_{t2}\ G(i,j)\right\}, \quad (a\ \varphi_{t2}\ b = \sup\{c\in[0,1] | a \textcircled{t}_2 c \leq b\}), \qquad (6)$$

により再構成した解 R^* は, ファジィ関係不等式 (4) の解となる.

式 (6) で示される t ノルムの順序変更による解法の基盤となる性質は, [4] においてすでに述べられているが, 式 (6) の形式では膨大な計算量を必要とする.

本研究では, [5] に基づき (6) の高速計算法を導出する.

[提案法 1 の高速計算法]

式 (6) は,

$$R^*(x,y) = \min_{j\in\mathbf{J}}\left\{B_j(y)\ \varphi_{t2}\left\{\min_{i\in\mathbf{I}}\{A_i(x)\ \varphi_{t2}\ G(i,j)\}\right\}\right\}, \qquad (7)$$

と等価である.

提案法 1 は [5] の高速解法を基盤としているため, [6] の解法のような複雑なアルゴリズムを必要としない.

2.2 一般化 t ノルム結合によるファジィ関係不等式の解法 (提案法 2)

ファジィ関係式 (1) の最大解は,

$$\hat{R}(x,y) = \min_{j\in\mathbf{J}}\left\{B_j(y)\ \varphi_t\left\{\min_{i\in\mathbf{I}}\{A_i(x)\ \varphi_t\ G(i,j)\}\right\}\right\}, \qquad (8)$$

により与えられる [5]. これは $I \times J$ 本の関係式に対する解を min 演算により結合したものである. 本研究では, min 結合を一般化 t ノルムによる結合に拡張す

ることにより, 原画像に近い特性を持つ解を構成する方法を示す. すなわち,

$$R^{**}(x,y) = \underset{j\in \mathbf{J}}{\mathbf{T}} \left\{ B_j(y) \ \varphi_t \left\{ \underset{i\in \mathbf{I}}{\mathbf{T}} \{A_i(x) \ \varphi_t \ G(i,j)\} \right\} \right\}, \tag{9}$$

により画像の再構成を行う. この式で得られる解 R^{**} は, ファジィ関係不等式 (4) の解となり,t ノルムの適切な選択により画像の品質向上が実現できる.

式 (7) および式 (9) で示される解法は, いずれも [2][6] で示される解法とは異なり, ファジィ関係の各関係値が一意に定まる. よって, 画像再構成の手法として用いることができる.

3 ファジィエントロピーによる提案法の解析

提案法 1 および提案法 2 における画像品質の向上を, ファジィエントロピー [1] の観点より解析する.

ファジィ関係のファジィエントロピーは,

$$\begin{aligned} H(R) &= \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} g(R(x_m, y_n)), \\ g(R(x_m, y_n)) &= \min(R(x_m, y_n), 1 - R(x_m, y_n)), \end{aligned} \tag{10}$$

で計算する [1].

式 (1) を満足する解集合 $\mathbf{R}$ の中で, 最大解 (式 (8)) が最小のファジィエントロピーになる, すなわち

$$\forall R \in \mathbf{R}, \quad H(\hat{R}) \leq H(R), \tag{11}$$

が成立することは [1] において示されている. よって, 原画像 $R_o \in \mathbf{R}$ のファジィエントロピーとの間には,

$$H(R_o) \geq H(\hat{R}), \tag{12}$$

なる関係が成立する. 再構成画像の品質を向上させることは, 最も理想的な再構成画像である R_o に特性を近付けることであり, 最大解 $\hat{R}$ の持つファジィエントロピー $H(\hat{R})$ を高める方向に解を修正することに対応する. 提案解 1(R^*) および提案解 2(R^{**}) において, その再構成画像が向上する場合, そのｔノルムのパラメータの変動範囲では, 最大解 $\hat{R}$ の間に

$$H(R^*) \geq H(\hat{R}), \quad H(R^{**}) \geq H(\hat{R}), \tag{13}$$

なる関係が成立することが実験的に確認されている. 以上のように, 提案法 1 および提案法 2 の画像品質の向上の妥当性をファジィエントロピーの観点からも説明できる.

4 提案解 (ICF), 最大解 (ICF) およびDCTの比較

提案解 (ICF) と最大解 (ICF) およびDCT(離散コサイン変換) に関して, 圧縮時間, 再構成時間, 再構成画像の品質の観点から比較実験を行う. 再構成画像の品質を示す指標として, 平均 2 乗誤差 (RMSE) を使用する. 実験では, 図 2(a) に示す画素数 $M \times N = 256 \times 256$ の静止白黒画像を, 圧縮率 0.0625 で圧縮し, 再構成を行う. 式 (1) で使用するファジィ集合族 $\mathbf{A}$ および $\mathbf{B}$ を,

$$\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \ldots, A_I\}, \tag{14}$$

$$A_i(x_m) = \exp\left(-Sh \left(\frac{iM}{I} - m \right)^2 \right), \tag{15}$$

$$(m = 1, 2, \ldots, M),$$

$$\mathbf{B} = \{B_1, B_2, \ldots, B_J\}, \tag{16}$$

$$B_j(y_n) = \exp\left(-Sh \left(\frac{jN}{J} - n \right)^2 \right), \tag{17}$$

$$(n = 1, 2, \ldots, N),$$

と定義する. ICF で用いる連続なｔノルムとして, Yager のｔノルム [5]

$$a \textcircled{t}_y^{(p)} b = 1 - \min\left\{ 1, \{(1-a)^p + (1-b)^p\}^{1/p} \right\} \tag{18}$$

を採用する.

提案法 1 では, 圧縮過程 (式 (1)) において $p = 1.0$, 提案解の再構成過程 (式 (7)) においては $p = 1.8$ とし, ファジィ関係不等式の解法のためのｔノルムの条件式 (5) を満たすように設定する. 提案法 2 における個々の解を結合するｔノルムとして, 式 (18) のパラメータを $p = 2.5$ に設定したものを採用する. また, 式 (15) および (17) において $Sh = 0.05$ と設定する. 各手法の圧縮時間, 再構成時間および RMSE を表 1 に示し, 原画像と各手法による再構成画像を図 2(a)~(e) に示す. また, 原画像, 提案解 1, 提案解 2 そして最大解の各ファジィ関係のエネルギーおよびファジィエントロピーを式 (2) および式 (10) により計算した結果を表 2 に示す. 図 2(b) および (c) で示される提案解 1 および提案解 2 では, 最大解 (図 2(d)) のような白い格子縞は発生していない.

これに対応して表 1 に示される RMSE の値も減少している. また, 表 2 で示される提案解 1 および提案解 2 のファジィ関係のエネルギーおよびファジィエントロピーは, 最大解に比べ原画像に近い値となっており, 画像品質向上の説明を裏付ける結果となっている.

表 1: 従来法と提案法の計算時間の比較

	圧縮時間	再構成時間	RMSE
ICF(提案解 1)	3.27(s)	5.09(s)	21.27
ICF(提案解 2)	3.27(s)	5.32(s)	28.31
ICF(最大解)	3.27(s)	3.95(s)	46.96
DCT	1.95(s)	3.06(s)	14.58

表 2: ファジィ関係のエネルギーとファジィエントロピーの比較

	ファジィ関係のエネルギー	ファジィエントロピー
原画像	0.501	0.350
ICF(提案解 1)	0.537	0.350
ICF(提案解 2)	0.543	0.313
ICF(最大解)	0.650	0.303



(a) 原画像



(b) 提案解 1(ICF)　(c) 提案解 2(ICF)



(d) 最大解 (ICF)　(e)DCT

図 2 ： 原画像と各手法の再構成画像

画像の外観という観点において比較を行えば, DCT による再構成画像 (図 2(e)) ではブロック歪みを発生してしまっているが, 提案解 2 では全体的に滑らかな特性を保持している. また提案解 1 と DCT との比較では, RMSE の値は若干劣っているが, 図 2 に示したような再構成画像の外観において, 提案解は女性の髪の細部まで再現できており, 画像の鮮鋭度の面では優れているといえる.

5　おわりに

本研究では,ICF における再構成画像品質向上のための 2 つの手法を示した. これらの方法は,ICF の再構成条件緩和, および新たに提案したファジィ関係不等式の解法に基づいている.

比較実験において, 提案解 1 および提案解 2 の RMSE は最大解 (ICF) の RMSE の 45.1% および 60.0% に減少し, また再構成画像の外観という観点では DCT と同程度であることを示した. さらに, 提案した 2 つの手法の画像品質向上をファジィ関係のエネルギーおよびファジィエントロピーの観点より解析し, 比較実験においてその裏付けを行った.

参考文献

[1] A. Di Nola, W. Pedrycz, S. Sessa, "On Measure of Fuzziness of Solutions of Fuzzy Relation Equation with Generalized Connectives," *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 106, pp. 443-453, 1985.

[2] J. Drewniak, "Fuzzy Relation Equation and Inequalities," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 237-247, 1984.

[3] K. Hirota, W. Pedrycz, "Fuzzy Relational Compression," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 29, no. 3, pp. 407-415, 1999.

[4] 宮腰 政明, 新保 勝, "T-ノルムを用いたファジィ関係の合成とそのファジィ推論への応用", 電子情報通信学会誌 (D), pp.391-398, 1984.

[5] 延原 肇, "ファジィ関係式の高速解法と画像情報圧縮への応用," 第 12 回日本ファジィ学会関東支部ワークショップ,1999/3 (東京都品川区明電舎大崎会館)

[6] 韓 生廉, 関口 隆, "ファジィ関係不等式の一解法," 日本ファジイ学会誌, vol. 4, no. 4, pp.710-721, 1992.

[7] G. K. Wallace, "The JPEG still picture compression standard," *Communication ACM*, vol. 34, no. 4, pp.30-44, 1991

[問い合わせ先]

〒 226-8502
神奈川県横浜市緑区長津田町 4259
東京工業大学 G3 棟 廣田研究室
延原 肇
Tel:045-924-5682, Fax: 045-924-5676
E-mail: nobuhara@hrt.dis.titech.ac.jp

FB3−2

画像に基づくシナリオ形成

Creating Story based on Image

増井重弘　寺野寿郎　山下智成　○柴田浩司

Shigehiro Masui　Toshiro Terano　Tomonari Yamashita　○Koji Shibata

法政大学工学部

Faculty of Engineering, Hosei University

Abstract

A human being can create many different stories from picture. But It is difficult to create it by using the computer. It is described about the system that creating story based on image. Fuzzy relation and membership value were made from many different stories.

1. 研究目的

人間というのは感情、感性、経験、あいまいさなど基に思考判断するのに対して、コンピュータはこれらの事を一切持っていなく論理的に判断してしまう物であり、そこでこの人間独特の思考、判断方法をコンピュータに持たせることを画像を対象としてファジイ理論を用いて試みる。

ある１つの画像（絵柄）に対して思い浮かぶ事柄は人それぞれで多種多様であり、また、それぞれの画像を並び変えた場合、その時のいろいろな並び方によって、作られる話は無限にふくらんで行く。本研究はこのように、画像に対しての意味理解を行いそれぞれの画像の並びから１つのシナリオを作り出す能力をコンピュータに持たせることである。

2. システム構造

以下にシステムの構造を示す。

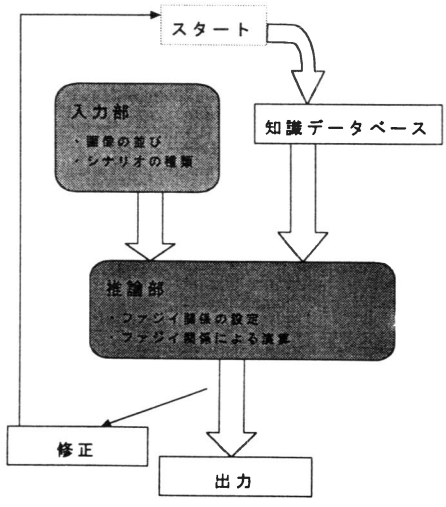


図１．システム構造

このシステムの入力として、４つの画像の並び方を決める事と、作成するストーリーの４種類の感情の種類を決める。画像の並び方は全部で２４通りである。また、ストーリーの感情の種類は怖い、悲しい、楽しい、冷静な、とする。また、推論部については後で詳細に後述する。

3. 使用した画像

ストーリーを作る上で問題となる画像の特徴について述べると、登場人物の人数が多いか少ないか、登場人物の動作が複雑か単純か、背景が複雑か単純か、の３つであり、本研究では５種類の画像を研究題材として用意した。

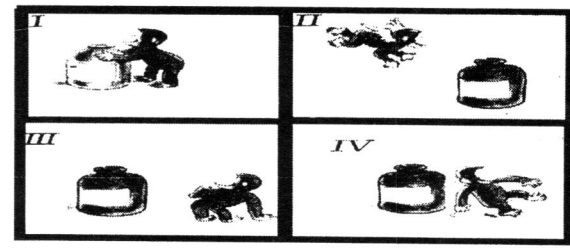


図２．画像１（画像１で用いた本は、「ひとまねこざる」文、絵；H・A・レイ、岩波書店、1983 年 9 月）

図２に示した画像１は登場人物が一人で、背景も無く、登場人物の動きから話が創られるものである。また他の画像は、主な登場人物は二人で、この二人の会話を想像して話が出来上がっていくものと、４つの画像にそれぞれ異なった人物を登場させ、一見何のつながりも持たないようにさせ、作り手の想像力に期待したものにした。

その他の画像に用いた本は、参考文献の（１）、（２）に示す。

また、自分で自作した画像も用いている。

4. 知識データベース

4 - 1. データ収集について

一人あたり２種類の感情について４コマの画像における並び方全２４パターンについてストーリーを作成してもらった。画像１においては５０人、画像２、３、４、５においては３０人に作成してもらい、画像１では２４００ストーリー、画像２、３、４，５では１４４０ストーリーのデータがあり、合計で８１６０ストーリーになる。

4 - 2. メンバーシップ値の設定

知識データベースの内部データとして、データとして集めた１つ１つのストーリーについてそれぞれの画像の繋がりにおけるメンバーシップ値を設定する。ここでは入力として設定した４つの感情（怖い、悲しい、楽しい、冷静な）をそれぞれ 0.0～1.0 の数値で表し、この値をメンバーシップ値としてプログラムに取りこむ。

メンバーシップ値を設定するにあたり、この作業を一人で行うとその人の性格や感性などによって偏りがでてしまうため１０人の人間で行い、その値の平均をとる事により平均的な人間に近い能力をコンピュータにもたせる。

4 - 3. ストーリーデータの例

データの１部を以下に示す。ストーリーデータのメンバーシップ値は（怖い、悲しい、楽しい、冷静な）の順に付けてある。また、データにはすべてに乱数が付けてある。

○画像１のＩのストーリーデータの一部

・何があるのかなあ～。

(0.4　0.4　0.8　0.5)

・触ってみよう。

(0.4　0　0.6　0.3)

・臭いを嗅いでみよう。

(0.3　0.1　0.4　0.5)

・どんな臭いがするのかな？

(0.4　0.1　0.3　0.5)

このように画像１のⅡ、Ⅲ、Ⅳ、についてもこのようなストーリーデータが存在する。入力が決定されるとこのデータベースの中から乱数を用いてランダムにストーリーデータが４つ選ばれる。

5. 推論部

5 - 1. ファジイ関係の設定について

本研究では、入力された内容に対する的確なストーリー展開を出力させるためにファジイ行列を用いる。

まず、画像Ｉから画像Ⅱへの移り変わりの関係をＩＲⅡとし、画像Ⅱから画像Ⅲへは ⅡＲⅢ、画像Ⅲから画像Ⅳへは ⅢＲⅣとして設定する。以下に画像の並びにおけるファジイ関係の図を示す。

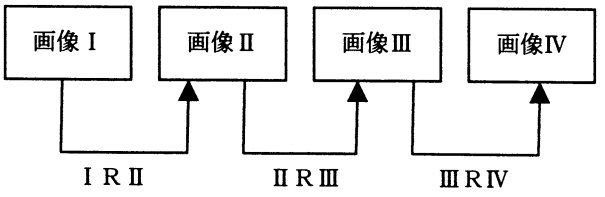


図３．ファジイ関係

5 - 2. ファジイ合成、逆ファジイ関係について

画像の並びがＩ～Ⅱ～Ⅲ～ⅣからⅡ～Ⅰ～Ⅳ～Ⅲへと変わった場合について考える。まず、画像Ⅱ～画像Ⅰのファジイ関係は、画像Ⅰ～画像Ⅱのファジイ関係の逆なので（ＩＲⅡ）を転値して、$(ＩＲⅡ)^{-1}$となる。画像Ⅳ～画像Ⅲの場合も同じ様に逆ファジイ関係を考えればいい。

次に、画像Ⅰ～画像Ⅳの場合は、ファジイ合成を考えればよい。画像Ⅰ～画像Ⅱへの移り変わりの関係を（ＩＲⅡ）、画像Ⅱ～画像Ⅲへは（ⅡＲⅢ）、画像Ⅲ～画像Ⅳへは（ⅢＲⅣ）であるのでこれらをファジイ合成したものが画像Ⅰ～画像Ⅳへのファジイ関係であり、（（ＩＲⅡ）○（ⅡＲⅢ）○（ⅢＲⅣ））となる。Ⅱ～Ⅰ～Ⅳ～Ⅲの場合のファジイ関係の図を以下に示す。

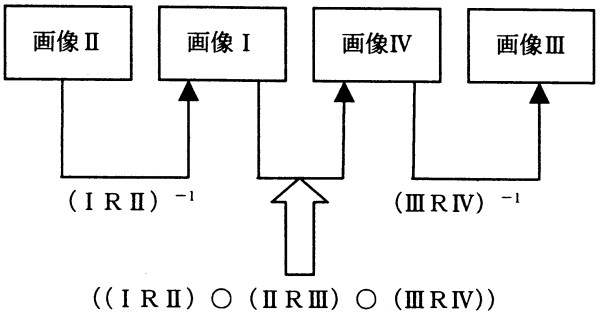


図４．ファジイ関係２

このように、１つのストーリーにおいて３つのファジイ関係を設定することによりどんな画像の並び方にも対応する事ができる。以下にファジイ関係の一覧表を示す。

表1．画像の並び変わりに対するファジイ関係

	画像Ⅰ	画像Ⅱ	画像Ⅲ	画像Ⅳ
画像Ⅰ		(ⅠRⅡ)	(ⅠRⅡ)○(ⅡRⅢ)	(ⅠRⅡ)○(ⅡRⅢ)○(ⅢRⅣ)
画像Ⅱ	$(ⅠRⅡ)^{-1}$		(ⅡRⅢ)	(ⅡRⅢ)○(ⅢRⅣ)
画像Ⅲ	(ⅠRⅡ)○$(ⅡRⅢ)^{-1}$	$(ⅡRⅢ)^{-1}$		(ⅢRⅣ)
画像Ⅳ	(ⅠRⅡ)○(ⅡRⅢ)○$(ⅢRⅣ)^{-1}$	(ⅡRⅢ)○$(ⅢRⅣ)^{-1}$	$(ⅢRⅣ)^{-1}$	

以上よりあらゆる並び方にも対応する事が出来る。

5－3．入力から出力までの具体例

以下に画像1の出力の例を挙げる。まず、入力として（画像の並びⅡ→Ⅰ→Ⅳ→Ⅲ）、（シナリオの種類「楽しい話」）と選択する。この入力により、乱数を用いランダムに各画像1枚につきそれぞれ4つの文章がデータベースより選び出される。選び出された文章は、

画像Ⅰ：①何があるのかなあ～。 (0.8)
②触ってみよう。 (0.6)
③臭いを嗅いでみよう。 (0.4)
④どんな臭いがするのかな？ (0.5)

画像Ⅱ：①のぞいてみよう。 (0.6)
②空を飛んでる気分。 (0.7)
③これって飛んでるの？ (0.2)
④羽が生えてきたぞ。 (0.9)

画像Ⅲ：①いい臭いがするぞ。 (0.5)
②もう一度嗅いでみようかな。 (0.4)
③力がみなぎってきたぞ。 (0.6)
④この瓶の中身って何？ (0.4)

画像Ⅳ：①気分が悪くなってきた。 (0.4)
②なんか良い気分になってきた。 (0.8)
③よっぱらちゃった。 (0.7)
④うお一目が回る。 (0.6)

（ ）の中は、楽しいの度合いで、選び出された文章の面白いの度合いの数値だけを抜き出しファジイ関係を作り演算する。

この場合の必要なファジイ関係は、Ⅱ→Ⅰの$(ⅠRⅡ)^{-1}$とⅠ→Ⅳの（(ⅠRⅡ)○(ⅡRⅢ)○(ⅢRⅣ)）とⅣ→Ⅲの$(ⅢRⅣ)^{-1}$であり演算により求める。

表2．ファジイ関係ⅠRⅡ

画像Ⅱの値 / 画像Ⅰの値		画像Ⅱの①	画像Ⅱの②	画像Ⅱの③	画像Ⅱの④
		0.6	0.7	0.2	0.9
画像Ⅰの①	0.8	0.70	0.75	0.50	0.85
画像Ⅰの②	0.6	0.60	0.65	0.40	0.75
画像Ⅰの③	0.4	0.50	0.55	0.30	0.65
画像Ⅰの④	0.5	0.55	0.60	0.35	0.70

表2から、ⅠRⅡは、

$$\begin{pmatrix} 0.70 & 0.75 & 0.50 & 0.85 \\ 0.60 & 0.65 & 0.40 & 0.75 \\ 0.50 & 0.55 & 0.30 & 0.65 \\ 0.55 & 0.60 & 0.35 & 0.70 \end{pmatrix}$$

となり、同様にⅡRⅢ、ⅢRⅣは、

$$\begin{pmatrix} 0.55 & 0.50 & 0.60 & 0.45 \\ 0.60 & 0.55 & 0.65 & 0.50 \\ 0.35 & 0.30 & 0.40 & 0.25 \\ 0.65 & 0.65 & 0.75 & 0.60 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0.45 & 0.65 & 0.60 & 0.55 \\ 0.40 & 0.60 & 0.55 & 0.50 \\ 0.50 & 0.70 & 0.65 & 0.60 \\ 0.35 & 0.55 & 0.50 & 0.45 \end{pmatrix}$$

となる。

ここで画像Ⅰ→画像Ⅳを考えると、

((ⅠRⅡ)○(ⅡRⅢ)○(ⅢRⅣ))

⇩

$$\begin{pmatrix} 0.50 & 0.70 & 0.50 & 0.60 \\ 0.50 & 0.70 & 0.65 & 0.60 \\ 0.50 & 0.65 & 0.65 & 0.60 \\ 0.50 & 0.70 & 0.65 & 0.60 \end{pmatrix}$$

となる。またⅡ→Ⅰの$(ⅠRⅡ)^{-1}$、Ⅳ→Ⅲの$(ⅢRⅣ)^{-1}$のファジイ関係はⅠRⅡ、ⅢRⅣの逆ファジイ関係なので転置を行えばよい。以上より、Ⅱ→Ⅰは画像Ⅰの④、画像Ⅱの①が選ばれ、Ⅰ→Ⅳは前の繋がりから画像Ⅳの②が選ばれ、Ⅳ→Ⅲは前の繋がりから画像Ⅲの②が選ばれる。以上の過程より出力される。その出力結果を、以下に示す。

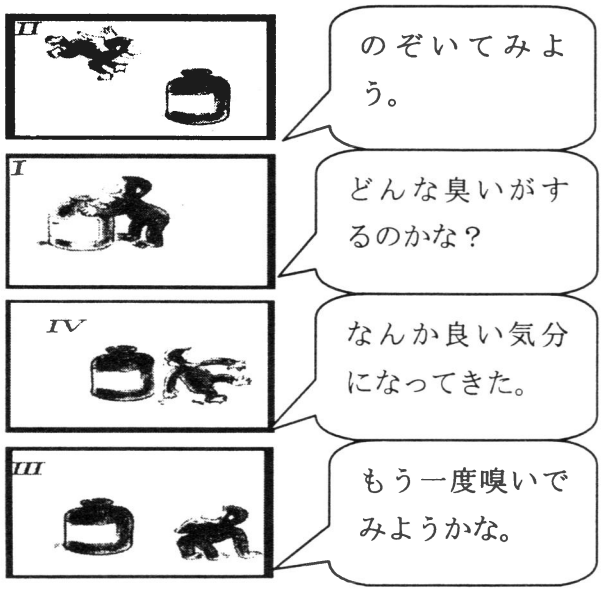


図５．Ⅱ→Ⅰ→Ⅳ→Ⅲの出力結果の例

また、画像の並びを変えてもシナリオが形成される。

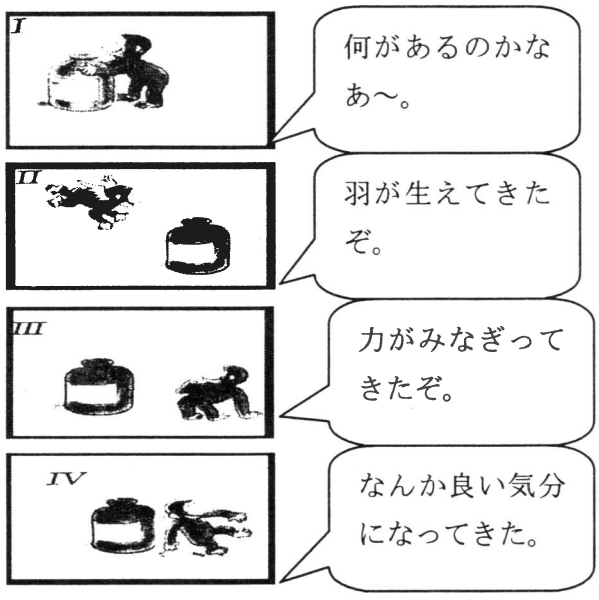


図６．Ⅰ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅳの出力結果の例

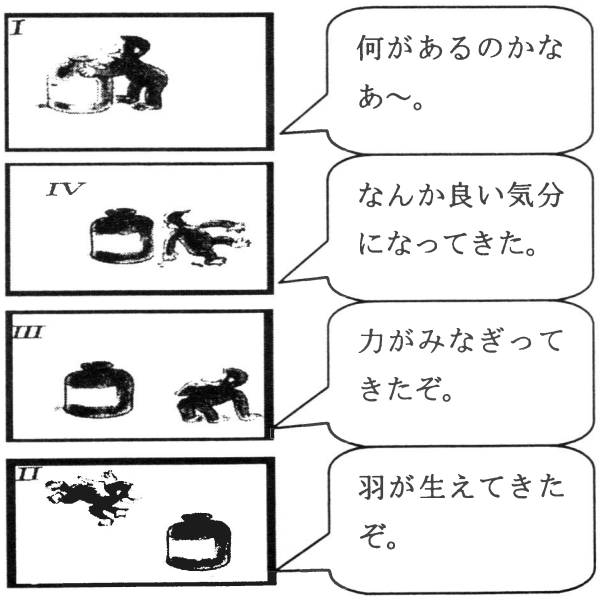


図７．Ⅰ→Ⅳ→Ⅲ→Ⅱの出力結果の例

このように、表１の画像の並び変わりに対するファジイ関係により、画像の並びを変えてもシナリオが形成される。

このプログラムにおける修正は、入力に対して出力されたストーリーがあまりにも意図するものと違った場合に、もう一度入力からやり直し、出力し直す。このことにより、客観性を出すことが出来るようになる。

６．結論

出力結果として表現されたストーリーは入力部分で設定された感情にほぼ近いものとなり、また、４枚の画像がどのような並びになろうとも上手く対応することができた。しかし、ごくまれに１画像に話の繋がりが見えにくいもの、また、入力に対してやや意図しているものとは異なるストーリー展開が出力結果として表れることもある。現段階では「修正」というプログラムを行うことで解決するのが最適な方法であると考える。本研究では、ファジィ関係を３つ設定し全２４通りの並び方に対してファジィ行列、逆ファジイ行列を用い対応している。このことにより、人間の性格、感じ方を基に多くのデータを取り、より人間に近い感性を持ったコンピュータシステムを構築することができた。しかし、シナリオが単調すぎるので、今後はシナリオについて検討してゆく必要がある。

［参考文献］

（１）ウィルバート・オードリー「がんばれ機関車トーマス」ポプラ社、1973 年 12 月

（２）作；那須　正幹　絵；前川　かずお「それゆけズッコケ３人組み」講談社

（３）「計測自動制御学会論文集第 16 巻」昭和 55 年８月

（４）「計測自動制御学会論文集第 17 巻」昭和 56 年２月

（５）寺島信義「人工知能とハイパーリアリテイー」オーム社

（６）水元雅晴「ファジイ理論とその応用」サイエンス社

［問い合わせ先］

〒184－8584　東京都小金井市梶野町３－７－２

法政大学工学部システム制御工学科

増井　重弘

ＴＥＬ：042(387)6249

ＦＡＸ：042(387)6123

E-mail: masui@k.hosei.ac.jp

FC1−1

ニューラルネットワークによる高齢者向け表情推論システム

Construction of a dialog system with emotions for elderly persons by neural networks

市村匠
Takumi ICHIMURA
広島市立大学情報科学部
Faculty of Information Sciences,
Hiroshima City University

目良和也
Kazuya MERA
広島市立大学情報科学部
Faculty of Information Sciences,
Hiroshima City University

山下利之
Toshiyuki YAMASHITA
東京都立科学技術大学工学部
Faculty of Engineering,
Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Abstract: We developed an interactive system with dialog function that can analyze emotions of the user and response to him/her with facial expressions. The dialog system is due to our Emotion Invoking Calculations (EIC) method based on the Elliot's Emotion Eliciting Condition Theory. The proposed method can judge whether an event is pleasant or not and obtain each attribute value for 20 various emotions under that situation. Successfully, we consider adjective relation and adverbial phrases and we input their attributes into the EIC, such that we can evaluate strength of each emotion.

This system can depict the face according to the context of conversation. Although each attribute value in EIC shows one aspect of feeling we must integrate those attributes to express human-like emotions. Then, we applied a fuzzy reasoning model for selecting the face proposed by T.Yamashita. In this method, nine faces with three levels of brow and eye deflection and three levels of mouth deflection were used to construct the fuzzy reasoning model. In this study, we extend Yamashita's system with eight emotions to a sophisticated system with 20 emotions by neural network.

1．はじめに

高度情報化社会の発展に伴い，情報端末を用いた高齢者の健康支援システム[1]が開発されているが，コンピュータの操作方法の複雑さ故に，利用しにくいという問題点がある．そのため，人間とコンピュータとのインタラクションにおいても，人間同士の対面的コミュニケーションと同様なシステムが求められるようになってきた[2]．

人間同士の対面的コミュニケーションの場合，相手の表情から感情を推測し，その感情に応じて話の内容，言い回し，表現を変えたりしながら円滑なコミュニケーションが行われる[3]．このように，対面的コミュニケーションにおける表情の役割が大きいため，心理学においても表情からの感情認知に関する研究は多い[4]．そこで，人間とコンピュータとのインタラクションにおいても，コンピュータに人間らしさを与えるために，顔の画像（以下，顔と略記）をインタフェースとして用いる試みが多く行われている[5,6,7]．

一方，特定の状況における感情を顔で伝えるためには，相手の発話内容を解析する必要が生じる．ここでは，発話内容から快／不快を生起するための情緒生起式を与え，生起される情緒の種類と感情の強さを示す度合いを求めることにより，20種類の情緒を生起する手法[8]を適用し，相手の感情を分析する．生起された情緒からそれに伴う顔の表情を選択するため，ニューラルネットワークによるファジィ推論モデルを提唱し，人間とコンピュータとのインタラクションに感情を考慮した対話システムの実現を試み，これを対話レベルでの問診を実現可能とする高齢者健康診断システムに適用することを目的とする．

2．情緒生起手法と属性値

相手の発話内容から快／不快を生起するための計算式（情緒生起式）とElliottの感情誘発条件理論[9]で定義された感情型を組み合わせることにより，次の20種類の情緒を生起する手法がある．つまり，「喜び」，「苦しみ」，「嬉しい」，「ほくそえむ」，「憤慨」，「気の毒な」，「望み」，「恐れ」，「満足」，「安堵」，「恐れていた通り」，「失望」，「誇り」，「賞賛」，「羞恥」，「叱責」，「感謝」，「怒り」，「自己満足」，「自責の念」である．さらに，生起されるこれらの情緒に対し，その強さの程度を表現可能とする手法が目良により提案されている．ここでは，この手法を簡単に説明する．

2．1　情緒生起式

格フレーム形式で表現された生起事象があり，主体，客体など格要素に対する語の好感度を事象のタイプごとに予め用意された情緒生起式に代入することで，事象の快／不快を求める．事象のタイプとそれに対応する情緒生起式は表1で示すものとする．また表中で使われている記号を次のように定義する．

f_S ：主体(Subject)の好感度
f_O ：客体(Object)の好感度
f_{OF} ：出発点(Object-From)の好感度
f_{OT}：目標(Object-To)の好感度
f_{OM} ：相互作用の相手(Object-Mutual)の好感度
f_{OS} ：拠り所(Object-Source)の好感度
f_{OC} ：属性の補足(Object-Content)の好感度
f_P ：述語(Predicate)の好感度

表１事象タイプと情緒生起式

タイプ	情緒生起式
$V(S)$	$f_S \times f_P$
$V(S,OF)$	$f_S \times (f_{OT} - f_{OF}) \times f_P$
$V(S,OT)$	$f_S \times (f_{OT} - f_{OF}) \times f_P$
$V(S,OM)$	$f_S \times f_{OM} \times f_P$
$V(S,OS)$	$(f_S - f_{OS}) \times f_P$
$V(S,O)$	$f_S \times (f_O \times f_P)$
	$f_O \times f_P$
$V(S,O,OF)$	$f_O \times (f_{OT} - f_{OF}) \times f_P$
$V(S,O,OT)$	$f_O \times (f_{OT} - f_{OF}) \times f_P$
$V(S,O,OM)$	定義なし
$V(S,O,I)$	$f_O \times f_P$
$V(S,O,OC)$	$f_O \times f_{OC}$
その他	定義なし

この情緒生起式では，１文を主体，客体，出発点，目標，相互作用の相手，拠り所，属性の補足，述語に分割したそれぞれの好感度の内積から求められ，情緒値としてその正負の符号のみで与えられていた．ところが，快／不快にも程度があり，情緒生起における好感度以外の要素から情緒の強さを表す測度が必要となっている．そこで，[8]では「強度にのみ影響する格要素を情緒生起式に追加」，「好感度（好き／嫌い）以外の属性の使用」，「修飾構造への対応」を考慮する．これには，各要素に対して注目すべき属性を事象ごとに指定し，さらに各要素となる対象物にも好感度以外の様々な属性に対する値を設定する手法が考えられている．（詳細は，[8]）

３．ファジィ推論による表情選択モデル

次に，ファジィ推論による表情選択モデルの構築について述べる．

３．１　顔の画像と基準感情

本研究では，図１に示すような，眉と目の傾きに関する３条件，口の形の３条件の組み合わせによる計９種類の顔を用いた．

３．２　ファジィ推論規則の構成

[7]では、質問紙調査の結果より，各基準感情に対して各顔が選択された比率を求めた．本研究では、２節で述べた情緒生起により求められた属性値を，各顔がその基準感情を表す表情に属する程度を表すメンバーシップ度とした．

この20個の情緒をもとに，図２に示すような，20 個のファジィ規則からなるファジィ推論モデルを仮定した．すなわち，20個の各々のファジィ規則は，前件部が生起された情緒の属性値を表し，後件部はその情緒を表す表情に各顔が所属する程度を表す．

ある状況における各々の情緒の属性値が入力として与えられたとき，Mamdani のファジィ推論法に従って，それらの複合された感情を表す表情に各顔が所属する程度を表すメンバーシップ関数が推定される．

すなわち，各情緒を表す集合をA_1，A_2，…，A_{20}とし，各々の基準感情を表す表情に各顔が所属する程度を表すファジィ集合をP_1，P_2，…，P_{20}とし，ある状況における各基準感情の程度をa_1，a_2，…，a_{20}とすると，ファジィ推論モデルは以下のように表される．

規則１：A_1^1 and A_2^1 and$\cdots A_{20}^1 \Rightarrow P_1$

規則２：A_1^2 and A_2^2 and$\cdots A_{20}^2 \Rightarrow P_2$

・　・　・　・　・

規則ｎ：A_1^n and A_2^n and$\cdots A_{20}^n \Rightarrow P_n$

入　力：a_1 and a_2 and$\cdots a_{20}$

結　論：　　P'

