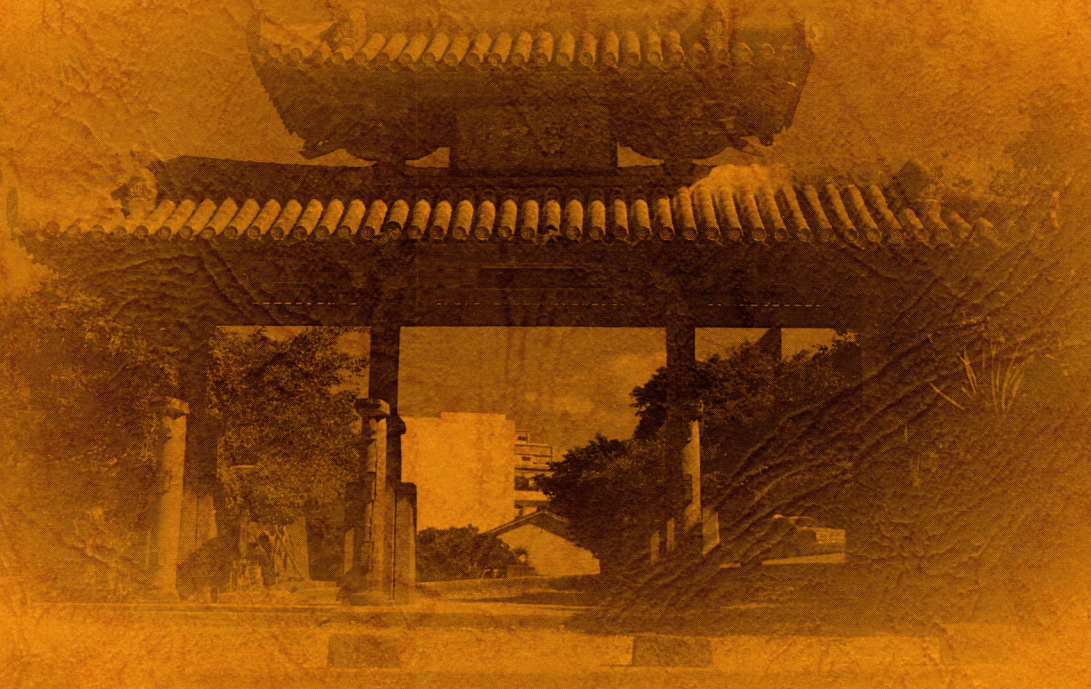
第 11 回
「ファジィ システム シンポジウム」

講 演 論 文 集

期　日　　1995年７月12日(水)・13日(木)・14日(金)

会　場　　琉 球 大 学 工 学 部 大 学 院 棟



SOFT

主催　日本ファジィ学会

(Japan Society for Fuzzy Theory and Systems)

第１１回

ファジィ システム シンポジウム
― システム科学として更なる発展を目指して ―

講 演 論 文 集

期 日: 1995 年 7 月 12 日 (水)・13 日 (木)・14 日 (金)

会 場: 琉球大学　工学部　大学院棟

主 催: 日本ファジィ学会
(SOFT: Japan Society for Fuzzy Theory and Systems)
〒 160 東京都新宿区西新宿 1-24-1　エステック情報ビル 24F
日本エステック情報協会内　電話　(03) 5322-3607

共 催: 国際ファジィシステム学会 (IFSA) 日本支部

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

第１１回ファジィシステム
シンポジウムの開催にあたって



日本ファジィ学会会長
向殿政男(明治大学　教授)

琉球大学のお世話になり，ここに第１１回のファジィシステムシンポジウムを開催する運びとなりました．当ファジィシステムシンポジウムはＩＦＳＡ（国際ファジィシステム学会）日本支部の時代に５回開催し，日本ファジィ学会が発足してから６回目を迎えることになりました．今回の発表論文の数が，これまでの最大であることからも分かりますように，日本ファジィ学会は研究の面はもとより、学会活動の面からもこれまで順調に発展をしてまいりました．これも会員の皆様方のご努力の賜であります．

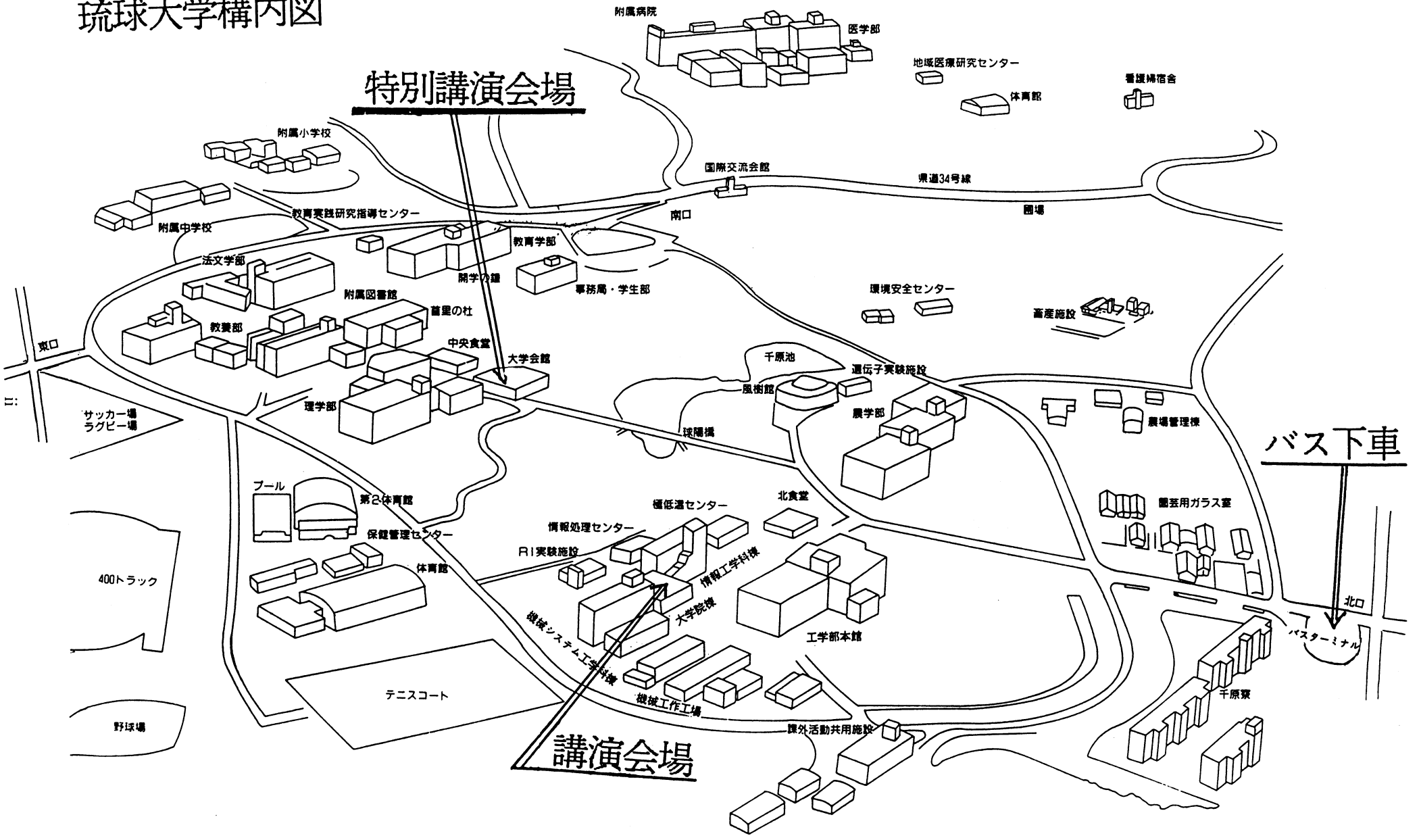
しかし，ファジィと本学会を取り巻く環境はここ数年大きく変わりつつあります．すなわち，ファジィ研究の周りには，ニューロ，カオス，遺伝的アルゴリズム，人工生命等々のソフトコンピューティングまたはインテリジェントコンピューティングと呼ばれる新しい研究の方向が盛んになり，その中でファジィがこれらの研究の中心的役割や、これらの新しい研究分野間の橋渡しの役割を演じることが期待されるようになってきており，ファジィが目指すところの重要性を我々はますます認識しなければならなくなって来ています．これらの要求に応えるためにも、大規模で複雑な、または人間の主観に関連したような、これまでの学問では研究対象とされなかった新しい問題に積極的にチャレンジして行くと言う実際的な面と、学問的な基礎を確立して体系化して行くと言う理論的な面の両面を、車の両輪の如くバランス良く一緒に探求して行く時期だと思います。

一方，日本ファジィ学会を取り巻く状況も劇的に変わりました。日本ファジィ学会と同じ年にスタートして、これまで世界のファジィ研究のセンターオブエクセレントとして活躍して来た、そして本学会を経済面でも精神面でも全面的にバックアップして頂いていた国際ファジィ工学研究所（ＬＩＦＥ）が、その役割を終えて当初からの予定通り今年の３月に解散致しました。従って、本学会は今後は全てを自前でやらなくてはならなくなりました。事務局は横浜にあったＬＩＦＥの中にこれまで置かせて頂いておりましたが、昨年末から現在の新宿にあるエステック情報協会に事務委託をしましたが、現在も事務局移転の過渡期が継続している状態です。会員が現在２０００人にも満たない当学会としては、当面、経済的にも大変困難な学会運営を強いられることになりますが、会員皆様のご協力を得て、ファジィの精神に相応しく、柔軟で自由な活動が出来る新しい体制の学会の在り方を今後模索して行かなければならない時期だと思います。

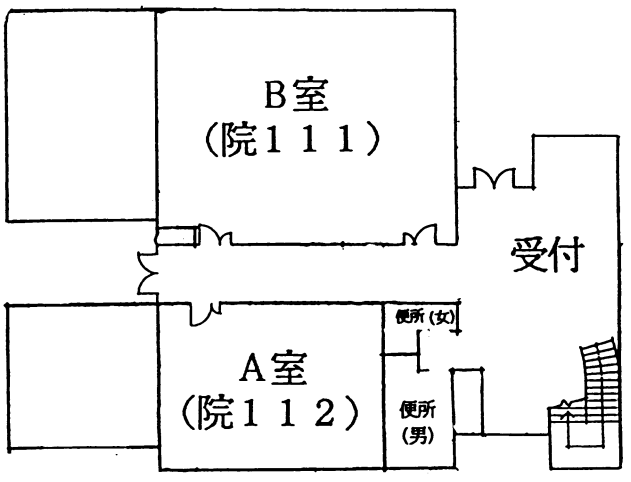
このような大事な時期に、多くの学会員が沖縄に集い、夏の明るい太陽の下で、大いに楽しく活発に意見交換をし、かつヒューマンコミュニケーションを交わすことで、新しい研究の方向を見いだし、ついでに新しい学会の在り方等も議論して頂ければ幸と存じます。その上に、お互いの友好を情も暖めて頂ければこんな素晴らしいことはありません。

最後になりましたが、このよう素晴らしい機会を準備された本シンポジウムの実行委員長であります村田　忠先生、プログラム委員長であります宮城隼夫先生をはじめご協力頂いた琉球大学の多くの先生方に心から感謝申し上げます。

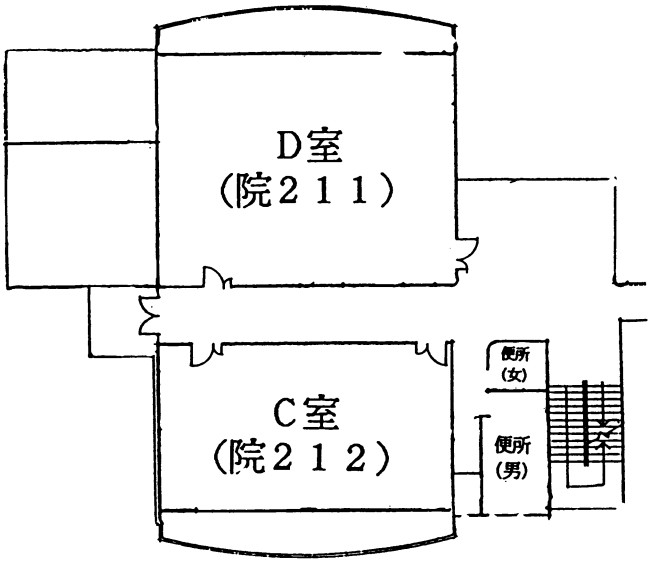
琉球大学構内図


特別講演会場
附属病院
医学部
地域医療研究センター
体育館
看護婦宿舎
附属小学校
国際交流会館
県道34号線
教育実践研究指導センター
南口
附属中学校
教育学部
法文学部
開学の鐘
事務局・学生部
附属図書館
首里の杜
教養部
中央食堂
大学会館
東口
環境安全センター
畜産施設
千原池
遺伝子実験施設
風樹館
農学部
理学部
サッカー場
ラグビー場
球陽橋
農場管理棟
バス下車
プール
第2体育館
極低温センター
北食堂
保健管理センター
情報処理センター
RI実験施設
園芸用ガラス室
体育館
400トラック
情報工学科棟
大学院棟
北口
バスターミナル
工学部本館
機械システム工学科棟
テニスコート
機械工作工場
千原寮
野球場
課外活動共用施設
講演会場

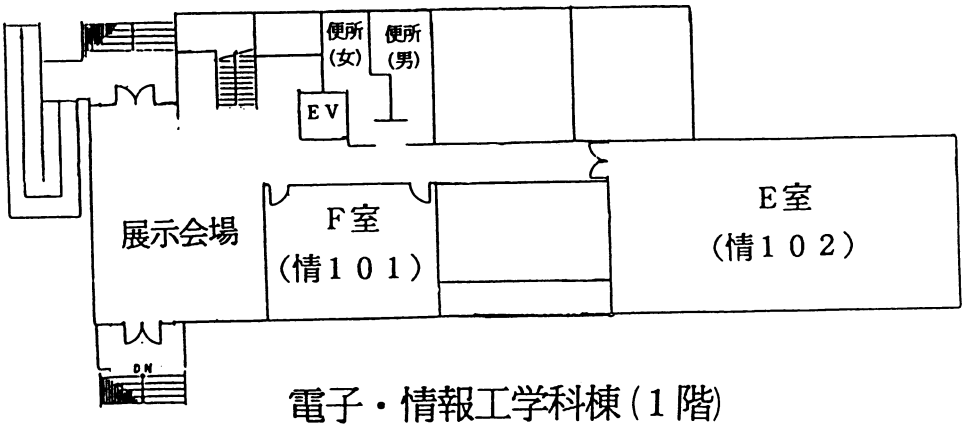
会 場 配 置 図



大学院棟(１階)



大学院棟(２階)



電子・情報工学科棟(１階)

プログラム概要

特別講演　琉球大学 大学会館

７月１２日（水）　１３：００～１４：００ 司会　向殿政男（明治大学）
米盛裕二先生（琉球大学）　「哲学とファジィネス」

招待講演　琉球大学 大学会館

７月１３日（木）　１３：００～１４：００ 司会　村田　忠（琉球大学）
照屋比呂子先生（沖縄県工業試験場）　「泡盛の話」

企画セッション

「ファジィ制御」	オーガナイザ：小沢和浩（法政大学）	３件
「エキスパートシステム」	オーガナイザ：馬野元秀（大阪大学）	７件
「ファジィＯＲ」	オーガナイザ：玄　光男（足利工業大学）	８件
「ノンエンジニアリング」	オーガナイザ：奥田徹示（大阪工業大学）	８件
「土木応用」	オーガナイザ：古田　均（関西大学）	４件
「カオス」	オーガナイザ：山口　亨（宇都宮大学）	４件
「医療・健康・感性」	オーガナイザ：有田清三郎（関西医科大学）	４件
「教育工学」	オーガナイザ：山下　元（早稲田大学）	１０件
「エボルーショナリコンピューティングI」	オーガナイザ：下原勝憲（ATR）	７件
「エボルーショナリコンピューティングII」	オーガナイザ：古橋　武（名古屋大学）	４件
「学生（ＧＡ，推論，認識）」	オーガナイザ：椎塚久雄（工学院大学）	１０件
「英　語」	オーガナイザ：仲尾善勝（琉球大学）	８件
「ビール」	オーガナイザ：廣田　薫（東京工業大学）	
	パネリスト：高木英行（九州芸術工科大学）	
	パネリスト：林　陽一（明治大学）	
	パネリスト：馬野元秀（大阪大学）	
	パネリスト：柴田崇徳（機械技術研究所）	