ここで，入力 a_iとファジィ規則ｎ「A_1 and A_2 and$\cdots A_{20} \Rightarrow P$」から得られる推論結果$P_n'$は，

$$\mu_{P_n'}(z) = a_i \ \wedge \ \mu_{P_n}(z)$$

で与えられ，最終的な結論P'は，

$$\mu_{P'}(z) = \mu_{P1'}(z) \vee \mu_{P2'}(z) \vee \cdots \vee \mu_{Pn'}(z)$$

で与えられる．

そして，その状況にふさわしい感情を顔によって表現する場合，最大メンバーシップ度を持つ顔，あるいは２番目に大きなメンバーシップ度を持つ顔などを選択して表示する．

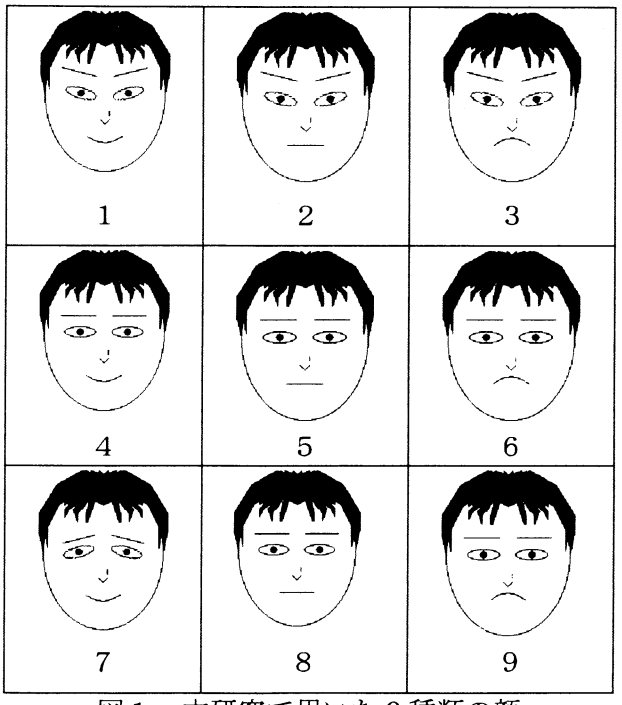


図１　本研究で用いた９種類の顔

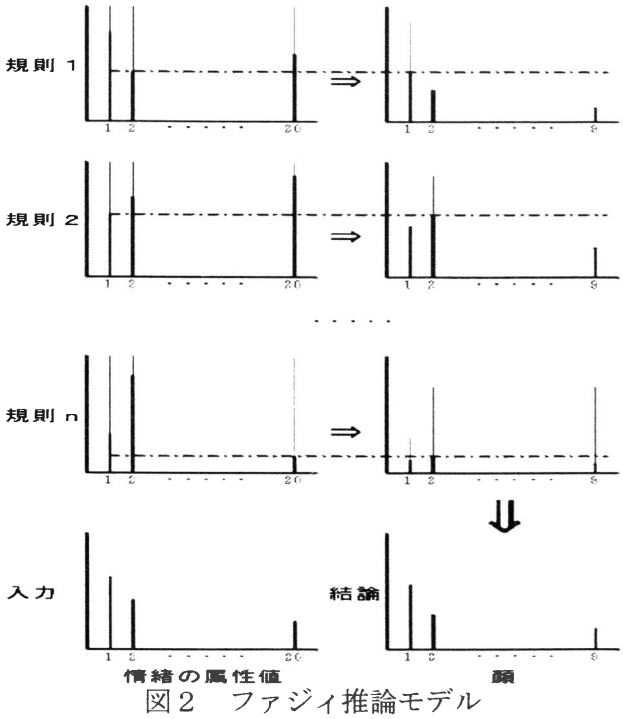


図２　ファジィ推論モデル

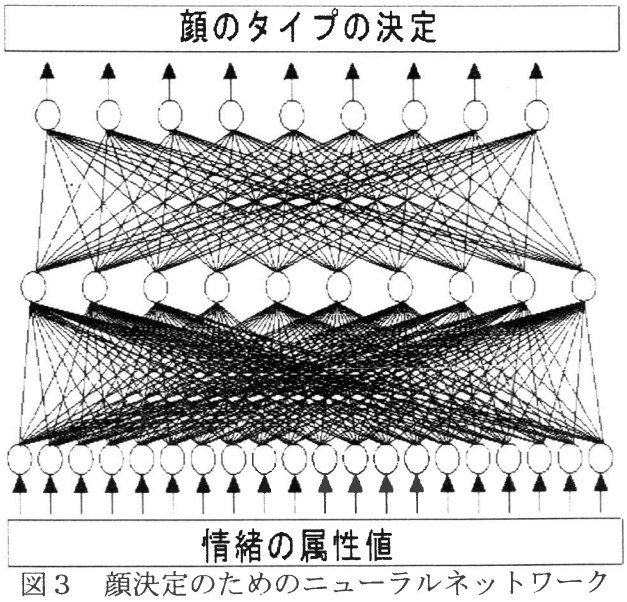


図３　顔決定のためのニューラルネットワーク

４．ニューラルネットワークによる表情選択モデル

３．１節で述べたファジィ推論規則をニューラルネットワークで実現する。図３は表情選択を行うファジィ推論を実行するニューラルネットワークで，入力層，隠れ層，出力層の３層から構成される．入力層には$[-1,1]$に変換された情緒の属性値$a'=(a_1,a2,\cdots,an)$を与える．出力層では，最大メンバーシップ度を持つ顔，あるいは２番目に大きなメンバーシップ度を持つ顔が選択されるように学習を行う．教師データは，予め与えた情緒の属性値とそれに対し決定された顔のタイプのペアを元に行われる．

いま，入力値a'，その出力活性の期待値b'が与えられたときの各ニューロンからの出力活性は次のようになる．

入力層活性値：

$$O_i^I = a_i' ,\ i=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

隠れ層活性値：

$$O_j^H = f\left(net_j^H\right),\ j=1,2,\cdots,m \tag{2}$$

$$net_j^H = \sum_{j=1}^{m} w_{ji} O_j^I + \theta_j^H ,\ j=1,2,\cdots,m \tag{3}$$

出力層活性値：

$$O_k^{out} = f\left(net_k^{out}\right),\ k=1,2,\cdots,l \tag{4}$$

$$net_k^{out} = \sum_{k=1}^{l} u_{kj} O_j^H + \theta_k^{out} ,\ k=1,2,\cdots,l \tag{5}$$

入出力関数$f(net)$は次のようなシグモイド関数とする．ただし定数$K>0$は十分に小さい数とする．

$$f(net) = \frac{1}{\left(1+\exp^{K(-net)}\right)} \tag{6}$$

また，学習は次の評価関数が最小になるように行われる．

$$E_k = \frac{\left(b_k' - O_k^{out}\right)^2}{2},\ k=1,2,\cdots,l \tag{7}$$

重みの修正は，次のようになる．

$$\Delta_p w_{ji} = \eta\left(-\frac{\partial E_i}{\partial w_{ji}}\right),\ p=1,2,\cdots,m \tag{8}$$

$$\Delta_p u_{kj} = \eta\left(-\frac{\partial E_i}{\partial u_{kj}}\right),\ p=1,2,\cdots,l \tag{9}$$

属性値の値から顔のタイプを決定する際，出力活性値が最も大きい，２番目に大きいニューロンに一致する顔のタイプを表示することになる．

５．高齢者健康診断システムへの適用

高齢化社会を迎えるにつれ，介護を要する者に対し，介護保険法が施行された．また厚生省が「２１世紀における国民健康づくり運動（健康日本２１）」を策定し，健在者に対する健康管理が求められている．一方，高度情報化社会に伴い，コンピュータが身近な存在になってきており，図４のような情報端末を用いた高齢者の健康診断システムが開発されている[1]．

ところが，コンピュータを操作するために，まずその操作方法について学習をしなければならないが，その操作方法の複雑さ故に，コンピュータの使用を拒否する人も多く存在している．そのため，高齢者がコンピュータを利用するには，ど

のような機能性が必要であるかを調査した結果，感情を考慮した対話を可能なコンピュータがあれば利用するという結果が得られた．

そこで本論文では，図４で示されているような問診に対する回答を YES/NO の２種類に限定することなく，通常のコミュニケーションと同様に回答可能とし，その内容を分析することで人間同士の対面的コミュニケーションの場合と同じように，コンピュータに人間らしさを与える．

まず広島市内の老人ホームで，高齢者 15 人に対し，予め用意した質問に対し口頭で回答を求めた．これらの音声データをテキスト化し，回答された文章を分析した結果により，２節で述べた方法により各情緒の属性値を求める．例えば次のように属性値が求まる．

質問「道に迷うことがありますか.」
回答「広島市内では迷うことはないですね.」
　場所：広島市内
　主体：相手・・・・・・・属性値 +0.8
　事象：迷う・・・・・・・属性値 -0.5
　様相：否定・・・・・・・属性値 -1.0

となりこれらの積により属性値が求まる．つまり，
+0.8 × {(-0.5)×(-1.0)} = +0.4

さらに，図５をもとに情緒の種類が求められ，この例では「喜び」，「嬉しい」，「賞賛」の３種類の情緒が生起される．このときの教師信号は，次のようになる．

{0.4, 0.0, 0.4, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.4, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0}

これらの教師信号を与え，ニューラルネットワークの学習を行い，実際の対話システムに適用した．

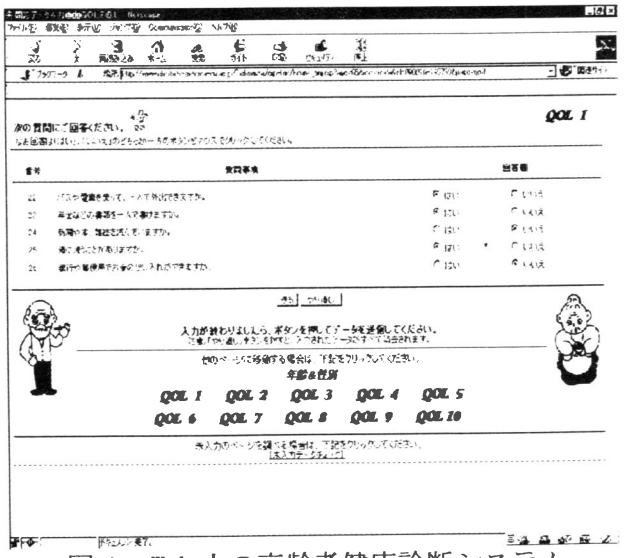


図４　Web 上の高齢者健康診断システム

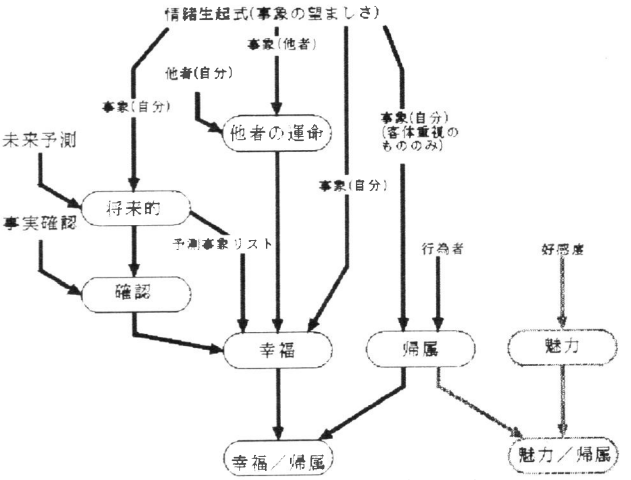


図５　感情生起の依存関係

６．結論

本論文では，高齢者の返答した文章における情緒を分析し，それらを統合することにより，顔のタイプを表示した．人間同士の対面的なコミュニケーションには，返答内容を分析し，相手の発話意図を理解する処理する手法が必要となり，開発が急がれるところである．

参考文献

[1]K.Yoshida, T.Ichimura et al., "Analytical System of Health Service needs among Healthy Elderly by using Internet", Proc. of Geontechnology Third Intl. Conf.(1999)

[2] 濱保久，「コンピュータからのメッセージが作業者に与える効果」，心理学研究，61(1)，40-46（1990）

[3]山本吉伸，松井孝雄，開一夫，梅田聡，安西祐一郎，「計算システムとのインタラクション―楽しさを促進する要因に関する考察」，認知科学，1(1)，107-120（1994）

[4]山田寛，「顔面表情認識の心理学モデル」，計測と制御，33(12)，1063-1069（1994）

[5] 原島博，「顔，表情，そして感情―映像ロボット技術からのアプローチ―」，日本機械学会誌，95(No.883)，503-507（1992）

[6]岩田満，鬼沢武久，「顔の表情表現と結びつけた経路決定システム」，日本ファジィ学会誌，8(3)，532-540（1996）

[7]高橋雅博，山下利之，酒井秀昭，武田利治，市村匠，「ファジィ推論による表情選択モデルのヒューマンインタフェースへの応用」，日本ファジィ学会誌掲載予定(2000)

[8]目良和也，「事象の格フレーム表現からの情緒生起における強度計算手法」，信学技報，TL99-32, pp.47-54(1999)

[9]Clark Elliott,高砂美樹訳，「人間とコンピュータの間の双方向感情的コミュニケーションの構成要素－感情と人格に関する広報な基本モデルを用いて」，認知科学，Vol.1, No.2, pp.16-30(1994)

連絡先

〒731-3194 広島市安佐南区大塚東３－４－１
広島市立大学情報科学部　市村　匠
Phone&Fax:082-830-1690
E-mail:ichimura@its.hiroshima-cu.ac.jp

FC1−2

麻酔時の血圧管理におけるファジィ推論知識の表現

Fuzzy Inference for Blood Pressure Control in Anesthesia

鵜飼 英俊 *1 Hidetoshi Ukai
白井 治彦 *1 Haruhiko Shirai
西野 順二 *1 Junji Nishino
小高 知宏 *1 Tomohiro Odaka
小倉 久和 *1 Hisakazu Ogura
大下 修造 *2 Shuzo Oshita
*1 福井大学 工学部 Faculty of Engineering, Fukui University
*2 徳島大学 医学部 Faculty of Medicine, Tokushima University

Abstract : This paper proposed a method to educe the fuzzy rule that implements the knowledge of blood pressure control that anesthetist do. In surgical operation, sudden blood pressure change, rise or fall, occur to patients for various factor. To prevent this phenomenon, anesthetist estimates autonomic nerves state by pulse and blood pressure and stabilizes blood pressure by step-down medicene using his knowledge, experience, and perception. We have reported the results of aquistion of the rule for dose and the rule for estimats blood pressure from real data on surgical operation.

1 はじめに

本研究は，麻酔科医が行っている手術中の血圧管理に関する知識を，ファジィ推論における推論ルールとして抽出することを目標とし，これまでに様々なことが行われてきた．[4]

手術中において，患者は様々な要因によって急激な血圧の上昇や低下が起こる．その要因として，麻酔，手術，手術直前の精神状態などがあげられている．[2][3]

これらの要因で起こる急激な血圧変動による人体への悪影響を防ぐために，麻酔科医が患者の脈拍，血圧など，自律神経系の変動などを評価，予測することで，知識や経験，勘に頼りながら血圧管理を行っている．手術中は，患者の血圧を管理する薬剤を注入し続け，その注入速度を変化させることにより血圧管理を行っている．現在用いられている血圧管理の薬剤は，効き目が早く，また，代謝速度も早いため，血中濃度は薬剤の注入速度にほぼ比例する．そのため小さなミスによって，患者の生命の危機を招く可能性がある．よって，手術中における血圧管理はより熟練した麻酔科医の微妙な管理が必要となる．

本研究では，麻酔科医が行う血圧管理の知識を実現するファジィ推論ルールの抽出方法の検討を試みる．ルール表現としてファジィルール表現，ファジィ推論を用い，手術中に実際に得られたデータからルールを抽出，さらにそれを最適化することを目的としている．本論文では，GA を用いて薬剤投与ルールと血圧予測ルールの抽出方法を検討し，結果を報告する．

2 血圧管理におけるファジィルール

2.1 血圧管理

手術を行う場合，高血圧や低血圧によって人体に悪影響を及ぼすことがあるため，血圧管理は昇圧剤と降圧剤を利用して行われている．例えば高血圧での手術は，出血量が多い，酸素障害などの影響を及ぼすことがある．それに対し，低血圧での手術は，出血量が少ない，手術後の回復が早いなどの利点があるため，実際には低血圧での手術が行われている．しかし，血圧が低すぎる場合には人体の各機能の低下の恐れがあるためできる限り障害の出ない範囲で血圧を低く管理する必要がある．そのために麻酔科医の微妙な判断が必要となる．本研究では，これらの薬剤のうち，血圧を下降させるために用いられる降圧剤による血圧管理について，麻酔科医の知識を実現するファジィルールの抽出方法を検討する．

麻酔科医が行っている血圧管理は，患者から得られる様々なデータを評価，予測し，行っている．本研究ではまず，これらのデータの中から最高血圧 SBP に注目して，薬剤投与ルールを構成する．

次に，薬剤注入後の血圧変化を予測する血圧予測ルールの抽出方法を検討する．血圧のデータとしては，最高血圧，最低血圧があるが，本研究では，最高血圧と薬剤の注入速度から最高血圧を予測するルールとして構成する．

2.2 薬剤投与ルール

薬剤投与ルールとは，手術中に麻酔科医が血圧の管理をするために予測して行っている，薬剤の注入速度を決定するためのルールである．

実際には，麻酔科医が患者の脈拍，麻酔深度などの様々なデータから評価を行い，薬剤の注入速度を決定している．ここでは，これらのさまざまなデータのうち，最高血圧だけに着目する．実際には頻繁に変動する血圧に合わせて薬剤注入速度を変化させている分けではないので，現時刻の最高血圧 SBP の移動平均と少し前の時刻の SBP の移動平均から薬剤の注入速度 Y(t) を予測するルールとして構成する．図 1に示すように，観測量には適切なゲイン G_s を掛けて，-1～1 までの範囲に入るように正規化し，使用している．また，ファジィ推論の結果も-1～1 の範囲で出力する．そのため，実際の注入速度を計算するときにも，適切なゲイン G_z を掛けて計算を行う．G_s は最高血圧のゲインを，G_y は薬剤注入速度のゲインを表す．



図 1: 薬剤投与ルールの構成

2.3 血圧予測ルール

血圧予測ルールは，これまでの血圧や薬剤注入速度，その他の様々なデータから次の時刻の最高血圧を予測するルールである．血圧のデータには，最高血圧，最低血圧があるが，最高血圧だけに着目し，変化を予測するルールを構成した．血圧は様々な要因で変化するが，現時刻の最高血圧 SBP(t) と薬剤注入速度 Y(t) から，次の時刻の SBP(t+1) を予測するルールとして構成した．図 2に示すように，血圧予測ルールにおいても，薬剤投与ルールと同じように，観測量に適切なゲインを掛けて-1～1 までの範囲に正規化し，使用している．推論結果も適切なゲインを掛けて実際の血圧を求める．G_s は最高血圧のゲインを表し，G_y は注入速度のゲインを表す．



図 2: 血圧予測ルールの構成

2.4 推論エンジン

本研究で作成した推論エンジンは 2 入力 1 出力で，入力データ，出力データはともに−1～1 の間に正規化されたデータを用いる．

推論エンジンは，2 つの入力データを受け取り，あらかじめ用意されたファジィルールファイルを読み込み，そのルールに従って簡略化法によるファジィ推論を行い推論結果を出力する．

ファジィラベルは PB，PS，ZO，NS，NB の 5 段階で構成し，ファジィラベルの台の値，x_0, x_1, x_2 は可変とした．ただし，$-1 < x_0 < x_1 < x_2 < 1$ とする．この値を調節することにより，様々なメンバーシップ関数の値で実験，評価を行うことができる．

メンバーシップ関数は図 3，4に示すように，前件のメンバーシップ関数は 3 角形で表し，後件は簡略化法なので重心のみのシングルトンで表す．[1]

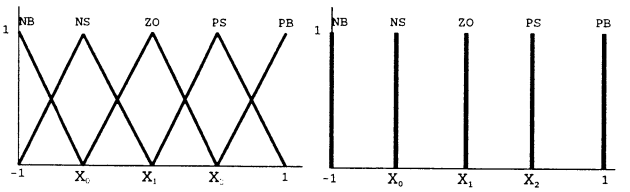


図 3: 前件部ファジィ集合　図 4: 後件部ファジィ集合

2.5 血圧管理システムの構成

2.4節で説明したファジィ推論エンジンを用いた血圧管理システムの全体の構成を図 5に示す．

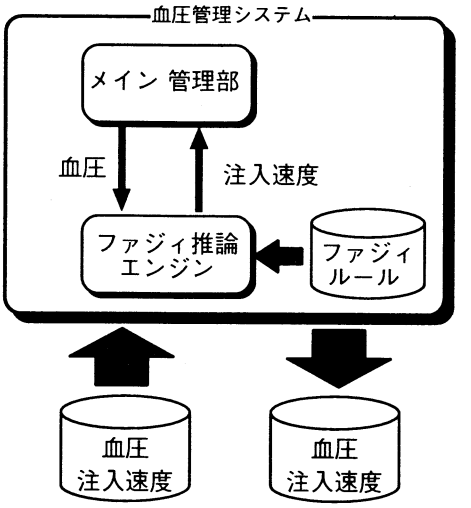


図 5: 血圧管理システムの構成

本研究で作成した血圧管理システムは，メイン管理部とファジィ推論エンジンに分けることができる．

メイン管理部　メイン管理部は，まず，血圧データが記されたファイルから，$SBP(t)$ と $SBP(t-1)$ を読み込む．そして，各値を−1〜1 に正規化し，ファジィ推論エンジンに渡す．

最後にファジィ推論エンジンからの返却値を薬剤注入速度として実数化し，出力する．この動作を，血圧データファイルが終了するまで行う．

ファジィ推論エンジン　ファジィ推論エンジンは，メイン管理部から受け取った−1〜1 に正規化されたデータ元に，簡略化法によって薬剤注入速度を決定するファジィ推論を行う．推論を行うためのファジィルールはあらかじめ用意したファジィルールファイルに記されたルールに従う．最後にこのルールにより求められた，−1〜1 の間に正規化された推論結果をメイン管理部に返す．

2.6　血圧データ

本研究では薬剤投与ルールと血圧予測ルールの実験は，実際に手術中に得られたデータを元にして実験を行う．図 6，7は現場で得られた実際の血圧データと薬剤注入速度を示す．血圧データのタイムステップは約 1 秒で，最高血圧のレンジ G_s は 80〜170，最低血圧のレンジは 40〜115 である．薬剤注入速度のタイムステップは約 10 秒で，レンジ G_y は 0〜35 である．このデータを元に，GA を用いてファジィルールを構成する．

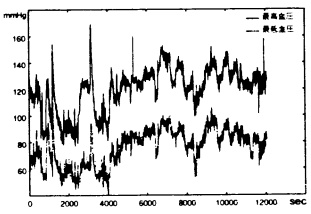


図 6: 血圧データ

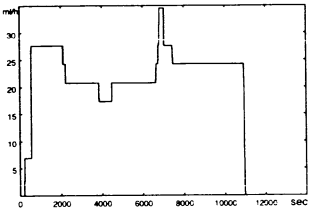


図 7: 薬剤注入速度

2.7　遺伝的アルゴリズムによるファジィルールの生成

麻酔科医の知識を実現するファジィルールの生成には，遺伝的アルゴリズムを使用した．これにより，知識獲得のプロセスを自動化することができる．麻酔科医の知識は，各遺伝子座があるファジィルールの後件部を示すものとする．例えば図 8の左端の遺伝子座は if x = NB and y = NB then z = NS というルールを表す．そのため遺伝子は，25 個の遺伝子座を持つことになる．交叉は一様交叉，エリート保存を行い，突然変移率は 0.01 とした．

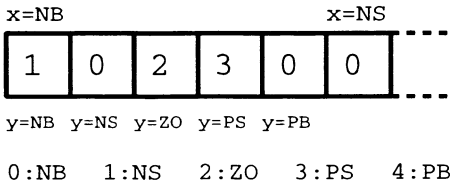


図 8: 遺伝子コーディング

3　実験

3.1　ルール獲得実験

ファジィラベルの台の値，最高血圧の推論レンジは G_s : 80〜170，薬剤注入速度の推論レンジは G_y : 0〜35 で固定とし，ファジィルールの部分にのみ遺伝的アルゴリズムを適用する．

GA の各パラメータは，個体数:30，交叉率:0.8，突然変移率:0.01，打ち切り世代:100 とした．評価値は，推論結果と実際のデータとの誤差平均と誤差の絶対値の最大値とした．

3.2　薬剤投与ルールの獲得

遺伝的アルゴリズムを用いて求められた最優良個体のファジィルールを表1に示す．表の左列と上列はファジィルールの前件部で，左列は現在の最高血圧SBP の移動平均のラベルを，上列は少し前の時刻の SBP の移動平均のラベルを表す．表の内側は後件部で，薬剤注入速度 Y(t) のラベルを表す．

ファジィラベルの台の値は-1.0，-0.6，0.0，0.4，1.0 として薬剤投与ルール獲得実験を行った．

表 1: 薬剤投与ルール

$SBP(t)\backslash SBP(t-1)$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	ZO	PS	PS
NS	NS	NB	NB	ZO	ZO
ZO	NB	NB	NB	NB	ZO
PS	ZO	PS	NS	NS	PB
PB	ZO	PB	NB	PB	PB

遺伝的アルゴリズムを用いて求められたルールによって予測を行った結果を図 9に示す．

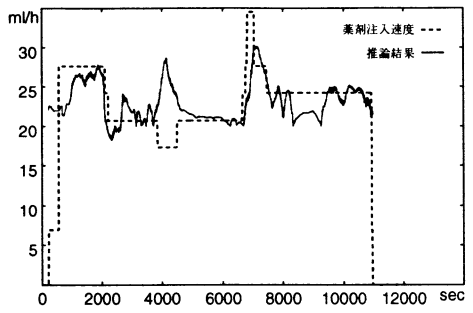


図 9: 薬剤投与ルールの実験結果

3.3 血圧予測ルールの獲得

遺伝的アルゴリズムを用いて求められた最優良個体のファジィルールを表2に示す．表の左列と上列はファジィルールの前件部で，左列は現在の最高血圧SBPのラベルを，上列は薬剤注入速度のラベルを表す．表の内側は後件部で，次の時刻の最高血圧のラベルを表す．ファジィラベルの台の値は-1.0，-0.5，0.0，0.5，1.0として血圧予測ルール獲得実験を行った．

このルールも薬剤投与ルールと同様の条件で求めた最優良個体のルールである．

表 2: 血圧予測ルール

$SBP(t)\backslash Y(t)$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PS	NB	NB	NB	ZO
NS	NB	ZO	NS	NS	PB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PB
PS	NB	PB	PS	PS	NS
PB	NS	NS	NB	PB	PS

遺伝的アルゴリズムを用いて求められたルールによって予測を行った結果を図10に示す．

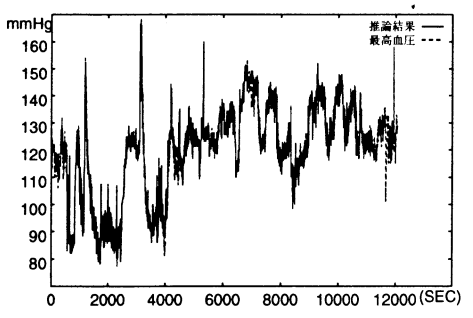


図 10: 血圧予測ルールの実験結果

4 考察とまとめ

本論文では，実際に手術中に得られたデータを用いて，薬剤投与ルールと血圧予測ルールの実験を行った．薬剤投与ルールでは，血圧変動のように薬剤注入速度を頻繁に変動させると人体に影響が現われるため，一定の注入速度で保っている．これを実現させるために，今回は血圧変動の移動平均から，薬剤注入速度を決定するルールとしたところ，概ね有効であった．

一方，データと全く反対の注入速度を示しているところもある．これは，直前の一瞬の血圧上昇に敏感に反応しすぎて，それに伴い注入速度を速くしているからであると考えられる．これを解決するためには最高血圧だけでなく最低血圧，脈拍も推論に含めるなど，ルールを工夫する必要がある．

血圧予測ルールでは，現在の時刻の最高血圧と薬剤注入速度から，次の時刻の最高血圧を予測するルールとして構成したが，今回のルールが有効であることが分かった．

今回実験を行った2つのルールは，ルールの全てが使用されている分けではないと思われるため，どこが使用されてどこが使用されていないルールかを調べてみる必要がある．

今後はより多くの臨床データに対しても実験を行い，今回使用したルールが有効であるか，また，どんなルールが有効であるか検討する．さらには，麻酔科医のより適格な知識の抽出方法も検討課題である．

参考文献

[1] 田中一男,「アドバンストファジィ制御」, 共立出版,1994

[2] 弓削孟文,「優れた臨床麻酔科医となるための戦略」, 真興交易医書出版部,1998

[3] 稲田英一,「麻酔への知的アプローチ」, 日本医事新報社,1990

[4] 鵜飼英俊, 白井治彦, 西野順二, 小高知宏, 小倉久和, 大下修造, 血圧管理におけるファジィ推論知識の表現. 第13回ファジィワークショップ講演論文集,page19-24,1999

問い合わせ先：
〒９１０－８５０７
福井市文京３－９－１
福井大学工学部知能システム工学科
小倉 久和
ogura@nqueen.fuis.fukui-u.ac.jp
TEL&FAX: 0776-27-8582(ダイアルイン)

FC1−3

正準相関分析による介護ランクの分析

Analyzing the Activities of Daily Life and the Rank of Care with Canonical Correlation

○ 長坂一徳*，山川あす香*，市橋秀友*，樋口誠康**
K. Nagasaka*, A. Yamakawa*, H. Ichihashi* and N. Higuchi**
*大阪府立大学大学院　工学研究科
*Graduate school of Engineering, Osaka Prefecture University
**関西ヘルスケアシステム(株)
**Kansai Health Care System Co. Ltd

Abstract : The relationship among the activities of daily life, the rank of care and the receipt data is analyzed using canonical correlation analysis in which the Fuzzy c-Means clustering algorithm is simultaneously applied. The results show that the rank of care varies with the relative difficulty of the activities of daily life, and the rank has some connection with the items of receipt. It is suggested that the rank of care can be estimated from the activities of daily life and the receipt data.

1. はじめに

本年4月から実施されている介護保険適用においては，介護ランクの決定の1方法として、ファジィ・クラスタリングと主成分の同時分析法を応用した介護ランク決定の方法が提案されている [1]．この方法は，介護ランク決定における1次判定に利用可能であるが，本研究では，専門医師による2次判定においても，その一助となるべく，クライアントのレセプト・データも含めた介護ランクを正準相関分析とクラスター分析の同時適用 [2] によって推定する方法を提案する．

2. 正準相関分析とクラスター分析の同時適用

$I+K$個の変量$\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2, \cdots, \boldsymbol{x}_{I+K}$が$J$個の標本について測定されていて，$I$個と$K$個$(I<K)$の2つの組$\boldsymbol{x}_a, \boldsymbol{x}_b$に分けられるものとする．これらの変量$\boldsymbol{x}_a$，$\boldsymbol{x}_b$に対して次のような線形結合を考える．

$$y_c = \boldsymbol{a}_c^T(\boldsymbol{x}_a - \boldsymbol{v}_{ca}) \tag{1}$$

$$z_c = \boldsymbol{b}_c^T(\boldsymbol{x}_b - \boldsymbol{v}_{cb}) \tag{2}$$

ただし，添字cはJ個の標本をC個のクラスターに分割したときの各クラスターを表し，$\boldsymbol{v}_{ca} = (v_{c1}, v_{c2}, \cdots, v_{cI})^T$，$\boldsymbol{v}_{cb} = (v_{cI+1}, v_{cI+2}, \cdots, v_{cI+K})^T$であり，$\boldsymbol{v}_c = (\boldsymbol{v}_{ca}, \boldsymbol{v}_{cb})$はクラスター$c$の中心（平均）である．変量$y_c$，$z_c$を正準変量といい，正準変量$y_c$，$z_c$の相関係数を正準相関係数という．正準相関係数を最大とするクラスター分析のための目的関数（ラグランジュ関数）を次のように定める．

$$L = \sum_{c=1}^{C}\Bigg(\alpha\Bigg(\boldsymbol{a}_c^T\sum\nolimits_c^{ab}\boldsymbol{b}_c - \frac{1}{2}\lambda_c^a(\boldsymbol{a}_c^T\sum\nolimits_c^{aa}\boldsymbol{a}_c - 1)$$

$$-\frac{1}{2}\lambda_c^b(\boldsymbol{b}_c^T\sum\nolimits_c^{bb}\boldsymbol{b}_c - 1)\Bigg) - (1-\alpha)\sum_{j=1}^{J}u_{cj}\|\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{v}_c\|^2$$

$$-\beta\sum_{j=1}^{J}u_{cj}\log u_{cj}\Bigg) - \sum_{j=1}^{J}\gamma_j\Big(\sum_{c=1}^{C}u_{cj} - 1\Big) \tag{3}$$

ただし，$\sum_c^{ab} = (\sigma_{cik}^{ab}), i = 1, 2, \cdots, I, k = I+1, I+2, \cdots, I+K$ で，

$$\sigma_{cik}^{ab} = \sum_{j=1}^{J}u_{cj}(x_{ji} - v_{ci})(x_{jk} - v_{ck}) \tag{4}$$

$\sum_c^{aa} = (\sigma_{cik}^{aa})$，$\sum_c^{bb} = (\sigma_{cik}^{bb})$は，それぞれ$i = 1, 2, \cdots, I$，$k = 1, 2, \cdots, I$と$i = I+1, I+2, \cdots, I+K$,$k = I+1, I+2, \cdots, I+K$について，式 (4) と同様に定める．ここで，$\alpha$は正準相関分析とクラスター中心からの距離のトレードオフを決めるパラメータである．βは大きい程ファジィなクラスターが得られる．$\partial L/\partial \boldsymbol{a}_c = 0, \partial L/\partial \boldsymbol{b}_c = 0$より

$$\lambda_c^a = \lambda_c^b = \boldsymbol{a}_c^T\sum\nolimits_c^{ab}\boldsymbol{b}_c \tag{5}$$

であるので，$\sum_c^{aa}$，$\sum_c^{bb}$が正則であれば

$$(\sum\nolimits_c^{aa})^{-1}\sum\nolimits_c^{ab}(\sum\nolimits_c^{bb})^{-1}(\sum\nolimits_c^{ab})^T\boldsymbol{a}_c = \lambda_c^2\boldsymbol{a}_c \tag{6}$$

なる固有値問題の最大固有値λ_{max}^2に対応する固有ベクトル$\boldsymbol{a}_c$より

$$\boldsymbol{a}_c^1 = \frac{\boldsymbol{a}_c}{\sqrt{\boldsymbol{a}_c^T\sum\nolimits_c^{aa}\boldsymbol{a}_c}} \tag{7}$$

を求め，$\boldsymbol{b}_c^1$を求めると正準変量は

$$y_c^1 = (\boldsymbol{a}_c^1)^T(\boldsymbol{x}_a - \boldsymbol{v}_{ca}) \tag{8}$$

$$z_c^1 = (\boldsymbol{b}_c^1)^T(\boldsymbol{x}_b - \boldsymbol{v}_{cb}) \quad (9)$$

となる．同様に式 (6) の第2〜第τ ($\tau \leq I$) 固有値に対応する固有ベクトルより第2〜第τの正準変量を求めることができる．

正準変量y_{c1}，z_{c1}の関連を示し，正準変量の解釈に利用するものとして，クラスターcの変量$\boldsymbol{x}_a$，$\boldsymbol{x}_b$に対応するファジィ構造係数ベクトル$\boldsymbol{a}_c^*$，$\boldsymbol{b}_c^*$を次のように定義する．

$$\boldsymbol{a}_c^* = \frac{\sum_c^{aa} \boldsymbol{a}_c}{\sum_{j=1}^J u_{cj}}, \qquad \boldsymbol{b}_c^* = \frac{\sum_c^{bb} \boldsymbol{b}_c}{\sum_{j=1}^J u_{cj}}$$

3. 日常生活動作，介護ランク及びレセプト・データの分析

クライアントの介護ランクを決めるための日常生活動作の能力レベルについての面接調査から介護ランクを決定した結果 [1] を参考に，動作項目として，歩行（屋内，屋外），座位，立位，通院，階段の昇降および入浴を選択した．日常生活動作能力のデータ（ADLデータ：Activity of Daily Life）は81名の外来患者から収集され，患者自身あるいはその家族が動作能力レベルとして，以下に示す5段階の数値を調査票に記入した結果をデータとした．(1：自分で出来る，2：ほぼ自分で出来る，3：手伝えば出来る，4：手伝えばほぼ自分で出来る，5：全く出来ない）また，面接者（調査員）は，記入された数値から介護ランクを決定するが，本研究では，表1のようにコード化した．さらに，これらの外来患者のレセプト・データから，医療費，通院日数および通院件数を得た．ただし，レセプトからのデータは，3ヶ月分の数値から求めた1ヶ月当たり平均値である．

本研究では，動作項目については，歩行，座位，入浴の3変数で主に表現できることから，これらのADLデータと年齢および性別を説明変数，介護ランク，医療費，通院日数，通院件数を目的変数とし，正準相関分析を行った場合の結果を 表2に示す．

表2より，クラスター数を1とした（クラスタリングを行わない従来の正準相関分析）場合，第1軸から歩行，入浴が困難な人ほど介護ランクが高いと言える．そのときの説明変数（ADLデータ）と目的変数（介護ランク，医療費，実日数，件数）の相関係数は0.95と高い．第2軸の相関係数は0.11と小さく，分析対象となり得ないので考慮の対象外とした．クラスター数を2，重みαおよびβをいずれも0.5とした場合，第1クラスター（介護ランクが高く，座位，入浴が比較的困難な人のクラスター）の第1軸からは，男性で座位が困難な人ほど，平均通院日数が少ないといえる．第2軸からは，高齢になるにつれて医療費は安くなるといえる．そのときの相関係数はそれぞれ1.00と0.75である．第2クラスター（座位，入浴が比較的容易で介護ランクが比較的低い人のクラスター）の第1軸からは入浴に困難さを覚える人ほど，介護ランクが高くなる傾向があるといえる．相関係数は0.88である．第2軸の相関係数は0.07と小さく，これも考慮の対象外とした．

表 1: 介護ランクと自立度

ランク	自立度	ランク	自立度
0	自立	4	要介護状態3
1	要支援状態	5	要介護状態4
2	要介護状態1	6	要介護状態5
3	要介護状態2		

表 2: ADLデータと介護ランクおよびレセプトデータの構造係数

	従来法	提案法		
クラスター	——	1		2
	第1軸	第1軸	第2軸	第1軸
a_1^*.通院件数	0.0087	-0.2444	0.0513	0.0233
a_2^*.通院日数	-0.0223	**-0.3606**	-0.0485	-0.0107
a_3^*.医療費	-0.0463	-0.2472	**-0.4050**	-0.0058
a_4^*.介護ランク	**-0.1115**	-0.0395	0.1737	**-0.0679**
b_1^*.年齢	-0.0232	-0.1451	**0.1538**	-0.0357
b_2^*.性別	0.0080	**-0.2112**	-0.0920	0.0017
b_3^*.歩行	**-0.1024**	0.0977	-0.0099	-0.0443
b_4^*.座位	-0.0896	**0.2247**	-0.0146	-0.0000
b_5^*.入浴	**-0.1141**	0.0174	0.0981	**-0.0637**
相関係数	0.9513	0.9999	0.74895	0.8810

4. おわりに

日常生活動作の能力レベルの調査結果から介護ランク決定データが与えられれば，それらを利用して，ファジィクラスタリングと主成分分析の同時適用によって，被調査者を介護ランクでクラス分けし，各クラスター毎に介護ランクに影響する検査項目を抽出した．

参考文献

[1] 長坂一徳，市橋秀友，樋口誠康：介護ランク決定の一方法，日本経営工学会平成11年度秋季研究大会予稿集，pp. 216-217 (1999)

[2] 山川あす香，市橋秀友: 正準相関係数を最大とするファジィc-Meansクラスタリング法, 日本経営工学会論文誌, 北海道，10月24日，Vol.51,No.2 (2000)

[問い合わせ先]
〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学大学院 工学研究科
電気・情報系専攻 経営工学分野　　長坂一徳
TEL:0722-54-9352　FAX:0722-54-9915
E-mail: nagasaka@ie.osakafu-u.ac.jp

看護システム論から見たケア・コミュニケーションに関する考察

Considerations on Care Communication Based on Nursing Theories

○野津　亮,　　片井　修,　　川上　浩司

○Akira Notsu,　Osamu Katai,　Hiroshi Kawakami

京都大学大学院 情報学研究科 システム科学専攻 共生システム論研究室

Department of Systems Science, Graduate School of Informatics, Kyoto University

Abstract A novel way of analyzing interpersonal relationship between patients and nurses is developed by referring to the Roy adaptation model in nursing theories and IPM (Interpersonal Perception Method), a social psychological analysis method, which yields correct guidelines for nursing interventions and hence better care communications.