一般講演

一般講演１５分（質疑応答を含む）

第１１回ファジィシステムシンポジウム日程

７月１２日（水）　セッション名と司会者

	A室	B室	C室	D室	E室	F室
9:30 ～ 10:30	WA1 推論(１) 西守克己 (鳥取大学)	WB1 制御(応用１) 田中一男 (金沢大学)	WC1 データベース 高良富夫 (琉球大学)	WD1 GA(１) 遠藤聡志 (琉球大学)	WE1 ファジィOR(１) 【企画ｾｯｼｮﾝ】 玄光男 (足利工業大学)	
－ 休　憩 －						
10:45 ～ 11:45	WA2 推論(２) 鳶敏和 (ダイダン)	WB2 制御(応用２) 江澤義典 (関西大学)	WC2 学習(１) 本多中二 (電気通信大学)	WD2 GA(２) 石渕久生 (大阪府立大学)	WE2 ファジィOR(２) 【企画ｾｯｼｮﾝ】 市橋秀友 (大阪府立大学)	
－ 昼　食 －						
13:00 ～ 14:00	特別講演 「哲学とファジィネス」 講師：米盛裕二先生（琉球大学） 司会：向殿 政男（明治大学） 会場：琉球大学 大学会館					
－ 休　憩 －						
14:30 ～ 15:30	WA3 推論(３) 馬野元秀 (大阪大学)	WB3 制御(応用３) 鎌野琢也 (徳島大学)	WC3 学習(２) 林　勲 (阪南大学)	WD3 GA(３) 高木英行 (九州芸工大学)	WE3 ファジィOR 和多田淳三 (大阪工業大学)	WF3 信頼性 小山健 (徳島文理大学)
－ 休　憩 －						
15:45 ～ 16:30	WA4 集合(１) 高木昇 (富山県立大学)	WB4 制御(応用４) 安信誠二 (筑波大学)	WC4 心理学 山口静馬 (山口大学)	WD4 GA(４) 山田孝治 (琉球大学)	WE4 モデリング(１) 田野俊一 (日立製作所)	WF4 ビールセッション 【企画ｾｯｼｮﾝ】 廣田薫 (東京工業大学)
－ 休　憩 －						
16:45 ～ 17:30	WA5 集合(２) 河口万由香 (北海道大学)		WC5 制御(方法論１) 川路茂保 (熊本大学)	WD5 GA(学生) 【企画ｾｯｼｮﾝ】 下島康嗣 (名古屋大学)	WE5 モデリング(２) 玉城史朗 (琉球大学)	
17:45 ～ 18:45	－ 総　会 － 会場：B室					

７月１３日（木）　セッション名と司会者

	A室	B室	C室	D室	E室	F室
9:30 ～ 10:30	TA1 推論（４） 村上周太 （九州工業大学）	TB1 制御（応用５） 上里勝實 （琉球大学）	TC1 ノンエンジニアリング（１） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 小田哲久 （愛知工業大学）	TD1 ｴﾎﾞﾙｰｼｮﾅﾘｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞ（Ⅰ）（１） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 下原勝憲 （ＡＴＲ）	TE1 教育工学（１） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 礒本征雄 （名古屋市立大学）	
－ 休　憩 －						
10:45 ～ 11:45	TA2 推論（５） 中西祥八郎 （東海大学）	TB2 制御（方法論２） 中津山幹男 （秋田美術工芸短期大学）	TC2 ノンエンジニアリング（２） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 奥田徹示 （大阪工業大学）	TD2 ｴﾎﾞﾙｰｼｮﾅﾘｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞ（Ⅰ）（２） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 下原勝憲 （ＡＴＲ）	TE2 教育工学（２） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 矢鳴虎夫 （九州工業大学）	
－ 昼　食 －						
13:00 ～ 14:00	招待講演　「泡盛の話」 講師：照屋比呂子先生（沖縄県工業試験場） 司会：村田忠（琉球大学） 会場：琉球大学 大学会館					
－ 休　憩 －						
14:30 ～ 15:30	TA3 推論（６） 増井重弘 （法政大学）	TB3 制御（方法論３） 山本哲彦 （琉球大学）	TC3 測度・積分（１） 高萩栄一郎 （専修大学）	TD3 ｴﾎﾞﾙｰｼｮﾅﾘｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞ（Ⅱ） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 古橋武 （名古屋大学）	TE3 教育工学（３） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 宮武直樹 （法政大学）	TF3 土木応用 【企画ｾｯｼｮﾝ】 秋山孝正 （岐阜大学）
－ 休　憩 －						
15:45 ～ 16:45	TA4 推論（学生） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 菊池浩明 （東海大学）	TB4 画像処理 山ノ井高洋 （北海学園大学）	TC4 測度・積分（２） 室伏俊明 （電気通信大学）	TD4 ハードウェア 秋月影雄 （早稲田大学）	TE4 チューニング 大北正昭 （鳥取大学）	
18:30 ～ 20:30	－ 懇 親 会 － 会場：パシフィックホテル					

７月１４日（金）　セッション名と司会者

	A室	B室	C室	D室	E室	F室
9:30 ～ 10:30	FA1 英語セッション（１） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 尾知博 （琉球大学）	FB1 ロボティクス（１） 片井 修 （京都大学）	FC1 ヒューマン インタフェース 伊達惇 （北海道大学）	FD1 クラスタリング 宮本定明 （筑波大学）	FE1 カオス 安田恵一郎 （東京都立大学）	
－ 休　憩 －						
10:45 ～ 11:45	FA2 英語セッション（２） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 陳延偉 （琉球大学）	FB2 ロボティクス（２） 柴田崇徳 （機械研）	FC2 医療（１） 星野聖 （琉球大学）	FD2 ニューラル ネットワーク （１） 金城寛 （琉球大学）	FE2 カオス 【企画ｾｯｼｮﾝ】 山口亨 （宇都宮大学）	FF2 ファジィ工学 応用（１） 安田昌司 （三洋電機）
－ 昼　食 －						
13:00 ～ 14:00	FA3 エキスパート システム（１） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 鬼沢武久 （筑波大学）	FB3 意志決定（１） 中村和男 （長岡技術 科学大学）	FC3 医療（２） 北條暉幸 （産業医科大学）	FD3 ニューラル ネットワーク （２） 五百旗頭正 （明電舎）	FE3 ファジィ制御 【企画ｾｯｼｮﾝ】 小沢和浩 （法政大学）	FF3 ファジィ工学 応用（２） 長堂勤 （琉球大学）
－ 休　憩 －						
14:15 ～ 15:15	FA4 エキスパート システム（２） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 金子隆臣 （九州東海大学）	FB4 意志決定（２） 長沢伸也 （立命館大学）	FC4 医療・健康・ 感性 【企画ｾｯｼｮﾝ】 有田清三郎 （関西医科大学）	FD4 ニューラル ネットワーク （３） 田中雅博 （岡山大学）	FE4 ファジィ制御（１） 山崎東 （日揮）	
－ 休　憩 －						
15:30 ～ 16:30	FA5 認識（学生） 【企画ｾｯｼｮﾝ】 吉川歩 （京都工芸 繊維大学）			FD5 ニューラル ネットワーク （４） 辻村泰寛 （足利工業大学）	FE5 ファジィ制御（２） 前田幹夫 （九州工業大学）	

目　　次

特別講演　琉球大学 大学会館

7月12日（水）　13：00～14：00 司会　向殿政男（明治大学）　.... 1
米盛裕二先生（琉球大学）　「哲学とファジィネス」

招待講演　琉球大学 大学会館

7月13日（木）　13：00～14：00 司会　村田　忠（琉球大学）　.... 5
照屋比呂子先生（沖縄県工業試験場）　「泡盛の話」

一 般 講 演

7月12日(水)

A室

WA1 推論(1) 9:30 ～ 10:30 司会 西守 克己(鳥取大学)

WA1-1: ニューロ・ファジィ手法による大規模熱源システムの負荷予測 9
北川善也，○市橋秀友，三好哲也，上久保典昭(大阪府立大学)

WA1-2: プロセス異常診断へのファジィ推論の適用 13
○楊宗胥，鈴木和彦，島田行恭，佐山隼敏(岡山大学)

WA1-3: ファジイ推論による台風発生数の予測について 15
○石島英，河辺照之(琉球大学)

WA2 推論(2) 10:45 ～ 11:45 司会 蔦 敏和(ダイダン(株))

WA2-1: 各種ファジィ推論法の最適化パラメータの検討 - 模型自動車の走行制御シミュレーション - 17
嶋津謙治，○西守克己，宮内肇(松江工業高等専門学校)、加藤義人，石原永伯(鳥取大学)

WA2-2: カート・ポール系ファジィ制御におけるポール立ち上げ方式の改善 19
松浦克昌，○永森光晴(図書館情報大学)

WA2-3: ファジィシステム記述言語の試作処理系 23
○鍵田威，石畑清(明治大学)

WA2-4: ファジィシステム記述言語の標準化に向けて 27
○石畑清，森雄一郎(高知大学)，大塚和彦，新沢洋太，向殿政男(明治大学)

WA3 推論(3) 14:30 ～ 15:30 司会 馬野元秀(大阪大学)

WA3-1: 不完全な知識下での「アバウト推論」方式 31
○松澤和光，藤本和則(ＮＴＴコミュニケーション科学研究所)，石川勉(拓殖大学)

WA3-2: t-ノルムに基づく合成を用いた一般化分離規則の実現について 35
○河口万由香，立花啓，伊達惇(北海道大学)

WA3-3: ファジィ論理関数あてはめアルゴリズムに基づく知識抽出システム 39
○塚原泰明，菊池浩明，中西祥八郎(東海大学)

WA4 集合(1) 15:45 ～ 16:30 司会 高木昇(富山県立大学)

WA4-1: ファジィ関係方程式の解集合の性質について 43
○今井英幸，宮腰政明，伊達惇(北海道大学)

WA4-2: ファジィ直線の定義への考察 45
○劉偉傑，菅野道夫(東京工業大学)

WA4-3: 除外のルールを用いた合成ファジィ関係式の一解法 49
宮城隼夫，○登川誠，山下勝己(琉球大学)

WA5 集合(2) 16:45 ～ 17:30 司会 河口万由香(北海道大学)

WA5-1: 不完全記述多値クリーネ関数の存在条件 51
○高木昇(富山県立大学)，菊池浩明(東海大学)，中島恭一(富山県立大学)，向殿政男(明治大学)

WA5-2: L－ファジィ集合によるファジィ推論について 55
○川瀬真(帝京平成大学)，柳原二郎(中央大学)，陳啓浩(北京郵電学院)

WA5-3: ファジィルールベースが疎である場合の線形補間型推論法の適用条件 59
○石岩，水本雅晴(大阪電気通信大学)

B室

WB1 制御 (応用 1)　9:30 ～ 10:30　司会　田中一男 (金沢大学)

WB1-1: ファジィ制御によるロードトレインの走行制御 63
○韓虎剛，村上周太，前田幹夫 (九州工業大学)

WB1-2: ニューロ・ファジィ融合システムによる飛行機の自動着陸システム 67
○岡田浩之 (富士通研究所)、マティアスケッペン (Humboldt University)

WB1-3: 2ステッピングモータによる平面上のボールの運動軌道のファジィ制御 71
湯場崎直養，○易建強，大谷正幸，芦田隆次，畝村暢一、川崎 慎一 (マイコム株式会社)，廣田薫 (東京工業大学)

WB1-4: 多自由度系に対するファジィ制御知識の表現と獲得に関する検討 75
○小倉久和，Muchammad Romzi，小高知宏 (福井大学)

WB2 制御 (応用 2)　10:45 ～ 11:45　司会　江澤義典 (関西大学)

WB2-1: １０台のトレーラを連結させたトラックの後退運転制御
ーモデルに基づくファジィ制御 (並列分散的補償) の適用ー 79
田中一男 (金沢大学)，○吉岡啓輔 (三菱電機)

WB2-2: ファジィ推論を用いた質点系構造物の振動制御 83
新宮清志，伊藤堅，入江寿弘 (日本大学)，○川村仁 (日本大学大学院)，川西利昌，三井和男 (日本大学)

WB2-3: ペレット造粒プラントのためのファジィ制御システムについて 87
○中村誠，堺敏明 (三新化学工業 (株))，田中恭治，白上貞三 (山口県工業技術センター)、
小泉達也，酒井義郎 (山口大学)

WB2-4: 熟練者の手法を取り入れた魚類乾燥制御システム 91
○中村誠，藤本正克 (山口県工業技術センター)，北澤雅之，酒井義郎 (山口大学)

WB3 制御 (応用 3)　14:30 ～ 15:30　司会　鎌野琢也 (徳島大学)

WB3-1: 自己調整ファジィコントローラを用いた高速多軸同期システム 95
○福見淳二，鎌野琢也，鈴木茂行，原田寛信 (徳島大学)，片岡雄 (片岡機械製作所)

WB3-2: フォークリフトの油圧回生ファジィ制御システム 97
○戸田正章、遠藤真一郎，林義人 (神鋼電機株式会社)

WB3-3: ファジィ推論により目標の設定と操作量の補正を行うファジィ PID 制御系による
石油プラントの非定常状態制御 101
○谷哲次，小林弘明，歌代誠 (出光興産)，馬野元秀 (大阪大学)，田中一男 (金沢大学)

WB4 制御 (応用 4)　15:45 ～ 16:30　司会　安信誠二 (筑波大学)

WB4-1: 予見ファジィ制御方式に基づく知的駐車制御システムの模型自動車による評価 105
安信誠二，村井泰仁，○山本幸一 (筑波大学)

WB4-2: ファジィとＧＡによる三重倒立振子におけるマン・マシンシステム 109
増井重弘，寺野寿郎，○井田博哉 (法政大学)

WB4-3: 自律分散系における柔らかい協調機構について 113
○江澤義典，森戸健一，植村和正 (関西大学)

C室

WC1 データベース　9:30 ～ 10:30　司会　高良富夫 (琉球大学)

WC1-1: ファジィデータモデルにおけるタプルのメンバーシップ値の解釈の曖昧さの考慮 115
中田典規 (千葉経済大学短期大学部)

WC1-2: 情報検索のキーワードとしての印象語の類似および反意なファジィ関係に関する定量的考察 119
○磯本征雄，長谷川聖美、研直宏 (名古屋工業大学)、吉根勝美 (南山大学)、横山清子 (名古屋市立女子短期大学)

WC1-3: 射影追跡ＩＤ３によるファジィルールの削減 123
島内正裕，○市橋秀友，三好哲也 (大阪府立大学)，吉本富士市 (和歌山大学)

WC1-4: オブジェクト指向に基づく自然言語問い合わせによる印象検索システム 127
○城田暁伸 ((株) 東芝)，前田博 (九州工業大学)

WC2 学習 (1)　10:45 ～ 11:45　司会　本多中二 (電気通信大学)

WC2-1: 多入力システムのファジィルール自動生成法 131
○木村哲也，清水正，加藤信之，牧野弘 (富士ゼロックス株式会社)

WC2-2: 状況データベース構築のための一考察 133
○藤本太郎，菅野道夫 (東京工業大学)

WC2-3: 背景知識を用いた AND/OR 演算子学習型ファジィ ID3 137
○林勲 (阪南大学)，小澤順 (松下電器産業 (株) 中央研究所)

WC2-4: ニューロ・ファジィ射影追跡による密度推定 141
市橋秀友，○長坂一徳，三好哲也，野崎大輔 (大阪府立大学)、
北口嘉亮 (大阪府立産業技術総合研究所)，喜田義宏 (大阪工業大学)

WC3 学習 (2)　14:30 ～ 15:30　司会　林勲 (阪南大学)

WC3-1: 屋内照明の階層型学習ファジィ制御システム 145
○佐久間岳，本多中二 (電気通信大学)

WC3-2: 教師無し学習型ファジィシステムによる階層型制御システム 149
下島康嗣，福田敏男，長谷川泰久 (名古屋大学)

WC3-3: ファジィ推論による行為決定評価に基づいた強化学習と倒立振子の制御 151
○堀内匡，藤野昭典，寺邊正大，片井修，椹木哲夫 (京都大学)

WC4 心理学　15:45 ～ 16:30　司会　山口静馬 (山口大学)

WC4-1: 主観に基づいた感情処理を用いた対話システム 155
○白濱成希，吉田香，矢鳴虎夫 (九州工業大学)

WC4-2: 感覚量の曖昧性と文脈効果を考慮した変動刺激音に対する心理的応答予測 159
山口静馬，○佐伯徹郎 (山口大学)，加藤裕一 (呉工業高等専門学校)

WC4-3: ファジィ理論による音声聴取時の有色外来雑音に対する心理的評価 163
○山口静馬，佐伯徹郎 (山口大学)，老松建成 (海上保安大学校)

WC5 制御 (方法論 1)　16:45 ～ 17:30　司会　川路茂保 (熊本大学)

WC5-1: ファジィモデルに基づく制御系の挙動を考慮したファジィ制御器の
言語的設計と倒立振子を用いた実験による検証 167
○足立学，古橋武，内川嘉樹 (名古屋大学)

WC5-2: 遺伝的アルゴリズムと超球形メンバーシップ関数によるファジィルール自動生成手法の提案とその応用 171
○井上博行，亀井且有，井上和夫 (立命館大学)

WC5-3: 非厳密評価によって進化させた直接ニューロ制御 175
○花田真一 (三菱電機プラントサービス (株))，吐合隆拡 (ダイキンプラント (株))，
中園邦彦，金城寛，玉城史朗，山本哲彦 (琉球大学)

D室

WD1 ＧＡ (1)　9:30 ～ 10:30　司会　遠藤聡志 (琉球大学)

WD1-1: 多目的ＧＡによる言語的識別ルールの選択 177
○石渕久生，村田忠彦 (大阪府立大学)，I.B.Turksen(Univ. of Toronto)

WD1-2: ＧＡによる知識構造の獲得 179
○大竹章裕，大谷忍，上木 ホセ リカルド，菊池浩明，中西祥八郎 (東海大学)

WD1-3: 対話型ＧＡを用いた歪音声の音質の改善 183
渡辺辰巳，高木英行 (松下電器 (株) 中央研究所)

WD1-4: 複数機械部品加工スケジューリング問題へのＧＡの適用 187
○井上修一，椎塚久雄 (工学院大学)

WD2 ＧＡ (2)　10:45 ～ 11:45　司会　石渕久生 (大阪府立大学)

WD2-1: Kochen 仮説に基づくメンバーシップ関数生成メカニズムの解明 189
渡辺諭 (南九州大学)

WD2-2: 致死遺伝子を用いた GA のモデルにおける遺伝的操作の設計 193
○謝孟春, 小高知宏, 小倉久和 (福井大学)

WD2-3: 構造適応型遺伝的アルゴリズムを用いたニューラルネットワークによるファジィルールの推論と学習 197
市村匠，○高野猛，田崎栄一郎 (桐蔭学園横浜大学)

WD3 ＧＡ (3)　14:30 ～ 15:30　司会　高木英行 (九州芸工大学)

WD3-1: 遺伝的アルゴリズムによるコンピュータネットワークの最適経路配分 201
○田口雄章，井田憲一，横田孝雄，玄光男 (足利工業大学)

WD3-2: ファジィクラシファイアシステムによる多入力システムの制御知識発見 205
中岡謙，○古橋武，内川嘉樹 (名古屋大学)

WD3-3: 局所改善型遺伝的アルゴリズムを用いたサインの特徴発見 207
○楊旭華，古橋武 (名古屋大学)，小幡賢三 (日本電装 (株))，内川嘉樹 (名古屋大学)

WD3-4: 生物の情報システムに基づく遺伝的アルゴリズムによるファジィルール発見 211
○吉川大弘，古橋武，内川嘉樹 (名古屋大学)

WD4 ＧＡ (4)　15:45 ～ 16:30　司会　山田孝治 (琉球大学)

WD4-1: 遺伝的アルゴリズムを用いた概念学習 215
○遠藤聡志 (琉球大学)，大内東 (北海道大学)

WD4-2: 因子分析，ＧＡ，学習型ファジイ推論を用いた多入力を扱う顧客満足構造分析システムの提案 217
○板垣朝子，高嶋守 (日本ナレッジインダストリ (株))，西尾チヅル (筑波大学)，中西祥八郎 (東海大学)

WD4-3: 実数符号化と偏平均交叉を用いたＧＡによるファジィルール抽出 221
野村竜也 (シャープ (株) ソフトウェア研究所)，三好力 (シャープ (株) 情報技術研究所)

WD5 ＧＡ (学生)　16:45 ～ 17:30　司会　下島康嗣 (名古屋大学)

WD5-1: ＧＡによるセミアクティブサスペンションのファジィ制御規則発見と入力変数選択 225
○橋山智訓 (名古屋大学)，S. BEHRENDT(Darmstadt Technical University)，古橋武，内川嘉樹 (名古屋大学)

WD5-2: ウイルス進化論に基づく遺伝的アルゴリズム 229
○久保田直行，福田敏男，下島康嗣 (名古屋大学)

WD5-3: クラシファイアシステムの人工生命への応用 231
○生井仁，向殿政男 (明治大学)

E室

WE1 ファジィＯＲ (1)　9:30 ～ 10:30　司会　玄光男 (足利工業大学)

WE1-1: 高い確率で最適解を得るためのホップフィールド・エネルギーに対する最急降下法 235
橘桂孝，市橋秀友，○李九炯，三好哲也 (大阪府立大学)

WE1-2: 可能性数量化 II 類 239
田中英夫，○小山研一 (大阪府立大学)

WE1-3: ファジィデータの主成分分析法の構成 241
○山中建二，薮内賢之，和多田淳三 (大阪工業大学)，中森義輝 (甲南大学)

WE1-4: ファジィ係数を伴う多目的最小コストフロー問題の一解法 243
○井田憲一，玄光男 (足利工業大学)

WE2 ファジィＯＲ (2)　10:45 ～ 11:45　司会　市橋秀友 (大阪府立大学)

WE2-1: ファジィ容量制約をもつファジィ整数シェアリング問題 247
石井博昭，○伊藤健 (大阪大学)

WE2-2: 遺伝的アルゴリズムによるファジィ処理時間を伴うフローショップ・スケジューリング 249
○辻村泰寛，玄光男，久保田えりか (足利工業大学)

WE2-3: ポートフォリオ選択問題へのファジィ数理計画法の適用に関する一考察 253
○乾口雅弘，坂和正敏 (広島大学)

WE2-4: ファジィ設備レイアウト問題の GA による一解法 257
Runwei Cheng(宇都宮大学)，○玄光男 (足利工業大学)，杜澤達美 (宇都宮大学)

WE3 ファジィＯＲ　14:30 ～ 15:30　司会　和多田淳三 (大阪工業大学)

WE3-1: n 人協力ファジィゲームにおける最小コア，関連する解および仁 261
西崎一郎 (摂南大学)，坂和正敏 (広島大学)

WE3-2: ファジィ線形計画問題におけるロバストでソフトな最適化 265
○乾口雅弘，坂和正敏 (広島大学)

WE3-3: 可能性多変量解析とその応用 267
田中英夫 (大阪府立大学)

WE3-4: ファジィ区間データに基づくファジィ状態のベイズ識別 269
○吉川伸一 (大阪府立大学)，稲田晃穂，奥田徹示 (大阪工業大学)

WE4 モデリング (1)　15:45 ～ 16:30　司会　田野俊一 (日立製作所)

WE4-1: ファジイモデリングのためのデータの分類と回帰の同時分析 273
○領家美奈，田村坦之 (大阪大学)，中森義輝 (甲南大学)

WE4-2: ファジィ線形計画法における感度解析 275
○渡辺則生，杉江浩之 (中央大学)，今泉忠 (多摩大学)

WE4-3: モデルフリーな適応的線形化法の最適レギュレータでの比較 277
○三好哲也，市橋秀友 (大阪府立大学)

WE5 モデリング (2)　16:45 ～ 17:30　司会　玉城史朗 (琉球大学)

WE5-1: 製品の主観評価に対するファジイモデリング 279
○南谷峰子，佐藤和明，林浩之，中森義輝 (甲南大学)，野村淳二，今村佳世 (松下電工)，長町三生 (広島大学)

WE5-2: ファジィ構造モデルを用いた快適な公園の分析について 283
○河野大輔，椎塚久雄 (工学院大学)

WE5-3: ファジィ GMDH を用いたたて糸糊付工程のファジィモデリング 285
○松下聖一，黒宮明，山岡充昌，高木久弥 (名古屋市工業研究所)，古橋武，内川嘉樹 (名古屋大学)

F室

WF3 信頼性　14:30 ～ 15:30　司会　小山健 (徳島文理大学)

WF3-1: ファジィ推論による電気部品の寿命推定 289
○波多野伸次，大森成暁，村田忠 (琉球大学)

WF3-2: 区間データを伴う切換えが不完全なシステム信頼性最適化問題の遺伝的アルゴリズムによる解法 ... 291
○横田孝雄，玄光男，李銀秀 (足利工業大学)

WF3-3: インテリジェントモータ回路の故障診断支援エキスパートシステムの試作 295
○瀧本巌，村田忠 (琉球大学)

7月13日(木)

A室

TA1 推論(4) 9:30 ～ 10:30 司会 村上 周太(九州工業大学)

TA1-1: 不完全記述多値クリーネ関数の一意性 297
○菊池浩明(東海大), 高木昇(富山県立大), 中西祥八郎(東海大), 向殿政男(明治大)

TA1-2: 多重ファジィ推論の並列可能性について 301
○信定裕二, 前田博(九州工業大学)

TA1-3: ルカシェヴィッツ含意を用いたファジィ論理における導出規則 305
○安井浩之、向殿政男(明治大学)

TA1-4: 前提と結論の満たすべき関係によるインプリケーション関数のパラメータ化 307
○尾山 卓也、田野 俊一(国際ファジィ工学研究所)

TA2 推論(5) 10:45 ～ 11:45 司会 中西祥八郎(東海大学)

TA2-1: 学習型ファジィ知能システムの医療への応用 - 知識の獲得と修正 - 311
前田 幹夫, ○原田 裕二, 村上 周太(九州工業大学)

TA2-2: ファジィ推論尺 315
○上田 傑, 濱田 辰巳(近畿大学)

TA2-3: 概念ベースによる類似判別法の「クロスワードパズル」への適用 319
松澤 和光*、○金杉 友子**、石川 勉*
(* NTTコミュニケーション科学研究所、** NTTアドバンステクノロジ株式会社)

TA3 推論(6) 14:30 ～ 15:30 司会 増井重弘(法政大学)

TA3-1: ファジィ関係データベースを用いた法的推論システム 321
○栗栖 啓光(法政大学), 廣田 薫(東京工業大学), 増井 重弘(法政大学),
吉野 一(明治学院大学), ペロ スパシッチ(東京工業大学)

TA3-2: ファジィ制御用規則生成支援ツール 323
○右田 博久、伊藤 修、宮本 章広、後藤 賢治(株式会社富士電機総合研究所)

TA3-3: 相互インデックス行列に基づくファジィシソーラス生成法と類似事例の検索 325
○野本弘平、久保剛弘、小菅義夫(三菱電機(株))

TA3-4: Fuzzy-ID3と非線形回帰モデルによる熟練作業者のスキルの抽出と
冗長マニピュレータの作業計画への応用 329
○柴田崇徳(機械技術研究所)、阿部保(コマツ)、谷江和雄(機械技術研究所)、野瀬松男(コマツ)

TA4 推論(学生) 15:45 ～ 16:45 司会 菊池浩明(東海大学)

TA4-1: ファジィクラスタリングを用いたエレベータガイドレールの曲げ矯正における加工力の推定 333
○長谷川 貴史、古橋 武(名古屋大学)、
石丸 伊知郎、斉藤 英樹(株式会社 日立製作所)、内川 嘉樹(名古屋大学)

TA4-2: 強化学習を用いたファジィコントローラの生成手法 337
福田敏男, ○長谷川泰久, 下島康嗣、斎藤史倫(名古屋大学)

TA4-3: 概略推論と局所推論との合成型ファジィ推論の回路設計 339
○仲田明紀、水本雅晴(大阪電気通信大学)、有川晴彦(アーク・テクノリサーチ株式会社)

TA4-4: ファジィシステム記述言語(FDL)による推論システムの記述とそのシミュレーションソフト 343
○大塚 和彦, 新沢 洋太, 森 雄一郎, 向殿 政男(明治大学)

B室

TB1 制御(応用5) 9:30 ～ 10:30 司会 上里勝實(琉球大学)

TB1-1: ファジィ推論型可変忘却係数を導入したパラメータ同定に基づいた超音波モータの位置制御 347
千住 智信, ○宮里 裕, 上里 勝実(琉球大学)

TB1-2: ファジィ位相進み補償における絶対安定条件の導出 351
○池田 貴幸, 田中 一男(金沢大学)

TB1-3: ファジィ推論を利用した調光制御 355
加藤義人、○西守克己、小松直樹（鳥取大学）

TB2 制御 (方法論 2) 10:45 ～ 11:45 司会 中津山幹男 (秋田公立美術工芸短期大学)

TB2-1: サーボ系の過渡特性改善へのファジィ推論の適用 357
○王 硯玉, 中津山 幹男, 高橋 一清, 神長 裕明, 水沼 充 (山形大学)

TB2-2: Lur'e の第 1 標準形で記述されるファジィ制御系の安定性解析 361
山川 烈, 内野英治, ○海老沼拓史 (九州工業大学)

TB2-3: ファジィシステムに基づく非線形制御のロバスト性と安定余裕 363
○川本俊治、桑田晶彦、兼高 厳、滝野勝彦、新原淳一、石亀篤司、谷口經雄（大阪府立大学）
田中裕幸（関西電力）

TB2-4: ファジィ制御の改善法 (IX)
－ファジィシングルトン型ファジィ推論法による状態依存型ファジィ制御－ 365
水本雅晴（大阪電気通信大学）

TB3 制御 (方法論 3) 14:30 ～ 15:30 司会 山本哲彦 (琉球大学)

TB3-1: 多入力ファジィ推論における前件部適合度へのハイブリッド演算の提案 369
有川晴彦（アーク・テクノリサーチ (株)）水本雅晴（大阪電気通信大学）

TB3-2: 階層型ファジィ制御方式の学習機構の提案と評価 371
トムソン シリンゴリンゴ, ○安信 誠二（筑波大学）

TB3-3: 簡略推論法を適用した低次元分割におけるファジィ制御性能の改善 375
○大坪 昭文, 林 健一郎（佐賀県工業技術センター）、村上周太、前田幹夫 (九州工業大学)

TB3-4: 遺伝的アルゴリズムによるファジィシングルトン型推論法の下での並列倒立振子のファジィ制御 ... 379
○藤田和之, 水本雅晴 (大阪電気通信大学)

TB4 画像処理 15:45 ～ 16:45 司会 山ノ井高洋 (北海学園大学)

TB4-1: ファジィ論理・ニューラルネットワークを用いたアスパラガスの形状判別 383
○高柳 浩、手島 昌一 ((株) ジャパンテクニカルソフトウェア) 山ノ井 高洋（北海学園大学）

TB4-2: ファジィ推論とニューラルネットワークによる時系列パターンの識別システム 385
○宮沢正明 (東海大), 黒沢正明 (東芝エンジニアリング), 菊池浩明, 中西祥八郎 (東海大)

TB4-3: GPS および画像情報を用いたヘリコプタの着陸制御 389
○平野勲, 古津悟, 菅野道夫（東工大）

TB4-4: Thornber の Fidelity を半順序関係の連鎖に適用することによる手書き文字認識への応用 393
磯部光朗 (NEC)

C室

TC1 ノンエンジニアリング (1) 9:30 ～ 10:30 司会 小田 哲久 (愛知工業大学)

TC1-1: カオス的データの短期予測における局所ファジィ再構のチューニング 395
松本義之 (関西女子学院短期大学), 黒田賢一, ○和多田 淳三 (大阪工業大学)

TC1-2: ファジィ積分によるアンケート調査の分析 – 集落の滅失と再生について – 399
○宮武直樹, 古川修文, 島田道彦, 山田水城 (法政大学)

TC1-3: ファジィクラブの近似表現と応用 401
○山下 元 (早稲田大学), 佐藤 章 (東洋大学)

TC2 ノンエンジニアリング (2) 10:45 ～ 11:45 司会 奥田 徹示 (大阪工業大学)

TC2-1: 2 種のメンバシップ関数同定法の客観的・主観的比較
- ファジィクラブ評定尺度図法と境界漸近推定法について - 405
○吉川 歩, 藤本大助, 西村 武 (京都工芸繊維大学)

TC2-2: ファジィ推論による MF 構成法 409
小田哲久 (愛知工業大学)

TC2-3: 台湾における消費者の多属性態度研究 - ファジィ評定データの可能性線形回帰分析 - 413
○竹村和久, 呉 俊彦, 候 徳宇 (筑波大学)

TC2-4: 腰部疾患データに基づく意思決定への可能性線形回帰分析の応用 417
○永井栄一, 奥田徹示 (大阪工業大学), 満田基温 (神戸川崎病院)

TC3 測度・積分 (1) 14:30 ～ 15:30 司会 高萩栄一郎 (専修大学)

TC3-1: 多重線形型ファジィ積分の適用法 - ベクトル値被積分関数の評価 - 419
松下 裕 (清水建設 (株))

TC3-2: 多重線形型ファジィ積分の適用法 －直交多項式との比較－ 423
○神原 浩, 松下 裕 (清水建設 (株))

TC3-3: 室内空間の高さ感に対する評価プロセスのファジィ積分モデル－階層型モデルによる意識構造分析－ 427
○宮腰淳一, 松下 裕, 神原 浩, 羽根 義 (清水建設 (株))