1 はじめに

人と人のコミュニケーションには様々な側面があるが、人の内面や存在に関わるコミュニケーションの場面として看護の過程は極めて興味深いと思われる。それは看護においては、医師の行う通常の医療活動のように要素還元論的に人体や生理的活動を捉えるのではなく（捉えるだけではなく）、患者を人間全体として、とりわけ人格を持つものとして捉え、人間全体を支えるケアを考える必要がある[1]。その基礎となる看護理論の中でも注目されているロイの理論に着目し、これに基づいて患者と看護者との相互理解や共感を深めるインタラクションのあり方について検討を加える。この分析には、IPM という相互理解の心理学的分析法を導入する。さらに、この手法によって得られる結果から、正確な患者のアセスメントと看護診断、ならびに看護介入のための指針の提示について検討する。

2 ロイ適応看護理論

看護理論は、看護場面における看護者の考え方や見方を示し、複雑な出来事の関係を系統的に整理する枠組を与える[2] [3]。その中の一つの理論であるシステム指向の立場に立つロイ適応看護理論は、人間を適応システムとして捉え、反応として出力される行動が「適応様式」から発生したものと考える。つまり、図 1 に示すように、人間を、ある入力に対しフィードバックをかけながら反応を出力をするシステムのかたまりと捉える[4]。ロイはこの適応様式を、人間の内外の環境の変化による刺激を処理し、反応として出力する 4 つのシステム、「生理的様式」、「自己概念様式」、「役割機能様式」、「相互依存様式」に分類している。

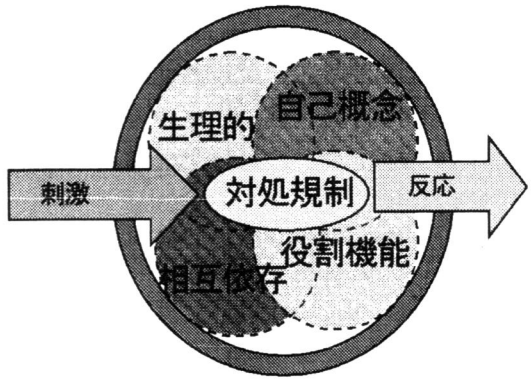


図 1：　適応システムとしての人間

ロイは、このような枠組みの中で、患者の行動や反応をこのシステムの働きとして記述することを通して、看護者が患者を理解し、その反応を修正して適切な方向へ導くための指針を与える方法を示している。

また、彼女は、看護の目標を、「アセスメントによって得られた情報から刺激を操作することで適応を促進させること」[4]としている。さらに彼女は、ある行動が適応的であるか非適応的であるかは、「人間システムの目標（生存、成長、生殖、円熟）に照らして効果的か非効果的かということ」

としている。また、看護を、「刺激（入力）に対して適切でない反応（出力）を出力する人間（システム）を、誤った対処（制御）が行なわれているとして修正すること」としている。

そして、この方法を実際に看護の場面に用いるに際しては、一般の看護理論における看護過程と同じように、それぞれの様式に対して、「1．行動のアセスメント 」「2．刺激のアセスメント」「3．看護診断」「4．目標の設定」「5．看護介入」「6．評価」の6段階の看護過程が定義されている。看護者はこの看護過程を患者が適応行動をとれるようになるまで繰り返す。

この理論は患者を記述し、よりよいケア･コミュニケーションを構築するための理論として実際の看護場面で利用されている[5]。

3 対人関係分析手法ＩＰＭ

患者と看護者の相互関係の進展を、「相手の行為から経験が出来上がり、それを自分の行為に反映させることを繰り返すことによって二者間の経験を強化し、より正確に相手の理解ができるようになり、より適した相互行為が行われるようになる」過程と捉える（図 2）[6]。この場合、両間の相互理解の深さを知ることが両間の相互（対人）関係を知る上で重要となる。

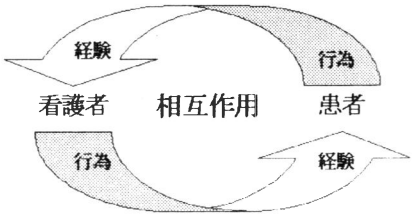
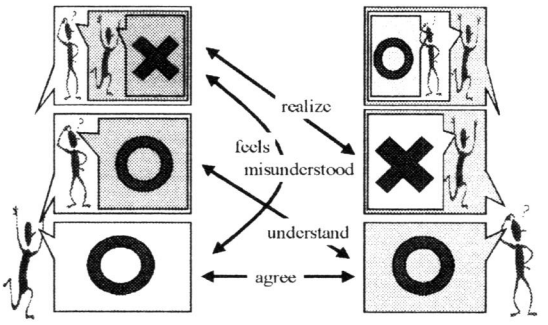


図 2： 看護における相互作用の流れ

対人関係分析手法ＩＰＭ（Interpersonal Perception Method）では相互の理解の深さを3つの認識レベルから捉えている。すなわち、Direct（自分の認識）、Meta（相手の認識）、Meta-Meta（相手の知覚する自己に関する認識） の3つのレベルであり、自分と相手の Direct、Meta、Meta-Meta なレベルの認識を相互比較し、それらの認識が整合しているかどうかを調べることによって相互理解の深さを調べる方法である。IPM では被験者である二人の関係を記述したものに関して、被験者二人がそれを、自分は正しいと思うか（自己の認識：Direct レベル）、相手はそれを正しいと思うか（相手の認識：Meta レベル）、それを自分が正しいと思うと思われているか（相手の中の自己の認識：Meta-Meta レベル）について思う/思わないを記述する。

結果を整理する際に、以下の項目（図 3）を確認する。



ｉ．二者 Direct な認識が一致しているか？
(agree？)

ii．一方の Meta な認識ともう一方の Direct な認識が一致しているか？
(understand？)

iii．一方の Meta-Meta な認識ともう一方の Meta な認識が一致しているか？
(realize?)

iv．一方の Meta-Meta な認識と Direct な認識が一致しているか？
(feel understood？)

図 3： IPM における結果の整理

実際の調査によってこれらの項目は、相互行為がスムーズに行われている二者間では、そうでない場合よりもより多く一致していることが知られており、また、同じ二者間でも誤解や疑いがなくなることによって、相互理解が深まり、一致数が多くなることも知られている[6]。

4 ロイの看護過程への IPM の導入

ロイの看護過程に IPM を取り入れることによっ

て、4つの様式それぞれでの患者と看護者の理解の深さと正確さを測定するとともに、患者の自己概念や役割機能、相互依存の各様式の問題点を浮き彫りにし、この結果をケアをする際の指針として活用できる。4つの適応様式に対応したテスト結果得るために、ロイの適応様式の定義をもとに質問項目を考えると以下のようになる。

—生理的様式—

・患者が正常に、酸素化（循環・呼吸）／栄養／排泄／活動と休息／防衛、のニードを満たしていること
・患者の 感覚／水と電解質（の平衡）／神経機能／内分泌系、の4つの適応過程が正しく機能していること
・患者の症状に関するもの

—自己概念様式—

・身体感覚に関するもの（気分は悪くないか、熱っぽいか、疲れているか、など）
・ボディ・イメージに関するもの（太っているか、やせているか、魅力あるか、など）
・自己一貫性に関するもの（性格、意志）
・自己理想に関するもの（希望、理想）
・道徳的・倫理的・霊的自己に関するもの（価値体系、自分が何者であるか）

—役割機能様式—

・一次的役割に関するもの（男であるか、何歳なのか、など）
・二次的役割に関するもの（仕事をしているか、結婚しているか、子供はいるか、など）
・三次的役割に関するもの（仕事の内容、配偶者、子供との関係、など）

—相互依存様式—

・患者と重要他者(その人にとって一番大切な人、人生の一定の期間比較的一定している)、サポートシステム（その人の相互依存のニードに貢献している人、グループ、時には動物）の相互依存に関するもの

これらを3つの認識レベルについて、患者と看護者が自分の認識を○×または記述式で答える。

これによって、それぞれの様式における各レベルでの認識の誤りを知ることができる。

ある程度の調査やケアが行われ、患者と看護者の相互の関係が成熟したとした上で、このテストを行い、分析する。まず、患者と看護者間において、合意ができているか(agree？)、相手の理解ができているか(understand？)、相手に知覚されている自己を認識できているか(realize?)、理解されていると感じているか(feel understood？)、を明らかにすることによって、さらにつぎに示す各様式についての知見を得ることができる。

・自己概念様式における誤った固定観念

例 「自分は太っているに違いない」という誤った認識

（例えば、太ることに関して合意ができていないのに看護者の考えを理解できているとき）

・役割機能様式における間違った役割のイメージ

例 「妻は家事をするもの」という間違った役割のイメージ

・相互依存様式における自尊心のレベルの低下

例 「自分はなにをやっても駄目な人間だ」という思い込み

・他者の反応の知覚によって自己概念や役割機能を形成する際の異常

例 「Aさんが僕に声をかけてくれたのは、僕がかわいそうな人間だからだ」というような自己概念形成の際の誤り

テスト結果から以上のような各様式における非適応要因をつきとめ、ロイの適応看護理論に基づいて非適応的反応を判断することによって、看護を改善する指針が得られる。

ロイの看護過程にIPMを用いる際の問題点としては、看護者が患者の傾向をつかむときにそれを見る人の考えや感じ方によって分析結果に違いが生じる可能性があること、たとえば、役割イメージの誤りと捉えるか、自尊心のレベルの低下と捉えるかは人によってちがう可能性があるというこ

と、また、看護者が患者を正確に理解できていないために、患者の理解は正しいにもかかわらず、それを誤りだとしてしまう可能性もあること、などがあげられる。したがって、この分析はカンファレンスのような複数人での話し合いの中でIPMの調査結果についてじっくりと話し合うなどの方法を用いて、多くの観点から慎重に行っていかなければならない。

また、個人の信念や家庭の事情に立ち入っていることや、患者が看護者との関係について考慮し、考えをねじまげる可能性（看護者を信じていないことを知らせたくない、あるいは、もっとかまって欲しいといった意図によるもの）が存在しうる以上、患者が率直な答えをしない可能性もあげられ、患者が正確な自分の認識を答えることができるかどうかは患者と看護者に依存するのみである。

5 まとめ

本研究では、まず、人間全体をシステム論的に捉えることを考え、看護理論の中のロイ適応看護理論に注目した。対人関係分析への心理学的アプローチであるIPM（Interpersonal Perception Method）という相互理解の深さを測る方法に焦点を当て、ロイ適応看護理論のなかに方法のひとつとしてIPMを取り入れることで、患者全体をひとつのシステムとしてより正確に捉えることが可能となり、各認知レベルから見た相互理解の深さについての情報から、看護過程における患者についての（ロイの意味での）より正確なアセスメントと正しい評価を導くことが可能となった。これによって、よりよい看護と、よりよい患者と看護者とのインタラクションのための指針が示されるのではないかと考えられる。

参考文献

[1] Florence Nightingale, Notes on Nursing: What It Is and What It Is Not, New York: Dover Publications, 1969
（湯槇 ほか訳, 看護覚え書, 現代社, 1968）

[2] Gertrude Torres, Theoretical Foundations of Nursing, Appleton & Lange, East Norwalk, 1986
（監訳 横尾, 田村, 高田,安藤 ほか訳, 看護理論と看護過程, 医学書院, 1992）

[3] Julia B. George (Ed.), Nursing Theories, The Base for Professional Nursing Practice, Appleton & Lange、A Simon & Schuster Company, 1995
（南, 野嶋, 近藤 訳, 看護理論集 増補改訂版 -より高度な看護実践のために-, 日本看護協会出版会, 1998）

[4] Heather A. Andrews and Sister Callista Roy, Essentials of the Roy Adaptation Model, Appleton & Lange, 1986
（監訳 松本光子, 松本 ほか訳, ロイ適応看護論入門, 医学書院, 1992）

[5] Jusths Akinsanya, Greg Cox Carol, Crouch and Lucy Fletcher, The Roy Adaptation Model in Action, Macmillan Publishers Ltd., 1994
（木村 ほか訳, 看護モデルを使う4 ロイの適応モデル, 医学書院, 1995）

[6] R. D. Laing, H. Phillipson and A. R. Lee, Interpersonal Perception: A Theory and a Method of Research, Tavistock Publications. London, 1966

[問い合わせ先]
〒606-8501
京都市左京区吉田本町 京都大学大学院
情報学研究科 システム科学専攻
共生システム論研究室
野津 亮
Tel: 075-753-5201
Fax: 075-753-5042
E-mail: notsu@sys.i.kyoto-u.ac.jp
katai@i.kyoto-u.ac.jp

FC2−2

インタラクティブEAを用いたナーススケジューリング支援システムのためのEAエンジンに関する一考察

A Study on EA Engine for Nurse Scheduling Support System Using Interactive EA

井上 武士* 古橋 武* 前田 宏** 高羽 実**

Takeshi Inoue* Takeshi Furuhashi* Hiroshi Maeda** Minoru Takaba**

*名古屋大学 **鈴鹿医療科学大学

*Nagoya University **Suzuka University of Medical Science

Abstract Nurse Scheduling Problem (NSP) is a combinatorial optimization problem. There is a growing demand for practical automatic nurse scheduling systems. The authors have presented an interactive nurse scheduling support system. This system learns the evaluation criteria from the past schedules, and generates new schedules using Bacterial Evolutionary Algorithm (BEA). The user can modify/fix parts of candidate schedules. The system reschedules the parts that need improvement. The proposed system is needed to produce high quality schedules with a short computation time for a good human-machine interaction. This paper examines the BEA operations, and studies hardware implementation of BEA on Field Programmable Gate Array (FPGA). Appropriate operations and parameters of BEA are clarified. Practical NSP is estimated to be solved within 2 seconds by the hardware.

1 はじめに

看護婦勤勤務表作成問題（Nurse Scheduling Problem: NSP）は組合せ最適化問題である。勤務表作成は毎月婦長によってなされる煩雑な作業であり、根強い自動化のニーズがある[2]。これまでに遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm: GA）を用いた勤務表作成システム[1]が開発されてきた。しかし、評価関数の手間がかかること、計算時間がかかりすぎることなどの問題があり、これらのシステムは普及していない。

筆者らは、インタラクティブ進化的計算[3]に基づく、インタラクティブ看護婦スケジューリング支援システム[4]を提案してきた。本システムは、過去のスケジュールから評価規則を抽出し、バクテリア進化アルゴリズム（Bacterial Evolutionary Algorithm: BEA）[5]を用いてスケジュール案を生成する。ユーザは提示されたスケジュール候補を修正、もしくは一部を固定し、システムに再スケジューリングを要求する。本システムはユーザとのインタラクションを通して、評価規則の更新を行い、より良いスケジュールの作成を行う。

ユーザとシステムが円滑に協調するためには、システムは短時間で勤務表候補を計算する必要がある。本稿はバクテリアEAの各演算の能力を調べ、適切なパラメータを明らかにする。また、BEAエンジンのFPGA(Field Programmable Gate Array)によるハードウェア化実験を行い、高速応答の可能性を示す。

2 看護婦スケジューリング問題

NSPは、勤務制約、看護の質、各看護婦の健康管理、各看護婦からの要求等を考慮し、各看護婦の3交代勤務シフトを割付ける問題である。図1は看護婦10人（A〜J）、2週間分の勤務表の例である。

		Date																
Skill	Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	D	N	M	R
A	Staff A	N	N		N	N	M	N		D	D	M	N		D	3	5	3	2
A	Staff B		D	D	M	D	D	M	N	M			D	M	N	3	5	3	4
A	Staff C		D	D	M		N		D	D	M		N	D	D	4	6	2	2
B	Staff D	D	M		D	M	N	D		N	N	D	M		D	3	5	3	3
B	Staff E	D	D	M		N	D	D	M		D	D		N	N	3	6	3	2
B	Staff F	D	D	M	N	N		D	D	M		N	D	D	M	2	6	3	3
B	Staff G	N		D	D	M		N	D	D	M	N	D	D	M	2	6	3	3
C	Staff H	D	M	D	N		D	D	M		N	D	D	M	N	2	6	3	3
C	Staff I	M		N	D	D	M		N	D	D	M		D		4	5	2	3
C	Staff J	M	N	D		D	D	M		N	D	D	M	N	D	2	5	4	3
	D	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				
	N	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				
	M	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				

図 1：勤務表の例

図中の記号Dは日勤（AM8:00〜PM4:00）、Nは準夜勤（PM4:00〜AM0:00）、Mは深夜勤（AM0:00〜AM8:00）である。一番左のコラムは各看護婦の熟練の度合いを表し、熟練Aから経験の浅いCにランク付けされている。下段の三つの行は各日の各勤務シフトに割付けられた看護婦数を表す。右側の4つの

行は各看護婦の各勤務への割付け日数を表す。

勤務表作成の評価規則は、各看護婦の勤務系列、各日の各勤務に必要な割付け人員(以下「必要人員」)、各看護婦の各勤務への割付け日数（以下「割付け日数」)、および各勤務における看護婦の組合せである。勤務系列は、健康面で無理の無い割付けを考慮する。必要人員は、看護の質を維持するため、深夜勤2人の1人は内必ず熟練の看護婦を割付けることを考慮する。勤務日数は、看護婦間で均等に割付けることが基本であるが、各看護婦からの要求や先月分の割付け日数も考慮し、公平な割付けを行う必要がある。現場では、看護婦間の相性、アクシデントによる急な日程変更に対しても柔軟に対応する必要がある。

3 提案システム

従来の支援システムは、ユーザが設定した評価規則に基づいてスケジューリングエンジンが勤務表候補を作成し、ユーザはこれら勤務表候補の中から満足のいく候補を選択していた。この様な従来システムの問題点として、次の3つが指摘されている。

- 評価規則の完全な設定は困難で、煩雑な設定作業は婦長に大きな負担をかける。
- スケジュール結果が局所解に陥り易い。
- スケジューリング演算に時間がかかるため、待ち時間が長い。

本研究では図2に示すインタラクティブ看護婦勤務表作成支援システムを提案する。

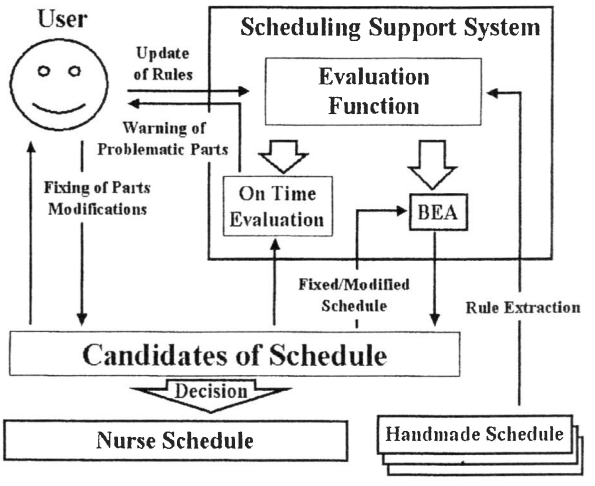


図 2：提案システムの概要

提案システムによる勤務表作成の基本的な流れを以下に示す。

(i) 既作成の勤務表から評価規則の抽出
(ii) BEAによる勤務表候補の生成
(iii) システムからユーザへの勤務表候補の提示
(iv) ユーザによる勤務表候補の修正、勤務表候補の部分的固定、および評価規則の更新
(v) システムによる未固定個所の再計算

(i)評価規則抽出では、最大4日分の勤務系列と看護婦技能の組合せを、既作成の勤務表から抽出する。評価規則の抽出は既作成勤務表の事例データから、望ましい勤務系列、あまり望ましくない勤務系列、禁止勤務系列を抽出することで行う。勤務表中のある勤務割付に注目し、この割付に先行する勤務系列をこの割付に対する状況とする。既作成勤務表中の同じ状況系列Bに対する勤務割付Aの出現頻度pを

$$p(A \mid B) = \frac{(A+B)\text{の出現回数}}{B\text{の出現回数}} \cdots (1)$$

と与える。割付Aが望ましいのであれば、$p(A|B)$の値は大きく、あまり望ましくなければ$p(A|B)$の値は小さく、$p(A|B)=0$なら$A+B$の勤務系列は禁止されていると考えられる。また看護婦技能の組合せ規則に対しては、事例データ中の各勤務の技能レベル毎に人数の上限と下限を求める。この自動抽出機能により婦長の煩雑な評価規則の設定作業を軽減できる。

(ii)勤務表候補生成に用いるスケジューリングエンジンには、バクテリア進化アルゴリズム(Bacterial Evolutionary Algorithm: BEA)[6]を応用した。BEAは染色体局所部分を効率的に改善できるためNSPに有効と考えられる。

(iii)勤務表候補の提示では、勤務表候補に評価規則に違反する個所が残っていればこの箇所を警告する。また、システムはユーザが指示した個所に関係する評価規則を表示することができる。提案システムが提示した勤務表候補の例を図3に示す。

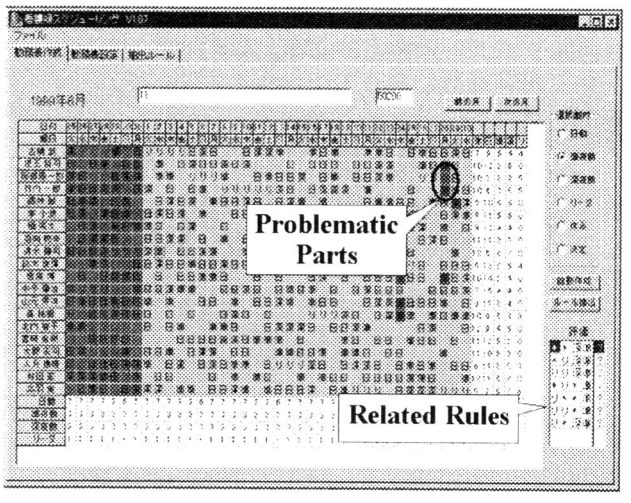


図 3：勤務表候補の表示

ユーザは提示された情報を基に(iv)の操作を行う。ユーザは提示された候補に対して画面上で修正を繰返して勤務表を完成させることもできるが、満足のいく箇所を固定して、(v)残りの部分の再スケジューリングをシステムに要求できる。勤務表候補の修正と部分的固定の例を図4に示す。

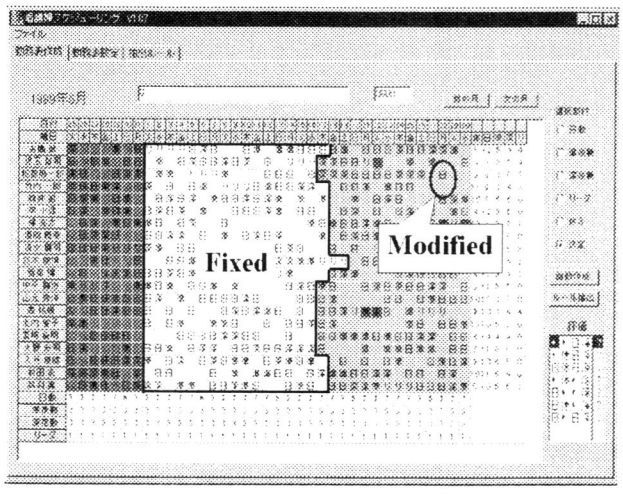


図 4：勤務表候補の修正と部分的固定

4　スケジューリング能力の評価

提案システムのスケジューリングエンジンにBEA を応用した。BEA はバクテリアの進化を模擬したアルゴリズムである。BEA は長い染色体に対し局所改善を行う手法であり、NSP に効率的であると考えられる。BEA の概要を図 5 に示す。

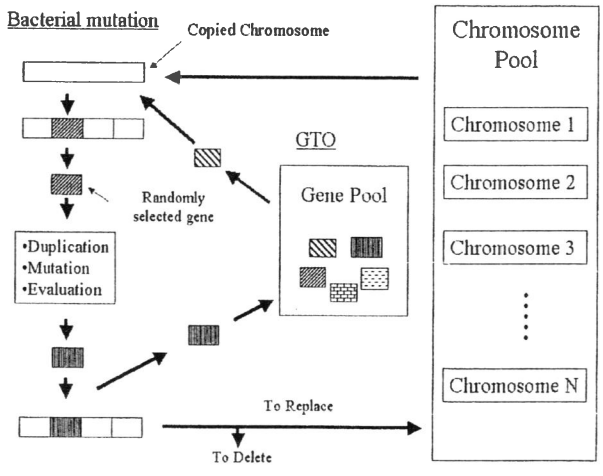


図 5：BEA

BEA はバクテリア突然変異と遺伝子転写（Gene Transfer Operation: GTO）の 2 つの操作から成り立つ。まず、局所改善を行う個所がランダムに選択される。次に、染色体プールから選択された個体に対し、局所部分に対して突然変異を施し、評価値を求める。この新しい個体と、染色体プールからランダムに選択した個体の評価値を比較し、優れている方を染色体プールに残し、もう一方を削除する。今回、この操作は 100 回行うことで一世代とした。局所改善個所は 1 世代を通じて、変わらず、次の世代に別の部分がランダムに選択される。この操作は染色体の効果的な局所改善を行うのため文献[5]の操作とは異なる。

GTO は他の個体に良い遺伝子を伝えるために行う。この操作はランダムな頻度で遺伝子を遺伝子プールにコピーしておき、染色体プールからランダム選択された個体の対応する部分とランダムな頻度で置き換えることで行う。

本稿では各操作の効果を調べるための実験を行った。実験に用いた問題規模は看護婦数 20 人×1 ヶ月間、勤務は、「日勤」、「準夜勤」、「深夜勤」、「日勤のリーダ」、および「休み」の 5 勤務形態、必要人員は日勤 7 人（但し日曜日は 6 人）、準夜勤 3 人、深夜勤 3 人、日勤のリーダ 1 人である。評価規則は 3 ヵ月分の既作成のスケジュールから自動抽出されたものを用いた。以下に例を示す。

- 勤務系列(準→深),(休→深),(準→日→深)は禁止する。
- リーダは 3 日以上連続で割り付ける。
- 4 日以上深夜勤を禁止する。
- 深夜勤及び準夜勤には必ず熟練(ランク A)看護婦を入れる。
- 深夜勤及び準夜勤には経験の浅い(ランク C)看護婦を 2 人以上入れない。
- 日勤には 3 人以上経験の浅い(ランク C)看護婦を入れない。

局所改善の効果を調べるため、局所改善幅 1、3、5 および 30 日の場合について各々50 回試行し、5,000 世代後の平均の評価値、ベストの評価値および全ての評価規則を満たすことができた回数を調査した。結果を表 1 に示す。実験結果に対し t 検定を行い、局所改善を 3 日の幅とする場合が、他の場合に対し危険率 1 %で有意な差があることが判った。

次に GTO の効果を調べるため、局所改善 3 日の幅に固定し、GTO の有無および GTO の変わりに 1 点交叉を用いた場合について同様の調査を行った。結果を表 2 に示す。実験結果に対し t 検定を行ったところ、いずれの場合に対しても有意な差は見られなかった。そのため、提案システムの BEA エンジンには GTO は用いないこととした。

表 1：局所改善の効果（試行回数 50 回）

局所改善幅	平均評価値	ベスト評価値	完全解獲得数
1 日	1.78	0	8
3 日	1.14	0	10
5 日	2.48	0	2
30 日	16.78	7	0

表 2：GTO の効果（試行回数 50 回）

	平均評価値	ベスト評価値	完全解獲得数
GTO	1.14	0	10
GTO 無し	1.22	0	12
1 点交叉	1.24	0	8

5　BEA のハードウェア化

円滑に協調スケジューリングを行うためには、短時間で高品質の勤務表候補を計算する必要がある。しかし、現在 C++によって作成された BEA エンジンは Pentium II 450MHz 上で 5,000 世代の演算に 3.5 分必要である。仮に、機械語を用いて理想的に BEA を作成したと仮定した場合、1 つの染色体に突然変異、評価、選択淘汰の 1 連の演算を行ためには 36,000 命令必要である。5,000 世代分の演算には 1 クロック当たり 2 命令実行できる 500MHz のプロセッサを用いて 18 秒を要する。この違いは OS の割り込みやコンパイラの最適化が不十分である等の影響と考えられる。

提案システムの高速化の解決法として BEA の専用ハードウェア化が挙げられる。特に FPGA はパソコンのスロットにボードを差し込むことで、演算の高速化の有効なツールとなりつつある。遺伝的アルゴリズムのハードウェア化については幾つか報告があり、北浦[6]らは巡回セールスマン問題において 700 倍の高速化を報告している。

本稿は NSP 対して BEA ハードウェアの利点を調査した。ハードウェア上限界のため、問題規模を看護婦 8 人×2 週間、4 勤務形態に縮小し、染色体数も 4 個体とした。BEA ハードウェアの設計環境は、対象デバイスに ALTERA FLEX 10K、記述言語に VHDL、論理合成ツールに ALTERA MAX PLUS II を用いた。図 6 に設計した BEA ハードウェアの構成を示す。

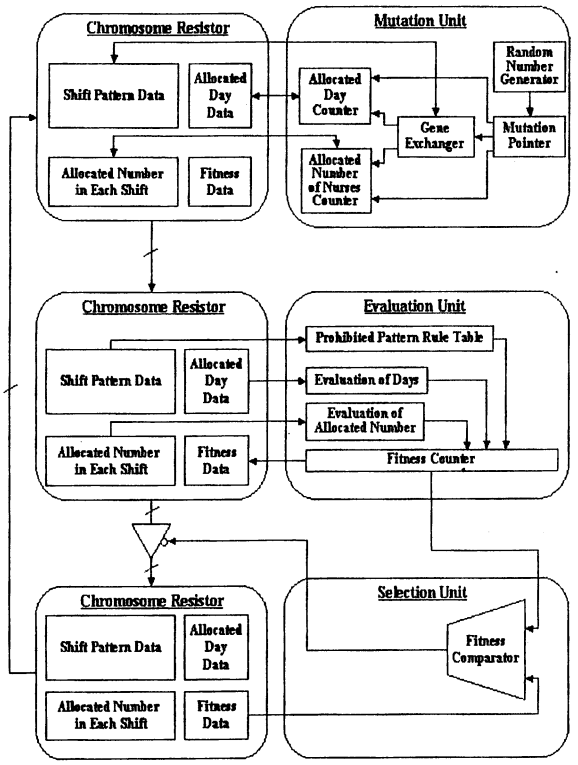


図 6：BEA エンジン

設計した BEA ハードウェアは論理シミュレーションの結果、回路規模 8 万ゲート、動作周波数 20MHz であった。この回路は突然変異、評価、選択の 3 つの処理ユニットで構成され、各ユニットは 40 クロックで 1 染色体の演算を実行する。3 つのユニットはパイプライン処理を行い、1 染色体当たり 40 クロックで演算することができる。

問題規模が 4 章と同じである場合、1 染色体当たりに必要なクロック数を 40 クロックに留めるためには回路規模を 8 倍以上とすることが見込まれる。ソフトウェア実行の場合と比較すると 18 倍の高速化が実現可能である。実際にはこの相違はより大きく、3.5 分が 2 秒まで短縮されることになる。

6　まとめ

本稿は、BEA を用いたインタラクティブ看護婦スケジューリング支援システムについて、BEA エンジンのパラメータ設定と高速化について検討した。ユーザとシステムが円滑に協調スケジューリングを行うためには、システムは短時間で高品質の勤務表候補を計算する必要がある。本稿は BEA の FPGA によるハードウェア化により、高速応答の可能性を示した。

参考文献

[1] 山村,小林,山岸,阿瀬「遺伝的アルゴリズムによるナーススケジューリング」北野宏明 著 遺伝的アルゴリズム pp.89-125, 1993

[2] 竹本「コンピュータを導入した看護婦勤務表作成の現状と課題」看護管理 Vol.3 No.1 pp38-42 1993

[3] ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 1996

[4] 井上、古橋、藤井、前田、高羽「進化的計算を用いたインタラクティブシステムによる看護婦勤務表作成支援システムの開発」第 15 回ファジィシステムシンポジュウム pp,385-388

[5] Norberto Eiji Nawa, Takeshi Furuhashi, "Bacterial Evolutionary Algorithm for Fuzzy System

[6] 北浦,浅田,松崎,川合,安藤,島田「パイプラインストールを除去した遺伝的アルゴリズム専用ハードウェア」計測自動制御学会論文集 Vol.35 No.11 pp.1431-1437 1999

[問い合わせ先]

〒 464-8603
名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻
井上 武士
Tel: 052-789-5315, Fax: 052-789-3166
E-mail: inoue@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

FC2−3

看護婦スケジューリングにおける制約条件を取り入れたコーディング方法に関する一考察

A Study of Coding Method with Their Constraints for Nurse Scheduling Problem

川中 普晴 吉川 大弘 篠木 剛 鶴岡 信治
Hiroharu Kawanaka Tomohiro Yoshikawa Tsuyoshi Shinogi Shinji Tsuruoka

三重大学 工学部 電気電子工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering,
Faculty of Engineering, Mie University

Abstract: Nurse Scheduling Problem(NSP) is the problem that allocating the shifts (day and night shifts, holidays, and so on) for plural number of nurse under various constraints. Generally, NSP has a lot of constraints. As a result, it needs much knowledge and experience to make the scheduling table with their constraints, and it has been made by the head nurse or the authority in the hospitals. Genetic Algorithm(GA) has been applied to this problem. The conventional methods take the constraints into the fitness function. However, it reduces the fitness value a lot for the parts of solution against the constraint, it causes useless search, because most of chromosomes are selected in the initial population or as the change by the genetic operations. And if it doesn't reduce the fitness value so much, the solution has some parts against the constraint. Some of them are established by the Labor Standards Act or the Labor Union Act, so the solution has to be modified. As a result, it is difficult to acquire an effective scheduling table automatically. We study the method of the coding and the genetic operations with their constraints for NSP. In this paper, we propose the coding method considering the constraints. We apply this method to the NSP using actual shifts and constraints used in a hospital. It shows that an effective scheduling table satisfying the constraints is acquired by this method.