TC3-4: 局所コンパクトハウスドルフ空間上のファジィ測度と Choquet 積分 431
○成川康男 (桐朋学園), 室伏俊明 (電気通信大学), 菅野道夫 (東京工業大学)

TC4 測度・積分 (2) 15:45 ～ 16:45 司会 室伏俊明 (電気通信大学)

TC4-1: λファジィ測度とショケ積分を利用した平均値・中央値の中間の評価 435
高萩栄一郎 (専修大学)

TC4-2: λファジィ測度とショケ積分を利用した最大値・平均値・最小値の中間の評価
- 重要度を考慮した 3 つの方法 - 439
高萩栄一郎 (専修大学)

TC4-3: 非加法的確率測度と統計的決定問題 443
○前田 豊、田中英夫 (大阪府立大学)

TC4-4: ファジィ測度の視覚的表示 445
○ 宮岡政夫, 菅野道夫 (東京工業大学), 室伏俊明 (電気通信大学)

D室

TD1 エボルーショナリコンピューティング (I)(1) 9:30 ～ 10:30 司会 下原 勝憲 (ATR)

TD1-1: 波動場を用いたアメーバ様探索行動のモデル化と応用 449
○横井浩史, 水野敬文, 滝田正寿 (生命研), 嘉数侑昇 (北海道大学)

TD1-2: 進化するハードウェアとその応用 - パターン認識とロボット制御 - 453
○樋口哲也、岩田昌也 (電総研)、平尾友二 (徳島県工業技術センター)

TD1-3: VPM における構成エージェントの獲得に関する研究 457
○山田孝治 (琉球大学), 横井浩史, 嘉数侑昇 (北海道大学)

TD2 エボルーショナリコンピューティング (I)(2) 10:45 ～ 11:45 司会 下原 勝憲 (ATR)

TD2-1: 集餌環境における集団形態の発生 459
○久保正男、 嘉数侑昇 (北海道大学)

TD2-2: 行動ネットワークの構成とその振る舞いに関する考察 463
○鈴木恵二, 嘉数侑昇 (北海道大学)

TD2-3: 協調システムのファジーネス 465
○ヤリ・ワーリオ (奈良女子大学)、下原勝憲 (ＡＴＲ人間情報通信研究所)

TD2-4: 行動型ハードウェアの進化 467
○邊見 均、下原勝憲 (ＡＴＲ人間情報通信研究所)

TD3 エボルーショナリコンピューティング (II) 14:30 ～ 15:30 司会 古橋 武 (名古屋大学)

TD3-1: 多重連結型移動車輌の知的ハイブリッド制御
－ルールベースによるクランク走行とＧＡによる衝突回避－ 469
田中一男、○吉岡啓輔 (金沢大学)

TD3-2: 遺伝的アルゴリズムに基づく経営政策の決定手法 473
○松田 浩、水沼洋人、和多田淳三 (大阪工業大学)

TD3-3: 遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークを用いたＳＰ戦略策定システム 475
○高嶋守, 板垣朝子 (日本ナレッジインダストリ (株)), 西尾チヅル (筑波大学), 中西祥八郎 (東海大学)

TD3-4: 遺伝的アルゴリズムによる腕の形態と投球動作の進化 479
○宮田裕次郎、古橋　武、内川嘉樹（名古屋大学）

TD4 ハードウェア　15:45 ～ 16:45　司会　秋月 影雄 (早稲田大学)

TD4-1: ファジィ並列推論のための並列アキテクチャ 483
李相球（韓国韓南大学）, ○宋正永, 秋月影雄（早稲田大学）

TD4-2: 補間機能を持たせた多入力ファジィ推論回路 487
湯場崎直養, 大谷正幸, ○芦田隆次, 易建強, 武藤章, 石岩（マイコム株式会社）廣田薫（東京工業大学）

TD4-3: 有機物の堆肥化を目的とする処理システム構成のための検討 491
○松永隆昌 (宇部テクノエンジ（株）), 酒井義郎 (山口大学)

TD4-4: FPGA を用いたリコンフィギャブル・ファジィコントローラの設計 495
神酒勤、○渡部英生、山川烈 (九州工業大学)

E室

TE1 教育工学 (1)　9:30 ～ 10:30　司会　磯本 征雄 (名古屋市立大学)

TE1-1: ファジィ推論を応用した教育評価法 497
○清水誠一 (川面小学校), 山下 元 (早稲田大学)

TE1-2: 情意面に関するあいまい問題について 501
○宮武直樹、松田修三 (法政大学), 三村紀中 (松江教育センター)、中島洋一 (美唄東中学校)

TE1-3: 学校教育における主観的評価 503
○佐藤 博, 矢鳴虎夫 (九州工業大学)

TE2 教育工学 (2)　10:45 ～ 11:45　司会　矢鳴虎夫 (九州工業大学)

TE2-1: 可変型メンバーシップ関数を用いたファジィ推論によるアンケート処理技法 505
北垣郁雄 (群馬職能短大)

TE2-2: 美術教材のための画面データベースにおけるファジィ情報検索のキーワードメニュー画面構成 509
吉根勝美, ○磯本征雄 (名古屋市立大学)

TE2-3: ファジィ数学の大学 (文系) 基礎教育への導入 [II] 511
須田 宏 (慶応義塾大学)

TE3 教育工学 (3)　14:30 ～ 15:30　司会　宮武 直樹 (法政大学)

TE3-1: ファジィクラブの特性解析システム 513
黒柳幸男, 駒形真樹, 土田賢省, ○佐藤 章 (東洋大学)、山下 元 (早稲田大学)

TE3-2: ファジィクラブを応用した教材構造分析 III 517
清水誠一 (川面小学校), 勝又保雄 (目黒高校), 津田 栄 (国学院高校),
箭内顯彦 (早稲田実業), 佐藤 章 (東洋大学), ○山下 元 (早稲田大学)

TE3-3: ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析 VI 521
○清水誠一 (川面小学校), 山下 元 (早稲田大学)、勝又保雄 (目黒高校), 津田 栄 (国学院高校)

TE3-4: 間隔尺度友達調べによる友達関係伝播図と学級のまとまり度 525
宮地功 (岡山理科大学)

TE4 チューニング　15:45 ～ 16:45　司会　大北 正昭 (鳥取大学)

TE4-1: 折れ線型メンバーシップ関数を用いたファジィルールの自動チューニング 527
宮田仁志, 大木誠, 柴田修吾, ○田中幹治, 藤田裕輝, 大北正昭 (鳥取大学)

TE4-2: 山登り法によるファジィルールの自動生成 531
○泉本 和俊, 水本 雅晴 (大阪電気通信大学)

TE4-3: ファジィエキスパートシステムにおけるルールの自動チューニング手法 535
○加藤　康記、小杉　正貴、高木　繁則

TE4-4: ファジィ積分を用いた制御ルールの自動チューニング 537
○宮田仁志，大木 誠，大北正昭（鳥取大学）

F室

TF3 土木応用 14:30 ～ 15:30 司会 秋山 孝正 (岐阜大学)

TF3-1: 遺伝的アルゴリズムを用いた連続桁 RC 床板の打設計計画 541
夏秋 義広、○向台 茂、保田 敬一、吉田 均 (関西大学)

TF3-2: ファジィ理論を応用した斜張橋のための温度同定法 545
亀井正博（大阪長堀開発（株）大阪市より出向）、古田 均（関西大学）、
田中 洋（日立造船 (株)）、○松下泰弘（日立造船 (株)）

TF3-3: 地すべり自動監視システムのファジィ理論による高度化 549
○大野 研、東 崇史 (三重大学)

TF3-4: 多段ファジィ理論を用いた経路選択モデルの作成 551
秋山 孝正、○安藤 彰記 (岐阜大学)

7月14日 (金)

A室

FA1 英語セッション (1) 9:30 ～ 10:30 司会 尾知 博 (琉球大学)

FA1-1: Evolutionary Reconstruction of Plane Images from Projections 555
Zensho Nakao, Yen-Wei Chen, ○ Fath El Alem F. Ali, Midori Takashibu(University of the Ryukyus)

FA1-2: Evolutionary Reconstruction of Plane Color Images from Projections 557
Zensho Nakao, Yen-Wei Chen, ○ Midori Takashibu, Yasuyuki Kina(University of the Ryukyus)

FA1-3: Image restoration based on Genetic Algorithm 559
Yen-Wei Chen, Zensho Nakao, ○ Makoto Iguchi(University of the Ryukyus)

FA1-4: Approximate Reasoning using Concepts of Similarity 561
○ Eduardo T. Fujito, Ario Ohsato(Nagaoka University of Technology)

FA2 英語セッション (2) 10:45 ～ 11:45 司会 陳 延偉 (琉球大学)

FA2-1: A Fuzzy-Neuro Approach for operational Reliability Classification Analysis in Mechanical System 565
○ ZHANG Miaokang(Nanjing Architectural & Civil Engineering Institute)

FA2-2: Stabilization of Multi-Machine Power System with FACTS Equipment Applying Fuzzy Control 567
Tomonobu Senjyu, ○ Marta Molinas, Katsumi Uezato(University of the Ryukyus)

FA2-3: Design of a Fuzzy Logic Controller Using a Fuzzy Model 571
○ Voldi C. Zambenedetti, Shuta Murakami(Kyushu Institute of Technology)

FA2-4: Ada-based Support Packages for Fuzzy Expert Systems and GUI 575
Zensho Nakao, Yen-Wei Chen, ○ Takeshi Tengan(University of the Ryukyus),
Masaya Kinjo(Alsys-KKE, Inc.)

FA3 エキスパートシステム (1) 13:00 ～ 14:00 司会 鬼沢武久 (筑波大学)

FA3-1: ファジィ制御テストシステム 577
小山 健（徳島文理大学）

FA3-2: 部品の接続情報をファジィ化したプリント基板部品自動配置に関する研究 581
○行松徹、古橋武、内川嘉樹（名古屋大学）

FA3-3: 都市ごみ焼却炉の運転支援システム 585
藤吉誠、○大林吉次（日立造船（株））

FA4 エキスパートシステム (2) 14:15 ～ 15:15 司会 金子 隆臣 (九州東海大学)

FA4-1: ファジィ理論に基づく財務分析エキスパートシステムの一研究 589
金子隆臣、○森川大昭（九州東海大学）泉めぐみクリスチーナ、矢野幸重 (国際協力事業団)

FA4-2: ファジィ指向型囲碁システム FOG 591
○横川壽彦 (帝京技術科学大学)、西野順二 (東京工業大学)、水野勇一 ((株) 未来技術研究所)

FA4-3: ファジィ・カラーネーミングシステム 595
高橋和浩，○朝倉大輔（玉川大学），菅野直敏（玉川大学）

FA4-4: 状況に基づいた囲碁盤面と戦略の言語表現について 599
○西野順二、菅野道夫（東京工業大学）

FA5 認識 (学生) 15:30 ～ 16:30 司会 吉川 歩 (京都工繊大学)

FA5-1: ウェーブレット解析を用いた脳波による感情識別システムの構築 601
○佐藤 秀樹、阪井 和男（明治大学）、武者 利光（脳機能研究所）、向殿 政男（明治大学）

FA5-2: 情動記憶モデルに関する研究 603
吉田 香（九州工業大学）

FA5-3: 主観観測モデル理論に基づいた感情語の処理 605
○ 白浜成希，矢鳴虎夫 (九州工業大学)

B室

FB1 ロボティクス (1) 9:30 ～ 10:30 司会 片井 修 (京都大学)

FB1-1: 3次元簡易 Ping-Pong ロボット 607
田中 一男 (金沢大学)、○神田 大和 (オリンパス光学工業 (株))

FB1-2: 外乱トルクオブザーバにファジィ推論機能を付加したロボットアームの軌道制御法 611
千住 智信, ○安次嶺 伸吾, 上里 勝実 (琉球大学)

FB1-3: 動作指示に基づく自律移動ロボット 615
○秋田幸治、金澤直幸、吉原道宏、山口亨（宇都宮大学）

FB2 ロボティクス (2) 10:45 ～ 11:45 司会 柴田 崇徳 (機械研)

FB2-1: 概念形成と強化学習によるマニピュレータ操作技能の自律獲得 619
○槙木哲夫，岩津 賢，片井修（京都大学）

FB2-2: 自律移動ロボットの走行制御における遺伝的アルゴリズムを用いたファジィルールの自動チューニング 623
宮田仁志，○大木誠 (鳥取大学)，柴田修吾 (関西日本電気 (株))，田中幹浩，大北正昭（鳥取大学）

FB2-3: マルチエージェントロボットの進化型行動学習 627
前田 陽一郎（大阪電気通信大学）

FB2-4: ファジィ、ニューラルネットワーク、RBF ネットワークを用いた隊列移動する
複数移動ロボットに関する研究 629
廣田薫 (東京工業大学)、森下巌、桑原強司、○石田健一、大舘裕章 (法政大学)

FB3 意志決定 (1) 13:00 ～ 14:00 司会 中村 和男 (長岡技術科学大学)

FB3-1: 尺度変換を用いた多目的意思決定法 631
宮城 隼夫、○平良 直之、山下 勝己 (琉球大学)

FB3-2: 商品選択支援システムについて 633
○中島信之，醍醐元正（富山大学）、般若裕子 ((株) コスモスネットワーク)

FB3-3: 熱源システムの最適運転計画のためのファジィ意思決定支援 637
○柏木法仁、鳶 敏和（ダイダン (株)）加賀昭和、山口克人（大阪大学）

FB3-4: Choquet 積分による階層的評価モデル (4) 641
○藤本勝成（東北大学）、菅野道夫（東京工業大学）、室伏俊明（電気通信大学）

FB4 意志決定 (2) 14:15 ～ 15:15 司会 長沢伸也 (立命館大学)

FB4-1: 会話を用いた経路決定システム 645
○枡田行央、鬼沢武久、岩田 満（筑波大学）

FB4-2: あいまいな環境における多目的意思決定ー 目的間統合への発見的アプローチ ー 647
○田崎栄一郎, 松尾勝（桐蔭学園横浜大学）

FB4-3: ファジィ工学 － ＬＩＦＥにおける研究の概要 651
寺野 寿郎, 中村 和男（ＬＩＦＥ）

C室

FC1 ヒューマンインターフェイス 9:30 ～ 10:30 司会 伊達 惇 (北海道大学)

FC1-1: マルチメディアに対応したファジィコミュニケーションシステムの提案 655
○中川 友紀子, 廣田 薫（東京工業大学）

FC1-2: インタフェースと人間の作業能率との関係について 657
○ 孫 永俠、鬼沢武久（筑波大学）

FC1-3: ある種のファジィ制御における 1/f ゆらぎについて 659
○蔵本俊男、大西真一、河口至商（北海学園大学）

FC2 医療 (1) 10:45 ～ 11:45 司会 星野 聖 (琉球大学)

FC2-1: フレーム理論の精神科診断への応用 661
○吉田 香, 白浜 成希, 矢鳴 虎夫（九州工業大学）

FC2-2: 組合せファジィハフ変換の医用画像処理への応用 663
○平川克己 (オリンパス光学工業 (株)), 山川 烈, 内野英治 (九州工業大学), 松山敏剛 (九州大学),
渡辺寿美子, 野上ナオエ (原三信病院)

FC2-3: 顔の表情の評価について 667
○鬼沢 武久、北崎 幸子、岩田 満、杢屋 銑一（筑波大学）

FC2-4: 知的障害者の運動パフォーマンス向上支援のためのファジィ評価手法について 671
○杉本光公（筑波大学）、安信誠二（筑波大学）

FC3 医療 (2) 13:00 ～ 14:00 司会 北條暉幸 (産業医科大学)

FC3-1: ファジィ理論によるカレンダー画像からの感性情報抽出 673
○大坪英昭, 亀井且有, 井上和夫 (立命館大学)

FC3-2: ファジイフィルタを用いた生体信号の処理 677
○江原義郎、市川銀一郎（順天堂大学）、向殿政男（明治大学）

FC3-3: 感情推察の一モデル 679
○千葉大輔、鬼沢武久（筑波大学）

FC4 医療・健康・感性 14:15 ～ 15:15 司会 有田 清三郎 (関西医科大学)

FC4-1: 濁慢性肝疾患 CT 象のフラクタル解析 681
○濱田辰巳, 上田 傑, 澄田 貢 (近畿大学)

FC4-2: 外科術後感染症のファジィ診断システム 683
坂口 聡 (和歌山県立医科大学), 有田 清三郎 (関西医科大学), 谷村 弘, ○馬庭芳朗 (和歌山県立医科大学)
堀義己 (川崎医療福祉大学)

FC4-3: ロジスティック曲線によるヒトの発育過程の分析 687
北條暉幸 (産業医科大学)

FC4-4: 東洋医学における基本理念の数理モデル化に関する基礎研究 689
○東原正和, 矢鳴虎夫 (九州工業大学)