1 はじめに

看護婦スケジューリング問題 (Nurse Scheduling Problem : NSP) は，通常，1ヶ月間の看護婦の勤務表 を，様々な制約条件のもとで作成する問題である．しかしながら，NSP は一般的に多くの制約条件を持つため，それらすべての制約条件を満たした勤務表を作成するには，経験者の豊富な経験と知識が必要となる．そのため現在，勤務表作成の自動化は行われておらず，病院における勤務表作成は，婦長や専門家などによって行われている．しかし，手作業による勤務表の作成は，作成者に多大な負荷を課すこととなり，看護婦勤務表の自動作成システムの開発が熱望されている．

一方，NSP の解探索手法に対する研究として，遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用いた研究が報告されている [1][2]．しかし GA は，本来ヒューリスティックアルゴリズムであるため，初期世代や遺伝的演算 (交叉，突然変異) によって生成される染色体のほとんどが制約条件を満たさないことがある．通常の GA では，これらの染色体は淘汰されてしまうため，期待される染色体の進化がなされない．すなわち，解の探索が，評価値の高い染色体を求めるよりも，それら制約条件を満たす解の探索に注がれてしまい，探索効率が悪く，結果として良い解が得られないことが多い．また文献 [1][2] では，GA における染色体の評価関数に，制約条件を加味した減点方式を用いることにより，より多くの制約条件を満たす方向に染色体を進化させる手法を提案している．しかしこの手法では，評価関数において制約条件を満たさない染色体の減点数を高くすれば，上述と同様の理由により，解の探索に無駄が生じる．また減点数を低くすれば，得られた結果には制約条件を満たさない部分が存在する．制約条件には，労働基準法等で決められた強い制約条件 (本稿ではこれを "絶対条件" と呼ぶ) も多く存在するため，得られた結果に対して何らかの修正を加えなければならず，勤務表の自動作成システムの構築は困難であると考えられる．

本研究では，これらの問題を解決するため，コーディング及び遺伝的演算に絶対条件を取り入れ，それらの条件を満たしながら染色体の進化を行うことで，GA における解の探索を，効率的に行う手法について検討する．本稿では，そのコーディング方法について，NSP における絶対条件をあらかじめ取り入れたコーディング法を提案する．本手法では，1 日あたりの勤務に対する絶対条件を満たしながらランダムに勤務を配置した後，各看護婦に対して，1ヵ月における休日・夜勤の日数や無理な勤務日程にならないための絶対条件を満たすように，それぞれの制約条件を満たしたままで勤務の交換を行う．これにより，染色体は作成された時点で与えられたすべての絶対条件を満たしており，その後の遺伝的演算にも同様の方法を用いることで，GA における探索が効率的に行われることが期待される．実際の病院で使用されている看護婦勤務表及び制約条件を使用し，本手法により制約条件を全て満たす染色体が，自動で生成されることを示す．

2　スケジューリングにおける制約条件

看護婦の勤務表は，毎月婦長によって案が作成され，係長と主任によりチェックが行われた後，病棟の看護婦全員に公開される．公開された勤務表は希望修正が加えられた後，正式に決定される．看護婦は，管理職である婦長，係長，主任の他に，ベテラン (A ランク)，中堅 (B ランク)，新人 (C ランク) の 3 つのランクに分けられている．表 1 に，実際の病院における 1 日の勤務体制と，それぞれの勤務時間を示す．勤務表を作成するためには，以下のような複数の絶対条件 (労働基準法や労働組合などにより定められたもので，勤務表において必ず満たされていなければならない) があり，1 日の勤務人数と以下の条件を全て満たさなければならない．

条件 1　リーダは必ず A グループから選ぶ
条件 2　夜勤 (準夜勤・深夜勤) においては，少なくとも 1 人は A または B グループから選び，同じグループから 2 人は選ばない
条件 3　夜勤は 1ヵ月に 8 回以下でなくてはならない
条件 4　必ず週 1 回は休みを入れる
条件 5　1ヵ月に休みを土，日，祝日の数だけ入れなければならない
条件 6　深夜勤の次の日は，日勤，早出，遅出を入れてはならない

ただし，本稿においては，上の条件における 1 週間は月曜日から始まるものとし，その月の第 1 週と最後の週においては，その週が 4 日以上ある場合は 1 週とみなすものとする．また，前の月の最後の週について，休みが入っているかどうかの情報は持っており，その週に休みが入っていれば，その月の第 1 週に休みを入れる必要はない (条件 4)．

表 1: 勤務体制

勤務の種類	人数	時間
日勤リーダ	1	8:30 ~ 17:00
日勤	5(4)以上	
早出	1	8:00 ~ 14:30
遅出	1	13:00 ~ 21:00
準夜勤	2	17:00 ~ 24:00
深夜勤	2	0:00 ~ 8:30

* 日勤の( )内は休日時

3　染色体へのコーディング

本稿では，2. で述べたすべての絶対条件を満たしながらコーディングを行う．看護婦の人数は，実際のある病院における例に基づき，A ランクが 5 人，B ランクが 5 人，C ランクが 6 人と，婦長以外の管理職である係長と主任を合わせた計 18 人とした．また，係長，主任は新人看護婦や学生の指導を行うため，勤務は臨時の場合を除き，優先的に日勤とする．以下にコーディング方法を示す．なお，以下で“勤務”，“日”，“看護婦”などはすべてランダムに選択するものとする．

3.1　第 1 段階

図 1 に，本手法における処理の流れを示す．まずコーディングにおける第 1 段階の処理として，選ばれた日ごとに，1 日の最低勤務人数分だけ，ランダムに勤務を入れていく (残りの部分は空きにしておく)(図 2)．この時，条件 1・2 を満足するようにリーダは A グループから選び，深夜・準夜に関しては，それぞれ異なったグループから 2 人を選ぶ．図 3 に，第 1 段階後の勤務表の例を示す．なお，図中において，“R” はリーダ，“日” は日勤，“早” は早出，“遅” は遅出，“準” は準夜勤，“深” は深夜勤であるものとし，空いているところは “空” で表している．

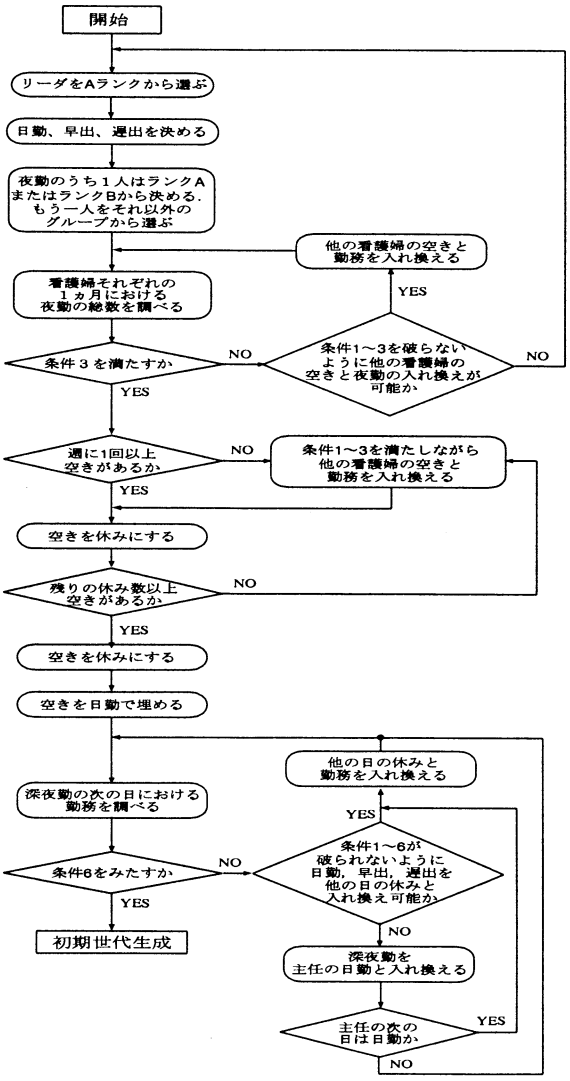


図 1: コーディングの流れ

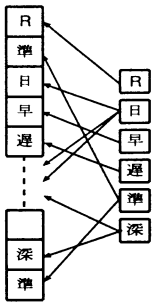


図 2: 第 1 段階

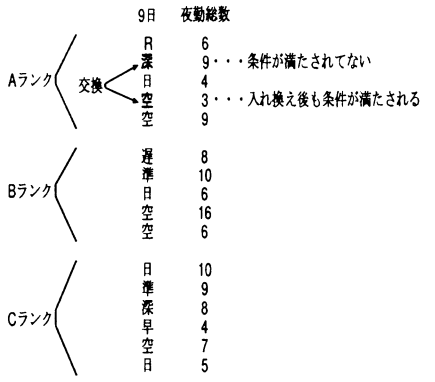
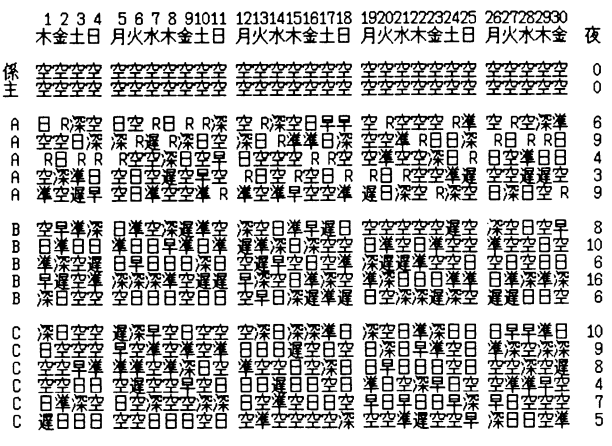


図 4: 条件 2 における勤務の交換 (第 2 段階)

3.2 第 2 段階

次に第 2 段階として，条件 3 を満足するように勤務の入れ換えを行う．各看護婦に対し，1ヵ月の総夜勤数が 9 回以上であれば，入れ換え先の看護婦を選択し，その看護婦の夜勤数が 7 日以下であり，かつその日が夜勤でなく，条件 2 を破らなければ，その日における勤務を入れ換える．図 4 に，図 3 に示した勤務表に対する第 2 段階での勤務交換の例を示す．以下，勤務の入れ換えにおいて各看護婦は，そのランクとランク内における行番号により表現するものとする．例えば，A ランクであり，かつ一番上段に位置する看護婦を A-1 と呼ぶ．図 3 中の看護婦 (A-2) は 1ヵ月における夜勤の総数が 9 回であり，条件 3 を満たしていない．そこで，9 日における看護婦 (A-2) の深夜勤と看護婦 (A-4) の空きを入れ換える．これにより，看護婦 (A-2) についての夜勤の総数は 8 となり，条件 1〜3 を満たしながら勤務交換が行われたことになる．図 3 の勤務表に対して第 2 段階の処理を行った結果を図 5 に示す．



	1 2 3 4	5 6 7 8 9 10 11	12 13 14 15 16 17 18	19 20 21 22 23 24 25	26 27 28 29 30	
	木金土日	月火水木金土日	月火水木金土日	月火水木金土日	月火水木金	夜
係	空空空空	空空空空空空空	空空空空空空空	空空空空空空空	空空空空空	0
主	空空空空	空空空空空空空	空空空空空空空	空空空空空空空	空空空空空	0
A	日 R深空	日深 R日 R R深	空 R深空日深早	空 R空空空 R準	空 R空深準	8
A	空空日深	深 R遅 R空日空	深日 R準準日深	空空準 R日日深	R日 R R日	8
A	R日 R R	R空空深日空準	日深空空 R R空	空準空空深日 R	日準準日深	8
A	空深準日	空日空遅深早空	R日空 R空日 R	R日 R空空準遅	空空遅遅空	4
A	準空遅早	空日準空空準 R	準空準早空空準	遅日深空 R早空	日深日空 R	8
B	空早準深	日準空深遅準空	深空日準早遅日	空空空空空遅空	深空日空早	8
B	日準日日	空日日早準日早	遅準深日深空空	日準空日準空空	準空空日空	8
B	準深空遅	日早深日日深日	空遅早空準空準	深遅遅準空空日	空日空日日	8
B	早遅空準	深空日準空遅遅	早空空日日早空	準深日日日準遅	日空深日日	8
B	深日空空	準日日日空日日	空早日深遅準遅	日空深深遅深空	遅遅日準空	8
C	深日空空	遅深早空日空空	空深日深日準日	深空日準早日日	日早早準日	8
C	日空空空	早空準空準空準	日日日遅空日空	日深日早準空日	準深空早深	8
C	空空早準	準準空準深日空	準空空日空深日	日早日日日空日	空空深空遅	8
C	空空日日	空遅空空早空日	日日遅日日深空	準日空深深日空	空準準深空	7
C	日準深空	日空深空空深深	日空準空日日空	早日早日日深深	早日空空空	8
C	遅日日日	空空日日日空日	空準空空空空深	空空準遅空空早	深日日空準	5

図 5: 第 2 段階後の勤務表

3.3 第 3 段階

次に第 3 段階として，各看護婦の“空”に対し，条件 4・5 を満たすように休みを入れていく．まず，条件 4 を満足させるために，選ばれた看護婦において各週ごとの空いている日の数を調べる．その週に 1 日以上“空”の日があれば，その中の 1 日を休みとする．例えば図 5 において，看護婦 (B-5) の第 3 週は，12 日が空きとなっているため，この部分は休みに置き換えられる．条件 4 が満たされるように，置き換えが行われた後，条件 5 の数だけ，残っている“空”を休みとする．これらの置き換え処理において，その週，または月内に，必要な数の“空”がない場合においては，条件 1〜3 を破らない範囲内で他の看護婦の“空”と勤務を交換する．すべての看護婦の休みを入れた後，残りの“空”を日勤に変える．図 6 に，図 5 の勤務表に対して第 3 段階の処理を行った結果を示す．

	1 2 3 4	5 6 7 8 9 10 11	12 13 14 15 16 17 18	19 20 21 22 23 24 25	26 27 28 29 30	
	木金土日	月火水木金土日	月火水木金土日	月火水木金土日	月火水木金	夜
係	空空空空	空空空空空空空	空空空空空空空	空空空空空空空	空空空空空	0
主	空空空空	空空空空空空空	空空空空空空空	空空空空空空空	空空空空空	0
A	日 R深空	日空 R日 R R深	空 R深空日早早	空 R空空空 R準	空 R空深準	6
A	空空日深	深 R遅 R深日空	深日 R準準日深	空空空準 R日日深	R日 R R日	9
A	R日 R R	R空空深日空早	日空空空 R R空	空準空空深日 R	日空準日日	4
A	空深準日	空日空遅空早空	R日空 R空日 R	R日 R空空準遅	空空遅遅空	3
A	準空遅早	空日準空空準 R	準空準早空空準	遅日深空 R深空	日深日空 R	9
B	空早準深	日準空深遅準空	深空日準早遅日	空空空空空遅空	深空日空早	8
B	日準日日	準日日早準日準	遅準深日深空空	日準空日準空空	準空空日空	10
B	準深空遅	日早日日日深日	空遅早空日空準	深遅遅準空空日	空日空日日	6
B	早遅空準	深深深準空遅遅	早深空日準深空	準深日日日準遅	日準深深深	16
B	深日空空	空日日日空日日	空早日深遅準遅	日空深深遅深空	遅遅日日空	6
C	深日空空	遅深早空日空空	空深日深深準日	深空日準深日日	日早早準日	10
C	日空空空	早空準空準空準	日日日遅空日空	日深日早準空日	準深空深深	9
C	空空早準	準準空準深日空	準空空日空深日	日早日日日空日	空空深空遅	8
C	空空日日	空遅空空早空日	日日遅日日空日	準日空深早日空	空準準早空	4
C	日準深空	日空深空空深深	日空準空日日空	早日早日日早深	早日空空空	7
C	遅日日日	空空日日日空日	空準空空空空深	空空準遅空空早	深日日空準	5

図 3: 第 1 段階後の勤務表



図 6: 第 3 段階後の勤務表

3.4 第 4 段階

最後に第 4 段階として，条件 6 を満たしていない日勤・早出・遅出に対し，他の条件を考慮しながら，勤務の入れ換えを行う．ここではその日勤・早出・遅出を，他の日の休みと入れ換える．図 6 において，看護婦 (B-3) の 7 日，8 日は “深夜”，“日勤” となっており，条件 6 を満たさない勤務日程となっているため，28 日の休みとの入れ換え処理が行われている．この後，係長，主任に対し，土，日，祝日に休みを，その他の空きに日勤をそれぞれ入れる．この時，条件 6 を満たさない日程があれば，他の日の休みとの入れ換えを行う．

以上の方法により，作成された染色体の例を図 7 に示す．作成された染色体は，絶対条件 1〜6 をすべて満たしており，今後 GA における解の探索が，効率良く行われると考えられる．

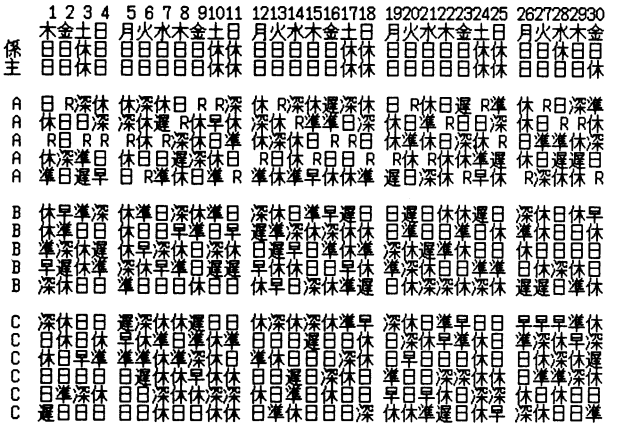


図 7: 生成された勤務表の例

4 おわりに

本稿では，看護婦スケジューリングにおける勤務表の自動作成を目的として，GA を用いるための染色体へのコーディング方法について，制約条件をあらかじめ取り入れたコーディング法を提案した．実際の病院で使用されている看護婦勤務表及び制約条件を使用し，本手法により，与えられた制約条件をすべて満たす染色体が，初期世代において自動で生成されることを示した．今後の課題として，遺伝的演算におけるこれら制約条件の取り入れ方の検討，及びそれらを用いた GA の本問題に対する適用などがあげられる．

参考文献

[1] 山村雅幸，小林重信 他：“遺伝的アルゴリズムにおけるナーススケジューリング”，北野宏明著．遺伝的アルゴリズム (2)，pp.89-125, 1995

[2] 井上武志，古橋武，藤井誠，前田宏，高羽実：“進化的計算を用いたインタラクティブシステムによる看護婦勤務表作成支援システムの開発”，第 15 回ファジィシステムシンポジウム，pp.385-388，1999

問い合わせ先

〒 514-8507　三重県 津市 上浜町 1515
三重大学大学 工学部
電気電子工学科 情報処理研究室
川中 普晴
TEL (059)231-9737
FAX (059)231-9737
E-mail kawanaka@ip.elec.mie-u.ac.jp

FD1−1

ファジィ多目的2レベル計画問題に対する主分解法による対話型意思決定
Interactive Decision Making for Fuzzy Multiobjective 2-Level Programming Problems Based on a Primal Decomposition Method

矢野均 (Hitoshi YANO)
名古屋市立大学人文社会学部 (School of Humanities and Social Sciences, Nagoya City University)

Abstract : In this paper, we propose an interactive algorithm for multiobjective 2-level programming problems with block angular structures where the leader and the follower work together to seek their interests.

1 はじめに

本論文では、角型構造 [2] を有するファジィ多目的2-レベル計画問題 [1] に対して、主分解法 [2] に基づく意思決定手法を提案する。提案する手法では、上下関係にある二人の意思決定者のそれぞれの多目的関数に対するファジィ目標をメンバシップ関数で規定した後、上位レベル意思決定者が、自身のメンバシップ関数に対する要求 (decision powers [1]) を主観的に設定する。下位レベル意思決定者は、上位レベル意思決定者の設定した (decision powers) に対応するファジィ多目的計画問題を定式化し、満足解の候補を求める。この候補に対して、上位レベル意思決定者は、自身のメンバシップ関数値のみならず上位・下位レベル意思決定者間のバランス (autonomy level [1]) をも考慮して、対話を終了するかあるいは要求を更新するかを決定する。このような対話過程を通じて、最終的には各意思決定者の選好構造のみならず上位・下位レベル意思決定者の階層構造をも反映した満足解が導出される。

2 多目的2レベル計画問題の定式化

本論文では、上位および下位レベルの意思決定者が相競合する多目的関数を有し、しかも、各目的関数および結合制約式が決定変数に関して分離可能な、ブロック構造を有する大規模多目的2レベル非線形計画問題 (Problem 1) について考察する。

上位レベル意思決定者の多目的関数：

$$\min \boldsymbol{f}_1(\boldsymbol{x}) = (f_{11}(\boldsymbol{x}), f_{12}(\boldsymbol{x}), \cdots, f_{1k_1}(\boldsymbol{x})) \tag{1}$$

下位レベル意思決定者の多目的関数：

$$\min \boldsymbol{f}_2(\boldsymbol{x}) = (f_{21}(\boldsymbol{x}), f_{22}(\boldsymbol{x}), \cdots, f_{2k_2}(\boldsymbol{x})) \tag{2}$$

結合制約式：

$$g_j(\boldsymbol{x}) \leq 0, \quad j = 1, \cdots, m \tag{3}$$

各部分システムに関する制約式：

$$\boldsymbol{h}_\ell(\boldsymbol{x}_\ell) \leq \boldsymbol{0}, \quad \ell = 1, \cdots, p \tag{4}$$

ただし、$\boldsymbol{x}_\ell \in R^{n_\ell}, \ell = 1, \cdots, p, \boldsymbol{x} = (\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2, \cdots, \boldsymbol{x}_p) \in R^n$.

ここで、各目的関数および結合制約関数は、部分決定変数ベクトル $\boldsymbol{x}_\ell, \ell = 1, \cdots, p$ に関して分離可能 [2] であると仮定する。

$$f_{1i}(\boldsymbol{x}) = \sum_{\ell=1}^{p} f_{1i\ell}(\boldsymbol{x}_\ell) \quad i = 1, \cdots, k_1 \tag{5}$$

$$f_{2i}(\boldsymbol{x}) = \sum_{\ell=1}^{p} f_{2i\ell}(\boldsymbol{x}_\ell) \quad i = 1, \cdots, k_2 \tag{6}$$

$$g_j(\boldsymbol{x}) = \sum_{\ell=1}^{p} g_{j\ell}(\boldsymbol{x}_\ell) \quad j = 1, \cdots, m \tag{7}$$

以下において、(Problem 1) の実行可能集合を X で表す。

(Problem 1) において、各意思決定者は各目的関数に対してファジィ目標を持ち、各ファジィ目標は，線形メンバシップ関数により規定することができるものとする。

$$\mu_{1i}(f_{1i}(\boldsymbol{x})) = \begin{cases} 1 & f_{1i}(\boldsymbol{x}) \leq f_{1i}^1 \\ \dfrac{f_{1i}(\boldsymbol{x}) - f_{1i}^0}{f_{1i}^1 - f_{1i}^0} & f_{1i}^1 \leq f_{1i}(\boldsymbol{x}) \leq f_{1i}^0 \\ 0 & f_{1i}(\boldsymbol{x}) \geq f_{1i}^0 \end{cases} \quad i = 1, \cdots, k_1 \tag{8}$$

$$\mu_{2i}(f_{2i}(\boldsymbol{x})) = \begin{cases} 1 & f_{2i}(\boldsymbol{x}) \leq f_{2i}^1 \\ \dfrac{f_{2i}(\boldsymbol{x}) - f_{2i}^0}{f_{2i}^1 - f_{2i}^0} & f_{2i}^1 \leq f_{2i}(\boldsymbol{x}) \leq f_{2i}^0 \\ 0 & f_{2i}(\boldsymbol{x}) \geq f_{2i}^0 \end{cases} \quad i = 1, \cdots, k_2 \tag{9}$$

ここで、もし、上位レベルの意思決定者が、各メンバシップ関数に対する要求 (decision powers) $\boldsymbol{\alpha}_1 = (\alpha_{11}, \cdots, \alpha_{1k_1})$ を主観的に設定すれば、(Problem 1) は、下位レベル意思決定者の多目的計画問題に帰着される。

$$\max_{\boldsymbol{x} \in X(\boldsymbol{\alpha}_1)} (\mu_{21}(f_{21}(\boldsymbol{x})), \cdots, \mu_{2k_2}(f_{2k_2}(\boldsymbol{x}))) \tag{10}$$

$$X(\boldsymbol{\alpha}_1) = \{\boldsymbol{x} \in X \mid \alpha_{1i} - \mu_{1i}(f_{1i}(\boldsymbol{x})) \leq 0, i = 1, \cdots, k_1\}$$

ここで、下位レベル意思決定者は各メンバシップ関数を統合するオペレータとして和オペレータを採用するものとすれば、結局、満足解の候補は次の大規模計画問題 (Problem 2)[2] を解くことにより得られる。

$$\max_{\boldsymbol{x} \in X(\boldsymbol{\alpha}_1)} \left\{ \sum_{i=1}^{k_2} \mu_{2i}(f_{2i}(\boldsymbol{x})) \right\} \tag{11}$$

3 主分解法

本節では、(Problem 2) を効率的に解くための主分解法に基づくアルゴリズムを提案する。

まず、仮定より、各意思決定者のすべてのメンバシップ関数は線形関数であることから、以下のように表現することができる。

$$\mu_{qi}(f_{qi}(\boldsymbol{x})) = -\sum_{\ell=1}^{p}\Big\{A_{qi}f_{qi\ell}(\boldsymbol{x}_{i\ell})\Big\} + C_q, \quad i=1,\cdots,k_q, q=1,2 \tag{12}$$

$$A_{qi} = \frac{1}{f_{qi}^0 - f_{qi}^1} > 0,\ C_q = \sum_{i=1}^{k_q}\frac{f_{qi}^0}{f_{qi}^0 - f_{qi}^1} \tag{13}$$

従って、(Problem 2) は、部分決定変数ベクトル $\boldsymbol{x}_\ell, \ell = 1,\cdots,p$ を用いて次式 (Problem 3) のように表現できる。

$$\min_{(\boldsymbol{x}_1,\cdots,\boldsymbol{x}_p)\in S_1\times\cdots\times S_p} \sum_{\ell=1}^{p}\Big\{\sum_{i=1}^{k_2}A_{2i}f_{2i\ell}(\boldsymbol{x}_\ell)\Big\} \tag{14}$$

subject to

$$\sum_{\ell=1}^{p} g_{j\ell}(\boldsymbol{x}_\ell) \le 0, \quad j=1,\cdots,m \tag{15}$$

$$\sum_{\ell=1}^{p} A_{1i}f_{1i\ell}(\boldsymbol{x}_\ell) \le C_1 - \alpha_{1i}, \quad i=1,\cdots,k_1 \tag{16}$$

(Problem 3) に対して、もし、結合制約式の数 $(m+k_1)$ が部分システムの制約式 $\boldsymbol{h}_\ell(\boldsymbol{x}_\ell) \le \boldsymbol{0}, \ell = 1,\cdots,p$ の数 $\sum_{\ell=1}^{p} r_\ell$ よりも十分小さい場合には、もとの問題を部分問題に分割して取り扱う主分解法が数値計算上きわめて有効 [2] である。ここで、(Problem 3) の $(m+k_1)$ 個の結合制約式の左辺：

$$\boldsymbol{g}_\ell(\boldsymbol{x}_\ell) = (g_{1\ell}(\boldsymbol{x}_\ell),\cdots,g_{m\ell}(\boldsymbol{x}_\ell))^T \tag{17}$$

$$\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{f}_{1\ell}(\boldsymbol{x}_\ell) = (A_{11}f_{11\ell}(\boldsymbol{x}_\ell),\cdots,A_{1k_1}f_{1k_1\ell}(\boldsymbol{x}_\ell))^T \tag{18}$$

に対する資源割り当てベクトル [2] を

$$\boldsymbol{y}_\ell = (\boldsymbol{y}_\ell^g \mid \boldsymbol{y}_\ell^{f_1})^T = (y_{1\ell},\cdots,y_{m\ell} \mid y_{(m+1)\ell},\cdots,y_{m+k_1\ell})^T \tag{19}$$

と表すと、(Problem 3) は、資源割り当てベクトル $\boldsymbol{y}_\ell$ をパラメータとする p 個の部分問題に分解できる。p 個の部分問題を繰り返し解くことにより最終的に (Problem 3) の最適解を求める、主分解法に基づくアルゴリズムについては、紙面の都合上省略する。

4 対話型意思決定アルゴリズム

上位レベル意思決定者によって設定されたメンバシップ関数に対する要求 (decision powers) に対応して、前節の主分解法に基づくアルゴリズムを適用することにより、効率的に満足解の候補 $\boldsymbol{x}^*$ を求めることができる。満足解の候補 $\boldsymbol{x}^*$ に対して、上位レベル意思決定者は、現在のメンバシップ関数値 $\mu_{1i}(f_{1i}(\boldsymbol{x}^*)), i=1,\cdots,k_1$ のみならず、下位レベル意思決定者の満足度とのバランス (autonomy level) にも配慮して、最終的な満足解を決定するものする。ここでは、上位レベル意思決定者の満足度と下位レベル意思決定者の満足度のバランスの指標を、以下のように定義しよう。

$$\delta(\boldsymbol{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{k_2}\mu_{2i}(f_{2i}(\boldsymbol{x}))/k_2}{\sum_{i=1}^{k_1}\mu_{1i}(f_{1i}(\boldsymbol{x}))/k_1} \tag{20}$$

この定義から明らかなように、$\delta(\boldsymbol{x})$ の値が小さいほど上位レベルの満足度が相対的に大きく、逆に、$\delta(\boldsymbol{x})$ の値が大きいほど上位レベルの満足度が相対的に小さくなる。

以上より、(Problem 1) に対して、主分解法に基づく対話型意思決定アルゴリズムを以下のように構成することができる。

Step 1: 上位・下位レベル意思決定者は、各目的関数に対する線形メンバシップ関数を主観的に設定する。また、上位レベル意思決定者は、各メンバシップ関数に対する初期要求値 $\alpha_{1i}, i=1,\cdots,k_1$ を設定する。

Step 2: (Problem 3) に対して、主分解アルゴリズムを適用することにより、最適解（満足解の候補）$\boldsymbol{x}^*$ を求める。同時にバランスの指標 $\delta(\boldsymbol{x}^*)$ を計算する。

Step 3: もし、上位レベル意思決定者がメンバシップ関数の現在値 $\mu_{1i}(f_{1i}(\boldsymbol{x}^*)), i=1,\cdots,k_1$ のみならずバランスの指標 $\delta(\boldsymbol{x}^*)$ にも満足ならば終了する。そうでなければ、上位レベル意思決定者は各メンバシップ関数に対する要求値 $\alpha_{1i}, i=1,\cdots,k_1$ を更新して Step 2 へもどる。

本稿で提案したアルゴリズムを、以下の数値例に適用して検討したが詳細は省略する。この数値例において、$f_{11}(\boldsymbol{x})$ は上位レベル意思決定者の目的関数、$f_{21}(\boldsymbol{x})$ と $f_{22}(\boldsymbol{x})$ は下位レベル意思決定者の目的関数を表す。また、部分決定変数ベクトルは、それぞれ、$\boldsymbol{x}_1 = (x_{11}, x_{12})$, $\boldsymbol{x}_2 = (x_{21}, x_{22})$ とする。

$$\min f_{11} = (x_{11}-8)^2 + (x_{12}-12)^2 + (x_{21}-30)^2 + (x_{22}-10)^2$$

$$\min f_{21} = (x_{11}-10)^2 + (x_{12}-7)^2 + (x_{21}-8)^2 + (x_{22}-25)^2$$

$$\min f_{22} = (x_{11}-35)^2 + (x_{12}-10)^2 + (x_{21}-12)^2 + (x_{22}-7)^2$$

$$g_1 = x_{11}/3 + x_{12}/10 + x_{21}/7 + x_{22}/8 \le 1$$

$$g_2 = x_{11}/15 + x_{12}/12 + x_{21}/5 + x_{22}/10 \le 1$$

$$g_3 = x_{11}/10 + x_{12}/12 + x_{21}/8 + x_{22}/4 \le 1$$

文　献

(1) Lai, Y.-J.: "Hierarchical Optimization : A Satisfactory Solution", Fuzzy Sets and Systems, **77**, pp.321-335 (1996).

(2) Lasdon, L.S.（志水清孝訳）："大規模システムの最適化理論"，日刊工業新聞社 (1973).

問合わせ先：467-8501　名古屋市立大学人文社会学部
矢野均（yano@hum.nagoya-cu.ac.jp）

FD1−2

ショケ積分と組み合わされた多目的意思決定
−薬学臨床判断分析システムへの適応−
Multi-objective Decision Making Combined with Choquet Integral
-Application to a pharmaceutical decision support system-

近藤 智大、田崎 栄一郎
Tomohiro Kondo,Eiichoro Tazaki

桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control & Systems Engineering,Toin University of Yokohama

Abstract:Using the Choquet Integlal,we design a decision support system for multiobjective decision making problems. The weight for each objective having a different evaluation measure is obtained in accordance with the extended Fuzzy Structural Modeling (FSM).From the minimum and maximum values,fuzzy measures are identified by Genetic Algorithm(GA). An alternative is selected from the objective having the maximum weight. To inspect the effectiveness of the proposed method we apply it to a practical pharmaceutical decision making problem.

１．はじめに

近年、医療診断や治療薬の選択等の意思決定問題は、考慮する目的の構造が複雑化しており、その扱いは非常に困難である。

意思決定を行う際、確率の推定や目的の評価を確実に行う必要があるが、薬剤の副作用の出現率などのように確率が特定できない場合が多く、不確実性が含まれている。また、実際の意思決定においては、複数の目的を考慮しなければならないが、これらの目的は、目的の中にさらに複数の属性が含まれている。しかし、考慮する目的が階層的構造をなし、各階層において多目的である場合、意思決定者が単純に各目的の評価値の荷重和をもって総合評価することによって、妥当な結果を得ることは一般に困難である。即ち、評価構造の非線形性が問題となる。

そこで本研究では、これらのことを考慮し、ショケ積分と組み合わされた多目的意思決定支援システムについて提案し、その手法を、C型慢性肝炎に対する治療薬選択問題に適応した、薬学臨床判断分析システムを構築し、その妥当性を検証する。

２．ショケ積分と組み合わされた意思決定手法

本研究て提案した意思決定手法を順を追って説明する。

２．１ 目的設定

意思決定を行う際に何を考慮するのかという、目的の設定を行う。本研究では、目的は、最上位目的−目的−属性という階層的構造を持つものとして設定する。それぞれの最上位目的の中には、複数の目的が存在し、その目的の中に更に複数の属性が含まれている。

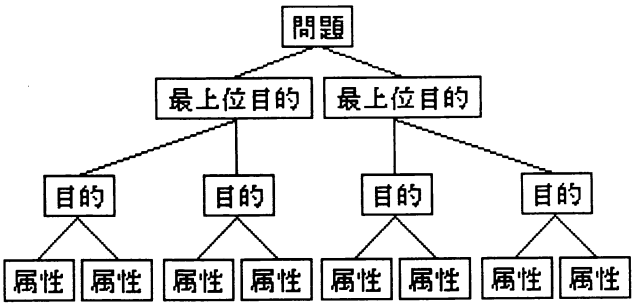


図１．目的設定

２．２ 個別的評価

多数存在する目的の内の二つを取り出し、一方の目的Aを８０ポイント重要であるとしたとき、もう一方の目的Bがどれだけ重要かを評価する。このポイントをＸｓとする。

次にBの目的がＸｓポイント重要であるとしたとき、Aの目的がどれだけ重要かを評価する。これをＸｊとする。

これらの手順を全ての組み合わせに対して行い、それぞれの目的に対する重要性を評価する。

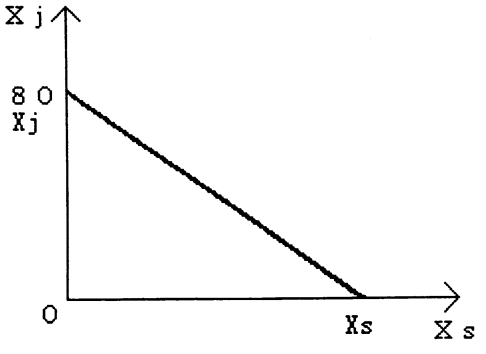


図２．個別的評価

２．３ 重視度の決定

各目的ごとに個別的評価によって得られたＸｓ、Ｘｊのポイントから無差別曲線を構成し、形成される三角形の面積を求める。そして、その面積比から、各目的の従属関係を表す行列 A の要素 a_{ij}(i=1,2,3,⋯,n,j=1,2,3,⋯,n)(i<j の部分)を求める。

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

i=j 部分の要素は、同一要因間の比較となり、その値は、０を取る。また、評価実験の負荷を軽減するため、i>j 部分の要素は、菅野のλ補集合に基づき、次式より求める。

$$a_{ij}=\frac{1-a_{ji}}{1+\lambda a_{ji}},\ i>j,\ -1<\lambda<\infty \quad \cdots(1)$$

そして、これにより得られた従属行列の最大固有値に対する固有ベクトルを求める。これより、各目的の重視度を決定する。

２．４ 目的間の統合

通常、目的間の統合においては、加法性を必要とするような総合評価ではなく、より主観を反映できる評価方法の採用を考える。

そこで階層的構造を持つ目的に対して、ファジィ測度とショケ積分により各目的関数を統合し、各目的における選択肢の総合評価値を得る。ショケ積分は、次式で表される。

$$(c)\int_X f du=\sum_{i=1}^{n} g(x_i)(h(x_i)-h(x_{i-1})) \quad \cdots(2)$$

i=1,2,3,⋯,m　(m：目的の数)
$g(x_i)$ ： ファジィ測度
$h(x_i)$ ： i 番目の目的の評価値

２．５ ファジィ測度の決定

ファジィ測度は、２．３節で述べた各目的の重視度より、λ－ファジィ測度を与える関係式によって決定するものとする。λ－ファジィ測度は、次式で表される。

$g(x_1 \cup x_2)=g(x_1)+g(x_2)+\lambda g(x_1)g(x_2) \quad \cdots(3)$
$g(xi)=wi\beta$　wi：i 番目の目的の重視度、β ：定数
$g: 2^X \rightarrow [0,1]$：ファジィ測度
$-1<\lambda<\infty$
$X=\{x_1,x_2,x_3,\cdots,x_m\}$
ただし、$g(\phi)=0, g(X)=1$

２．６ 最良の選択肢の決定

最上位目的間に対しても、ファジイ測度とショケ積分により、各選択肢の総合評価を求める。しかし、最上位目的に関しては、目的間の評価測度が大きく異なることが考えられ、それだけ主観が強く作用すると考えられるので、広域的に意思決定者の評価の曖昧性を考慮して測度を決定する必要がある。そこで、最上位目的におけるファジィ測度の決定においては、ＧＡ探索を導入し、測度を決定する。

まず、個別的評価を行い、重視度に幅を持たせ、その最大、最小が求まるように無差別曲線を構成する。そして、ＧＡの探索により、この重視度の幅を収束させ、その収束した値からファジィ測度を決定する。

そして、これにより得られたファジィ測度と、最上位目的の選択肢の総合評価値の値から、ショケ積分により、問題における最終的な総合評価値を決定する。

３．Ｃ型慢性肝炎における薬剤選択への適応

本手法を、Ｃ型慢性肝炎患者の治療薬(インターフェロン)の選択を行う、薬学臨床判断分析に適用させ、その妥当性を検証する。

選択肢は、インターフェロンの中から５種類、さらにそれらの代表的な投与方法から各３種ずつの合計１５種類とし、考慮する目的としては、最上位目的として、副作用、効果、費用を背艇する。そして、それに付随する目的として、副作用については、血液症状、循環器症状、呼吸器症状などを設定し、効果については、著効、有効などを設定する。費用については、薬剤費を設定する。

次に、２．３節で述べた手法により、各目的の重視度を求めた結果、以下のようになった。

表１．各目的の重視度

最上位目的	目的	属性	重視度
副作用	全身症状		0.2
		発熱	0.17
		全身倦怠	0.39
		頭痛	0.9
	精神神経症状		0.23
		思考異常	0.26
		不眠	0.5
		知覚異常	0.82

	血液症状		0.25
		血小板減	0.36
		顆粒球減	0.65
		貧血	0.67
	過敏症状		0.33
		発疹	0.26
		掻痒感	0.82
		蕁麻疹	0.51
	腎臓症状		0.22
		蛋白尿	0.17
		BUN	0.9
		血尿	0.39
	循環器症状		0.26
		動悸	0.12
		四肢浮腫	0.99
	消化器症状		0.23
		下痢・便	0.15
		悪心・嘔	0.92
		口内炎	0.36
	皮膚症状		0.27
		脱毛	0.3
		湿疹	0.77
		乾癬	0.56
	神経筋肉症状		0.45
		しびれ	0.25
		関節痛	0.49
		筋肉痛	0.83
	呼吸器症状		0.24
		気管支炎	0.12
		せき	0.99
	電解質・代謝症状		0.38
		低K血症	0.14
		甲状腺機能異常	0.93
		血糖値	0.35
	眼症状		0.3
		眼痛	0.12
		眼底出血	0.99
効果	著効		0.65
		HCV-RNA陰性化	0.99
		GPT陰性化	0.12
	有効		0.52
		HCV-RNA陰性化	0.99
		GPT陰性化	0.12
	不変		0.43
		HCV-RNA陰性化	0.99
		GPT陰性化	0.12
	悪化		0.36
		HCV-RNA陰性化	0.99
		GPT陰性化	0.12

2．6節で述べた手法により、最上位目的の重視度を求めた結果、副作用は、0.6994、効果は、0.5152、費用は、0.2671となった。

これらの重視度からファジィ測度を求め、このファジィ測度と各選択肢の総合評価値から、ショケ積分により問題における各選択肢の最終的な総合評価値を求めた結果、フェロンのII群の最終的な総合評価値が最も高く、フェロンのII群が最良の選択肢となった。

4．患者の個別性への対応

考慮する目的においては、患者に個別に考慮しなければならない個別性があると考えられる。そこで、医師により患者の個別性が特に問題となる目的を検討して頂き、その目的に対する重視度にどれだけの変化を加えるか決定する。これにより選択肢の個別性を考慮する。

今回の場合、患者の状態から、血小板減少、顆粒球減少、発疹、蛋白尿、ＢＵＮ、血糖値の重視度を通常値より１５０%上げ、気管支炎、せきを２００%上げることにより、個別性を考慮した。その結果、個別性を考慮した重視度は、以下のようになった。

表２．個別性を考慮した重視度

最上位目的	目的	属性	重視度
副作用	全身症状		0.19
		発熱	0.87
		全身倦怠	0.3
		頭痛	0.38
	精神神経症状		0.27
		思考異常	0.82
		不眠	0.4
		知覚異常	0.4
	血液症状		0.39
		血小板減	0.93
		顆粒球減	1.065
		貧血	0.34
	過敏症状		0.27
		発疹	1.23
		掻痒感	0.405
		蕁麻疹	0.765
	腎臓症状		0.26
		蛋白尿	1.155
		BUN	0.6

		血尿	0.5
	循環器症状		0.3
		動悸	0.99
		四肢浮腫	0.12
	消化器症状		0.22
		下痢・便	0.84
		悪心・嘔	0.4
		口内炎	0.36
	皮膚症状		0.26
		脱毛	0.72
		湿疹	0.39
		乾癬	0.58
	神経筋肉症状		0.36
		しびれ	0.57
		関節痛	0.76
		筋肉痛	0.31
	呼吸器症状		0.31
		気管支炎	1.98
		せき	0.24
	電解質・代謝症状		0.31
		低K血症	0.63
		甲状腺機能異常	0.35
		血糖値	1.035
	眼症状		0.27
		眼痛	0.12
		眼底出血	0.99
効果	著効		0.65
		HCV-RNA陰性化	0.99
		GPT陰性化	0.12
	有効		0.52
		HCV-RNA陰性化	0.99
		GPT陰性化	0.12
	不変		0.43
		HCV-RNA陰性化	0.99
		GPT陰性化	0.12
	悪化		0.36
		HCV-RNA陰性化	0.99
		GPT陰性化	0.12

また、個別性を考慮した場合の最重要目的の重視度を、2．6節で述べた手法により、同様に求めた結果、副作用は、0.871、効果は、0.389、費用は、0.267となった。

また、重視度からファジィ測度を求め、このファジィ測度と各選択肢の総合評価値から、ショケ積分により同様に問題における各選択肢の最終的な総合評価値を求めた結果、スミフェロンのII群の最終的な総合評価値が最も高く、スミフェロンのII群が最良の選択肢となった。

5．結論

ショケ積分を用いた多目的意思決定手法を、C型慢性肝炎患者に対する治療薬(インターフェロン)選択を行う薬学臨床判断分析に適応させ、その妥当性を検証した。

その結果、考慮する目的が複数存在する場合の目的間の統合に、ショケ積分を用いることにより、すべての目的の重要性や各選択肢の評価を考慮にいれ、問題における最良の選択肢の決定を行なうことができた。また、ショケ積分による選択肢の総合評価は、ファジィ測度の変化に応じて総合評価も変化するため、個別性を比較的容易に簡単に考慮することが可能となった。

本手法により得られた選択肢への評価は、専門家の意思との比較において妥当なものであると判断された。このことから、本手法は、ファジィ多目的意志決定支援に有効な手法の1つであるといえる。

参考文献

[1]Hirosi Wakasa,Eiichiro Tazaki:Interactive Support System for Fuzzy Structural Modeling (FSM) in Group Decision Making,Proc.1997 IEEE International Conference on System ,Man,and Cybernetics,Vol.4,pp3472-3477,1997

[2]若狭 浩,近藤 智大,田崎 栄一郎:遺伝的アルゴリズムと組み合わされた階層的多目的意思決定－複雑な臨床判断支援
システムへの適応－:第15回ファジィ・システム・シンポジウム講演論文集、pp109-110,1999

[3]若狭 浩, 近藤 智大, 田崎 栄一郎, 立野 和佳子, 井上 忠夫 : 多目的意思決定法による臨床判断分析の構築 -薬剤選択における個別性を考慮した総合判断分析システムへの適用-, 第18回医療情報連合大会論文集, pp.178-179, 1998

[4]高萩 栄一郎:ファジィ積分によるデータ検索法:第9回ファジィ・システム・シンポジウム講演論文集、pp221-224,1993

問い合わせ先

〒225-8502
神奈川県横浜市青葉区鉄町1614
桐蔭横浜大学 工学部 制御システム工学科
田崎 栄一郎
Tel:045-974-5070
Fax:045-978-1311
Email:tazaki@intlab.toin.ac.jp

FD1−3

トップダウン・ボトムアップ融合型意思決定システムの構築

Construction of Decision Making System Combined Top-down and Bottom-up Approach

○ 佐藤 雄一郎
Yuichiro SATO

前田 陽一郎
Yoichiro MAEDA

大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract — In this research, we aim to construct a flexible and adaptive decision making system which the top-down approach and the bottom-up approach are fused by refering, evaluating and revising together. It was confirmed the efficiency by performing the simulation of some problems which are difficult to solve by compter.

1 緒 言

昨今のコンピュータ技術の発展によりコンピュータは疑似的な知能を持つといったレベルまでやってきている。実際計算や記憶においては人間の能力を越えるまでになっている。しかしながらコンピュータにはまだ思考や推理など人間の能力に及ばない部分もある。その代表例が複雑なゲームである囲碁や将棋である [1]。

現在このような問題解決に用いられているアプローチはAIやファジィといったトップダウンアプローチや、GAやニューラルネットワークといったボトムアップアプローチの2つに大別される。トップダウンアプローチにおいては、河野らによるデータマイニング手法 [2] により知識を発見する研究や、野下らによる将棋・囲碁などゲームの研究 [3] がある。またボトムアップアプローチでは、石川らによるニューラルネットワークでの学習 [4]、畝見らによる強化学習 [5] や対話的学習法 [6] の研究などがある。しかしながら、いずれもどちらか一方のアプローチのみであり、そのため人間の各々の分野のエキスパートを越えるシステムはなかなか作り出すことができないのが現状である。

これらを人間の思考能力で考えるとトップダウンは人間の知識のことであり、ボトムアップは人間の学習能力に相当する。しかしながら人間はこれらのいずれかしか使わないということは無く、この2つを程良く使い分けながら思考しているはずである。このように考えると人間の思考に近づけるためには、このトップダウンとボトムアップの2つのアプローチをうまく組み合わせたシステムを作り上げることができれば、人間のような判断、思考を実現させることも可能ではないかと考えられる。

本研究では以上のことを踏まえ、トップダウンとボトムアップにわけて、それらを互いに影響させながら融合した意思決定システムを提案する。またそのシステムの有効性を問題に特化しないものであることを示すため、2種類のシミュレーションを行なった。まず「フットステップ」という思考ゲームを用いて切替型融合と重み付け融合を単独アプローチを含めた比較を行ない、さらに移動ロボットの障害物回避シミュレーションを用いてトップダウン・ボトムアップ双方にチューニングしあうシステムの検討を行なったので、その結果についても報告する。

2 融合型意思決定システムの提案

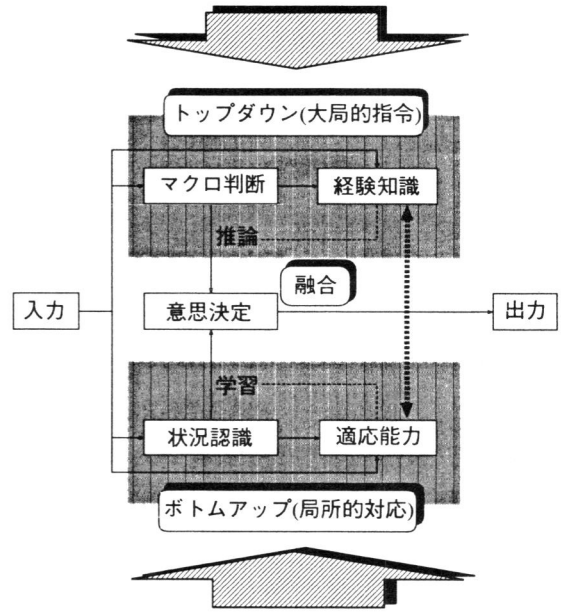


図 1: 提案システム

図1が本研究で提案するシステムである。トップダウン意思決定とは主にAI手法やファジィ理論を用い、過去の経験をもとによりマクロな総合判断で意思決定を行なう部分である。またボトムアップ意思決定とはGAやニューラルネットワーク等を用い、さまざまな状況に対する適応能力を学習により構築し、柔軟な認識・対応を行なう部分である。提案手法はこの2つの意思決定の長所を融合し、より人間の思考方法に近い意思決定システムの構築を目的としている。

2.1 トップダウン意思決定

本研究で使用するトップダウン意思決定は、データベースを用いて蓄積されたデータから次の事象を予測するものとする [2]。式 (1) はデータベースより対戦相手の行動を予測するものであり、$D_k(x)$ は状況 x において相手が行動 k をとった頻度である。また $X(x)$ はこの式より求まった次回の行動予測を示す。

$$X(x) = k \quad if\ maxD_k(x)\ [k = 0, 1, \cdots, n] \qquad (1)$$

2.2 ボトムアップ意思決定

ボトムアップ意思決定は進化戦略 (ES) を用いて状況判断に優れた個体を求める。ここで各遺伝子座には現在の状況の有利度合を実数で表している。ESは突然変異が主な操作であり、親個体に平均 0 の正規乱数を加えるため、以下の式 (2) で突然変異を行う。

$$x_i(t) = x_i(t-1) + N_n(0, \sigma^2(t-1)) \qquad (2)$$

ここで $x_i(k)$ は世代 kの状態 i の値であり、$N_n(0, \sigma^2(k-1))$ が平均 0・分散$\sigma^2(k-1)$ の正規乱数である。

2.3 融合システム

提案手法であるトップダウン・ボトムアップ融合システムでは常にこの 2 つの意思決定で行動を求め、状況に合わせ適切に融合するものである。従来のアプローチでは、この状況によりトップダウンかボトムアップかを切替・選択するだけのものであった。そこで本研究ではトップダウンとボトムアップを重み付け加算し、より人間に近い意思決定システムの提案を行なう。図2に従来手法と提案手法の融合メカニズムを示す。

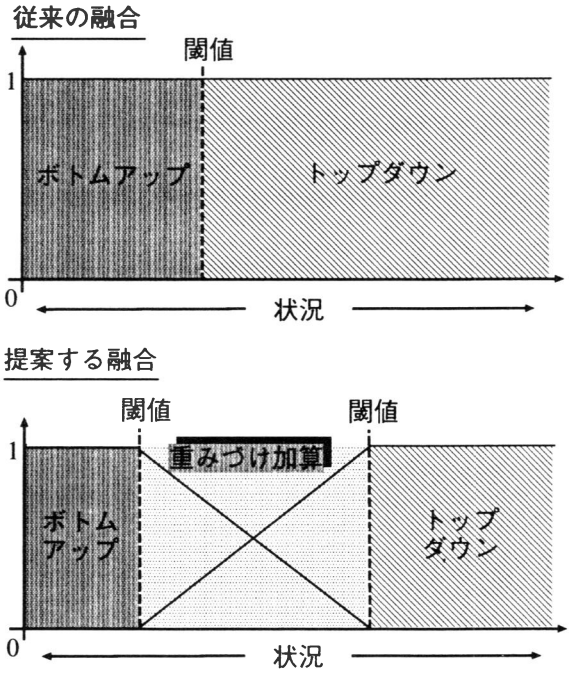


図 2: 従来手法と提案手法の融合メカニズム

しかしこれのみでは、トップダウン・ボトムアップ共に完全に独立したシステムであるため各々の出力に整合性がなく、柔軟な思考をするシステムとは言えない。そこで図3のようにトップダウン部とボトムアップ部どうしでチューニングをしあうことにより、各々の出力に整合性を持たせることを考える。またこれは図1における太い破線の部分に相当する。ここでは、トップダウンにおけるルール内のパラメータがボトムアップによりチューニングされる。またボトムアップで学習するべき範囲がトップダウンで決定されることにより効率的な学習ができるようになる。例えば行動をするときは基本的にトップダウンに依存し、その行動から状況判断能力をボトムアップで学習していくことにより、さらに柔軟な対応ができる意思決定システムを構築することができる。

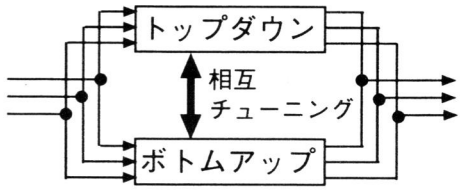


図 3: 2 手法間のチューニング

3 思考ゲームシミュレーション

本論文で提案した手法の有効性を検証するため、まず始めに思考ゲーム「フットステップ」を用いてシミュレーションを行なった。

3.1 思考ゲーム「フットステップ」

思考ゲーム「フットステップ」とはお互いの持点の範囲から任意の点数を出し合い、相手より大きい点数を何度出すかを競うものであり、次に相手の出す点数の予測と現在の状況判断が重要視されるゲームである。今回用いたルールは初期の持点を 50 点とし、相手より 3 度以上大きい点数を出せば勝利となるように設定した。またお互いの持点が無くなった場合は、相手より大きい数を出した回数が多い方を勝ちとし、それも同じ回数だった場合は引き分けとする。

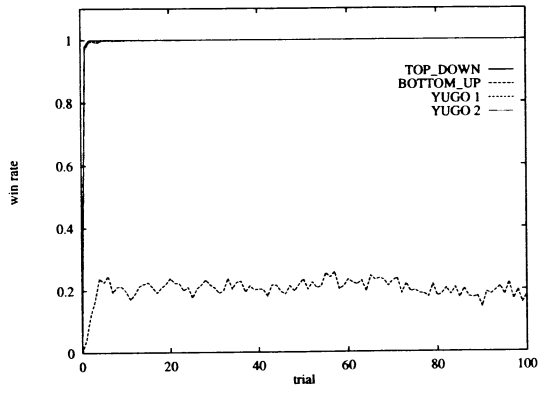
シミュレーションでは融合手法の有効性を示すため、相手にダミー戦略を用いてその対応を調べた。用いたダミー戦略は以下の通りである。

- All5 戦略
  常に 5 を出す戦略
- ランダム戦略
  毎回ランダムで出す数字を決める戦略
- しっぺがえし戦略
  最初のみ固定値 (今回は 1) を出すが、次からは前回相手の出した数字より 1 大きい数を出すという戦略

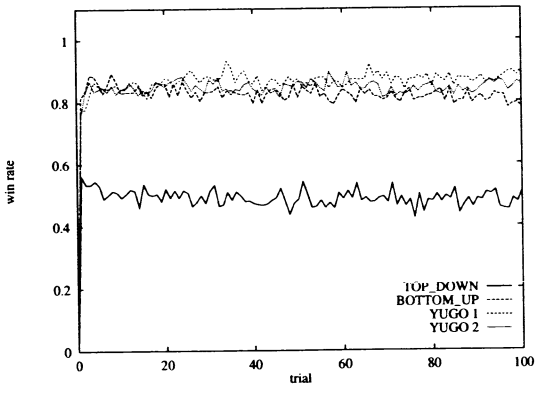
これらのダミー戦略に対し以下の従来手法の戦略と提案手法とで対戦させ、その結果を比較する。

- トップダウン戦略
  相手と自分の持点から相手の出してきた点数をデータベースに登録し、その値を元に自分の出す点数を決める戦略
- ボトムアップ戦略
  数十パターンのあらかじめ決められた行動の中から進化戦略で学習した状況判断を元に行動を決める戦略

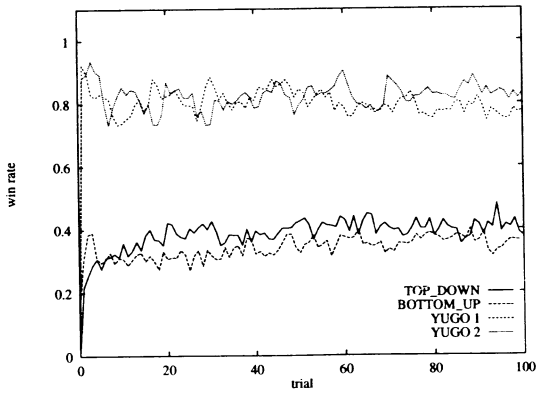
- 切替型融合戦略
  データベースに貯ったデータ量を閾値にし、その値によりトップダウンを使用するかボトムアップを使用するか、どちらかを決定する戦略
- 重み付け型融合戦略
  データベースに貯ったデータ量を閾値にし、その値によりトップダウンを使用するかボトムアップを使用するか決定するが、得られた値が閾値付近ならば両手法に重み付けをして融合する戦略



(a) 対 All5 戦略



(b) 対ランダム戦略



(c) 対しっぺがえし戦略

図 4: 思考ゲームシミュレーション結果

3.2 シミュレーション結果

図 4(a)-(c) がシミュレーション結果のグラフである。グラフはトップダウンのみ (TOP_DOWN)、ボトムアップのみ (BOTTOM_UP)、切替型融合 (YUGO1)、重み付け融合 (YUGO2) のそれぞれについて 3 つのダミー戦略と対戦した時の 100 世代 (横軸) における 30 対戦を 20 回繰り返した時の平均勝率 (縦軸) を示している。

トップダウンのみはランダム戦略に、またボトムアップのみは固定戦略に弱いという結果がでているが、融合したシステムでは双方の弱点を補っている結果が出ている。またしっぺがえし戦略という高度な戦術においては、単独のアプローチでは双方ともに芳しく無かったが、融合手法では高い勝率をあげることができた。ただし切替型融合と重み付け融合では大きな差は表れなかった。

4 障害物回避シミュレーション

さらに本手法の有効性を検証するため前述のシミュレーションとは全く異なるロボットの障害物回避シミュレーションを行なってみた。

4.1 シミュレーション条件

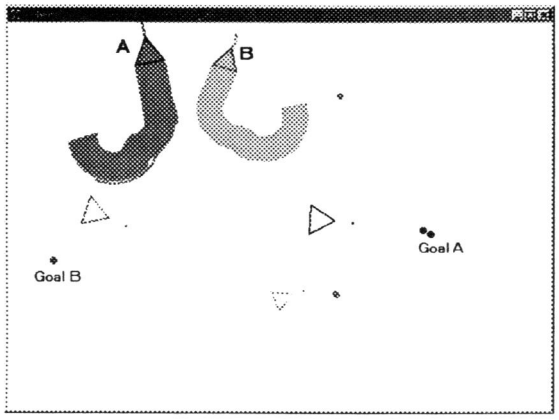
各エージェント (ロボット) は方位および座標のみの情報を持ち、各々ランダムで決められた大きさとスピードを持つものとする。各エージェントが取り得る行動は、一定の速度で左右に回避することのみである。また各エージェントは目標点 (Goal) を目指して動き、目標に達すると新たな目標点に向かって進むことを繰り返す。各エージェントの行動の評価は、目標点までの経過時間と衝突回数により計算される。その評価値から、トップダウン部およびボトムアップ部において別々に状況・経験が学習・記憶される。

ボトムアップ部は進化戦略で他のエージェントとの距離感と危険度を学習し、その値から回避行動を決める。またトップダウン部は距離感を用いて他のエージェントの距離・向き、ゴール方向をデータベースに記録し、それをもとに回避行動をとる。なお提案手法の融合方法はトップダウン・ボトムアップの相互チューニングで切替型を採用している。

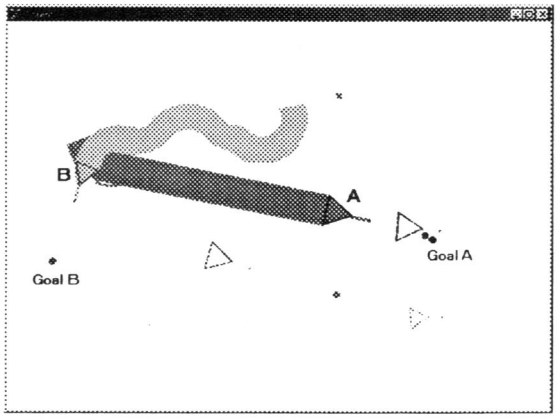
4.2 シミュレーション結果

図 5(a)-(c) はそれぞれトップダウンのみ、ボトムアップのみ、提案手法における一定期間の学習・記憶後の同条件下の移動軌跡を示すシミュレーション結果である。

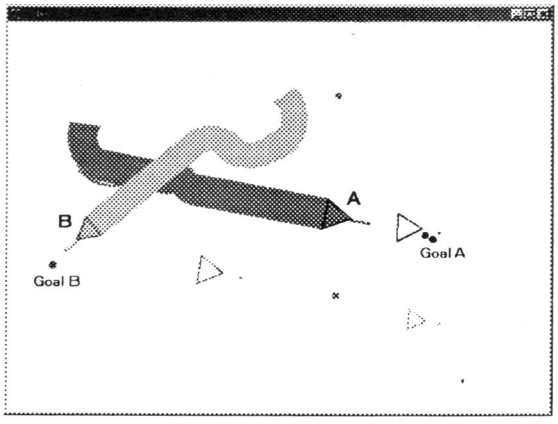
トップダウンのみでは、図 5(a) に示されるようにエージェントどうしが回避しあうことによるデッドロックのような現象が多々あった。しかしスムーズに回避するということも多かった。逆にボトムアップのみではデッドロックのようなことはあまり起こらなくなるが、そのかわり回避行動に効率の悪い動きが目立った。そしてその 2 つを互いにチューニングしあった提案手法は、それぞれの長所がうまく働きデッドロックにもはまりにくく、比較的スムーズな回避をすることができた。



(a) トップダウンのみの軌跡



(b) ボトムアップのみの軌跡



(c) 提案手法の軌跡

図 5: 障害物回避シミュレーション結果

5 考 察

提案手法の有効性を示すため２つのシミュレーションを用いたが、どちらのシミュレーションにおいてもトップダウン・ボトムアップ単体のアプローチより融合したアプローチの方が良い結果が出た。これは各々のアプローチの弱点を上手く補い合えた結果であろう。しかし切替型融合と重み付け融合では大きな差が見られることは無かった。これについては、融合を行う閾値近くの値が得られることが少なかったこと、トップダウン・ボトムアップ各手法がまだ調整不足であったことなどが考えられる。そこで今後はトップダウン・ボトムアップに用いるアルゴリズムを、ニューラルネットワークや GA、ファジィ推論等を用いてさらにこの融合システムの有効性を調べる必要があるものと思われる。障害物回避においては、他のエージェントにも同様のアルゴリズム、あるいは他の高度なアルゴリズムを搭載することにより、ある程度の知能を持った相手にもこのシステムが通用するか、また条件やその他を難しくしてシミュレーションし、このシステムの問題による特殊性が少なく人間的な思考方法に近いことをさらに調べる必要があると考えられる。

6 結 言

本論文では、人間的な意思決定システムを実現するため、トップダウンアプローチとボトムアップアプローチの適切な融合方法を提案した。さらに思考ゲームを用いて切替型融合と重み付け融合の比較を、障害物回避シミュレーションを用いてトップダウン・ボトムアップ双方でチューニングしあうシミュレーションを行なった。シミュレーション結果により、提案手法は従来手法に比べ、比較的柔軟で人間的な思考を実現することができた。

しかしながら融合方法やトップダウン・ボトムアップ各手法に使うアルゴリズムにまだ問題もあり、さらに改善する余地が残されている。また人間の思考メカニズムをさらに解析し、このシステムに組み込んでいく必要も今後の課題として残った。またこのシステムを実機の知能ロボットに応用することも考えている。

参考文献

[1] 松原 仁:『将棋とコンピュータ』, 共立出版 (1994)

[2] 河野 浩之: “知識発見とデータマイニング” , 日本ファジィ学会誌, Vol.9, No.6, pp.851-860 (1997)

[3] 伊藤 琢巳, 野下 浩平: “詰将棋を速く解く２つのプログラムのその評価” , 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.8, pp.1531-1539 (1998)

[4] 石川 眞澄: “コネクショニストモデルの忘却を用いた一般構造学習” , 電気学会論文誌 C , Vol.112, No.6, pp.364-369 (1992)

[5] 畝見 達夫: “実例に基づく強化学習法” , 人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp.697-706 (1992)

[6] 高木 英行, 畝見 達夫, 寺野 隆雄: “対話型進化計算法の研究動向” , 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp.692-703 (1998)

＜連絡先＞

〒 572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学 総合情報学部 情報工学科
前田 陽一郎
Tel & Fax : 072-825-4698(直通)
E-mail : maeda@mdlab.osakac.ac.jp

FD1−4

QOLとその評定プロセスについて

Evaluation Processes of QOL of College Students

奥田裕紀
Hiroki Okuda
金城大学
Kinjo University

Abstract This study was conducted to investigate evaluation processes of quality of life (QOL) of college students using a fuzzy estimation method (the revised spontaneously described factors estimation method). Subjects were 220 students and they were divide into 2 groups, Group A (N=180) and Group B (N=40). All subjects were requested to describe factors concerning their QOL. Subjects were also requested to rate the importance and degree of subjective satisfaction of each factor of their QOL on no point scales (0-1). Finally, subjects of Group A were requested to describe evaluation processes of their QOL. Subjects of Group B were requested to select evaluation processes of their QOL from examples. Only 7% of all subject of Group A could describ their own evaluation process precisely. 83% of all subjects of Group B could selected calculable processes. Possibility and difficulty of monitoring support system of fuzzy estimation processes are discussed.

Ⅰ.目的

近年、医療・福祉等様々な分野でQuality of Life (QOL)のという用語が頻繁に使われるている。これは、様々な働きかけに関する評価を行う際等に、モノやサービスの量等を基準とするのではなく、各個人がそれらをどう認知・評価するかに注目し、主観的な評価を高めるためることが重要であると考えられるようになったことが一因であろう。

奥田（1999）は、研究者が関与要因を制限することがなく、多様な被験者のQOLの検討が可能な、改変記述対象評定法（各人があることがらについて関連すると判断すること・事項を個別に記述し、各々の事項について評定を行う方法）を用いて、“生活の質”（生活の快適さ、満足さ、幸福度）に関与する各要因の重要度・満足度と、総合的な“生活の質”の評価との関連について検討を行った。

先の研究では、各被験者が記述した、各自の“生活の質”に関与する要因の重要度と満足度に基づいて、総合的な“生活の質”の推定を行う複数のモデルを構成し、各々の推定値と、実際に各被験者によって無段階スケール上に示された、各被験者の総合的な“生活の質”の評定値との関連を検討した。

しかし、このような方法では、各被験者が、自ら記述した各関与要因の重要度・満足度を基礎として、総合的な“生活の質”の評定を行っていることの直接的な証拠は得られない。また、各被験者が、どのような方法（評定過程）によって評定を行っているのか特定することは困難である。

そこで、本研究では、各被験者が総合的な“生活の質”の評定を行う際に、関与要因の重要度・満足度を考慮した否かに関して、各被験者から直接回答を求めることにした。また、関与要因の重要度・満足度を考慮して、総合的な“生活の質”の評定を行ったと回答した被験者に、どのような方法（評定過程）で評価を行ったのかに関する回答を求めることとした。

また、回答方法による差異を比較するために、評定過程に関する自由記述を求める群とと、複数の選択肢の中から選択を求める群に分けることとした。

さらに、評定過程に関する回答の妥当性、あるいは評定の精度に関して情報を得るために、評定過程に関して具体的な回答が得られ被験者に記述された方法によって、総合的な“生活の質”の高さを算出することが可能な場合は、その計算値と、被験者が無段階スケール上に評定した評定値との差異についても検討を行うこととした。

II．方法

(1)被験者

被験者は、19～20才の学生220名であった。被験者は、各自の“生活の質”の評定過程について、自由記述を求める群（A群 N＝180）と、評定過程に関する複数の選択肢の中から選択を求める群（B群 N=40）に分けた。各被験者は、過去にQOLに関する研究の被験者となった経験は持っていなかった。

(2)QOLの説明

学生においても、QOLという用語の周知度は十分ではなく、QOLを平易な概念として説明することが必要である。そこで、ここでは、QOLを、被験者各人が感じる“生活の質”（生活の快適さ、満足さ、幸福度）として説明することとした。

(3)手続き

“生活の質”の検討には、各被験者がある事項に関連していると判断する要因を明らかにし、その重要性等の評定を求めるために開発した、記述対象評定法を一部改変した方法（改変記述対象評定法）を用いた。

まず、各被験者に、20の記入欄と40＋1列の無段階スケールと、総合的な“生活の質”を評価する際に考慮した事項を記入するための4つの選択肢等が印刷された用紙を配布した。

A群に配布した用紙には、この他に、各自の“生活の質”の評定過程を自由記述するための欄があった。またB群配布した用紙には、各自の“生活の質”の評定過程を複数の選択肢の中から選択する欄があった。

用紙は、全て無記名であった。そして、以下のような内容を教示した。

あなたが、あなたの“生活の質”（生活の快適さ、満足さ、幸福度）に、影響を与えると思うことを、いくつでも良いですから、個別にカッコの中に書いて下さい。もし用紙が足りなければ、何枚でも自由に追加することができます。また、カッコの横の2つのスケール(0～1)上に、各々のカッコに記入したことがらについて、あなたの“生活の質”にとっての重要度と、そのことに関する現在の（あなたにとっての）満足度・望ましさの程度を評定して下さい。

カッコ内への記入と、各々2つのスケール上の評定が全て終了したら、現在のあなたの総合的な“生活の質”の高さを、用紙の右下のスケール(0～1)上に評定して下さい。

次に、あなたが総合的な“生活の質”を評定した際に、あなたが記述した“生活の質”に影響を与えると思うことの満足度・重要度を考慮したか否かについて、1.各項目の満足度を考慮した、2.各項目の重要度と満足度を考慮した、3.考慮しなかった、4.その他の中で、当てはまるものに○印をつけて下さい。4.を選択した場合には具体的に記入して下さい。

A群では、さらに以下ような内容を教示した。“生活の質”の総合評定を行う際に、“生活の質”に関与する要因の満足度・重要度を考慮した場合には、どのように考慮したのか、その方法についてできる限り具体的に記述して下さい。

また、B群では、以下のような教示を行った。“生活の質”の総合評定を行う際に、“生活の質”に関与する要因の満足度、重要度を考慮した場合には、どのように考慮したのか、選択肢の中から選んでください。

III．結果

(1)関与要因の重要度・満足度を考慮した被験者の比率

図1に、総合的な“生活の質”の評価を行う際に、各被験者が記述した関与要因の満足度のみを考慮したと回答した被験者の比率、各関与要因の重要度と満足度を考慮したと回答した被験者の比率、それ以外の被験者の比率を示した。総合的な“生活の質”の評価を行う際に、関与要因の重要度と満足度を考慮した被験者は、全体の50％を越えていた。しかし、満足度のみを考慮し、重要度は考慮しなかった被験者等もいたことが示された。

(2)評定過程に関する回答

A群については自由記述、B群については多肢選択法で、総合的な“生活の質”の評価を行う際に、関与要因の重要度・満足度を考慮した方法（評定過程）に関する回答を求めた。

その結果、A群については、被験者の記述に基づいて、関与要因の重要度や満足度から総合的な“生活の質”の推定値を計算可能であるほど、具体的な記述を行うことができた被験者は少数であった（図2）。これに対して、B群では多くの被験者が、用意された選択肢の中から具体的な（計算可能な）評定方法を選択することができた（図2）。

(3)総合的な“生活の質”の推定値と、評定値との比較

被験者の評定方法に関する回答に従い、関与要因の重要度・満足度に基づいて総合的な“生活の質”の高さの推定値を計算可能であったケースについて、推定値と各被験者によって無段階スケール上に示された評定値の差の絶対値、および評定値に対する差の絶対値の比率（(推定値と評定値の差の絶対値)／評定値*100）を求めた。

図3に示したように、A群では、各被験者の記述に基づく総合的な“生活の質”の推定値と、各被験者によって無段階スケール上に示された評定値との差の絶対値の平均は、0.15を越えていた。また、評定値に対する評定値と推定値の差の絶対値の比率（百分率）の平均は、30%以上であった（図4）。

B群では、各被験者の記述に基づく総合的な“生活の質”の推定値と、各被験者によって無段階スケール上に示された評定値との差の絶対値の平均は、0.13であった（図3）。評定値に対する評定値と推定値の差の絶対値の比率（百分率）の平均は、約12%であった（図4）。