D室

FD1 クラスタリング 9:30 ～ 10:30 司会 宮本 定明 (筑波大学)

FD1-1: Aggregation Operator の性質とクラスタリング 693
○佐藤美佳（北海道武蔵女子短期大学）、佐藤義治（北海道大学）

FD1-2: Gaussian Clustering and Its Application to Rock Classification 697
○ Rui-Ping Liand Masao Mukaidono(Meiji University)

FD1-3: ファジィクラスタリングによるファジィルールの生成 699
○山田恒嗣、亀井且有、井上和夫 (立命館大学)

FD1-4: L1 および Lp 空間にもとづくファジィ c-means アルゴリズムの効率化と停止性 703
○宮本 定明（筑波大学），ユーディ・アグスタ（徳島大学）

FD2 ニューラルネットワーク (1) 10:45 ～ 11:45 司会 金城 寛 (琉球大学)

FD2-1: ファジィ構造化ニューラルネットワークによる需要量長期予測 707
○清水 透、山本茂史（NEC）

FD2-2: ニューラルネットワーク及びファジィ推論の経営計画問題への適用 709
金子隆臣、○池永美智子（九州東海大学）、泉めぐみクリスチーナ、矢野幸重 (国際協力事業団)

FD2-3: 階層化された砂時計型ニューラルネットによる自律的な内部表現獲得 711
○山川 宏（ＲＷＣＰつくば研究センタ）、木本 隆、柳沼 義典（富士通株式会社）

FD2-4: 砂時計型ニューラルネットワークを用いたセンサ情報融合による内部表現の自動獲得 715
○柳沼 義典、木本 隆（富士通株式会社）、山川 宏（ＲＷＣＰつくば研究センタ）

FD3 ニューラルネットワーク (2) 13:00 ～ 14:00 司会 五百旗頭 正 (明電舎)

FD3-1: ニューラルネットワークを応用した「火花による異材判別の開発」 719
○米澤好司、五百旗頭正（株式会社 明電舎)、清水敏雄、鷲巣悟 ((株) システムサコム）

FD3-2: ニューラルネットワークによる材料配合設計支援システム 721
○玉江寛志, 熊本洋（東陶機器（株））

FD3-3: RBF ネットワークにおける自己組織化特徴マップの応用 725
○田中雅博，辻本賢司，古河靖之，谷野哲三（岡山大学）

FD4 ニューラルネットワーク (3) 14:15 ～ 15:15 司会 田中雅博 (岡山大学)

FD4-1: ニューラルネットワークによるＨＵＢの最適配置 727
玄 光男，辻村泰寛，○石崎俊介（足利工業大学）

FD4-2: ガウスクラスタリング法を用いたニューラルネットワーク構造の決定 729
○梁 青，李 瑞平，向殿 政男（明治大学）

FD4-3: ニューラルネットワークにおける中間層出力のコントロール 733
長峰伸明，上村龍太郎，菊池浩明，○中西祥八郎 (東海大)

FD5 ニューラルネットワーク (4) 15:30 ～ 16:30 司会 辻村 泰寛 (足利工業大学)

FD5-1: リカレント型ニューロ・ファジィモデルによるカオス力学系の学習 737
○三好 哲也，市橋 秀友，岡本 茂樹，早川 武（大阪府立大学）

FD5-2: ニューロ・ファジィＧＭＤＨによる関数近似 741
○大谷 崇，市橋 秀友，長坂 一徳，三好 哲也（大阪府立大学）

FD5-3: ウェーブレットニューロンによる信号解析とその心電図への応用 745
山川 烈，内野英治 (九州工業大学)，○藤波 敦 (上野精機 (株))

E室

FE1 カオス 9:30 ～ 10:30 司会 安田 恵一郎 (東京都立大学)

FE1-1: 局所ファジィ再構成法の外気温度予測への応用 747
○村田昌司、五百旗頭 正（株式会社明電舎）

FE1-2: パターンと記号を扱う連想記憶モデルとカオス的想起 749
古橋 武、○服部 陽一郎、八木 透、内川 嘉樹 (名古屋大学)

FE1-3: 自己組織化モデルの非線形現象について 753
○今井正文、柯トウ、清水 静江、西川 智登 (東京都立科学技術大学)

FE1-4: 毛筆書体におけるフラクタルを用いたかすれ表現 757
○中村 剛士, 松下 政親, 野崎 勝彦, 世木 博久, 伊藤 英則（名古屋工業大学）

FE2 カオス　10:45 ～ 11:45　司会　山口 亨 (宇都宮大学)

FE2-1: カオス的アプローチによる心室細動判別 759
杉浦 敏文 (静岡大学)、五百旗頭 正、村田 昌司、小山 雅也 (明電舎)

FE2-2: 間欠性カオス写像を用いた大域的最適化手法 763
藤田 得光、渡辺 隆男、○安田 恵一郎、横山 隆一 (東京都立大学)

FE2-3: 「回想」記憶モデル：カオス、ランダム的探索と連続想起 767
○八木 透、古川 栄一、古橋 武、内川 嘉樹 (名古屋大学)

FE2-4: 連想記憶とカオス的想起に基づく知的ロボット 769
○吉原 道宏 (宇都宮大学)、佐藤 友彦 (山武ハネウエル)、山口 亨 (宇都宮大学)

FE3 ファジィ制御　13:00 ～ 14:00　司会　小沢 和浩 (法政大学)

FE3-1: クリーンルームのファジィ恒温恒湿制御 その1 ファジィ制御パラメータの自動調整の試み 773
○外山 薫、鳶 敏和 (ダイダン株式会社)、田中 一男 (金沢大学)

FE3-2: クリーンルームのファジィ恒温恒湿制御 その2 階層的ファジィモデルの実行可能性の評価 775
○鳶 敏和、外山 薫 (ダイダン株式会社), 市橋 秀友 (大阪府立大学)

FE3-3: 言語指示による制御規則調整方法 779
○宮本 章広、伊藤 修、後藤 堅治 (富士ファコム制御 (株))、菅野 道夫 (東京工業大学)

FE4 ファジィ制御 (1)　14:15 ～ 15:15　司会　山崎 束 (日揮)

FE4-1: 状態予測時間の実時間調整によるファジィ予測制御 781
前田幹夫、○松川英夫、村上周太 (九州工業大学)

FE4-2: ファジィコントローラ設計支援システム 785
神酒勤、○川口将願、山川烈 (九州工業大学)

FE4-3: 非線形システムに対するロバストファジィ制御器の設計法
－二次安定性・H^∞ 制御理論・Linear Matrix Inequalities の観点から－ 787
○田中　一男（金沢大学），Hua Wangand Mike Griffin(United Technologies Research Center)

FE5 ファジィ制御 (2)　15:30 ～ 16:30　司会　前田 幹夫 (九州工業大学)

FE5-1: ファジィモデリングの蒸留搭制御への適用 791
山崎　束（日揮株式会社）

FE5-2: ファジィ制御を用いたＬＭＳアルゴリズムによる伝達系の推定時間について 795
○武藤憲司（東京都立航空工業高専）、岡崎崇、柴山秀雄（芝浦工業大学）、島田一雄（東京都立航空工業高専）

FE5-3: 実システムにおける最適性と安定性の妥協 799
○増井　重弘, 寺野 寿郎, 関口 俊宏,　高椋 真司（法政大学）

FF2 ファジィ工学応用 (1)　10:45 ～ 11:45　司会　安田昌司 (三洋電機)

FF2-1: あいまいカテゴリの形成機構 - モデル化の試み 803
中村和男 (長岡技術科学大学)

FF2-2: メジアンポリッシュによる多元ファジィデータの探索的解析 805
長沢伸也（立命館大学）

FF2-3: 重複区間関数を用いるファジィ区間データの統計分布 809
○古殿幸雄、浅居喜代治（福山平成大学）、奥田徹示、小西幹彦（大阪工業大学）

FF2-4: ニューロ・ファジィ射影追跡による回帰と判別 811
○三好　哲也，中尾　圭介，市橋　秀友，長坂　一徳（大阪府立大学）

FF3 ファジィ工学応用 (2)　13:00 ～ 14:00　司会　長堂 勤 (琉球大学)

FF3-1: 構造学習と忘却学習を用いたファジィ・ニューラルネットワークによるファジィ・ルールの抽出 ... 815
馬野元秀，○福中寿朗，鳩野逸生，田村坦之 (大阪大学)

FF3-2: ファジィ量限定子を含む自然言語命題の評価方法 819
馬野元秀，○岡田貴祐，鳩野逸生，田村坦之 (大阪大学)

FF3-3: ファジィ決定木のチューニング 823
馬野元秀，○北辻佳憲，鳩野逸生，田村坦之 (大阪大学)

FF3-4: ファジィ・プロダクション・システムを用いた酸塩基平衡異常診断システムの構築 827
馬野 元秀、片岡 忠彦、○松下 光範、鳩野 逸生、田村 坦之 (大阪大学)

特別講演
７月１２日（水）

会 場：琉球大学 大学会館

時 間：１３：００～１４：００ 司会　向殿政男（明治大学）

演 題：「哲学とファジィネス」

講 師：米盛裕二先生（琉球大学）

哲学とファジィネス

琉球大学教授　米盛裕二

哲学には古くから「確実性と明証性の理想」とでも言えるものがある。古代ギリシアのプラトン、アリストテレスから、近世のデカルト、ライプニッツ、ロックら（合理主義者も経験主義者も「確実性と明証性の理想」においては変わりはない）、そして現代では現象学的厳密哲学を創設したフッサール、分析哲学を代表するラッセル、真理関数的言語の体系を提唱した前期ウィトゲンシュタイン、論理実証主義派の科学哲学者たちにいたるまで、あらゆる時代を通じて、指導的な哲学者たちは常に確実性と明証性を知識・真理の条件または基準と考え、つまり確実性と明証性を学問的認識の理念と考えていて、そこでこれらの哲学者たちは、哲学からいっさいの曖昧さを排除し、哲学を厳密で明証的な学として確立しようと企ててきた。そしてこの「確実性と明証性の理想」は確かに、多くのすぐれた厳密哲学的思想を生み、特に厳密科学の発展に大いに寄与しているが、しかし一方、この理想は哲学と科学思想に幾多の根強い、好ましくない偏向をももたらした。

この理想によって、哲学と科学思想は著しく「演繹主義」に偏し、この偏向は哲学と科学の境界をこえて、広く一般のものの考え方にも及んでいる。最近、科学哲学者たちの間で科学における発見過程とその論理への関心が高まっていて、この頃は「発見の論理」という言葉も普通に使われるようになったが、しかし科学哲学者たちの「発見の論理」の研究にとって大きな障害になっているのが、演繹主義的偏向である。「発見の論理」という言葉を聞いただけで、論理学者たちはもとより、一般の知識人たちも、きっと反発し否定的になるであろう。はたして発見過程に論理があるのか、つまりある一定の方法や規則に従えば機械的に発見がなされるというような、そういう発見のアルゴリズムがありうるのかという疑問は、誰もがもつことであろう。そしてそういう疑問が起こるは、「論理」とはすなわち「演繹の論理」であるという論理概念がわれわれの思想を根強く支配してきたからであろう。この演繹の論理の概念が科学を支配し、また実際に現代科学の発展において強力な役割を果たしてきた「合理性」の定義が、「合理性」というものを演繹論理的または数学的体系性によって定義するというものであったがために、科学における創造性、発見過程が何か超論理的な、神秘的な過程とみなされ、「発見の論理」ということが疑わしく思われてきたのである。

実際、これまで科学哲学者たちは、科学的探究に関して「発見の文脈」と「正当化の文脈」を区別し、つまり科学的探究には法則を発見したり理論を考案したりする最初の段階と、発見された法則や発明された理論を検証し正当化する段階とがあって、この二つの段階は明確に区別しなければならないと唱えるとともに、科学哲学は「正当化の文脈」にのみ関わるもので、「発見の文脈」は何ら論理分析を必要としないし、またできるものでもない、と主張してきた。最近のある科学哲学者は、これまで科学哲学者たちが科学における最も創造的な発見過程を無視し、いやむしろ科学哲学から「発見の文脈」を排除することを正当化さえしてきたことを、「現代科学哲学のスキャンダル」と呼び、そしてこのスキャンダルをもたらしたのは、「合理性」、「論理性」を演繹論理的厳密性、数学的体系性によって定義してきた演繹主義的偏向にほかならない、と批判している。確かに、あらゆる創造的過程はファジィであり、発見行為、「発見の文脈」もそうである。しかしファジィであるということはすなわち論理性、合理的根拠がないということを意味するものではない。演繹論理的厳密性、数学的体系性によって「論理性」、「合理性」を定義することは、決して「論理性」、「合理性」はその基準で定義されなければならないという必然性によるものではなく、この基準はそれ自体が歴史的産物であり、したがってそれは歴史のなかで批判され再検討しうるものなのでのである。そういう観点から、「発見の論理」に関心をもっている最近の科学哲学者たちの間では、「合理性」や「論理性」の概念そのものについても再検討が行われているのである。

「確実性と明証性の理想」がもたらしたもう一つの、看過してはならない偏向は、常識知、日常言語に対する哲学者たちの偏見にみられる。厳密哲学の構想をいだく哲学者たちにとって、あらゆる曖昧性と虚偽の元凶は何よりも常識知、日常言語、あるいはフッサールが「自然的態度」と呼ぶところの日常的認識態度である。そこでかれらは、それらの曖昧な常識知、日常言語、自然的認識態度を一掃して、それに代わる徹底的な反省的認識態度によって、あるいは新たに体系立てられた厳密な形式論理（記号論理学または数学的論理学）の言語と方法によって、厳密な哲学を構築しようと考えてきた。しかしこのような「常識の拒否」(the renunciation of common sense)は、常識知の原理や日常言語というものに関する間違った見方にもとづくものであり、それはひいては人間の認識の原理および言語の本質に関する甚だしい曲解を招くものである。実際、ある時期の科学哲学者、分析哲学者たちのなかには、日常言語（自然言語）に対して、「理想言語」という言葉をしばしば使い、日常言語をあたかもでき損ないの言語であるかのようにみなし、明晰で厳密

な形式論理の言語を日常言語に代わる理想言語と考える者さえいたのである。言語の本質に関するこうした由々しい誤解も、「確実性と明証性の理想」がもたらした帰結の一つと言えよう。

もちろん、科学的学問的認識は「自然的態度」の単なる延長線上にあるものではなく、それは徹底した反省的認識態度によって達成される。しかしこのことによって、常識知を虚偽の知識とみなしたり、あるいは日常言語はでき損ないの言語で、日常的世界においても曖昧な日常言語は排して、いつも科学の言葉が使われなければならないとしたら、どうであろうか。ある「常識と科学」論者が言うように、「一つの脈略で使用される言語、つまり特にその脈略固有の題材や問題を取り扱うために発達した言語が、他の脈略にまで不当にもち込まれ、そこで無理に用いられるとすれば、そのために生ずる諸結果は異様であり、しばしば滑稽である。」たとえば、「恋をしている人に、彼女の愛する人の＜真の＞実在は、結局は＜たがいに空間を隔てて急速に運動しているエレクトロンやプロトンの一組織体＞にすぎないなどと教えてやるのは、言語の使用を間違えていることであり、ちっとも啓発的ではない」のである。

今世紀最大の哲学者の一人で、特に言語分析の哲学の形成と発展に大きな影響を与えたL．ウィトゲンシュタインは、「前期ウィトゲンシュタインの哲学」と「後期ウィトゲンシュタインの哲学」と呼ばれる二つの偉大な思想を生んでいるが、その前期の哲学では厳密な「真理関数的言語」の体系を考えていたのに対し、その後期の哲学においては「日常言語」に言語の本質を求めている。そしてウィトゲンシュタインは、こうした自らの前期から後期への大きな思想の転換についてつぎのように言う。「現実の言語を精密に考察すればするほど、この言語と我々の要請との葛藤はきびしくなる（論理の透明な純粋性は、私にとって結果として生じたものではなく、一つの要請であった）。この葛藤は次第に耐え難くなり、かの要請もやがては空しいものになりはてようとする。我々は全く摩擦のないつるつるした氷の上にさ迷い出たのである。そこでは諸条件は或る意味では理想的なのだが、まさにそのために我々は先へ進むことができない。我々は先へ進みたい。そのためには摩擦が必要である。ざらざらした大地に戻れ！」こうして、ウィトゲンシュタインは自らの前期の真理関数的言語の思想を徹底的に批判しつつ、現実の「ざらざらした」日常言語に戻って、そこに言語の本質を求めているのである。