Ⅳ.考察

(1)関与要因の重要度・満足度の考慮と評定過程の多様性

図1に示したように、半数以上の被験者は、総合的な“生活の質”の評価を行う際に、各被験者が記述した関与要因の重要度と満足度を考慮していたと回答した。このことから、関与要因の重要度・満足度が、“生活の質”の評価の基礎となっているケースが多いことが示され、先の研究の結果（奥田，1999）と一貫した結果が得られた。一方、総合的な“生活の質”の評価を行う際に、関与要因の満足度のみを考慮していたと回答した被験者等もいたことから、“生活の質”の評定過程は、被験者によって（あるは場合によって）異なっており同一ではないとの仮説（奥田，1999）が支持された。

(2) 評定方法（評定過程）の回答可能性

A群においては、総合的な“生活の質”を評定した方法（評定過程）を、被験者の記述に基づいて推定値を計算することが可能なほど、具体的に記述することは容易ではなかった。また。ほとんど何も記述できない被験者もいた。

しかし、この結果はそれほど驚くことではない。例えば、ある音楽に関する好み等を評価するとき、どのような要因（要素）を、どのように処理して最終的な評価を下しているのかについて、詳細な説明を行うことは容易ではないであろう。

本研究で、評定方法に関する回答を求める前に導入された手続き（関与要因を具体的に記述し、その重要度・満足度をスケール上に評定する等）は、評定方法を分析し意識化することを容易にした可能性が考えられる。

また、このような方法を用いることによって、（意図したわけではないが）一定の評定方法を記述するよう誘導し、具体的な記述を得やすくなっていた可能性も考えられる。

本研究の結果、評定過程の選択肢を提示し選択を求めたB群では、A群の10倍以上の比率で、評定方法に関する具体的な回答が得られた。この結果は、被験者が、一定の回答を行うよう誘導され易いことを示していると解釈することも不可能ではない（後述するように他の可能性も考えられる）。

(3)評定方法（評定過程）回の妥当性

B群において、多くの被験者が具体的な（推定値を計算可能な）評定方法を選択したのは、全くの自由記述は困難だが、選択肢（回答の手がかり）があれば、各自の評定方法（同一でなくとも近似した方法）を回答できる可能性が高まることを示すものとも解釈できる。

本研究の結果、回答された評定方法に基づく推定値と、各被験者によってスケール上に示された各自の“生活の質”の高さの評定値の差異の平均は、B群の方がA群より小さかった。この結果は、B群で選択された評定方法（過程が）が、実際の評定過程に近似したものであった可能性を示唆する。

ただし、この問題については、A群との比較だけで結論を出すのは適切ではなく、さらに検討を行うことが求められよう。

(4)評価支援システムと自由決定の妨害

例えば、ある商品を購入する際に、様々な要因（要素）を統合して、総合的な評価が高いものを購入しようとしても、どのような要因をピックアップし、どのように統合すれば良いのか困惑する場合がある（カタログを見ても何が重要なポイントか判断できないし、

様々なスペックに差がある場合、総合的にはどれが優れているのか分からない）。

このような場合に、何らかの評価支援システムの導入が求められよう。しかし、どのような支援システムであっても、それを用いることによって評価に影響を与え、一定の方向に誘導してしまう（枠組みを決めてしまう）可能性があろう。

例えば、ある支援システムを利用すると、常に特定の企業の製品を選択することがベストだという結果になるよう、意図的に構成するも可能である。

（製作者に一定方向に誘導するような意図がない場合でも）支援システムを用いることによって、自由な評価・決定が妨げられる可能性には、常に留意する必要あろう。

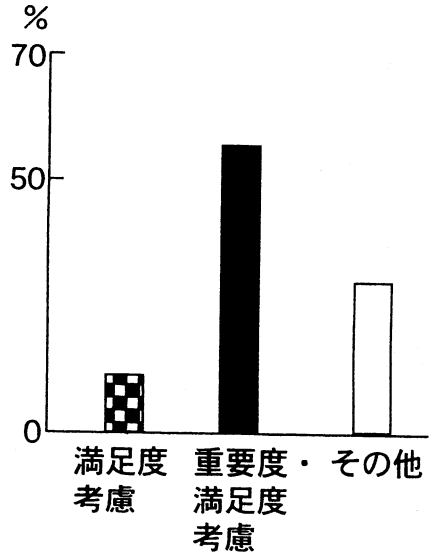


図1　関与要因の重要度・満足度の考慮比率

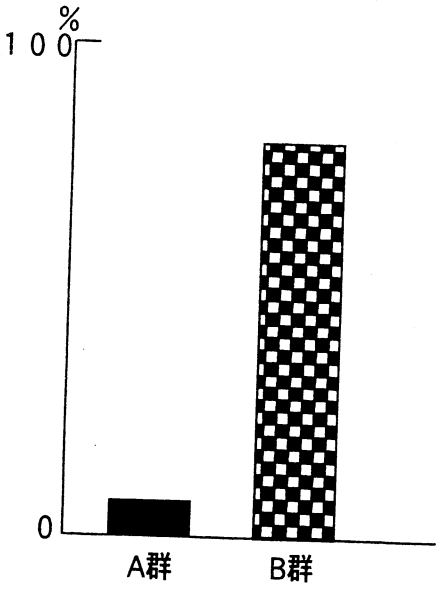


図2　A群とB群の具体的評定方法回答率

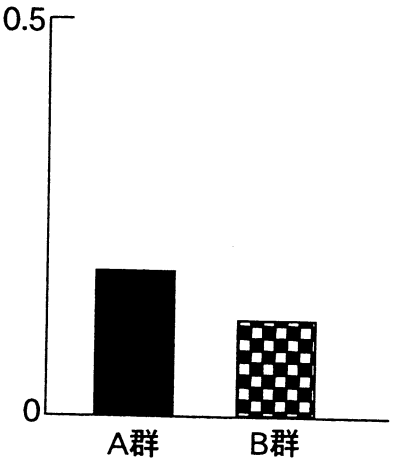


図3　評定過程の回答に基づく推定値と評定値の差の絶対値の平均

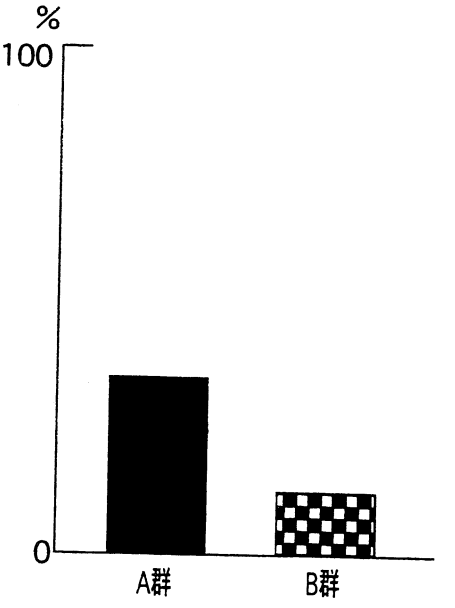


図4　評定値と推定値と評定値の差の絶対値との比率の平均
（ABS（評定値－推定値）/評定値）＊100

Ⅴ.参考文献

[1] 奥田裕紀　高齢者・児童におけるQOL評定過程の検討　金城短期大学紀要 23, 51-69 (1999)

問い合わせ先
〒920-8511 松任市笠間町1200
金城大学
Tel:(076) 276-4400
Fax:(076) 275-4316

FE1−1

プログラミング教育の事例研究

Case Study of Education for Programming

中津山幹男＊　阿部清子＊＊　田郷岡直美＊
Mikio Nakatsuyama*, Kiyoko Abe**, Naomi Tagooka*
＊秋田公立美術工芸短期大学、＊＊秋田県立脳血管研究センター
*Akita Municipal Junior College of Art and Craft
**Akita Research Institute of Brain and Blood Vessels

Abstract We are teaching the lecture C language for 90 students and perform exercises for 3 groups. The record of a group is rather different from another two groups. We report that the reason why the records are different.

1　はしがき

本学では計算機言語としてＣ言語を取り上げ、講義１単位、演習２単位の構成で教育を行っている。[1] 学生数は約９０名で、講義はまとめて行い、演習は３グループに分けて実施している。演習の教育方法については各担当者に任せ、進行速度のみを調整しただけである。従来はこの方式で教育が順調に行われてきたが、平成１１年度のみ大きく変化して、１グループのみ成績の低下が見られた。この原因について調査した結果、教育方法の違いにあることがわかった。しかし、なぜ教育方法の差がこのように顕著の形で具現した理由については学生の気質の変化、受験生の質の変化などが考えられる。

2　グループごとの学生の構成および成績

学生の出身地の分布にはあまり顕著な差は見られない。本学では姓名による偏りを防ぐために、学生の名前を５０音順にならべ、それをもとに順にA,B,C,A,B,C,...と振り分け、Aグループ、Bグループ、Cグループを構成している。講義と演習の平均点および秋田県出身と秋田県外の比率は表１のとおりである。Cグループについては平均点は表示してない。なお、平成１０年度の平均点はグループごとの成績にはこのような差は見られない。

表１　　平均点と県外比率

グループ	演習	講義	県外比率
A	80.77	75.29	35.48%
B	77.9	78.53	36.66%
C	---	77.46	32.25%

3　教育方法の違い

教育方法には極端な違いは見られないが、次のようになっている。

A グループ　最初に他の解法を液晶プロジェクタを用いて教える。ついで演習問題を主とし、学生に考えさせることを主眼としている。

B グループ　本文のプログラムや例題を主とし、演習２，３題を学生に解かせ、最後に正解を教える。

C グループ　３０分程度講義し、独特な問題を２，３題くらい課する。課題も次週まで与える。

4　アンケートによる分析

学生側の意見をアンケートにより明らかにしてみた。アンケートは次の３項目より

設問１　　演習は講義を理解する上で役立ちましたか。

設問２　演習での補充的な説明は役立ちましたか。

設問３　情報処理（基礎）はプログラミング入門、演習の基礎になったでしょうか。[3]
答えははい、いいえ、わからないの３つから選ぶようにした。結果は次の図１、図２、図３に示す。この図からＡ グループのみが他のグループと異なっていることがわかる。

6　考察ならびにむすび

以上を総合すると本質的なものを理解させようとしたグループの教育方法が受けいれられなかったことを示しているように思われる。本質的なことを理解させるのは教育の理念の根幹にあるもので方針としては間違いのないことであるので、その際には同時にわかり易い説明を加え、さらに Ｃ 言語にたいする興味を引き出す工夫が必要であろう。[2] 本学の学生のほとんどが芸術的なことに主たる興味があり、情報関係を毛嫌いする傾向がある。なぜ、Ｃ言語を勉強するのかという素朴な疑問をもち続けている学生が存在することも確かである。平成１１年度の学生にこのような傾向が多かったのが、今回の結果につながったのではないかと考えている。ただし、これについては確たる証拠があるわけではないが、その裏づけとして Ｃ 言語の講義で実施した授業へのアンケートでは Ｃ 言語への疑問が解消されなかったことを示している。

参考文献

[1]中津山、Ｃプログラミング入門、陪風館（1997）
[2]斎藤、文科系のプログラミング教育、平成１１年度情報処理教育研究集会講演論文集、pp.409-412,(1999)
[3]中津山、芸術系短期大学の情報教育、平成１１年度情報処理教育研究集会講演論文集、pp.399-400,(1999)

[問い合わせ先]
〒010-1632 秋田市新屋大川町 12-3
秋田公立美術工芸短期大学産業デザイン学科
Tel:018-888-8111　Fax:018-888-8109
E-mail:nakatsu@eos.amcac.ac.jp

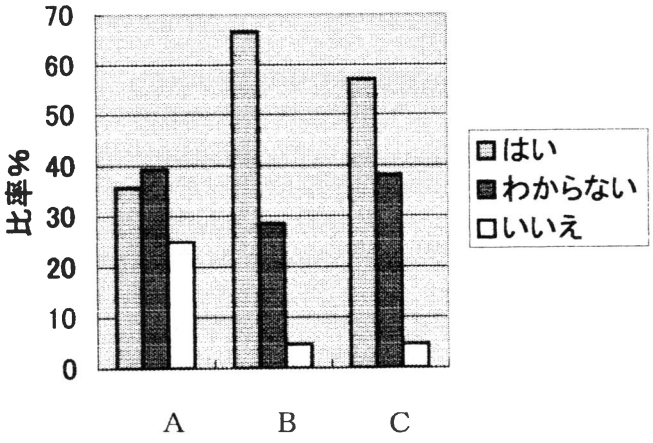


図１　設問１

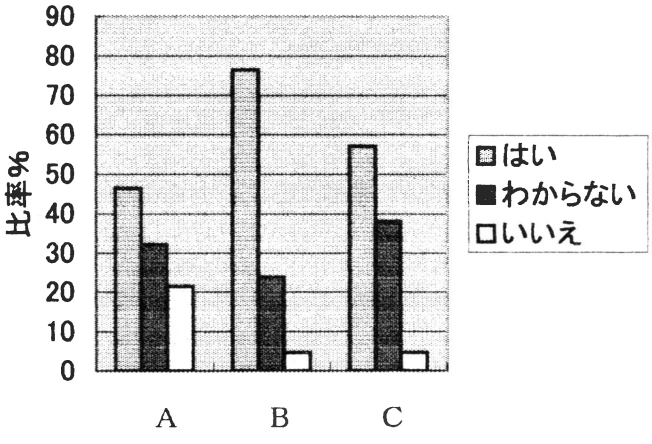


図２　設問２

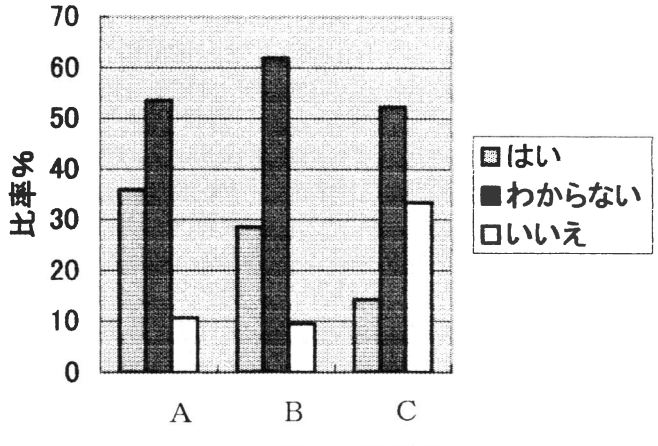


図３　設問３

FE1−2

栄養士養成学科における実習料理のデータベース

Data base for the practical training of dieticians.

井ノ口 美佐子
Misako Inokuchi

西南女学院短期大学
Seinan Jo Gakuin Junior College

Abstract : The cooking to practice in the subject which trains dieticians is made as Web page, and this work is to try so that it can look it up corresponding to the purpose.

1 はじめに

栄養士養成学科における実習科目には「給食管理実習」や「臨床栄養学実習」などがある。これらは学外の実習に先立って、学内では、まず「給食管理実習」は献立作成から給食にいたるまで、すべて学生の手により、前期に２４日分毎回１００～１５０食を作る。また「臨床栄養学実習」でも食事療法の実際について学び、献立作成、食品購入や実習が行われている。

この仕事の目的は、これらの実習内容を料理の写真やレシピ、栄養評価のグラフなどをもとにデータベース化すると同時に、この作業をプレゼンテーション能力の一つとして学生達にも出来るように指導することである。

最初の段階は DBMS を備えたものでなく、過去に教科書を HTML で作成した経験から[1]、いつでも学生達が利用しやすいものにするために、まず Web ページにしている。今回はその試作であり、今後は第２段階として検索エンジンを備えたものへの改善が必要である。

2 目次について

全体構成として目次を考えると、１．科目別（給食管理実習、臨床栄養学実習、他）、２．季節別（春, 夏、秋、冬、他）、３．適応例別（糖尿病、腎臓病、骨粗鬆症、肥満、健康者若者、高齢者、他）が考えられる。一つの料理はこれら 1～3 のいずれからもリンクされていることを必要条件とし、各ページからの戻りについては、１．科目別、２．季節別、３．適応例別、４．目次を選ぶことができるように配慮する。そのためには、各ページに、１～３に対してそれぞれの通し番号を持たせ、１～３のいずれかを選んだときに次のリンク先が通し番号として固定されていることになる。

さらに目次の細部をどのようにするか、今回検索するのは１食分の料理であり、主食、主菜、副菜、デザートの全てを含んだものである。目次には１食の献立の特徴を上手に表現する必要がある。

3 １ページの構成について

一つのページには料理の特徴を示す文章や

図１のような料理の写真、図２のような栄養評価を示すレーダー型グラフや材料と作り方を示す文章、戻りの選択等を基本要素として配置する。

各ページをすべて同じ構成にするために、HTML の内容を同じにして、挿入する写真やグラフなどを入れ替えるだけで簡単に作成できる。

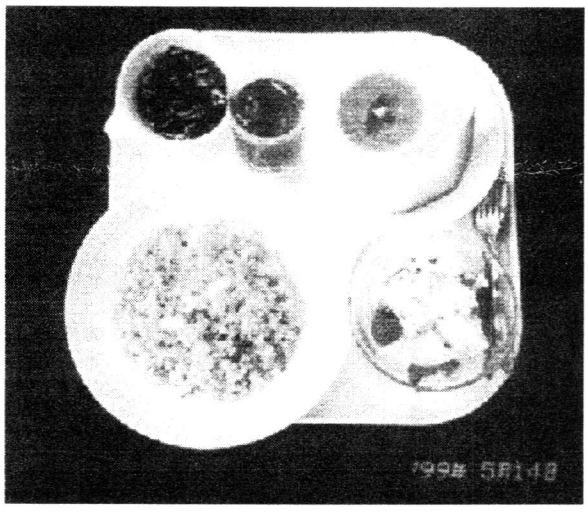


図１ 料理の写真

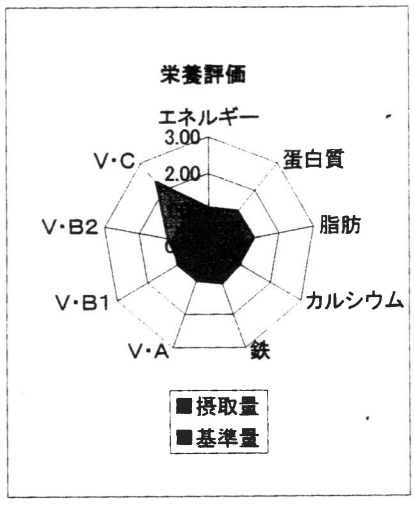


図２ 栄養評価のグラフ

4 Web ページ作成作業

この方法で、簡単にインターネットを通して学生達はコンピュータ演習室でこれらの実習料理を参照できるので、早急に各ページのデータ作りが必要である。まずセミナーの学生達がある程度作成した上で、後期の栄養情報処理で２，３回指導し、レポートの１つとして作成させてデータを蓄積する。

5 おわりに

今後の基本的な課題は検索エンジンをどのように持ち込むかということである。市販のデータベースがインターネットを通して利用でき、教育用として初心者に使いやすく、見栄えのするものであるならば、検索方法に特別な問題はない。

今後はこれらのアプリケーションソフトも比較検討していきたい。

参考文献

（1） 井ノ口 美佐子：メディア教材とプレゼンテーション教育，第１５回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，大阪，６月，709／710，(1999)

[問い合わせ先]
〒803-0035
北九州市小倉北区井堀１－３－２
西南女学院短期大学
井ノ口 美佐子
Tel／Fax：093-583-5478
E-mail：minokuti@d1.dion.ne.jp

FE1−3

情報教育へのデータマイニングとファジイの応用

Application of Data Mining and Fuzzy Theory to Computer Literacy Education

高橋恒介 、川口順功、大石義
Kousuke Takahashi 、Junkou Kawaguchi and Tadashi Oishi

静岡産業大学国際情報学部
Shizuoka Sangyo University, Faculty of Communications and Informatics

Abstract Data mining and fuzzy set theory are applied to analyzing statistical relations between problem-rank sets in the test data for computer literacy education. The fidelity of association rules is introduced to remove doubtful association rules and to find possible chain of rules.

1 まえがき

短大でも４年制大学においても教育現場では大量のテスト結果のデータが発生する。テスト結果は、A、B、Cなどのランクに分けられ、主に成績判定を行うために利用される。テスト結果のデータは、成績判定だけでなく、教育効果の分析にも役立つ。大量のデータから問題解決に役立つ知識を発見する手法としてデータマイニングが注目される[1]。

ファジイ理論は相関規則(if-then ルール)の抽出の場面で利用される。相関規則の前提となる問題別ランクでの点数のばらつきがランダムでなくファジイ性を持つ場合に、問題別ランク間の相関規則の真理度を定義することができる。これによって、因果関係を推察するための相関規則の重要性を示すことができる。

この論文では、相関規則の重要性を示す真理度と信頼性を示すルールフィデリティの関係[2][5]を導入し、それらのテストデータ分析への応用を示す。また、相関規則が連鎖する場合のルールフィデリティの計算方法を提案する。

2 テスト結果とデータマイニング

本校には、コンピュータリテラシーの教育の一つに「情報処理概論」という講義がある[3]。図１は、昨年実施したこの講義の受講生 120 人のテスト結果で、問題別に正規化（100 点満点に換算）した平均点をグラフ化したものである。問題の概要は以下の通りである。
①パソコンの基本操作、②パソコンの用途とネットワーク利用、③情報倫理、④パソコンの構成機器選択、⑤パソコンの基本構成、⑥２進数

図１から３番（情報倫理）と６番（２進数）の問題が難しかったことが分かる。

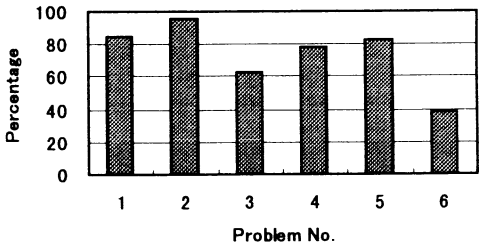


図１: 問題別平均点（百分率）

問題別に正規化した点数を以下の基準でA,B,C の３つのランクに分けて、人数を集計すると表１が得られる。

ランクＡ：80～100　ランクＢ：60～79
ランクＣ：０～59

この表から、難しい問題ではＣランクが多く、易しい問題ではＡランクが多いことが分かる。

表１: ランク別学生数

	１番	２番	３番	４番	５番	６番
A	82	114	49	72	81	16
B	26	2	4	30	26	13
C	12	4	67	18	13	91

表２は、各問題であるランク（前件部）から別の問題のあるランク(後件部)に推移する学生数とその推移率（後件部の学生数を前件部の学生数で割ったもの）をまとめたものである。すべてのケースの推移を示すには１５×１８行の表を示す必要があり、紙面の関係で難しいので、50 人以上の推移数のものに絞ってある。

表 2: 推移則別推移数（50 人以上）・推移率

前件部		後件部		推移率
1A	82	2A	80	0.98
1A	82	4A	59	0.72
1A	82	5A	57	0.70
1A	82	6C	59	0.72
2A	114	3C	62	0.54
2A	114	4A	71	0.62
2A	114	5A	79	0.69
2A	114	6C	85	0.75
2A	114	1A	80	0.70
3C	67	6C	53	0.79
3C	67	2A	62	0.93
4A	72	5A	53	0.74
4A	72	1A	59	0.82
4A	72	2A	71	0.99
5A	81	6C	58	0.72
5A	81	1A	57	0.70
5A	81	2A	79	0.98
5A	81	4A	53	0.65
6C	91	1A	59	0.65
6C	91	2A	85	0.93
6C	91	3C	53	0.58
6C	91	5A	58	0.64

相関規則を図示する推移図(相関グラフ)は、図２のようになる。ここでも、推移数が 20 人以上のものに絞り、推移する学生数が多いほど推移パス（線）が太くなるように描いてある。最も太い線が 50 人以上の場合である。

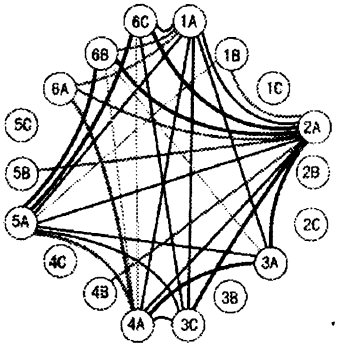


図 2: 推移図(相関グラフ)

表３と表４は、表２の推移数と推移率をマトリックス形式にしたものである。左端が前件部を、上段が後件部を示し、交差するセルが該当する推移数と推移率を示す。

ここで行なうデータマイニングは、表２から図２、表 3，表４などを求めることであり、特に、表 4 を図３に示す相関グラフに絞り込んで書き換えることである。図３は、図２の推移図（相関グラフ）の中で推移数の大きいものに絞り、非対称な推移率のパスで結ばれた相関規則だけを示している。推移率が非対称であるということは、例えば、問題４のランク A から問題２のランク A への推移率(0.99)は高いが、逆(0.62)は低いというようなケースを指す。

表３: 推移則別推移数 (50 人以上)

	1A	2A	3C	4A	5A	6C
1A(82)		**80**	43	**59**	**57**	**59**
2A(114)	**80**		**62**	**71**	**79**	**85**
3C(67)	43	**62**		38	40	**53**
4A(72)	**59**	**71**	38		**53**	48
5A(81)	**57**	**79**	40	**53**		**58**
6C(91)	**59**	**85**	**53**	48	**58**	

表４: 推移則別推移率 (50 人以上)

	1A	2A	3C	4A	5A	6C
1A(82)		**0.98**	**0.52**	**0.72**	**0.70**	**0.72**
2A(114)	**0.70**		**0.54**	**0.62**	**0.69**	**0.75**
3C(67)	**0.64**	**0.93**		**0.57**	**0.60**	**0.79**
4A(72)	**0.82**	**0.99**	**0.53**		**0.74**	**0.67**
5A(81)	**0.70**	**0.98**	**0.49**	**0.65**		**0.72**
6C(91)	**0.65**	**0.93**	**0.58**	**0.53**	**0.64**	

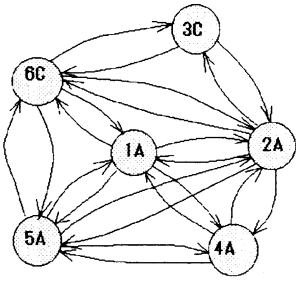


図３: 非対称な推移率相関グラフ

テスト結果から教育上の問題を分析する場合、図３に抽出された相関規則が役に立つ。上の例のように推移率が非対称な場合、問題４を先にランク A にする教育が先決であることを暗示する。もう一つ見落としてはならないことは、前件部から後件部への推移の相関規則が１つのパスだけでないことである。いくつかのパスを介して複数の相関規則が連鎖する場合を見逃すべきでない。複数の相関規則が連鎖する場合、トータルの推移率は、それぞれの推移率を掛け合わせて求められるので連鎖数と共に小さくなるが、2 段程度ならダイレクトな推移の相関規

則の推移率に匹敵する。したがって、連鎖的な推移の原因分析も必要である。

3　ファジイ相関規則の抽出

従来のデータマイニングは、相関規則の抽出には有効であったが、規則の信頼性に関する情報を与えてくれない。例えば、80 点のランク A と 100 点のランクAが区別されないからである。前者は、後者よりもランク A での真理度のグレードが低くされるべきである。そこで、ファジイ集合論[4]を導入し、図４に示すようなメンバーシップ関数を設定して、ランクに属するグレードを計算できるようにする。

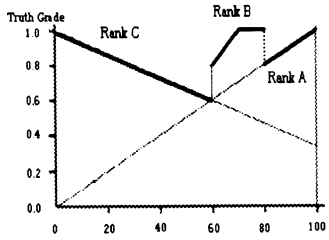


図４: ランクに関するメンバーシップ関数

一例として、問題１のランク A の学生が問題 2 でランク B に推移する場合の相関規則を考える。前者と後者の学生の点数の集合をそれぞれ１A、２B で表し、相関規則の前件部、後件部が真であるグレード（真理度）を、それぞれ[1A]、[2B]で表す。そのとき、相関規則に対応する含意の真理度を[1A→2B]で表わすと、このルールの真理度 R は、前件部と後件部の真理度から計算される。相関規則はすべての問題別ランク間で計算される必要があるため、すべての問題別ランク間で前件部と後件部の真理度を決める必要がある。それらは、問題別ランクに分類されたテストの点数から上記のメンバーシップ関数によって求められる。点数にばらつきがあるため、グレードの最小値で真理度が決められる。その計算結果(真理度)が表５に示されている。ここでも、推移数が 50 人以上の場合だけが示されている。

前件部と後件部の真理度が与えられたときの相関規則（含意）の真理度の計算方法は、次式 [A1→B2]=max (1－[A1], [B2])を使う。この式は、古典的な含意の論理式 [A1→B2]=[¬A1 ∨B1]で、ファジイ論理に対応するよう、OR 論理の∨を max 演算に置き換え、¬A1（A1 の否定）の論理値を１－[A1]に置き換えたものである。したがって、前件部の否定命題の真理値と後件部命題の真理値のうち大きい方が相関規則の真理度を決める。上記の max 演算式から、もし[B2]min > (1–[A1]min)であるなら，含意の真理度[A1→B2]は[B2]min に等しいということが導かれる。この含意の真理度は、相関規則の真理度 R でもある。ここでは、使用するメンバーシップ関数から[A1]、[B2]はいずれも 0.5 以上であるから、R=[B2]min となる。

真理度 R が計算できても、それがどれほど信用できるかは、R だけでは決められない。そこで、この真理度 R が導出される条件式の右辺と左辺の差をルール信頼度のフィデリティ Fr として使う。それは次式で表わされる。Fr ＝ [B2]min–(1–[A1]min)=[B2]min+[A1]min–1

表６は、上式から計算されるルールフィデリティの計算値を行列形式に示したものである。

表５: 推移則別真理度（50 人以上）

	1A	2A	3C	4A	5A	6C
1A		**0.80**	0.67	**0.80**	**0.80**	**0.67**
2A	**0.80**		**0.67**	**0.80**	**0.80**	**0.67**
3C	0.80	**0.80**		0.80	0.80	**0.67**
4A	**0.80**	**0.80**	0.67		**0.80**	0.67
5A	**0.80**	**0.80**	0.67	**0.80**		**0.67**
6C	**0.80**	**0.80**	**0.67**	0.80	**0.80**	

表６: 推移則別フィデリティ（50 人以上）

	1A	2A	3C	4A	5A	6C
1A		**0.60**	0.47	**0.60**	**0.60**	**0.47**
2A	**0.60**		**0.47**	**0.60**	**0.60**	**0.47**
3C	0.47	**0.47**		0.47	0.47	**0.33**
4A	**0.60**	**0.60**	0.47		**0.60**	0.47
5A	**0.60**	**0.60**	0.47	**0.60**		**0.47**
6C	**0.47**	**0.47**	**0.33**	0.47	**0.47**	

4　ルールフィデリティの応用と相関規則が連鎖する場合のルールフィデリティ

図５は、問題別クラス間で 50 人以上の推移がある場合に絞られた推移図を示す。この図から、１A, ２A, ４A, ５A から３C や 6C に推移するケースに対して、表 6 を使って、ルールフィデリティが小さくない推移パスに注目し、さらに、推移率が推移方向で大きく違う場合の推移パスに注目する必要がある。ルールフィデリティは相関規則の信頼度に対応する。6C への推移規則のフィデリティが低い理由は、ランク C の学生の点数が 0 点に近くないことで、ランクCでの真理度が低くなったことによる。

1A, 2A, 4A, 5A から6C へ推移するという推移率や真理度は大きいが、相関規則の信頼度が低いことがわかる。

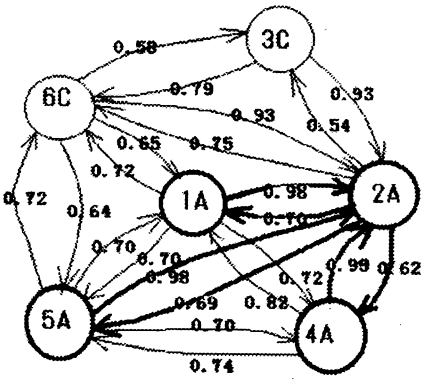


図5: 高フィデリティな相関グラフ

図5から 2A に推移する学生の推移率が高く、逆方向の推移率が低いということがわかるが、これは前述したように問題2の知識の教育の優先順位が低い事を意味する。

もう1つの注目点は、2つの推移が連結した場合の推移率が直接の推移率より高い場合が観察される点である。1A から6C(0.72)は、1A から2A を経由して6C(0.98*0.75)へ推移すると推移率が高くなる場合であり、推移率の非対称性が拡大する場合である。どちらを信用するかというと、ルールフィデリティの大きいほうを選んだほうが良い。

ここで、相関規則が連結するときのルールフィデリティを考える[2]。この場合、2つの相関規則のフィデリティの小さい方だけを考えるだけで良いかどうかがまだ明らかにされていない。A1→B2、B2→C3 という 2 つの相関規則の真理度を R1,R2、フィデリティを Fr1,Fr2 とし、さらに、この2つを連結した場合の真理度を R0、フィデリティを Fr0 とすると、R0=R2、Fr0=min（R1+R2-1,Fr1,Fr2）とすることができる。R1=max(1-[A1],[B2])から B2→C3 では、[B2]=R1 と推論され、R2=max(1-R1,[C3])となる。もし R2＞1-R1 なら[C3]=R2 であるから、R0=R2 となる。したがって、R2 と（1－R1）の差が大きいとき規則の連鎖も強くなり、Fr0 は上式のようにできる。

5 ルールの信頼性について

ルールの真理度は、前件部と後件部の真理度から求められるルールの真理度の最低を保証するという意味での信頼性といえる。しかし、実際には、前件部の信頼度とは関係なく決まってしまう。ルールには前件部と後件部の信頼度を反映させるべきである。ルールフィデリティは、前件部と後件部の信頼度の合計から求めるため、これらを反映できる。したがって、ルールの信頼性のメトリックなスケールとして、このルールフィデリティを使用できる。

6 まとめ

テスト結果のデータからデータマイニングによって相関規則を抽出し、その相関規則にファジイ論理を応用し、相関規則やその連鎖ルールの信頼性をルールフィデリティとして表すことができた。このルールフィデリティは、メンバーシップ関数を改善してより正確なものにする必要があるが、テスト結果のデータから信頼できないルールを取り除くことなどに適用でき、教育の改善に利用できる。

参考文献

[1] M Berthold, D J.Hand : Intelligent Data Analysis,An Introduction、Springer、1999

[2] 高橋,川口,大石 : On Application of Transitive Fuzzy Logic Inference to Data Mining for Computer Literacy Education Improvement、AFSS2000、2000 発行予定

[3] 高橋,川口,大石：コンピュタリテラシー教育の講義と演習の成績の関連、平成 11 年度情報処理教育研究集会論文集、pp217-220、1999

[4] L A Zadeh : Fuzzy Sets、Information and Control 8、pp338-353、1965

[5] K Takahashi, K K.Thornber : On Application of Fuzzy Logic Inference to the Nearest Neighbor Pattern Search、Proc. of the IFSA'95、pp153-156、1995

[問い合わせ先]
〒 426-8668
静岡県藤枝市駿河台４－１－１
静岡産業大学　国際情報学部
高橋恒介、川口順功、大石義
Tel : 054-645-0191
Fax : 054-645-0195
E-mail :
{takahasi,kawaguti,oishi} @ssu.ac.jp

FE2−1

ファジィ理論を用いたオンライン数式認識

On-line Handwriting Interface for Numerical Formulas Recognition Using Fuzzy Theory

西守克己(鳥取大学), 松井 尚(鳥取大学), 石原永伯(鳥取大学), 西村 亮(鳥取大学)
Katsumi Nishimori, Takashi Matsui, Naganori Ishihara, Ryo Nishimura
(Tottori University)

Abstract We propose an on-line handwriting interface for numerical formulas recognition using fuzzy theory. The system consists of a character recognition part of handwriting patterns from input devices and a structural recognition part of mathematical formulas following typescript expressions based on TEX source coded transformation. The experimental results showed that our recognition system can work quickly as one of the useful input interfaces for mathematical formulas in real-time processing.