「確実性と明証性の理想」とともに、それと関連して、われわれがさらに問題にしたいのは、科学における「客観性の理想」である。この理想に関しては、特にマイケル・ポラ

ニーの批判がよく知られている。ポラニーはもともと物理化学者であるが、かれが物理化学者として研究活動をしているときに、常にかれを悩ませた問題は、科学者は厳格に客観的で、主観から超然としていなければならないという教義であった。ポラニーはこの教義に疑問を抱いて、物理化学の研究を止め、哲学や心理学や社会学などの研究に転向しているが、かれはこの「客観性の理想」を偽りの理想と呼び、こう述べている。「私は、主観から科学的に超然とすべきだという理想を拒絶することから出発した。厳密科学においては、この偽りの理想は多分無害であろう。というのは、ここでは、この理想は科学者たちが、事実上、無視しているからである。だが・・・それは生物学、心理学、社会学においては破壊的な影響を及ぼしており、さらに科学の境界をはるかに越え出たところまで、われわれの世界観全体を誤らせている。」こうして、ポラニーは「客観性の理想」を批判しつつ、科学的発見・創造性における科学者の主観性・個人的知識の重要性について論じているが、われわれが特に注目したいのは、「客観性の理想」批判や個人的知識論と深く関わっているポラニーの「暗黙知」の理論である。この理論は、人間の認識や思考の「曖昧性」は、人間の認識や思考の不備欠陥なのではなく、その本質的特性であることを、説くものである。

この講演では、「確実性・明証性の理想」と「客観性の理想」を批判的に検討し、さらに「発見の論理」、「常識知」、「暗黙知」、日常言語と形式言語の問題について論じつつ、人間の認識や思考や言語の本質的な「曖昧性」について考えてみたいと思う。

招待講演
7月13日（木）

会 場：琉球大学 大学会館

時 間：１３：００～１４：００ 司会　村田　忠（琉球大学）

演 題：「泡盛の話」

講 師：照屋比呂子先生（沖縄県工業試験場）

泡盛について

照　屋　比呂子
(沖縄県工業試験場)

1．泡盛の歴史

泡盛の起源は、「季朝実録」(1477) や「使琉球録」(1534) の記述等から14～15世紀と推定されている。そのルーツは、シャム (タイ国) とされてきたが、最近中国のかかわりについても調査が始められた。

蒸留酒の製法は16世紀に九州に伝えられたと推定されているが、そのとき黒麹菌は伝えられなかった。黒麹菌が九州の焼酎製造に使用されるようになったのは、1907年 (明治40) からである。(図1)

「季朝実録」(1477) 酒には清・濁ありて…酎するには銀の鍾(さかづき)をもってす。また南蛮国の酒あり。色は黄にして、味は焼酎の如く、甚だ猛烈なり。数鍾を飲めば則ち大いに酔う。

「使琉球録」(1534) 王、酒を奉じ勧めて座す。酒は清にして烈、シャムより来る者之に比す。
····其の南蛮酒は則ちシャムより出づ。醸、中国の露酒の如し。

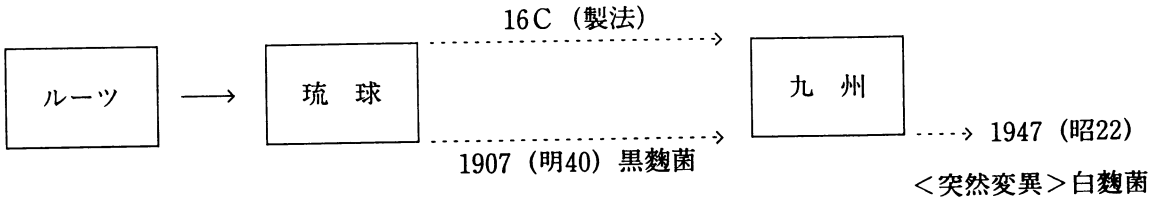


図1　泡盛の歴史

2．名称の由来

泡盛の名称については、15世紀後期につくられた古い民謡 (菅間「焼酎のはなし」) や、1660年島津家から将軍への献上目録に (宮城「琉球王府の外交用泡盛」) 古い記述がみられる。また、その語源については①薩摩起源説、②原料起源説、③梵語起源説、④泡由来説がある。

3．製造法の特徴

原料米は、インディカ種のタイ砕米で、これを蒸して泡盛種麹 (黒麹菌で造ったもの) を加え、約40時間ねかせて麹を造る。原料の米を全部麹にすることが特徴でこれに原料米の160～180%相当の水と酵母菌を加え、10～14日間発酵させた後、蒸留する。熟成もろみのアルコール分は約18%で、これを単式蒸留機で蒸留してアルコール分45%前後の泡盛ができる。これを3年以上熟成したものが古酒 (クース) として出荷される。

泡盛醸造法の特徴を要約すると①黒麹菌を使用すること、②全麹仕込であること、③熟成により酒質の醇化向上をはかること、などがあげられる。

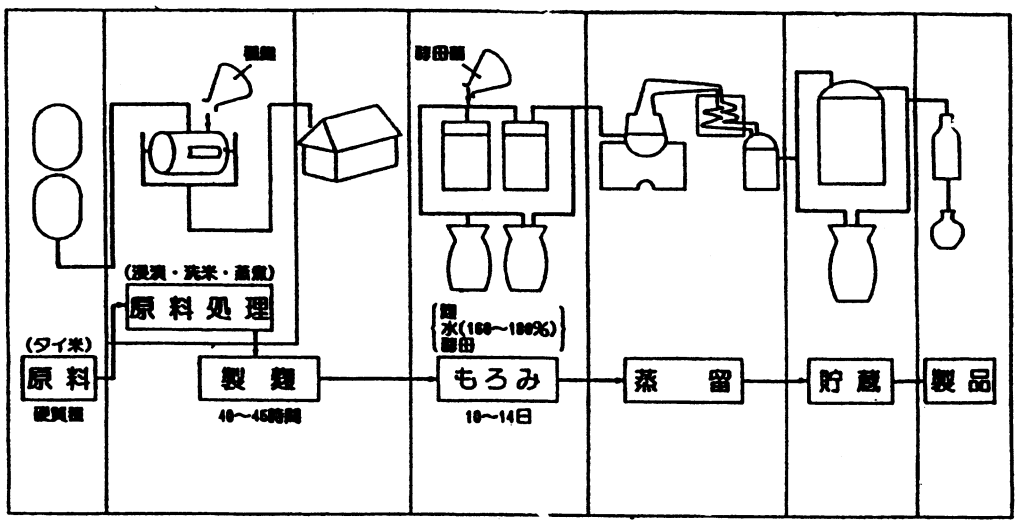


図２　泡盛の製造工程

４．黒麹菌について

酒造りに利用される麹菌について、日本の酒造りには黄麹菌、中国、韓国、東南アジア諸国ではクモノスカビ、ケカビが古来その主要菌として利用されてきたが、泡盛の醸造には他と異なる黒麹菌が用いられてきた。

１）黒麹菌の種類

黒麹菌の種類には、アスペルギス・リュウチュウエンシス・イヌイ（イヌイ菌）、アスペルギンス・ウサミ（ウサミ菌）、アスペルギルス・サイトウイ（サイトウ菌）、アスペルギルス・アワモリ（アワモリ菌）、アスペルギス・アウレウス（アウレウス菌）の５菌種が知られている。この中で現在の泡盛醸造に使用されているものは、アワモリ菌とサイトウ菌である。

２）黒麹菌の特徴

黒麹菌が他の麹菌と大きく異なる性質の一つにクエン酸の生成があげられる。黒麹菌で造った麹にはクエン酸がかなり生産されているので、これで仕込んだモロミは酸度が高く、ＰＨが3.2～3.5ともなり気温の高い地域でモロミの腐造が起こりにくく安全に泡盛を造ることが出来る。

泡盛の仕込は原料の米をすべて麹とする全麹仕込みであるが、これは発酵工程において麹の生成したクエン酸の役割をより効果的に発揮させる結果となっている。この全麹仕込は他の焼酎には見られない泡盛製造の特徴の一つである。

さらに黒麹菌の特徴としては清酒麹菌には殆どない生デンプン分解力を持っていることである。その他、黒麹菌の生産する種々のアミラーゼ系およびプロテアーゼ系酵素についても清酒麹菌とは異なった傾向が見られる。

黒麹菌の生酸力や糖化酵素生成能は、菌種により、またその変種により異なり先に述べた現在の泡盛の製造に用いられているアワモリ菌は糖化力が強く生酸力はやや弱いタイプであり、一方サイトウ菌は生酸力が強く糖化力はやや弱いタイプである。

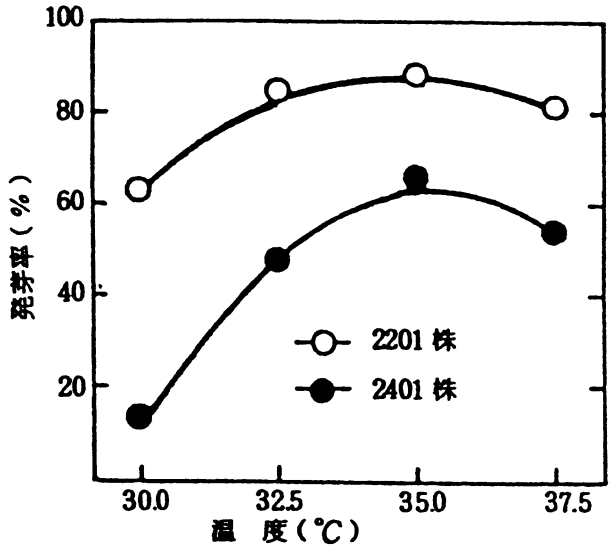


図３－１　培養温度と発芽率

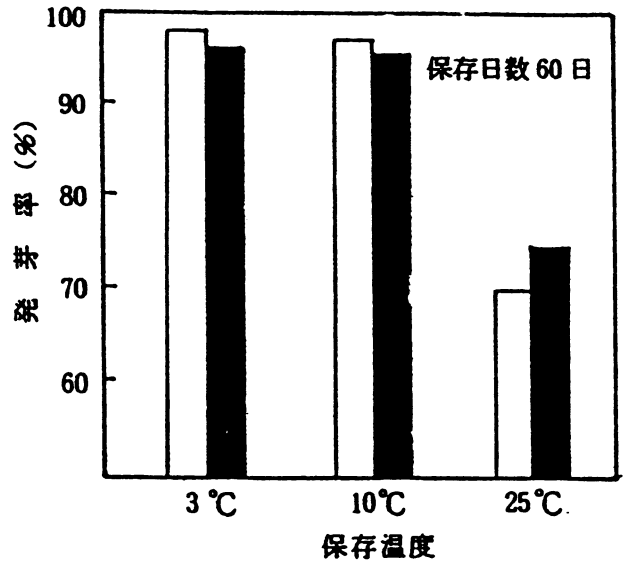
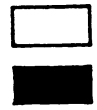


図３－２　菌株の種類と胞子の保存性



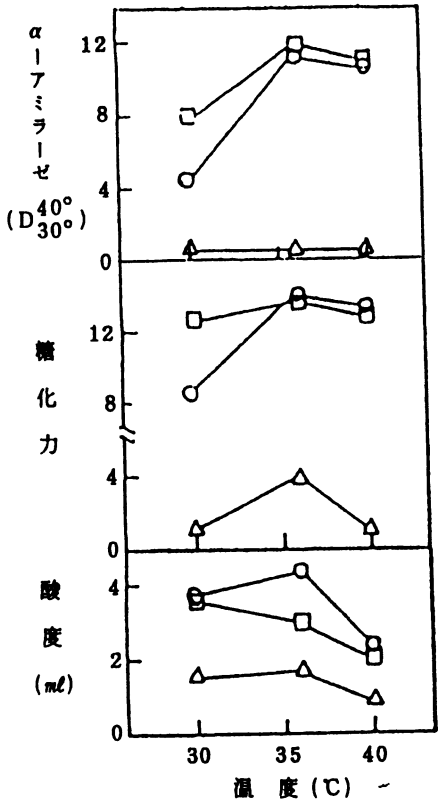


図３－３　製麹温度条件と麹成分

○－○ *Asp. foetidus* (*A. awamori*)
△－△ *Asp. awamori* (IAM2391)
□－□ B2－1（アワモリ・タイプ）

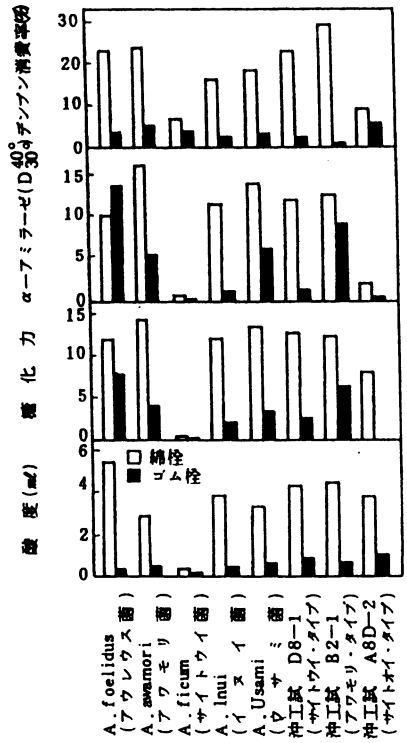


図３－４　嫌気的・好気的条件と麹成分

図３　黒麹菌の実用的性質

5．古酒（クース）について

泡盛の熟成－古酒づくり－には伝承の方法として、まず良いカメを運ぶこと、冷暗所に貯蔵すること、仕次ぎの方法（数個のカメに年代別に貯蔵し、最も古い古酒ををくみ出すと、その次古い古酒から順次補充していき、古酒の酒質と量の保持をはかる・図４）等が伝えられている。

しかし、この古酒の熟成要因及びそのメカニズムはまだ不明な点が多く、種々の熟成条件について試験実施中である。

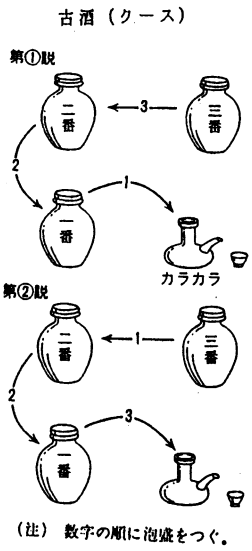


図４　仕次ぎ

6．泡盛の利用

泡盛は飲用のほかに、料理への利用、種々のリキュール（花の酒、実の酒、根・葉の酒）等へ利用される。ここでは、泡盛の調味料としての簡単な試験例について述べる。

ラフテー、豚肉味噌煮、キビナゴ蒸煮について、30%泡盛、30%エチルアルコール、水のを用いてそれぞれ調理を行った。その結果、泡盛を用いたものが香りにおいて、特に優れていた。（表１、表２）

調味料としての泡盛に関する研究については、まだ多くの課題を残している。

表１　調理材料と調理法

料理名	材料＼条件＼試験区	1	2	3	調理法
		水	30% アルコール	泡盛（30%）	
ラフテー	豚三枚肉 1kg しょうゆ 180mℓ かつおだし 180mℓ 砂糖 150g	180mℓ	180mℓ	180mℓ	丸ごと１時間ゆでる。角切りにして調味液と共に弱火で２時間煮る。
味噌煮豚	豚三枚肉 500g かつおだし 250mℓ 白味噌 80g 砂糖 70g みりん 大さじ2	90mℓ	90mℓ	90mℓ	同上
きびなごの酒煮	きびなご 150g 塩 5g	100mℓ	100mℓ	100mℓ	材料をなべに入れ煮汁がなくなるまで煮つめる。

表２　調理試験結果

（１）味

料理名＼試験区（条件）	1（水）	2（30%アルコール）	3（泡盛30%）
ラフテー	＋	＋	＋＋＋
味噌煮豚	＋	＋	＋＋
きびなごの酒煮	＋＋	＋	＋

（２）香り

料理名＼試験区（条件）	1（水）	2（30%アルコール）	3（泡盛30%）
ラフテー	＋	＋	＋＋＋
味噌煮豚	＋	＋	＋＋
きびなごの酒煮	＋＋	＋	＋

7．ラオス、ベトナムの酒造りと食品について

本年１月に行った食品および酒造技術調査の結果について、見たまま、感じたままを報告したい。

一般講演論文
7月12日（水）

A室

WA1	推論 (1)	司会：西守 克己 (鳥取大学)
WA2	推論 (2)	司会：鳶 敏和 (ダイダン)
WA3	推論 (3)	司会：馬野 元秀 (大阪大学)
WA4	集合 (1)	司会：高木 昇 (富山県立大学)
WA5	集合 (2)	司会：河口 万由香 (北海道大学)

B室

WB1	制御 (応用 1)	司会：田中 一男 (金沢大学)
WB2	制御 (応用 2)	司会：江澤 義典 (関西大学)
WB3	制御 (応用 3)	司会：鎌野 琢也 (徳島大学)
WB4	制御 (応用 4)	司会：安信 誠二 (筑波大学)

C室

WC1	データベース	司会：高良 富夫 (琉球大学)
WC2	学習 (1)	司会：本多 中二 (電気通信大学)
WC3	学習 (2)	司会：林 勲 (阪南大学)
WC4	心理学	司会：山口 静馬 (山口大学)
WC5	制御 (方法論 1)	司会：川路 茂保 (熊本大学)

D室

WD1	ＧＡ (1)	司会：遠藤 聡志 (琉球大学)
WD2	ＧＡ (2)	司会：石渕 久生 (大阪府立大学)
WD3	ＧＡ (3)	司会：高木 英行 (九州芸工大学)
WD4	ＧＡ (4)	司会：山田 孝治 (琉球大学)
WD5	ＧＡ (学生)	【企画セッション】 司会：下島 康嗣 (名古屋大学)

E室

WE1	ファジィＯＲ (1)	【企画セッション】 司会：玄 光男 (足利工業大学)
WE2	ファジィＯＲ (2)	【企画セッション】 司会：市橋 秀友 (大阪府立大学)
WE3	ファジィＯＲ	司会：和多田 淳三 (大阪工業大学)
WE4	モデリング (1)	司会：田野 俊一 (日立製作所)
WE5	モデリング (2)	司会：玉城 史朗 (琉球大学)

F室

WF3	信頼性	司会：小山 健 (徳島文理大学)
WF4	ビール	【企画セッション】 司会：廣田 薫 (東京工業大学)

WA1-1

ニューロ・ファジィ手法による大規模熱源システムの短期負荷予測

Neuro-Fuzzy Approaches to Heating and Cooling Load Prediction for Large Scale Plants

北川 善也　○市橋 秀友　三好 哲也　上久保 典昭
Yoshinari Kitagawa　Hidetomo Ichihashi　Tetuya Miyoshi　Noriaki Uekubo

大阪府立大学 工学部
College of Engineering, University of Osaka Prefecture

Abstract— Neuro-Fuzzy approaches to heating and cooling load prediction of large scale plants are discussed. NF-GMDH and NF-ID3 are hierarchical and tree structured adaptive learning networks(ALN) respectively. Prediction performances of the ALNs are analyzed and compared.