1 はじめに

手書き文字をコンピュータに認識させるという研究は長年行われてきた。しかし、これらはほとんど文章を認識対象としており、手書きの数式の入力[1]には対応してないものが多い。そこで、数式入力を視覚的に簡単に行える入力システムと、オンラインで認識できる文字認識システム、学会でも利用されるTeXの出力機能を組み合わたシステムを作成した。そして、評価実験を行い、その有効性を確かめた。

2 オンライン手書き数式認識システム

手書き入力による数式の認識を行うためには, ペン入力から記号や文字など一つ一つの構成要素（ストローク）の特徴（方向・方向の変化量・端点）を検出し, その動きをファジィ的に捉えることによるオンライン単文字認識システム[2]をまず構築する。次にそれに基づいてさらに一連の自由手書き数式構造を認識できるシステムを構築する必要がある。それらの概要を図1に示す。以下、この本システムの処理の流れに沿って説明する。

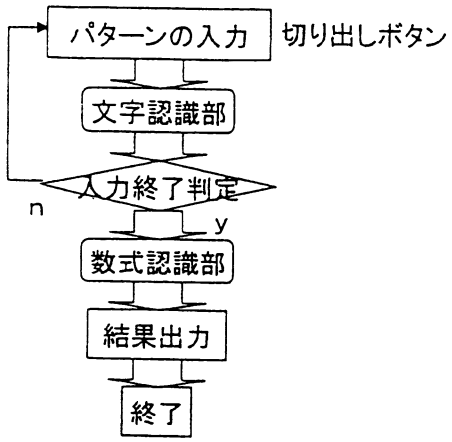


図1. 手書き数式認識システムの流れ図

2.1 パターンの入力・前処理

2.1.1 パターンの入力

手書きパターンは、ペン型入力デバイスであるタブレット、又はマウスにより、指定された枠内（図2）へ細線化の必要がないように太さ1ドットの線分で入力する。ここで、ストロークはペンがタブレットから離された時点で1つの部分パターン（以後ストロークと呼ぶ）とする。

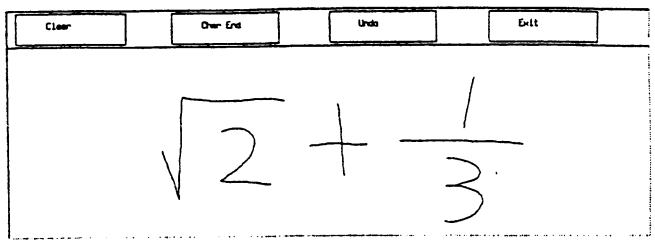


図2. 数式の入力

2.1.2 前処理

入力されたサンプル点間のデータの変換を行なう。パターンの大きさが６４×６４ドットとなるように正規化を施し、それに伴い、座標値への変換を行う。これは、各文字ごとに行われる。また、数式認識で用いるため、正規化前のチェインデータを用い、チェインデータを囲む最小面積の長方形を形成した時の最小の x,y 座標、縦幅および横幅を求める。

2.2 文字認識部

文字認識部では、今までに開発し報告してきたファジィ文字認識システム[2]を使用する。図3に示すその処理の流れと概要を次に簡単に説明する。

2.2.1 特徴抽出

前項の前処理から得られる時系列データから、次のような特徴を抽出する。

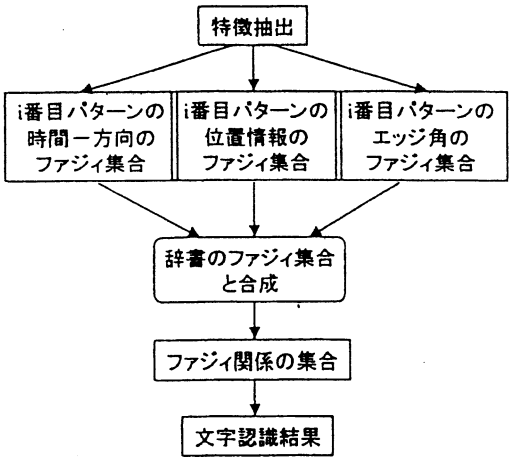


図 3. 文字認識部

(1) 量子化方向コード

時系列データの各点を3ドット毎に見ていき，その方向変化を見るためにそれに対して，一周360°を16分割した反時計回りの方向コード値（0～15）に当てはめ量子化してゆく。

(2) 旋回角

チェインコードとして得られたi番目とi＋1番目の量子化方向コード値の変化分をその差の数値として反時計回転方向に表わしたものである。これによりストロークの曲がり具合をみることができる。

(3) エッジ角

量子化方向コードの旋回角の絶対値が90°～180°までのものをエッジ角とする。ここで、90°未満の角度はエッジではないとみなす。これによりストロークの屈曲点を判別する。

(4) 端点

各ストロークの特徴の一つである書き始めと書き終りの点，すなわち始点と終点との座標値である。

2.2.2 単一文字認識

手書き入力パターンから得られるストロークの特徴情報より、ファジィ関係を作り，各ストロークに対して予め学習された辞書パターンとファジィ合成を行うことにより文字認識を行う。

2.2.3 文字認識のためのファジィ関係

Yを文字種の集合とし、

Y＝{’a’,’b’, …,’Z’, …,
’=’, …,’√’}　(1)

とする。これらの単一文字種を以下の3つのストローク特徴によるファジィ関係を基にして特徴抽出を行う。これらの詳細は前報[2]にあるので，ここでは概略のみ述べる。

(1) ストロークの時間と方向のファジィ関係

それぞれXT：時間、XD：量子化方向の各コードの集合とし、下のように定義し，各時間における方向コードの出現割合に応じたファジィ関係を合成することによりストロークのパターン識別を行う。

XT＝{時間0、時間1、…、時間9}　(2)

XD＝{方向0、方向1、…、方向15}　(3)

(2) ストロークの始点、終点のファジィ関係

XV：端点（始点、終点）の垂直方向の位置（y軸方向），XH：端点（始点、終点）の水平方向の位置（x軸方向）に対して3分割したファジィ集合とし、以下のように定義し，各ストロークの始点と終点の位置を特徴としたファジィ関係を合成する。

XV={T, ZV, B}, XH={L, ZH, R}　(4)

(3) 運筆時間とエッジ角のファジィ関係

今回はエッジ角情報を加えた。XTは時間と方向のファジィ関係と同様のものとする。XGをエッジ角に対する集合とし、以下のように定義する。これにより各ストロークの屈曲点を特徴としたパターン識別ができる。

XT＝{(時間0、)時間1、…、時間8(、時間9)}　(5)

XG＝{方向－7、方向－6、…、方向0、…、方向8}　(6)

2.2.4 学習

以上の3つの特徴情報をもつファジィ関係によって，各ストロークについて文字種別に学習を行い，各ストロークごとの辞書を作成する。よって書き順は無視できるものとする。

2.2.5 認識

認識手順は画数で分類し、絞り込みを行う。次にi番目のストロークの量子化方向コードA_i・位置情報P_i・エッジ角情報B_iと，学習したストロークの辞書$L_A(n)$、$L_P(n)$、$L_B(n)$とをそれぞれファジィ合成し、i番目のストロークにおいて文字種Yに対するファジィ集合を求める。その中で最も高いものを求める。ファジィ合成の結果が最大になる文字種Yを第1位認識結果、2番目、3番目をそれぞれ第2位、第3位とする。

2.3 数式認識部

前処理部分と文字認識部で得られた情報をもとに数式認識を行う。具体的には，文字認識の結果で第1位、第2位、第3位となる文字候補および，正規化される前のチェインデータを長方形で囲った時の最小x、y座標、横幅、縦幅(図4)を用いる。各文字部をx座標順に並べかえると同時に，次に述べる特殊記号があればその認識を行う。

2.3.1 特殊数式記号の認識

分数記号や、Σなど数式上に1列に並べること

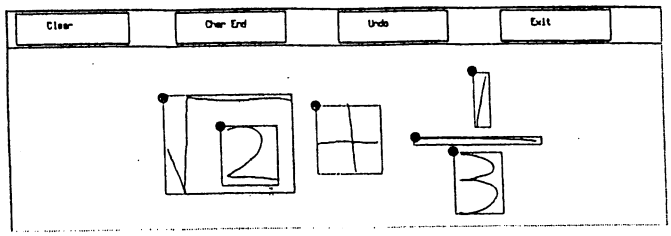


図 4. 手書き数式で用いるパラメータ

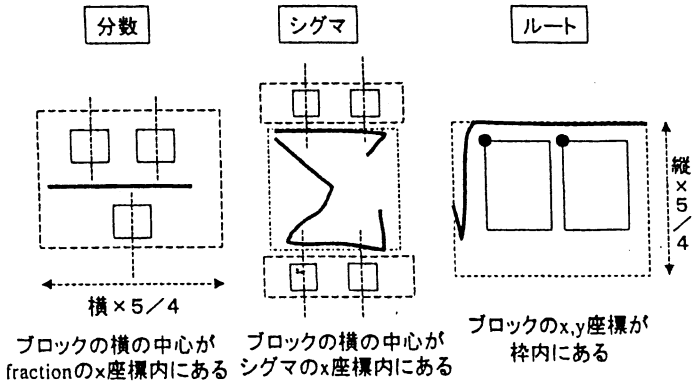


図 5. 特殊記号の構造判定

ができない記号の判定をする。(図 5)

それらの判定条件はつぎのようにする。

分数記号：分数記号の線分の横幅内において，上下に分子，分母文字の横（x 座標で）の中心がある。もし上下に無いならば，“－”(マイナス)記号となる。

“Σ”シグマ記号：シグマ記号の上(下)端から上(下)に横幅の半分の範囲に上(下)付き文字の中心がある場合に特殊記号の構造認識[3]を行う。

2.3.2 添え字認識

次に添え字判定を行う(図 6)。普通全ての文字の添え字判定で，基準となるラインを使えば簡単となるが，ここでは快適な手書きの自由さを重視するため，文字列の傾きなどを考慮しなければならないので，基準ラインを使わない。

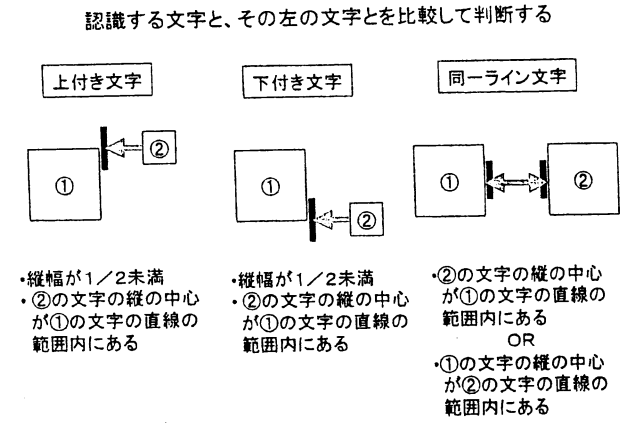


図 6. 添え字の認識方法

添え字判定は

・上(下)付文字：文字の横幅の中心が前の文字の縦幅の上(下)１／４より上(下)、幅が前の文字の半分以下，

・同一ライン文字：文字の横幅の中心が前の文字の縦幅の１／４～３／４以内にある，

となるように設定する。

2.3.3 括弧判別

まず、文法的に括弧が正しいかどうかを調べる。以下の場合、

・“(”、“[”、“{” が最後

・“(”、“[”、“{” に添え字がある

・“)”、“]”、“}” が最初

・“(”、“[”、“{” の後に四則演算記号がある

・“)”、“]”、“}” の前に四則演算記号がある，

は括弧以外になるように処理を行い，第２位、第３位候補に括弧以外がある場合，それらに置き換える。括弧しか無い場合はそのままとする。また、

・“(”、“[”、“{” の次に “)”、“]”、“}” がある

・対応する括弧が無い，

の場合、それぞれの文字認識候補の第２位、第３位を探し、選択する。無い場合はそのままとする。

2.4 出力

以上のように数式認識された結果は TeX[4]のソースコードで出力される。

3 認識実験

下記の数式を試作的に５人の筆記者に５パターンづつ書いてもらい、認識率を調べた。

(a) $$\sqrt{2}+\frac{56}{\sqrt{34}} \qquad (7)$$

(b) $$\sum_{m=0}^{3} B_m \qquad (8)$$

(c) $$g(x)=a_0x^2+a_1x+a_2 \qquad (9)$$

(d) $$y_0^{ax^2+c} \qquad (10)$$

それぞれの例を図 7 に示す。正しく認識できた場合はそれぞれ、TeX のソースコードで，

(a) ¥sqrt{2}+¥frac{56}{¥sqrt{34}}

(b) ¥sum_{m=0}^{3} B_{m}

(c) g(x)=a_{0}x^{2}+a_{1}x+a_{2}

(d) y_{0}^{ax^{2}+c}

となる。

4 認識実験の結果と考察

4.1 実験結果

1 文字あたりの認識時間は TurboLinux4.2 (Celeron466MHz)で約１６ｍｓであった。この速度は、書き手にストレスを与えない時間である。

認識実験の結果を表１に示す。数式（a）や数式（b）(図７参照)はほぼ期待通りの認識率を見せた。分数記号の認識が１００％であった。数式(c)は“(”、“)”を誤認するケースが多かったが、括弧判別で誤認を減少させることができた。しかし“2”を“z”、“a”を“9”と誤認するケースが見られた。数式（d）では“y”の第２角目が下方に伸びすぎ、添え字“0”をしばしば添え字として認識しないことがある(図8)。これは、“y”の下付添え字判定部分の判定範囲より上部に“0”の位置がくることがあるためである。

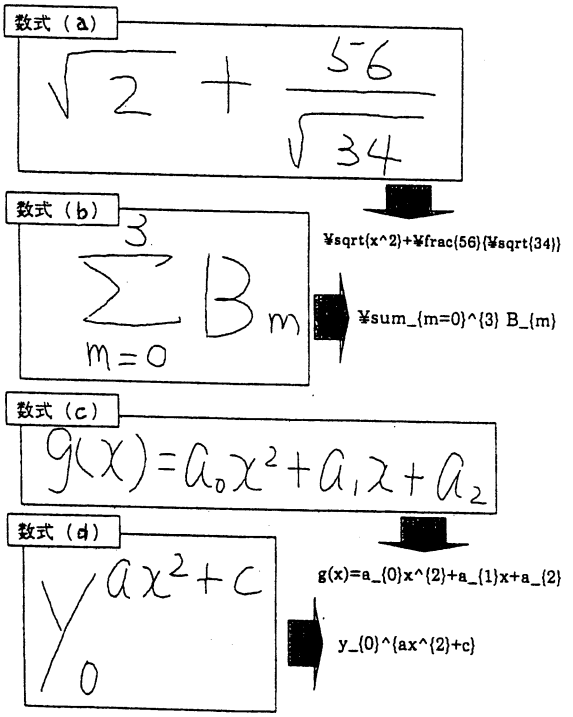


図 7. 手書き数式認識の例

数式	文字認識率(%)	添え字認識率(%)
(a)	97.8	98.5
(b)	98.0	100.0
(c)	93.5	98.3
(d)	90.3	93.7

表 1. 手書き数式認識率

4.2 結果の考察

認識結果では括弧判別が難しいと思われたが，エッジ角が括弧ストロークの特徴をとらえ、有効に働いていることがわかった。

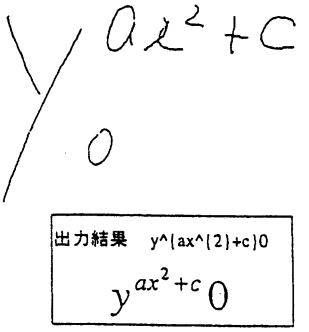


図 8. 数式(d)の誤認例

数式（a)、数式（b）に関してはほぼ満足する結果が得られた。根号記号、Σ記号、分数記号の認識はうまくいっているといえる。また、分数の書き順やΣの添え字の書き順がまちまちでも正しく並べかえることができた。数式（c）は括弧の文字の認識を誤認することがある。これは括弧判定で修正しているのである程度の認識率は確保できるが、まだ認識率は十分だとは言えない。数式（d）は添え字に添え字があることで添え字の認識が困難になるようであった。

5 まとめ

ストローク、エッジ角、位置情報を検出するオンラインの文字認識と位置情報から数式の構造を認識し、TeX のソースコードを出力するシステムを構築し、その有効性を確認した。

文字認識システム単体で見ると１文字あたりの認識率は１６ｍｓ、文字認識率は９８．１３％となった。また、数式認識では、平均で文字認識率９４．９％、添え字認識率９７．６％という結果になった。これは数式認識のシステムとしては有効であるといえる。

参考文献

1）青島、森、末永：“実時間手書きストローク解析による数式入力システム”信学技報 PRMU98-19 1998-5

2）安木,松井，西守，西村，石原：“オンラインファジィ手書き英文字認識システム”，第 14 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 387-390, 1998.

3）岡本 正行、東 裕之：“記号のレイアウトに着目した数式構造認識”,信学論 D-II Vol. J78 no. 3 pp. 474-482 1995.

4）野寺 隆志：“楽々LaTeX”共立出版 1996.

[問い合わせ先]
〒680-8552 鳥取市湖山町南４丁目１０１
鳥取大学工学部電気電子工学科
西守克己
TEL 0857-31-5688, FAX 0857-31-0880
E-mail : nisimori@ele.tottori-u.ac.jp

FE2−2

主観的等価面積の実験とファジィ理論による解析

An experiment on subjectively equivalent area and its analysis by fuzzy theory

野本 弘平　　若松 正晴　　大矢 富保
Kohei NOMOTO　Masaharu WAKAMATSU　Tomiyasu OYA
三菱電機 デザイン研究所
Industrial Design Center, Mitsubishi Electric Corp.

Abstract: This paper presents an experiment and a fuzzy analysis which were performed in order to find the subjective scaling of figures' area. In the experiment, twenty subjects observed a circle and a square. The circle's size was fixed, whereas the subjects could control the size of the square. The subjects selected the square whose area seemed to be equivalent to that of the circle. In the fuzzy analysis, the answer of the individual subject was described by a membership function. Aggregating the membership functions of the individual subjects, we have obtained resultant membership functions which imply the subjectively equivalent area between a circle and a square under some conditions.

1 はじめに

人間に受け入れられやすいヒューマンインタフェースや、人間と同様な外界の認識の仕組みを開発するためには、人間が視覚的に外界をどのように受容しているか、その仕組みを研究することが必要である。Kudo, Saito, Yamamura と Ohnishi は、個人装着型イメージ表示器を開発するために、単眼視における距離の受容について研究を行った[1]。Wu, Ge と Liu は、パタン認識のアルゴリズムを開発するために、主観的輪郭に関する特性について研究を行った[2]。

さらに、人間の視覚的外界受容を明示的に説明するための研究として、Kawamura と Onisawa は、主観的な色の印象の表現モデルを提案し[3]、Suganoは、あいまいな色を言葉で表現できるようにするためのファジィモデルを提案した[4]。

一方、大きさの知覚も、上記のような開発には重要な要因である。しかし、本人が大きさをどのように知覚しているかと言うことは、上記の色のように明示的な聞き出すことは困難である。J.P.Smith は、ランダムに発生させた図形を用いて、大きさの知覚に関する研究を行った[5]。その結果、形の大きさは形の性質に依存することが分かった。

本報告では、図形として、円形と正方形とを取り上げ、その主観的な大きさに関する実験とその解析の結果について扱う。実験では、20人の被験者に、大きさの固定された円形と大きさを変化させられる正方形とを観察させ、円形に面積が等しいと感じられる正方形を答えさせた。この実験結果の解析では、被験者の回答をメンバーシップ関数により表現し、ファジィ理論を用いて解析した。

2 主観的等価面積を評価するための実験

20名の被験者を対象として、円形と正方形との主観的等価面積を評価するために行った実験について説明する。

被験者の前に、2台のCRTを置いた。一方のCRTには円形を表示し、もう一方のCRTには正方形を表示した。円形の大きさは固定されているが、正方形の大きさは、被験者が自由に変化させることができる。正方形の大きさを、その一辺の長さ x で代表させる。

被験者は、正方形の大きさを変化させながら、次の3つのパラメータを答えた。

(1) 十分に大きな正方形から初めて、被験者 i は、次第にその大きさを小さくして行く。そして、その面積が、与えられた円形よりも明らかに小さく見え始める時を答える。この時の正方形の大きさを主観的等価面積の下限と呼ぶこととし、その一辺の長さを x_i^{Inf} で示す。

(2) 被被験者 i 正方形を自由に変化させる。そして、その面積が、与えられた円形に最も等しく見える時を答える。この時の正方形の大きさを主観的等価面積のピークと呼ぶこととし、その一辺の長さを x_i^{Peak} で示す。

(3) 十分に小さな正方形から初めて、被験者 i は、次第にその大きさを大きくして行く。そして、その面積が、与えられた円形よりも明らかに大きく見え始める時を答える。この時の正方形の大きさを主観的等価面積の上限と呼ぶこととし、その一辺の長さを x_i^{Sup} で示す。

3　ファジィ理論による実験結果の解析

被験者に答えさせた主観的等価面積の下限、ピーク、および上限から、個々の被験者にとっての主観的等面積のファジィ集合を作成することを考える。この場合、下限、ピーク、および上限がこの順番で並ぶんでいれば、問題なく期待するファジィ集合を形成することが可能である。しかし、人間の感覚には往々にして矛盾があり、実際に被験者が答えた値は、必ずしもこの順には並んでいない。すなわち、ファジィ集合を作成するためには、この人間の矛盾の問題を解決することが必要である。

まず、矛盾のない場合、すなわち、等号も含めて下限、ピーク、および上限がこの順で並んでいる場合には、メンバーシップ関数は、下限で0、ピークで1、そして上限で再び0とし、その間は直線で補完するものとした。

次に、下限と上限は$x_i^{Inf} \le x_i^{Sup}$の関係を保つが、ピークがこれらの外側にある場合には、下限、ピーク、および上限を結んでできる三角形の内、$x_i^{Inf} \le x \le x_i^{Sup}$の部分のみを取り出してメンバーシップ関数とした。このことにより、メンバーシップ関数の最大値は1未満となり、矛盾の大きさによってファジィ集合を抑圧していることとなる。

最後に、下限が上限よりも大きい場合には、被験者の回答には信憑性がないものと考え、ピークの値に関わらず、空集合とした。

このようにして作成した個々の被験者iにとっての主観的等面積のファジィ集合$\mu_i(x)$を、被験者数N人分統合し、人間にとって一般的な主観的等面積のファジィ集合$\overline{\mu}(x)$を導く。ここでは、この統合の方法として平均化処理を用いた。

$$\overline{\mu}(x) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mu_i(x) \qquad (1)$$

結論として得られた一般的な主観的等面積のファジィ集合$\overline{\mu}(x)$を図1に示す。図1-1は、白地に黒い図形の場合で、図1-2は、ライトグレーの地にダークグレーの図形の場合である。ともに、メンバーシップ関数は2峰性の形状となった。メンバーシップ関数が最大値を取るのは、真に面積が等しい1.00付近であり、2番目に大きな値はその0.93から0.94倍辺りであった。

4　おわりに

円形と正方形との主観的等価面積を評価するための実験を行い、ファジィ理論により解析を行った。その結果、この主観的等価面積のファジィ集合は2峰性となり、真に面積の等しい大きさで最大となり、次に大きな値をこれに対して0.93倍から0.94倍辺りで取ることが分かった。

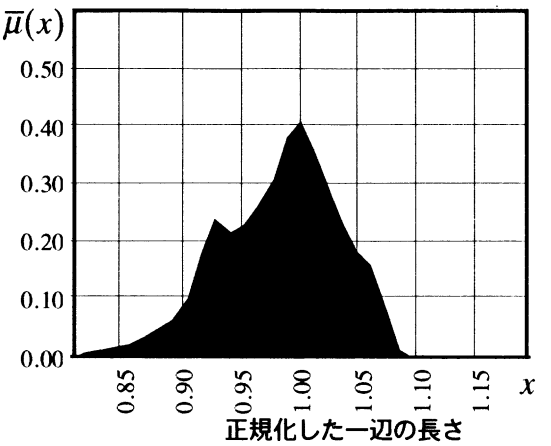


図1-1　白地に黒の図形の場合

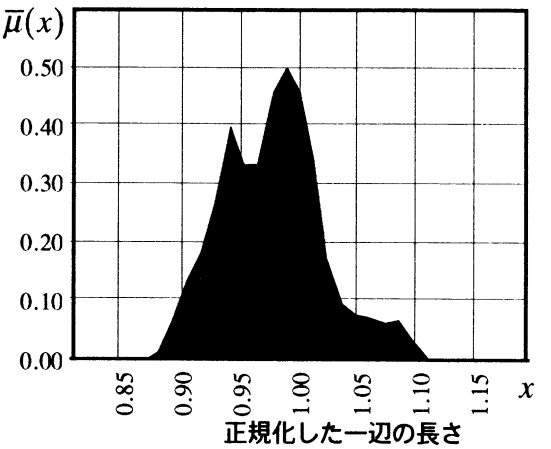


図1-2　ライトグレーの地に
ダークグレーの図形の場合

図1．与えられた円形と主観的に等価な面積の正方形のファジィ集合
（正方形は、真に等価な面積の正方形により正規化された一辺の長さで示す。）

参考文献

[1] H.Kudo, et al. : Measurement of the ability in monocular depth perception during gazing at near visual target – effect of the ocular parallax cue -, IEEE Int.Conf. on SMC, pp. II-34 - 37, October 1999.

[2] J.L.Wu, et al. : Measurement and quantitative analysis of human characteristic on visual subjective contours, IEEE Int.Conf. on SMC, pp. II-44 - 49, October 1999.

[3] M.Kawamura et al. : Expression model of subjective color impressions, IEEE Int.Conf. on SMC, pp. VI-212 - 217, October 1999.

[4] N.Sugano : A fuzzy set theoretical approach for color specification using color names, IEEE Int.Conf. on SMC, pp. VI-230 - 235, October 1999.

[6] J.P.Smith : The effects of figural shape on the perception of area, Perception & Psychophysics, vol.5, pp.49-52, 1969.

[問い合せ先]
〒247-8501　鎌倉市　大船　5-1-1
三菱電機(株)デザイン研究所インタフェースデザイン部
野本　弘平　　Tel: 0467-41-2310　Fax: 0467-41-2390
E-mail: nomoto@idc.melco.co.jp

FE2−3

レンズモデルに基づく人間—エージェント共創場における分散認知の解析

Analyzing Distributed Cognition in a Field of Co-Adaptation between Human and Agent Using Lens Model

○椹木 哲夫，堀口 由貴男，鈴井 康浩
○ Tetsuo SAWARAGI, Yukio HORIGUCHI, Yasuhiro SUZUI
京都大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract: Intent sharing among a human and an agent will be of importance. We present a novel approach based upon an assumption that intermediating field information can function as medium for sharing their intentions. Our idea is coherent with a number of recently emerging ideas on human cognition insisting that a human cognition is not attributed only to a human mind, but is distributed in the external world (i.e., distributed cognition).

1 はじめに

近年，人間と機械（自動化）との間での分業化はさまざまな負の効用をもたらし始めている．実際，自動化の能力が単純に人間の労働を代替するだけの道具（task-offloading tool）としての人工物から，判断や意思決定・学習までをも自律的に行うほどに知能化の進んだ**自動化エージェント**との協調系のデザインは必ずしも固定的な分業ではうまくいかない．とくにある決められた手順を人間が少しでも逸脱すれば，人間の置かれている状態に関わりなく直ちにシステムが警告を発するようなシステム設計は，人間の**行動多様性**をことごとく排除することでの安全性を保証しようとするものであるが，この多様性を発揮できることこそが人間の学習・習熟には不可欠な要素で，かつ作業環境や他者との関係生成を促進するために不可欠な要因でもある．

以下本稿ではPC上に構築したボート漕ぎシミュレータを用いて，２本のオールの運動を各々人間と自動化が担ってボートを目標地点まで進めるタスクに対し，両者の間での非言語コミュニケーションに介在する作業環境設計のパラメータが両者の協調の進み具合に与える影響について考察する．とくに人間と自動化の間で，いずれか一方が他方に対して一方的な拘束を課する形態の協調ではなく，お互いが能動的にインタラクションする**相互主導型インタラクション**（mixed initiative interaction）の概念[3]を提唱し，人間と自動化が相互に自律的に調整し合い，行動できるような作業環境設計に関する一般的な知見について考察する．

2 分散認知

近年，人間の認知モデルに対する見直しが進められている．認識は自分と対象との関係性の上に生じるものであり，そこには環境要因と行為者の認知要因との相互作用が必ず存在する．人間の認知が「頭」の中にだけあるのではなく，頭の中にある知識の構成が，頭の外である社会的世界とどのように関わりあって相互の活動を限定しあっているのか，そしてさらに拡大するならば，複数の活動構造源が互いに相手の活動をどのように形づくっており，互いの関係のなかでどのような適合がうみだされてそれぞれが効率化されているのか，等の問題を解明するべく進められている研究領域が「分散認知」（distributed cognition）の研究である[2]．分散認知においては，外部環境あるいはパートナーとしての他者との間での「能動的」な関係構築が，認知主体（行為主体）の認知負荷を減ずる有効な手だてとなっている点が強調される．ここでの「能動性」とは，寄与の環境パラメータのみに依存するのではなく，行為者自ら環境・他者に作用を起こしその応答を観察することで得られるより有効な新たな手がかりを収集することができること，さらに多数の直接知覚可能な諸変数間の相関関係から，自らの行動決定にとって有意な要因となりえる少数の潜在的な深層変数を抽出し，これによって行動決定の自由度の低減化を計ることができる．このことは人間と自動化の協調，とくに自律性を前提とするエージェントと人間とのコミュニケーションにおいても同様で，円滑にして最小認知負荷でのコミュニケーションを可能にする「共創場」の形成が不可欠となる．

3 ブランズウィックのレンズモデル

環境がどのように各種の認知活動に影響を与え，これを効率化しているのかについて，環境—行為者あるいは外部—内部を切り離すことなく両者を共通の記述形式でモデリングしようとするのが，Brunswikそしてその後のGibsonらの研究である．Brunswikの**レンズモデル**（Lens Model）を図1に示す[2]．このモデルの特徴は，**手掛かり**（cues）が環境内の基準を示唆している程度が，人間が同じ手掛かりから行う認知判断においてどれほど適正に反映されたものになっているかを測定するもので，前者を**生態学的妥当性**（ecological validity），後者は**手掛り利用**（cue utilization）と呼ばれる（図1内の重み係数 w_{en}, w_{sn}）．

これらの重みの真の値を求めることはできないが，通常は観察から集められたデータ集合に対して，**基準**（criteria）ならびに**判断**（judgment）のそれぞれに対して共通の手掛かり集合がどの程度寄与しているかについて重回帰式などの線形モデルでモデル化する（図1内の重み係数 h_{en}, h_{sn}）．そしてさまざまな手掛かり集合の変数の実現値に対して応答される両変数の値の間の相関値が**一致度**（achievement）として定量化される．この値は両モデルの出力が一貫している場合には 1.0 の値をとり，この場合環境の特性を忠実に捉えた認知が行われていることに相当する[4]．

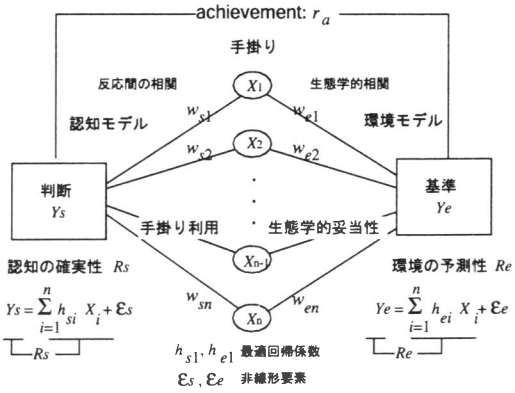


Fig. 1: Brunswik のレンズ・モデル

元来のレンズモデルは単一の行為者と環境との関係を捉えるモデルであるのに対して，我々はこれを人間—自動化—作業環境からなる３者間の関係に拡張したモデルとして考える．すなわち人間操作者に利用可能な手がかりとｓっｈてシミュレーション環境場で直接利用可能な諸変数群と捉え，人間操作者がシミュレータ環境で参照できる手がかりと，一方自動化の側でシミュレータ環境から参照できる手がかりに違いがある際に，両者の相手に合わせるという共適応の形態がどのような違いとして現れるかについて明らかにするのが目的である．なお本研究では，以上のうち生態学的妥当性と自動化側の手がかり利用については固定し，人間側の手がかり利用のみを様々に変化させた場合の協調の形態の変化について考察する．

Kirlik は上述のレンズモデルを拡張した新たな**一般化レンズモデル**の提案の中で，「手掛かり」を知覚と行為の両者に分け，直接知覚することができる**近接知覚変数**（proximal perception: PP）と直接それを変化させることのできる**近接行為変数**（proximal action: PA）に二分している．さらに基準や判断に相当する深層の遠隔変数についても同様に**遠隔知覚変数**（distal perception: DP）と**遠隔行為変数**（distal action: DA）を識別し，「場」の情報をこれらの組みあわせとして以下の４つに分類している[3]．

1. **Type I**　[PP,PA]：直接知覚可能で直接操作可能な変数
2. **Type II**　[PP,DA]：直接知覚可能だが直接操作不可能な変数
3. **Type III**　[DP,PA]：直接知覚不可能だが直接操作可能な変数
4. **Type IV**　[DP,DA]：直接知覚不可能で直接操作不可能な変数

以下本研究では上記の分類に従って，環境場のパラメータを分類し，それぞれの組みあわせ下で創発する協調形態について，人間操作者が自動機械・エージェントの各々を相手にする場合の協調パフォーマンスの違いについて考察する．

4　実験環境と状況設定

本研究では人と機械の共創の題材としてボート漕ぎについてシミュレーションする．シミュレータは Microsoft Windows 上で Visual C++と DirectX により作成した．ボート漕ぎインターフェースを Fig.3(a) に示す．DirectX はジョイスティックをデバイスとして用いることができるほかに，描画の視点方向が可変で，異なる視点からのさまざまな手がかりを表示・非表示したインターフェースを実現でき本実験に適する．

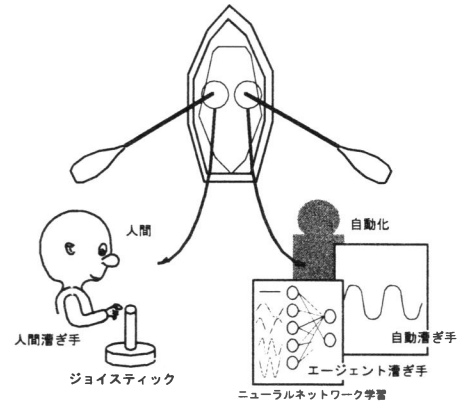


Fig. 2: 実験環境

操作者はジョイスティックによってオールを操作する．オールは「ため」の部分と「漕ぎ」の部分を操作感の違いとして操作者が体感できる．ジョイスティックを前に倒す動作とオールを前に持っていく動作（ため）が対応し，またオールで水を漕ぐ際には，ジョイスティックに力覚フィードバックが発生し，水の抵抗を体感することができる．

ボートとオールの他に環境内に８つの異なる色のブイをボートを囲むように等間隔に配置し，環境に固定する．本実験では人と機械（自動化）が左右の各オールの操作を担当し，協力してボートをまっすぐに進ませることが両者に課せられたタスクである．

また，作業環境として以下のような３つの環境場を用意する．各環境場における操作者に利用可能な変数の分類を Fig.3に示す．

- **Case 1**：相手のオールの動きを主に観察することができるように視点を設定．
- **Case 2**：視点をボートの先端に置き，前方のブイのみを見ることができるように設定．これはブイをたよりにまっすぐ進んでいるかどうかを確認することに相当．
- **Case 3**：鳥瞰的な位置に視点を設定．ボート，オール，ブイを全て見ることが可能．

	Case 1	Case 2	[redacted]
自分のオールの位置・速度	[PP, PA]	[DP, PA]	[PP, PA]
相手オールの位置・速度	[PP, DA]	[DP, DA]	[PP, DA]
ボートの位置・方向	[DP, DA]	[DP, DA]	[DP, DA]
ボートの推進速度・旋回速度	[DP, DA]	[DP, DA]	[DP, DA]
目標ブ　の位置	[DP, DA]	[PP, DA]	[PP, DA]
目標ブ　とボートの相対距離	[DP, DA]	[PP, DA]	[PP, DA]
参照ブ　とボートの相対角	[PP, DA]	[PP, DA]	[PP, DA]

Fig. 3: 3つのシミュレーションと環境変数の分類

人間漕ぎ手の相手としては，一定周期でオールを漕ぐ「自動漕ぎ手」と，人の動きにあわせる「エージェント」を用意し，それぞれについて実験する．後者にはニューラルネットワークの教師あり学習の1つである逆誤差伝搬(BP)法とボルツマンマシンを組み合わせたものを用いる．これはBP法が局所解に陥りやすく，オール漕ぎ運動をうまく学習できない場合が存在したため，ネットワークの結合更新の際に訓練時間に依存する確率分布に従うノイズを与えることでBP法の学習能力を強化したものである．ここでの教師信号は相手オールの力点の位置座標（2次元）とする．これはエージェントがCase 1の状況でオールを漕ぐことに相当する．

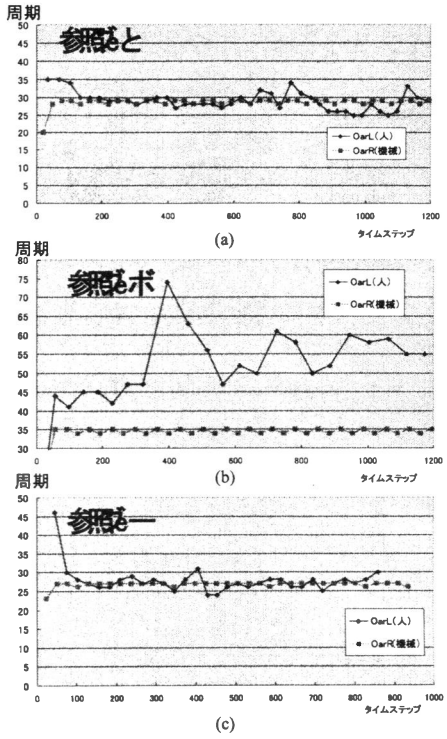


Fig. 4: 人間と自動漕ぎ手の協調におけるボート漕ぎ運動の周期の推移

5 実験結果

5.1 人－自動漕ぎ手による協調パフォーマンス

Case1-3の場合の人間と自動漕ぎ手の協調におけるボート漕ぎ運動の周期の推移をFig.4(a)-(c)に各々示す．Case1では左右のオールの動きはほぼ同期しているにもかかわらず，実際のボートの軌跡は，人の漕ぐ力のほうが強いためボートの軌跡は円を描いていた．Case1ではこの軌跡の異常を確かめる術を操作者は見出せない状況にあるためボートを直進させることはできない．ただしこの場合も，人間操作者の習熟が進めば，蛇行を回避できるようになったが，このとき操作者は相手のオールの動きだけでなく，その背後に写るブイ（参照ブイ）の動きをみて旋回しているか直進しているかを判断していた．これは[PP,DA]（知覚可，操作不可）である参照ブイとボートの相対角から[DP,DA]（知覚不可，操作不可）であるボートの相対方向を推測したことを意味する．Case2については，一定周期の自動漕ぎ手に対して人間の側からこれに合わせようとする能動性が観察でき，全ての試行を通じてほぼ直進を維持し，安定した軌道が確認できた．その理由として第一に，場の情報は[PP,DA]（知覚可，操作不可）である「目標オールの相対位置」のみであるにもかかわらず，それがタスクの目標である「ボートの方向」([DP,DA]（知覚不可，操作不可））の維持と密接な関係にあるためである．第二に，Case2における特徴として，Vr（旋回速度）の符号の周期的な変化があるが，これは操作者が目標ブイ（PP）の左右の動きからボートの旋回(DP)を推測し，その判断をもとにオールを漕いでいたことによる．当初は協調形態を「手探り」するような挙動が観察されるものの，その後はオールの動きは不可視であるにもかかわらず，両オールの漕ぐ周期の間にはそれぞれ整合的な関係が生成され，お互いの行為を媒介として「場の共有化」が起こったといえる．Case3（鳥瞰的な視点）の結果は，周期の上では当初から同期がとれ軌跡の上でも直進に近いパフォーマンスが得られた．

5.2 人－エージェントによる協調パフォーマンス

Case1-3の場合の人間とエージェント漕ぎ手の協調におけるボート漕ぎ運動の周期の推移をFig.5(a)-(c)に各々示す．Case 1の場合の典型的な両者の漕ぎ方の軌跡を位相の推移としてFig.6に示す．この場合のボートの軌跡は蛇行曲線であった．その中味について考察すると，およそ200タイムステップまでの最初の段階は，お互いが自分の漕ぎ方のリズムを相手に合わせようとしてコンテキストを生成しつづけている段階である．そのためボートは左右に旋回する．やがて両者のコンテキストが共有されリズムが等しくなる（200～280ステップ）．しかし人間は常に同じリズムで漕ぐことはできない．さらにお互いが相手のリズムに合わせるように自分のリズムを変化させるために両者の間にすれ違いが生じる．これらはやがて共有されたリズムを崩すことになる（280～400ステップ）．そしてお互いのコンテキストの生成が再度行われ，両者のコンテキストの生成・共有・崩壊という各フェーズが繰り返されている．このようなサイクルの繰り返しが，ボート軌跡の蛇行に現れていると考えられる．Case2では，エージェントが積極的に人間の漕ぎ方に合わせようとしている様子がわかる．ボートの軌跡は人－自動漕ぎ手の場合と同様にほぼ直進しているか，もしくは一定の割合で旋回している様子が確認できたが，その操作状況は全く異なっていた．この場合，相手オールの動きが視覚

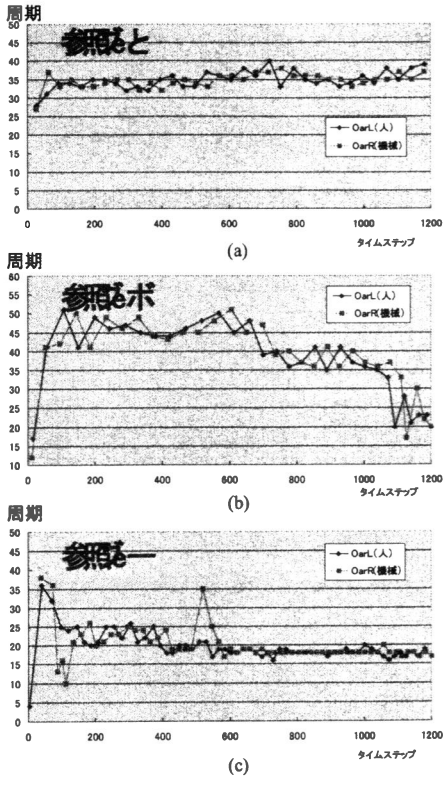


Fig. 5: 人間とエージェントの協調におけるボート漕ぎ運動の周期の推移

により確認できないため，ボートの挙動を制御するためには他の方法でその動きを知る必要がある．自動漕ぎ手が相手の場合には，自分が漕いでいない時のボート挙動の変化から相手の漕ぎを推測することが出来たのに対し，ここではエージェントが自分の動きに合わせてくるために，このような方法を用いることができない．したがってPA（直接操作可能）である「自分のオールの漕ぎ」をボート挙動の制御に結び付けることが難しく，被験者はしばしば漕ぐリズムを変えてみたり，動きをとめたりといった行動をとっていた．Case3 の特徴は，序盤に紆余曲折するが最終的にまっすぐにかそれに近い軌跡を描けるようになる点である．操作者は相手のオールに合わせつつ，目標ブイの動きも意識しながら漕ぐ必要がある．最初はお互いの動きがばらばらであるためボートの動きもぎこちないものの，操作者はその状況を確認できる状態にあるため，コース逸脱のフィードバックが速やかになされ初期の不安定なボート挙動が観測されているが，試行錯誤の末，両者のコンテキストが共有されるようになると，Case1，Case2 に比べ環境場からの手がかり情報が多い分，ずれを柔軟に修正できている．

なおボート旋回量の総和で計った協調パフォーマンスを Fig.7に示す．操作者に全ての情報が提供される Case3 のパフォーマンスが，より情報が少ない Case2 のそれを下回る結果が得られた．このことは，Case3 において操作者の注意が分散し，挙動が乱れたときにエージェントがそれに追随しようとしたため乱れが増幅したと考えられる．実際，熟練に至る前の技量の操作者にとって雑多な

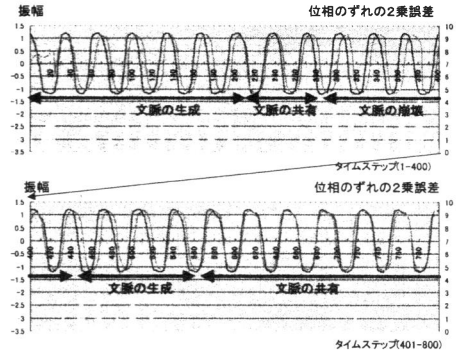


Fig. 6: 人間とエージェントの協調におけるボート漕ぎ運動の位相の推移

情報の中から関連する情報のみを選別するタスクは大きな認知負荷をもたらす．しかしその一方で，このような多様な利用可能な情報の提示も，習熟に至るプロセスの途上においては不可欠なものであり，これら両者の融合をいかに計っていくかが今後の課題となる[5]．

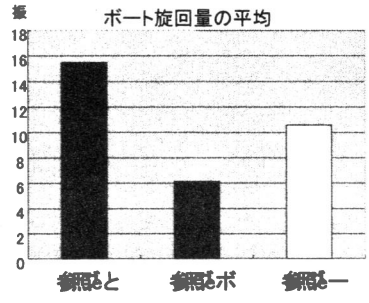


Fig. 7: 人間とエージェントの協調パフォーマンス

参考文献

1) Kirlik, A.: The Ecological Expert: Acting to Create Information to Guide Action, *Proc. of 1998 Symposium on Human Interaction of Complex Systems*, Dayton, OH, IEEE Comuter Science Press, (1998)

2) 椹木: 人間—機械—環境系からみる熟練技能, 計測と制御, **37**-7, pp.471 - 476 (1998)

3) 椹木, 北村, 稲垣: 自動化におけるヒューマン・システム・インタラクションの諸相, ヒューマンインタフェース学会誌, **2**(1), pp.30-39 (2000)

4) 椹木: モデリングにおける時間と環境の文脈と不確実性, 日本ロボット学会誌, **18**(3) , pp.318-324 (2000)

5) 椹木, 谷: 進化型計算手法による観察からの能動型見習い学習, 計測自動制御学会論文集, **35**(11), pp.1505-1513 (1999)

[連絡先] 〒606-01 京都市左京区吉田本町
京都大学大学院工学研究科精密工学専攻
椹木 哲夫
Tel. (075) 753-5266 Fax. (075) 771-7286
Email. sawaragi@prec.kyoto-u.ac.jp

電子セッション論文

9月6日（水）、9月7日（木）

Modeling numbers of teacher in vocational high school of Taiwan area

Chao-Chih Tsai

Department of Mathematics Education
National Tainan Teachers College
(cj123@ipx.ntntc.edu.tw)

Shun-Jyh Wu

Saint John's and Saint Mary's Institute of Technology

Abstract. This paper investigates the efficiency of forecasting models. The Tsai-Wu model, Chen model, Grey forecasting model and Song-Chissom model are used to analyze numbers of teacher in vocational high school. The historical data of numbers of teachers in vocational high school of Taiwan area from 1982 to 1996 are adopted. The results of fuzzy time series methods are compared with those of Grey forecasting model. It is found that the mean relative error of the forecasts can be improved from 1.41% for Grey forecasting model to 1.16% for Song-Chissom model, to 0.39% for Chen model and to 0.15% for Tsai-Wu model, the model proposed by the authors.

Keywords: Fuzzy time series; Fuzzy logical relationship; Grey forecasting model; Linguistic value

(Φ1,Φ2)-convex Fuzzy Mappings

Yu-Ru Syau
Department of Industrial Engineering, Yuan Ze University
Taoyuan, Taiwan 320, R.O.C.
E-mail:ieyrsyau@ie.yzu.edu.tw

1. Introduction

The concept of convexity is important for quantitative and qualitative studies in operations research or applied mathematics. Various generalizations of convex functions have been appeared in the literature. This was considered by many authors also in fuzzy set theory (for example, see [1,2,4-6]).

Recently, Pini and Singh [3] considered a class of functions called (Φ_1,Φ_2)-convex functions from a unified point of view: the function Φ_1 describes a generalized convex combination of arguments, and Φ_2 determines generalized convex combinations of values. In this way, a large number of well-known and new convexity conditions can be included.

Motivated by earlier research works, we propose the concept of (Φ_1,Φ_2)-convex fuzzy mappings, Φ_1-convex fuzzy mappings, and Φ_1-quasiconvex fuzzy mappings. We show that, for suitable choices of Φ_1 and Φ_2, some of the well-known classes of generalized convex fuzzy mappings are special cases of this new class. We also present some basic properties of the defining fuzzy mappings.

Supervised Fuzzy Kohonen Clustering Networks

Ching-Tang Hsieh Uei-Jyh Chen You-Chuang Wang
Department of Electrical Engineering, Tamkang University, Taiwan, R.O.C.
hsieh@ee.tku.edu.tw chenuj@cm1.hinet.net g6350015@tkgis.tku.edu.tw

Abstract

A fuzzy Kohonen clustering networks (FKCN) was proposed which integrates the fuzzy c-means (FCM) algorithm model into the learning rate and updating strategies of the Kohonen networks. This yields an optimization problem related to FCM, and the numerical results showed improved convergence as well as reduced labeling error. In this paper, we propose a supervised version of FKCN with the supervised learning algorithm that is similar to the learning vector quantization (LVQ2) algorithm. Two artificial data sets and Anderson's IRIS data are used to illustrate this method. The results show that proposed method is more effective than LVQ2 and the back-propagation (BP) algorithms. Moreover, it can terminate quickly with the same condition.

著者名索引

【あ】

秋田　真吾
WB5-3, 93

秋山　孝正
WA5-1, 39
FA3-1, 573

浅居　喜代治
TF3-1, 529

浅野　敏郎
TC3-1, 395

アスクア　ラファエル
WB5-2, 91

阿曽　光洋
WF4-3, 271

阿部　清子
FE1-1, 641

網野　栄郎
TD4-2, 455

荒井　良徳
WA5-2, 41

有川　晴彦
WA2-2, 11

有澤　政義
TB4-2, 357

安斎　剛
TD4-1, 451

易　建強
WD3-1, 163
WD3-2, 167
WD3-3, 171

飯田　一弘
WB4-3, 83

池田　進矢
WC2-2, 105
WC3-2, 117

井佐原　均
TC3-2, 399

石井　省爾
TE4-1, 493

石井　博昭
WE4-2, 225

石井　博昭
TB2-3, 339
TB3-2, 345

石田　斉
WA5-3, 45

石原　永伯
FE2-1, 649

石渕　久生
WB2-2, 61
WB2-3, 63
FB1-1, 581
FB1-2, 583

泉　清高
WD5-3, 191
WF3-3, 263

井田　正明
TB4-3, 361

井谷　久博
WD1-1, 143

市橋　秀友
WC4-2, 125
TF5-1, 547
TF5-2, 549
FA1-2, 555
FC1-3, 613

市村　匠
WC5-1, 131
WC5-2, 135
FC1-1, 605

伊藤　則夫
TC2-2, 387

伊藤　正博
TC1-1, 373

稲井田　次郎
WC1-1, 97

乾口　雅弘
TB4-1, 353
TB4-2, 357
TE2-3, 487
TF1-1, 515

井上　和夫
FA2-3, 569

井上　純一
WB3-3, 73

井上　武士
FC2-2, 619

井上　博行
TD4-3, 459

井ノ口　美佐子
FE1-2, 643

今西　茂
TA4-3, 311
TA5-1, 313
TD1-3, 429

入江　寿弘
WD2-1, 155

岩崎　正明
WD5-1, 183

岩崎　正宏
WC3-3, 119

岩下　志乃
TA2-3, 293

岩田　満
WF2-2, 251

碓井　智範
WF5-2, 277

植田　俊克
TE4-2, 497
TE4-3, 501

植西　健二
TE2-2, 485

鵜飼　英俊
FC1-2, 609

内野　英治
TC1-3, 379

内野　幸生
TF3-2, 533

内元　清貴
TC3-2, 399

宇野　裕之
WF1-1, 235
WF1-2, 239
WF1-3, 243
TD5-1, 463

馬野　元秀
WF1-1, 235
WF1-2, 239
WF1-3, 243
TD5-1, 463

海川　至幸
WB5-3, 93

江本　全志
WA4-1, 27
WE1-1, 193
WE1-2, 197

王　碩玉
WA1-1, 1
WA1-2, 3

WA1-3, 5
WA5-3,45
TA3-2, 301
TB5-2, 367
TB5-3, 369

大石　義
FE1-3, 645

大熊　繁
WB4-1, 77
WC3-3, 119
WF4-3, 271

大崎　美穂
FB2-1, 589

大下　修造
FC1-2, 609

大須賀　節雄
TE1-3, 479

大塚　和彦
TA1-1, 281
TB5-1, 363

大槻　充紀
WF1-1, 235

大月　隆一
WE2-3, 211

大野　英明
FB2-1, 589

大迫　真実
TF5-1, 547

大村　明弘
WC3-1, 115

大矢　富保
FE2-2, 653

小笠原　千尋
TA1-1, 281

岡田　真幸
TB3-1, 341

岡部　隆男
WB5-1, 87

奥崎　智裕
TE2-2, 485

奥田　徹示
TF3-1, 529

奥田　裕紀
FD1-4, 637

小倉　久和
WB4-3, 83
TA2-2, 291
FC1-2, 609

小田　憲志
WC4-1, 123

小田　哲久
TA5-3, 319

鬼沢　武久
WA4-3, 35
WF2-2, 251
TA2-3, 293
TD1-2, 425
TD4-1, 451

小野　能嗣
WC2-2, 105
WC2-2, 107
WC2-3, 111
WC3-1, 115
WC3-2, 117

【か】

笠井　義友
FA3-3, 577

風見　覚
WA4-3, 35

梶谷　賢司
WB3-3, 73

片井　修
TB1-2, 325
FC2-1, 615

片桐　英樹
TB2-3, 339

桂田　有香
TA3-1, 297

加藤　茂
WF2-2, 251

加藤　高志
TB5-2, 367

加藤　恒昭
TA1-3, 285

加藤　裕一
WE2-3, 211

金杉　昭徳
TE2-1, 481

上江洲　弘明
WC1-1, 97

上村　龍太郎
WC2-2, 107
WC2-3, 111
WC3-2, 117

神谷　和浩
WB2-1, 59

亀井　且有
TD4-3, 459
FA2-1, 561
FA2-2, 565
FA2-3, 569

川上　浩司
FC2-1, 615

川上　泰雄
WF3-1, 257

川口　順功
FE1-3, 645

河口　万由香
WE3-3, 221

川澄　未来子
TD2-3, 441

河田　耕一
WA1-2, 3

川中　普晴
FC2-3, 623

川村　誠
TD1-2, 425

川村　正樹
TC1-3, 379

Kwaw Obu-Cann
TC4-3, 413

韓　虎剛
WD4-3, 179

神崎　享子
TC3-2, 399

神田　和幸
TB5-1, 363

菅野　直敏
WC1-3, 101
TD1-1, 421
TD2-2, 437

菊池　彰洋
TA4-3, 311

菊池　浩明
WC2-2, 105
WC2-2, 107
WC2-3, 111

WC3-1, 115
WC3-2, 117
WE2-1, 203
WE2-2, 207

木口　量夫
WD5-3, 191
WF3-3, 263

北内　智子
WA3-3, 23

北垣　郁雄
TA2-1, 289

北川　悦司
TF3-3, 535

北山　功
WD1-2, 147

木戸　和彦
FA3-2, 575

木村　太
WA1-3, 5

木村　真理
TA5-1, 313

清本　盛明
FA2-1, 561

櫛木　雄介
TF2-1, 521

久保田　良輔
TC4-1, 405

窪野　哲光
TC5-1, 417

熊丸　健一
TA4-1, 305

粂田　起男
TA4-1, 305

栗山　裕
WC5-1, 131

ケネスJ.マッキン
WC5-3, 139
WF2-1, 247
WF4-1, 265

呉　志賢
TF5-1, 547

小島　瞳
TA3-2, 301

小高　知宏
WB4-3, 83
TA2-2, 291
FC1-2, 609

小谷　淳司
TB1-3, 327

Germano Resconi
TE3-1, 491

玄　光男
WB2-2, 61
WB2-3, 63

後藤　聡
WF1-2, 239

古殿　幸雄
WA3-2, 21

小西　忠孝
TB1-2, 325

小西　幹彦
TF3-1, 529

小林　俊一
TD4-2, 455

近藤　智大
FD1-2, 629

【さ】

齋藤　誠慈
WE4-2, 225

坂井　優
TC3-3, 403

坂和　正敏
TB2-1, 331
TB2-2, 335
TB2-3, 339

佐藤　章
WC1-1, 97

佐藤　秀司
WA5-2, 41

佐藤　浩史
TA1-3, 285

佐藤　雄一郎
FD1-3, 633

澤　亮治
TB1-1, 321

椹木　哲夫
FE2-3, 655

椎塚　久雄
WB4-2, 81
TA3-3, 303
TA5-2, 317

品田　誠一
TE4-2, 497
TE4-3, 501

篠木　剛
WB5-3, 93
FC2-3, 623

柴田　愛子
TC3-3, 403

柴田　浩司
FB3-2, 601

島川　学
WB3-1, 65
TE4-1, 493
FA3-3, 577

清水　友彦
TA3-3, 303

下田　学
WF3-1, 257

鍾　寧
TE1-3, 479

白井　治彦
WB4-3, 83
TA2-2, 291
FC1-2, 609

白木　渡
TC2-2, 387

新居　学
FB1-1, 581

新居　龍治
WB5-1, 87

鄒　軍安
FA2-3, 569

杉山　岳弘
FB2-1, 589

鈴井　康浩
FE2-3, 655

鈴木　和彦
TD2-3, 441

鈴木　俊博
WA3-3, 23
TE5-2, 509

須田　宏
WC1-1, 97

石　岩
WA2-3, 15

関　洋恒
WF4-1, 265

瀬田　和久
WF1-2, 239
WF1-3, 243
TD5-1, 463

瀬名波　強
WB3-2, 69

宋　少秋
TB3-2, 345

添川　真
WC5-3, 139

【た】

高木　友博
TA1-1, 281
TB5-1, 363

高木　昇
FB1-3, 585

高木　良浩
WD2-1, 155

高田　治
TF4-2, 539
TF4-3, 543

高梨　令
TA4-1, 305

高萩　栄一郎
WE3-1, 213

高橋　恒介
FE1-3, 645

高橋　将人
WE2-3, 211

高羽　実
FC2-2, 619

高間　康史
WF2-3, 255
FB3-1, 597

瀧村　尚己
WF2-1, 247

竹内　一郎
TE5-1, 505

竹内　晴彦
TA1-2, 283

竹内　康雄
WB1-3, 57

武田　夕紀
TA2-3, 293

武光　広志
TC3-3, 403

田郷岡　直美
FE1-1, 641

田崎　栄一郎
WB3-2, 69
WC5-3, 139
WF2-1, 247
WF4-1, 265
WF5-2, 277
TD5-2, 467
FD1-2, 629

田島　博之
TF1-2, 519

但馬　文昭
WC1-2, 99
TA5-3, 319

田島　正憲
TB5-1, 363

多田　薫弘
TC2-3, 391

橘　完太
WF3-1, 257

田中　一男
WD5-1, 183
WD5-2, 187
TE5-3, 513

田中　一成
TB5-3, 369

田中　喜美子
FB1-1, 581

田中　成典
TF3-2, 533
TF3-3, 535

田中　正道
FB2-2, 593

谷口　孝治
TA1-1, 281

谷口　唯成
WD5-2, 187

谷野　哲三
TB4-1, 353
TB4-2, 357
TE2-3, 487
TF1-1, 515

玉野　和保
TC3-1, 395
TD2-1, 433
FB2-3, 595

Tarek EL..Tobely
TC4-2, 409

陳　明浩
WE4-2, 225

董　菊珍
TE1-3, 479

津田　栄
WC1-1, 97

津田　竜一
TC4-2, 409

土谷　武士
WA1-1, 1
WA1-2, 3
WA1-3, 5
WA5-3, 45
TA3-2, 301
TB5-2, 367
TB5-3, 369

津本　周作
TE1-1, 471
TE1-2, 475

鶴岡　信治
WB5-3, 93
FC2-3, 623

鶴田　直之
TC4-2, 409

寺尾　道治
FB2-2, 593

寺野　寿郎
FB3-2, 601

徳高　平蔵
TC4-3, 413

徳丸　正孝
TA4-3, 311
TA5-1, 313
TD1-3, 429

豊浦　由浩
TF2-1, 521
TF2-2, 523

【な】

長岡　毅
WA2-1, 7

長坂　一徳
FC1-3, 613

長澤　庸二
WA3-1, 19

中島　恭一
FB1-3, 585

中島　智晴
FB1-2, 583

中島　洋一
WC1-2, 99
TA5-3, 319

仲田　明紀
WD1-2, 147

長田　和寛
TC1-3, 379

中田　典規
TE3-1, 491

永田　寅臣
WD1-3, 151

中津山　幹男
FE1-1, 641

中西　祥八郎
WC2-2, 105
WC2-2, 107
WC2-3, 111
WC3-1, 115
WC3-2, 117
WE2-1, 203
WE2-2, 207

中村　和男
TF2-3, 525

中森　義輝
WF4-2, 269

那須　俊将
TD2-2, 437

鳴門　雅之
WF1-3, 243

縄舟　守
WC4-2, 125

新宮　清志
WD2-1, 155

新美　礼彦
WB3-2, 69
TD5-2, 467

西﨑　一郎
TB2-1, 331
TB2-2, 335

西野　篤史
WE1-2, 197

西野　順二
WB4-3, 83
TA2-2, 291
FC1-2, 609

西村　亮
FE2-1, 649

西守　克己
FE2-1, 649

西山　信宏
WB4-2, 81

丹羽　啓一
TB2-1, 331
TB2-2, 335

野田　崇
TB1-2, 325

野田　肇
TF3-3, 535

野津　亮
FC2-1, 615

延原　肇
FB3-1, 597

野本　弘平
FE2-2, 653

【は】

萩原　将文
TB1-1, 321
TB1-3, 327

橋本　智己
WF3-2, 261

橋山　智訓
WB4-1, 77
WC3-3, 119
WF4-3, 271

畑　豊
TE2-2, 485
FB2-2, 593

畑瀬　圭太
TD4-3, 459

服部　陽一郎
WA3-3, 23

林　勲
WC4-3, 127

林　一久
FB2-3, 595

半田　久志
TB1-2, 325

坂東　正規
WC1-3, 101

樋口　智尚
WD4-1, 175

樋口　誠康
FC1-3, 613

平松　久佳
TC3-1, 395
FB2-3, 595

廣田　薫
WA5-2, 41
WD3-1, 163
WD3-2, 167
WD3-3, 171
WF2-3, 255
FB3-1, 597

福永　哲夫
WF3-1, 257

福並　正剛
TE1-2, 475

福元　伸也
WA3-1, 19

藤田　篤
WB1-2, 53

藤田　晴喜
TF1-1, 515

藤村　喜久郎
TC4-3, 413

藤村　俊平
FA3-3, 577

藤本　和則
TA1-3, 285

藤吉　誠
FB2-3, 595

ブラッハ　ミラン
TB3-2, 345
TB3-3, 349

古川　長太
WE4-1, 223

古金　裕美
WD4-2, 177

古田　均
TF3-2, 533
TF3-3, 535

古橋　武
WA3-3, 23
WA4-2, 31
WD1-1, 143
WF3-1, 257
TE5-1, 505
TE5-2, 509
FC2-2, 619

星野　孝総
FA2-2, 565

堀　強
TE5-3, 513

堀尾　恵一
TC1-2, 375
TC4-1, 405

堀口　由貴男
FE2-3, 655

本多　克宏
WC4-2, 125
TF5-1, 547
TF5-2, 549

本多　中二
TE4-2, 497
TE4-3, 501

【ま】

馬　青
TC3-2, 399

前田　利之
WC4-3, 127

前田　宏
FC2-2, 619

前田　幹夫
WB5-1, 87
WD4-1, 175
WD4-2, 177

前田　陽一郎
WB1-1, 49
WB1-2, 53
WD1-2, 147
TA3-1, 297
FA1-1, 551
FD1-3, 633

増井　重弘
FB3-2, 601

増田　貴裕
WD2-2, 159

増田　達也
WB3-3, 73

増山　博
TC1-1, 373
TC2-1, 383

松井　尚
FE2-1, 649

松浦　優子
WA2-2, 11

松岡　喜美子
TE1-2, 475

松下　光範
TA1-3, 285

松下　裕
TD3-1, 445
TD3-2, 447

松田　修三
TA5-3, 319

松田　充夫
WE4-4, 231

松本　幸一
TB4-1, 353

松本　裕二
TD5-1, 463

馬火　玄
WB4-3, 83

間淵　重昭
WE4-3, 227

馬屋原　一孝
TF4-1, 537
TF4-2, 539
TF4-3, 543

丸山　泰弘
WA4-1, 27

三重野　芳典
TA5-2, 317

水谷　香織
WA5-1, 39

水本　雅晴
WA1-1, 1
WA1-2, 3
WA2-1, 7
WA2-2, 11
WA2-3, 15
WD1-2, 147

道端　正裕
TC2-1, 383

宮岸　聖高
TF5-2, 549

宮越　淳
TA2-2, 291

宮腰　淳一
TD3-2, 447

宮腰　政明
WE3-3, 221

宮下　雄一郎
TC3-1, 395

宮島　廣美
WA3-1, 19

宮武　直樹
WC1-2, 99
TA5-3, 319

宮本　定明
TF4-1, 537
TF4-2, 539
TF4-3, 543

三好　力
TC1-1, 373
TC2-1, 383

武藤　裕美
WF5-1, 275

向殿　政男
WA4-1, 27
WB1-3, 57
WB2-1, 59
WE1-1, 193
WE1-2, 197
WE1-3, 199

向根　美和
WC5-3, 139

村井　哲也
TE3-1, 491

村上　周太
WB3-1, 65
WB5-1, 87
WD4-1, 175
WD4-2, 177
WD4-3, 179
TE4-1, 493
FA3-3, 577

村木　広和
TF3-3, 535

村田　忠
TA4-2, 307

村田　忠彦
WB2-2, 61
WB2-3, 63

村田　真樹
TC3-2, 399

村中　徳明
TA4-3, 311
TA5-1, 313
TD1-3, 429

目良　和也
FC1-1, 605

望月　怜美
TC3-3, 403

森　典彦
TA4-1, 305

【や】

安田　浩明
FA3-1, 573

安富　善彦
TF5-2, 549

安信　誠二
WB5-2, 91
WD2-2, 159
WD2-3, 161
WF5-1, 275

箭内　顕彦
WC1-1, 97

箭内　美智子
WC1-1, 97

矢野　均
FD1-1, 627

藪内　賢之
TF2-2, 523

山内　ゆかり
WB2-1,59

山川　あす香
TF5-1, 547
FC1-3, 613

山川　みゆき
TD2-3, 441

山川　烈
TC1-2, 375
TC4-1, 405

山口　静馬
WE2-3, 211

山口　人生
WE3-2, 217

山口　大輔
WF2-1, 247
WF4-1, 265

山崎　博昭
WD2-3, 161

山下　利之
WC5-1, 131
FC1-1, 605

山下　智成
FB3-2, 601

山下　元
WC1-1, 97

山田　耕一
FA1-3, 557

山田　尚史
WB3-1, 65

山田　初幸
TC4-3, 413

山藤　和男
WD5-2, 187

山元　秀洋
WA4-2, 31

山本　雅哉
WB4-1, 77

山本　裕亮
WF2-1, 247

湯場崎　直養
WD3-1, 163
WD3-2, 167
WD3-3, 171

横山　茂樹
TE1-2, 475

吉家　悟司
WB3-2, 69

吉川　大弘
WB5-3, 93
FC2-3, 623

吉木　裕一朗
TC4-2, 409

吉田　勝美
WC5-2, 135

吉原　一紘
TC4-3, 413

米山　忠暲
WC1-3, 101

【ら】

ラミーク　ヤロスラフ
TB3-3, 349

ランカ　ウダワッタ
WD5-3, 191

領家　美奈
WF4-2, 269

Rolly INTAN
WE1-3, 199

【わ】

若松　正晴
FE2-2, 653

和久田　肇
WD1-2, 147

和多田　淳三
WC4-1, 123
TF2-1, 521
TF2-2, 523

渡辺　桂吾
WD1-3, 151
WD5-3, 191
WF3-3, 263

渡辺　輝幸
WC4-1, 123

第１６回ファジイ システム シンポジウム実行委員会

実行委員長	中津山　幹男	(秋田公立美術工芸短期大学)
プログラム委員長	森岡　正臣	(宮城教育大学)
組織委員長	小松　正武	(秋田大学)

秋山　孝夫	(山形大学)	
阿部　清子	(秋田県立脳血管研究センター)	会計担当
石黒　純一	(秋田大学)	総務担当
神長　裕明	(福島大学)	プログラム担当
小松崎　年雄	(八戸工業大学)	
斉藤　誠	(アキタエレクトロデバイス)	デモ担当
佐藤　春夫	(日本大学)	
高橋　徹	(東北学院大学)	
田村　雅史	(アキタ電子)	会場担当
野村　松信	(秋田公立美術工芸短期大学)	広報担当
佐藤　英實	(秋田公立美術工芸短期大学)	事務局
高橋　洋樹	(秋田公立美術工芸短期大学)	事務局
伊藤　直美	(秋田公立美術工芸短期大学)	事務局

第１６回ファジィ システム シンポジウム講演論文集
第１６回ファジィ システム シンポジウム　プログラム委員会　作成
２０００年９月６日発行

発行：日本ファジィ学会（ SOFT ）
〒820－0067
福岡県飯塚市大字川津 680－41
財団法人　ファジィシステム研究所

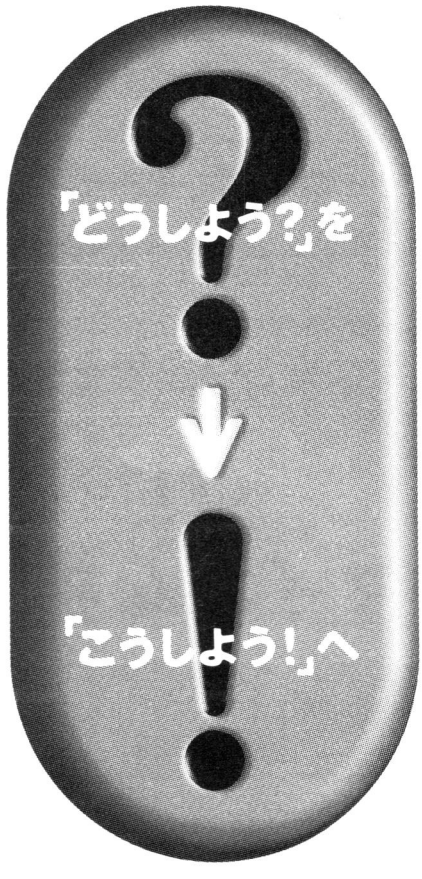
印刷所：東北大学生活協同組合印刷出版事業部　PRINT COOP
〒980－0812
宮城県仙台市青葉区片平２丁目１－１

OMRON
社会を豊かに、おもしろくするオムロン

こうなったらいいナ。ああなったらいいナ。
ということで、世の中、いつもいろんな「どうしよう?」が
あふれています。私たちオムロンは、そんな一人ひとりの
「どうしよう?」をちょっと違った角度から見て
「こうしよう!」という解決策を探しつづけてきました。
機械にできることは機械にまかせることで、人間はもっともっと
有効に時間を使ったり、考えたりすることができるはずだと。

私たちの最初の「こうしよう!」は、1933年に始まりました。
その頃、大きな社会問題だった結核。当時すでに
結核早期発見のためのレントゲン撮影が始められていましたが
心臓の鼓動によるブレのせいで、クリアな胸部写真を撮ることは
とても困難でした。そこで、私たちは、正確に作動する
レントゲンタイマーに着目。日本ではじめて20分の1秒で
作動する高精度タイマーの実用化に成功しました。
それまで難しかった鮮明なレントゲン撮影を可能にしたのです。
それ以来、私たちは、いま世の中で必要とされているものは
何だろうと考え、つねに新しい答えを探りつづけてきました。
いつのまにか、その分野は制御機器からファクトリー
オートメーション、世界で初めての駅の自動改札機や
銀行の現金自動支払機の開発、そして健康機器など生活に
密着したものまで、大きくひろがりました。

そして、いま2000年。グローバル化、高度情報化、少子高齢化、
環境問題など、さらにいろいろな課題が山積みされています。
でも、これは私たちにとってやりがいのあること。
人と社会がこれから必要とするものを見つけて、いち早く答えをだす。
そして、人間がいちばん人間らしく生きていける、最適な社会へ。
「どうしよう?」を「こうしよう!」にするオムロンの挑戦は、
まだまだつづきます。

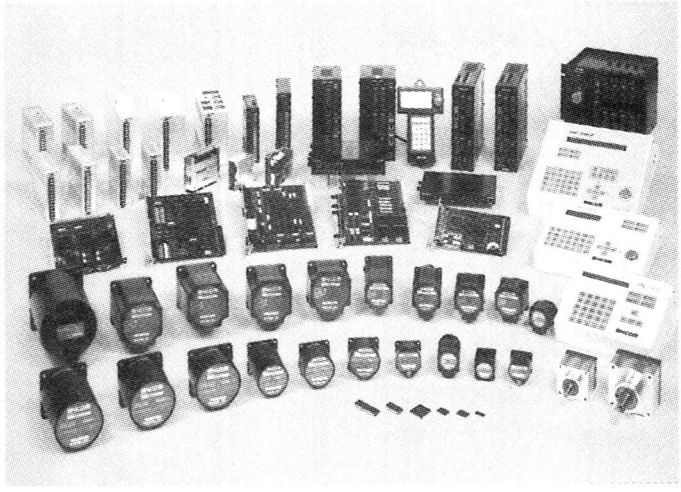


www.omron.co.jp

オムロン株式会社 ●インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー ●エレクトロニクスコンポーネンツビジネスカンパニー
●ソーシアルシステムズビジネスカンパニー ●ヘルスケアビジネスカンパニー ●クリエーティブサービスビジネスカンパニー ●事業開発本部

MOTOR CONTOROL PROVIDER

マイコムの制御技術は、
「人との共生」
を提案しています



マイコムは、モーションコントロールから人工知能まで、
先端技術を創造する技術集団です。

常に新しい技術を創造し、世界に向けて発信し続けています。

URL : http://www.mycom-japan.co.jp/

マイコム株式会社

●本　社　〒616-8303 京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町12
TEL 075-882-3601　FAX 075-882-6531
E-mail:support@mycom-japan.co.jp

●営業所　京都・東京　●工場　京都南

●海外拠点　台北・ソウル・サンフランシスコ・シンガポール

営業品目

■ネオ・パルスモータ／ドライバー
■PCI・コンパクトPCIバスコントローラ
■パソコン制御型 自動刻印装置
■5相ステッピングモータ／ドライバー
■ ISAバスコントローラ
■電子カムコントローラ
■無人走行車
■2相ステッピング用ドライバー
■VMEバスコントローラ
■モーション制御用LSI
■CNCミーリング・ドリリングマシン