1．はじめに

近年，大規模（地域内），小規模（建物内）にかかわらず，冷暖房施設として電力負荷の平滑化のために，蓄熱槽を備えたシステムが導入されている．そのために，冷暖房熱源システムを最適に運転管理するためには，熱負荷の予測は必要不可欠なものである[1]．将来の熱負荷を的確に予測できれば，無駄な蓄熱や追いかけ運転を防止できる．また，システムの頻繁な発停は，無駄にランニングコストを増やしたり，機器の劣化を早める．熱負荷は，気象条件，建物等の利用条件など多くの要因の相互作用により変動するためにイベント情報などできるだけ多くの情報を予測に用いる必要がある．現状ではオペレーターが10%程度の余裕をもった運転を行っており，この余裕分を予測精度の向上により減少させることができれば大きな効果があると考えられている．

本研究では，某地域の冷暖房施設において計測されたデータをもとに，ニューロ・ファジィ手法[2,3]を用いた熱源システムの短期（1時間後と6時間後）負荷予測を行った．

2．ニューロ・ファジィGMDH

ニューロ・ファジィ（NF-）GMDH（Group Method of Data Handling）はネットワーク型GMDH[4,5]の部分表現にガウス関数を基底とするRBFネットワーク[6-8]を用いる適応的学習ネットワーク[5]である．

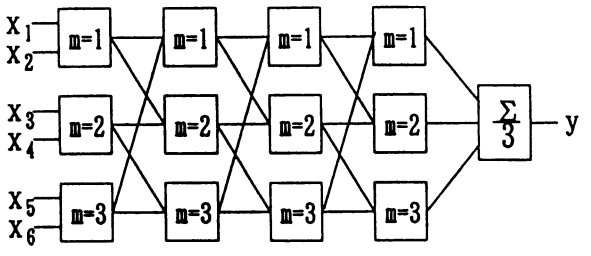


図2.1　NF-GMDHの階層図

各サブモデル（部分表現）への入力変数を2個とした場合のNF-GMDHモデルの構造を図2.1に示す．図において，各サブモデルからの出力は，次層の入力変数となる．最終層の出力は，各サブモデルからの出力の平均値とする．各サブモデル（部分表現）を1層目から順に上の層へと計算し出力値を求める．この出力値を基にして誤差逆伝播学習法を用いる．

3．ニューロ・ファジィＩＤ３

J.R.QuinlanによるID3[9]は簡単で強力な決定木作成法であり，新しい対象を分類するときのテスト回数最小化をその目的としている．決定木は獲得した知識がわかりやすく，ルールの抽出が容易であることから有効な知識表現の一つとされている．ファジィID3[10]において，ファジィ集合の共通集合を積演算子で定義すると，ノードbにおけるデータの個数（濃度）およびクラスkに属するデータの個数は各々

$$\left|D^b\right| = \sum_{x \in D} \left(\prod_{(i,j) \in Q_b} B_{ij}(x_i) \right) \tag{3.1}$$

$$\left|D_k^b\right| = \sum_{x \in D_k} \left(\prod_{(i,j) \in Q_b} B_{ij}(x_i) \right) \tag{3.2}$$

となる．ただしB_{ij}は属性iの第jメンバシップ関数で(i,j)は属性iとその属性値のファジィ集合（ファジィ数）の添字jとの対を表しており，Q_bはルートからノードbに至るまでに選択された(i,j)の集合である．

出力yを次のように表す．

$$y = \sum_{r=1}^{R} \left(\prod_{(i,j) \in Q_r} B_{ij}(x_i) \right) w_r \tag{3.3}$$

ここで，$\prod_{(i,j) \in Q_r} B_{ij}(x_i)$は第ｒルールの条件部に対応し，決定木ではルートから第ｒリーフにいたるまでの一次元のメンバシップ関数の積で定義されている．入力を区間[0,1]に基準化し，端点で節点を3個重ねた内部節点のない2次のＢースプライン[11]をメンバーシップ関数に用いる場合は，(3.3)式はBernstein多項式である．

4．大規模熱源システムの負荷予測

4.1　負荷予測のためのデータ処理

負荷予測に用いたデータは，某地域の冷暖房施設において1992年8月4日から8月31日に渡って観測された4種類の気象データ（1時間当たりの平均値）と冷水負荷[Gcal/h]を一対とする672件のデータである．4種類の気象データとは，外気温度[℃]，外気湿度[%]，日射量[μE/m^2]と大気圧[hPa]である．NF-GMDHとNF-ID3を用いて負荷予測を行う場合，これらのデータ以外に，予測精度の向上を目指して，A）予測する日の曜日，B）観測された時刻，C）予想最高気温，予想最低気温を加えた．以下にそれぞれについて述べる．

A）予測する日の曜日

熱負荷は周期的に変動する時系列データとしてとらえることができる．そこで，その周期性を見いだすために冷水負荷の自己相関係数の変化を図4.1と図4.2に示す．規則的な周期変化をする時系列データでは，その周期のラグを与えた時，もっとも相関が高くなる．

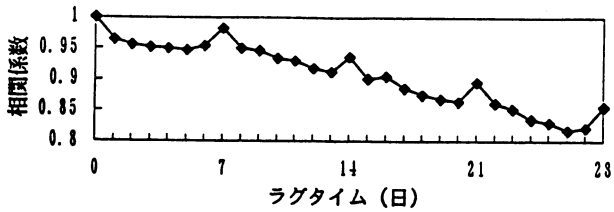


図4.1　熱負荷の自己相関係数（日毎）

ここでは，7日，14日，21日と，1週間ごとに自己相関係数が高くなっており，1週間サイクルの規則的な変化が続いているのが分かる．これは地域内の建物の使用状況によるものと考えられる．そこで，周期性をとりいれるために，月曜から日曜までを順に1から7までの整数値で表した予測しようとする曜日のデータを入力変数に加える．

B）観測された時刻

同様に，図4.2で明らかなように，時間ごとにも周期性が見られるので，予測しようとする時刻，つまり前述の気象データが観測された0時台から23時台までに対応する0から23の数字も入力変数に加える．

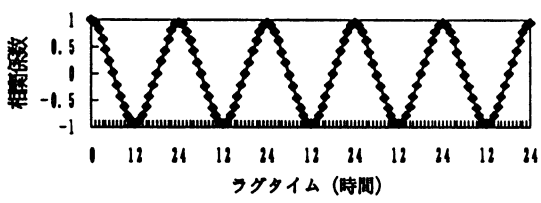


図4.2　熱負荷の自己相関係数（時間毎）

C）予想最高気温，予想最低気温（以下，それぞれT_{max}，T_{min}と略す）

気象条件のうち，熱負荷に支配的であるのは気温の推移であると考えられるが，熱源システムの負荷予測では，これを最高・最低気温で代表させることでも熱負荷をかなりの精度で表現しうると言われている[12]．そこで，本研究においても最高・最低気温を入力変数に加えることによってどの程度予測精度が向上するかを検討した．観測地の相違などもデータに加味しなければならないが，（財）日本気象協会のWMD情報を利用すれば，翌日の気温の予測精度は，約90%（1990当時）であるので，予測時点で得られる情報にかえてT_{max}とT_{min}として，実際の最高気温と最低気温を代用した．次に入力変数について述べる．トレーニングデータ（同定用）を8月の第一週から第三週までの479件（1時間後予測）と474件（6時間後予測）とした．また，同定したモデルの予測精度を調べるために，チェッキングデータとして，第四週目の168件のデータを用いた．後述の負荷予測は，それぞれ下記の入力変数を組み合わせて行った．なお，いずれも出力は熱負荷の予測値である．

入力変数：(1)予測する日の曜日，(2)予測する時刻，(3)現在の気温，(4)6時間前の気温，(5)12時間前の気温，(6)18時間前の気温，(7)24時間前の気温，(8)現在の湿度，(9)6時間前の湿度，(10)12時間前の湿度，(11)18時間前の湿度，(12)24時間前の湿度，(13)現在の気圧，(14)現在の日射量，(15)6時間前の気圧，(16)6時間前の日射量，(17)12時間前の気圧，(18)12時間前の日射量，(19)18時間前の気圧，(20)18時間前の日射量，(21)24時間前の気圧，(20)18時間前の日射量，(21)24時間前の気圧，(22)24時間前の日射量，(23)観測された日の最高気温，(24)観測された日の最低気温

[22入力1出力]；(1)～(22)の入力変数
[16入力1出力]；(1)～(14)，(23)，(24)の入力変数
[14入力1出力]；(1)～(12)，(23)，(24)の入力変数
[12入力1出力]；(1)～(12)の入力変数
[10入力1出力]；(1)～(8)，(23)，(24)の入力変数
[8入力1出力]；(1)～(7)，(23)の入力変数
[6入力1出力]；(1)～(4)，(23)，(24)の入力変数

4.2　短期負荷予測

NF-GMDHによる学習では，学習回数を5000回，学習係数を0.005とし，教師データとNF-GMDHの出力の誤差の2乗和を計算しながら階層数を増やして行い，誤差の2乗和の最も少ない階層数でのモデルを採用した．

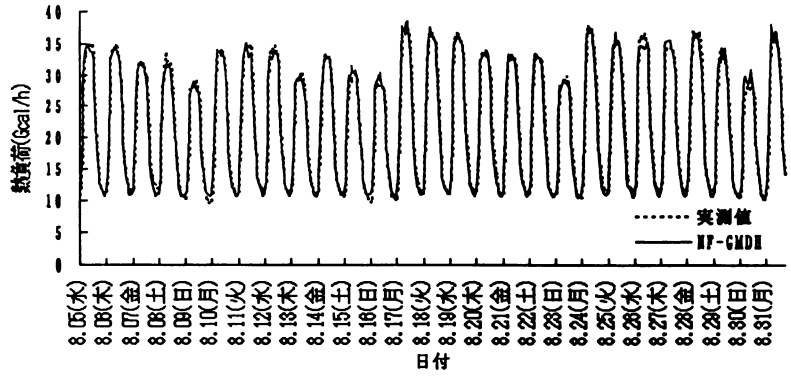


図4.1　NF-GMDHの10入力の6時間後の予測結果

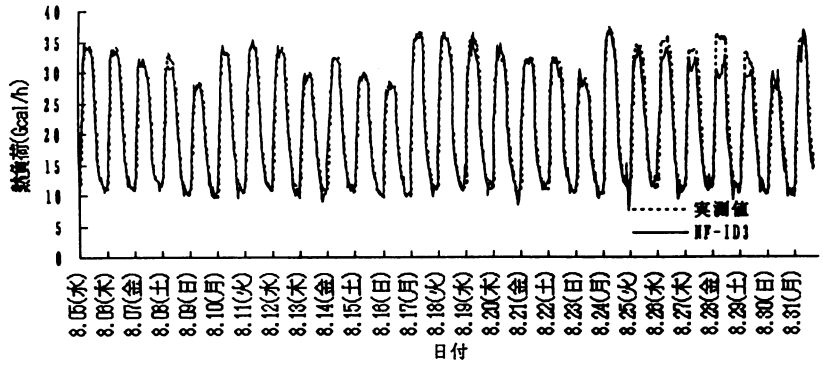


図4.2　NF-ID3の22入力の6時間後の予測結果

予測精度を測る評価基準として，本研究では相対誤差率を使用する．誤差率を$\frac{|予測値-実測値|}{実測値}$で表し，相対誤差率RERは(4.1)式によって与えられる．

$$RER=\frac{100}{データ数}\sum_{i=1}^{データ数}\frac{|予測値-実績値|}{実績値}(\%) \quad (4.1)$$

RERはデータ一件あたりの誤差を示す．実際の運用には，このRERの値が10%以下であれば十分であると言われている．表4.1にNF-GMDHの学習結果を相対誤差率で示した．

表4.1　NF-GMDHによる相対誤差率(RER)

	1時間後予測		6時間後予測			
	T(%)	C(%)	T(%)	C(%)	階層数	パラメータ
22入力	2.26	8.53	2.53	6.19	4	880
16入力	2.35	5.39	2.51	7.77	4	640
14入力	2.54	4.25	2.80	5.87	4	560
12入力	2.93	5.07	3.24	5.45	3	360
10入力	2.7	5.26	3.00	3.73	4	400
8入力	3.12	5.68	3.43	4.54	3	240
6入力	3.22	5.21	3.26	7.37	3	180

T；トレーニングデータ　C；チェッキングデータ

表4.1に示すように，トレーニングデータのRERの値は，入力変数の数が増えるにつれて減少している．チェッキングデータではRERが最小値をとるのは1時間後予測で14入力，6時間後予測で10入力の場合で，この時のモデルがそれぞれ最適モデルと考えられる．

つぎに入力変数T_{max}，T_{min}の有効性を検討する．また，12入力の場合にはT_{max}，T_{min}が含まれていないため，10入力と比較すると，トレーニングデータにおいてRERの値が大きい．14入力は，12入力にこの2つの入力変数を加えたデータで，学習結果は表4.1のとおり，トレーニングデータに対して14入力の方が誤差が減少している．また12入力と14入力の1時間後の予測でも，同じ3層までのRERを比較すると，1）12入力／T：2.93(%)，C：5.07(%)，2）14入力／T：2.70(%)，C：4.33(%)で，同様である．入力変数を減らし，新たに4入力変数：予測する日の曜日，予測する時刻，T_{max}，T_{min}を用いた4入力1出力で学習するとT：3.90 (%)，C：5.79 (%)となり比較的良好な結果が得られた．以上より，T_{max}，T_{min}は，入力変数の数が少ない場合に特に有効な変数であると考えられる．

次に，NF-ID3による学習結果を表4.2に示す．学習回数は500回，最小データ数は1とし，最小占有率（決定木の

停止規則）は0.6から0.9まで変化させ，もっとも誤差が小さい0.9の場合を選択した．

表4.2　NF-ID3の相対誤差率(RER)

	1時間後予測			6時間後予測		
	T(%)	C(%)	ﾊﾟﾗﾒｰﾀ	T(%)	C(%)	ﾊﾟﾗﾒｰﾀ
22入力	4.44	7.89	501	4.15	8.39	667
16入力	4.66	10.52	713	4.65	10.24	719
14入力	5.74	10.94	803	5.69	11.58	795
12入力	5.62	11.97	821	5.80	11.85	791
10入力	5.63	9.74	827	5.46	10.53	813
8入力	5.95	12.11	833	6.48	11.97	855
6入力	9.45	23.07	571	9.88	20.78	565

T；トレーニングデータ　C；チェッキングデータ

表4.1と表4.2を比べてわかるように，Bernstein多項式である木構造のNF-ID3はRBFを用いた階層型のNF-GMDHに比べて誤差は大きい．また，パラメータ数は，NF-GMDHの方が少ない．ただし，NF-ID3は木構造であるので，NF-GMDHに比べて学習時間が3分の1以下である．最後に，チェッキングデータで最も予測精度の良かったNF-GMDHの10入力6時間後予測，NF-ID3の22入力1時間後予測での熱負荷の実測値に対する予測値の関係をそれぞれ図4.3と4.4に示す．

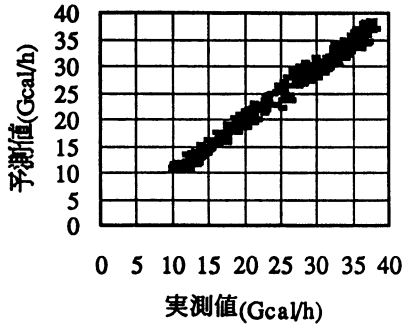


図4.3　熱負荷の実測値と予測値との関係(NF-GMDH)

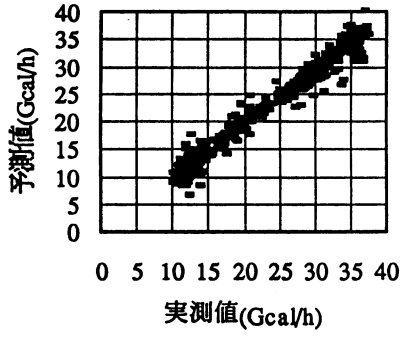


図4.4 熱負荷の実測値と予測値との関係(NF-ID3)

システムを実際に作動するにあたって前述の相対誤差率RERはデータ数で割った平均値であり，1件あたりの予測精度，即ち誤差率はそれより多少ばらつく．そこで誤差率の標準偏差でそのばらつきの程度をみる．図4.3の例で，誤差率の標準偏差2.66(%)に，RER＝3.73(%)と足すと6.39(%)となる．実用的な予測精度が得られていると考えられ，現在のオペレーターによる運転を自動化できる可能性がある．

5．おわりに

本研究では，適応学習ネットワークであるNF-GMDHとNF-ID3を用いて大規模熱源システムにおける熱負荷の短期予測を行った．用いる観測データの種類や，予想最高気温・予想最低気温の予測精度への影響を検討した．NF-GMDH，NF-ID3ともにある程度実用的な予測精度が得られていて，熱源システムのニューロ・ファジィ手法による自動運転の可能性が示された．

《参考文献》

[1] 柏木，鳶：空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 341-344 (1993)
[2] 市橋：日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.2, pp.191-203 (1993)
[3] 市橋，白井，長坂：第１０回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.337-340 (1994)
[4] A.N.Mucciard：Cybernetics, Artificial Intelligence & Ecology, Spartan Books, pp.159-194 (1972)
[5] 池田：システムと制御, Vol.24, No.1, pp.46-54 (1980)
[6] J.Moody and C.J.Darken：Neural Computation, Vol.1, pp.281-294 (1989)
[7] T.Poggio and F.Girosi：Sciences, Vol.274, pp.978-982 (1990)
[8] 丸山：システム／制御／情報, Vol.36, No.5, pp.322-329 (1992)
[9] J.R.Quinlan：Machine Learning, Vol.1, pp.81-106 (1986)
[10] 馬野他：第４回インテリジェントＦＡシンポジウム講演論文集, pp.201-204 (1993)
[11] 市田，吉本：スプライン関数とその応用，教育出版 (1979)
[12] 孔，清水，伊東，高橋：空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.717-720 (1989)

[問い合わせ先]
〒593　大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学工学部経営工学科　市橋 秀友
TEL：0722-52-1161. FAX：0722-59-3340
E-mail：ichi@center.osakafu-u.ac.jp

WA1-2

プロセス異常診断へのファジィ推論の適用
Application of Fuzzy Inference to Process Fault Diagnosis

楊　宗霄*　　鈴木　和彦　　島田　行恭　　佐山　隼敏
Zong-Xiao YANG *　　Kazuhiko SUZUKI　　Yukiyasu SHIMADA　　Hayatoshi SAYAMA
岡山大学　工学部
Faculty of Engineering, Okayama University
*岡山大学　大学院　自然科学研究科
* Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

When a fault diagnostic fuzzy expert system of processes is developed, it is important to deal with the uncertainty information of specialist knowledge and running data about the objective process. This paper describes an appplication of process fault diagnosis by fuzzy inference. Fuzzy fault tree analysis is utilized for constructing the rule-based knowledge, and a fuzzy inference engine is developed to fault diagnosis by possibility distributions and also operation data. Then from the reasoning results, the diagnostic system can identify the positive causes which can lead to process malfunctions, and also their checking sequence. We verify the practicality of the proposed method to a laboratory plant.

Keywords: *Fuzzy Inference, Expert System, Process Fault Diagnosis, Fault Tree Analysis, Possibility Distribution*

1.　はじめに

フォールトツリー解析に基づくプロセス異常診断法は原子力発電所や化学プラントなどに適用され，その有効性が示されている[1]が，プロセス異常に関する知識の曖昧性，システム解析者の持つ知識のヒューリスティック性及びプロセス運転に関する情報の多義性などの取り扱い法は依然として問題となっている[2]。これらの問題に対して，ファジィ制御に応用されるファジィif-then ルールに基づくファジィ推論法をプロセス異常診断に適用することにより，柔軟性を持ち，専門家の行う診断に近い異常診断システムを構築することが可能となる[3]，[4]。

本研究では，フォールトツリー解析に基づき，ツリーのミニマルカットセットと異常伝播の関係を明らかにすることにより，if-then ルールベースを作成する。ファジィ故障解析モデルを提案し，知識ベースに故障可能性分布を導入する。プロセスの運転データと知識ベースとのパターンマッチングを行い，ファジィ推論を異常診断に適用する。この推論結果に基づき，プロセス異常の原因と診断グレードを推定する。更に，提案した異常診断システムを実験プラントにより検証する。

2.　知識ベースの構築

2.1 ルールベースの作成

図1に示す連続攪拌反応槽に対してフォールトツリーを生成し，その結果を図2に示す[1]。このツリーに基づき，異常伝播の経路とミニマルカットセットを求める。更に，検出すべき事象(図2)を明らかにし，診断センサ配置個所(図1)を決定する[2]。ミニマルカットセットが発生する場合，診断センサ配置個所における変数の状態量をルール条件部とし，プロセス異常の原因となるミニマルカットセットの構成メンバーをルール結論部として，if-thenルールを作成する[4]。連続攪拌反応槽の出口温度高に対するルールは16個であり，これらの一部を図3に示す。

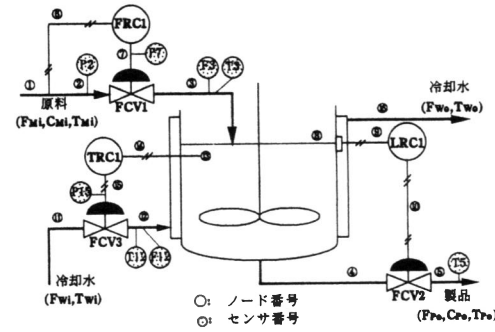


図1　　連続攪拌反応槽

```
/*  *****  RULE FORMULATIONS  *****  */
Rule00: IF T5 is normal,  THEN The system is running on normally.
Rule01: IF T5 is high(1) & T3 is too_high(3),  THEN T1 is too_high(5).
Rule02: IF T5 is high(1) & T12 is high(6),  THEN T11 is high(7).
Rule03: IF T5 is high(1) & T3 is high(8) & F12 is less(22) & P15 is not_less(24),
        THEN T1 is high(10) & FCV3 is failure(23).
Rule04: IF T5 is high(1) & P2 is too_high(12) & F12 is less(22) & P15 is not_less(24),
        THEN P1 is too_high(13) & FCV3 is failure(23).
... ... ... ... ... ...
Rule15: IF T5 is high(1) & F12 is low(26) & P15 is not_low(28), THEN FCV3 is closed(27).
Rule16: IF T5 is high(1) & P15 is low(28),  THEN TRC1 is low_o/p(29).
```

図3　　出口温度高に対するルールベース

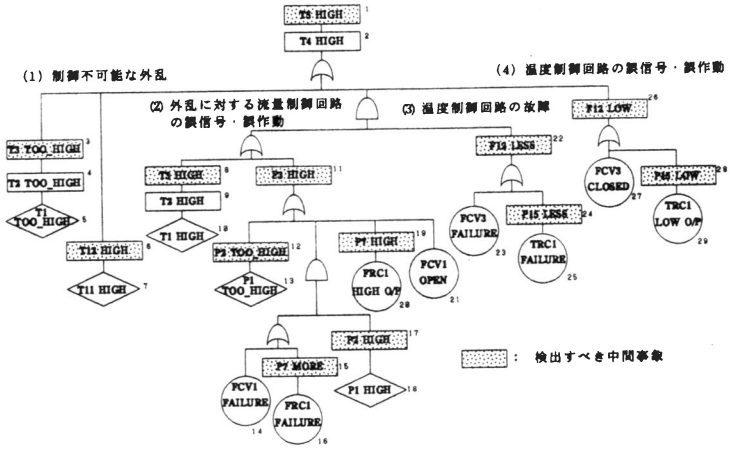


図2　　連続攪拌反応槽のフォールトツリー

2.2 ファジィ故障解析

ここでは，異常診断のためのファジィ故障解析モデルを提案する。対象プロセスの構成要素の故障率λにより，ファジィ故障測度 f(λ；K)を定義

する[2]。この測度を用い，故障可能性分布関数(Beta関数)のパラメータを決定することにより，フォールトツリーの基本事象発生の可能性分布を導出する[4]。更に，知識ベースに格納されたルール結論部の構成メンバーについて，ファジィ論理演算(t-norm)を行うことにより，そのルール条件部が確かに成立している($\mu_r=1$)場合のルール結論部の可能性分布を導出する[4]。最後には，求められたルール結論部の可能性分布をファジィ推論に使われる形式(PD_r)に変換し，計算機内に格納しておき，推論及び異常診断の際に利用する。

表1 故障率データ

分類	基本事象	故障率(*10^{-6}/hr, IEEE Std500-1977) 下限値 λL	最良値 λM	上限値 λU
構成要素の故障 (K=1/9)	FCV failure(14),(23)	0.070	0.630	1.730
	FRC failure(16)	0.045	0.743	3.690
	FRC high o/p(20)	0.005	0.075	0.371
	FCV open(21)	0.049	0.441	1.211
	TRC failure(25)	0.310	3.000	4.350
	FCV closed(27)	0.049	0.441	1.271
	TRC low o/p(29)	0.003	0.294	0.455
外乱 (K=1/4)	T too_high(5)	0.034	0.170	1.123
	T high(7),(10)	0.048	0.242	1.600
	P too_high(13)	0.004	0.353	0.695
	P high(18)	0.001	0.137	0.270

表1の連続攪拌反応槽の各構成要素の故障率データを用い，ルール結論部の可能性分布関数を求めた計算結果の一部を表2に示す。

表2 ルール結論部の可能性分布関数

番号	可能性分布関数 PDr
01	{0.10/10,0.14/11,0.20/12,0.31/13,0.50/14,0.80/15,1.0/16, 0.80/17,0.50/18,0.31/19,0.20/20,0.14/21,0.10/22}
02	{0.11/14,0.16/15,0.22/16,0.34/17,0.54/18,0.82/19,1.0/20, 0.82/21,0.54/22,0.34/23,0.22/24,0.16/25,0.11/26}
03	{0.07/−17,0.11/−16,0.22/−15,0.53/−14,1.0/−13,0.53/−12,0.22/−11,0.11/−10,0.07/−9}
04	{0.07/−16,0.11/−15,0.22/−14,0.53/−13,1.0/−12,0.53/−11,0.22/−10,0.11/−9,0.07/−8}
05	{0.08/−23,0.16/−22,0.42/−21,1.0/−20,0.42/−19,0.16/−18,0.08/−17}
⋮	⋮
14	{0.08/−20,0.16/−19,0.43/−18,1.0/−17,0.43/−16,0.16/−15,0.08/−14}
15	{0.06/−18,0.11/−17,0.21/−16,0.52/−15,1.0/−14,0.52/−13,0.21/−12,0.11/−11,0.06/−10}
16	{0.07/−21,0.12/−20,0.23/−19,0.54/−18,1.0/−17,0.54/−16,0.23/−15,0.12/−14,0.07/−13}

3. ファジィ推論による異常診断

3.1 ファジィ推論

推論エンジンでは，診断センサ検出値をルール条件部の各状態量に関するメンバーシップ関数に代入し，センサ検出値のグレード{$\mu_{A(B)}$}を求め，ルール条件部の一致度μ_r={$\mu_{A(B)}$}を計算することにより，運転データと知識ベースとのパターンマッチングを行う。発火している各ルールに対して，結論部の可能性分布関数PD_rに条件部の一致度μ_rで重み付け($\mu_r \times PD_r$)を行うことにより，各ルールの結論部を結合(max{$\mu_r \times PD_r$})する。この結合された分布をファジィ推論の結果として異常診断の際に利用する。連続攪拌反応槽に配置した8個の診断センサで表3のサンプルデータが検出された場合の推論結果を図4に示す。

表3 サンプルデータ

センサ番号	ファジィ変数
P2	+9.5
F3	+9.0
T3	+2.5
T5	+12.5
P7	+1.25
T12	+2.5
F12	−7.5
P15	−2.25

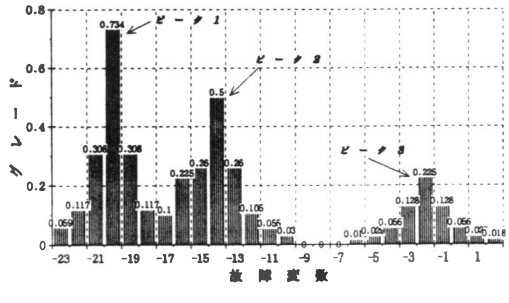


図4 ファジィ推論結果

3.2 異常診断

上述の推論結果をワーキングメモリに送り，そのピークグレードの中の最大値で除算することにより，知識ベース内のルール結論部の可能性分布との照合を行う。マッチされたルールの結論部におけるプロセスの異常原因を診断グレード(除算で用いた最大ピークグレード)と共に，ユーザへ出力する。更に，ワーキングメモリに残られた分布に対して，同様な手順で処理を行うことにより，全ての照合可能なプロセス異常の原因と診断グレードを推定することができる。表3のサンプルデータに対する推論結果を用い，対象プロセスの異常を診断し，この結果を表4に示す。これにより，2個の流量制御弁の故障（FCV1 and FCV3 failure）及び入口圧力高（P1 high）という外乱が同時に発生している可能性はかなり高い(診断グレード=0.734)と考えられる。

表4 異常診断結果

ルール番号	診断グレード	異常原因
5	0.734	FCV1 is failure(14) & P1 is high(18) & FCV3 is failure(23)
15	0.5	FCV3 is closed(27)
9	0.225	T1 is high(10) & TRC1 is failure(25)

4. 提案手法の検証

図1に示す連続攪拌反応槽をモデルとし，実験プラントを構築し，提案した異常診断システムを検証し，その有用性を明らかにする。本実験では，図3に示す知識ベースに対し，ルールの結論部における要素故障や外乱などを想定した異常状態を起こし，運転プラントの状態量の変化を調べる。この観測されたデータを異常診断システムに入力し，ファジィ推論を適用した異常診断結果と実験の想定異常状態とを比較することにより，本研究で提案した診断システムの有効性を検証する。実験の結果により，1つのルールの結論部に対する異常状態を起こした場合の実験結果が診断システムによる結果と一致していることが分かった。一方，オンライン診断での異常伝播を調べることにより，本診断システムが異常兆候を捕らえる柔軟な診断を行えることは明らかにした。

5. おわりに

本研究では，プロセス異常診断エキスパートシステムの構築法を提案した。知識獲得と表現の過程で，ファジィフォールトツリー解析法を用いることにより，知識工学者を特に必要とせず，専門家のみによって知識ベースの構築が可能である。ファジィ推論を異常診断へ適用することにより，プロセス異常に関する知識や運転情報などの曖昧性，多義性，不確実性などに対し，柔軟な対応も可能となる。更に，実験プラントの検証により，提案した異常診断システムの実用性を明らかにした。

参考文献

[1] 鈴木，島田，佐山：フォールトツリーを用いた異常診断エキスパートシステムの開発； 安全工学， Vol.31， No.2， pp.100 -109 (1992)

[2] Z. X. Yang, K. Suzuki, Y. Shimada, H. Sayama: Fuzzy Fault Diagnostic System based on Fault Tree Analysis; Proceedings of FUZZ-IEEE/IFES'95, Vol.1, pp.165-170(1995)

[3] 馬野：ファジィ・エキスパート・システムの現状と展望；日本ファジィ学会誌 , Vol.2, No.2, pp.115-124(1990)

[4] 楊，島田，宋，鈴木，佐山：ファジィ知識ベースにおける可能性分布決定法；平成6年度日本設備管理学会秋季研究発表大会論文集， No.2, pp.17-22(1994)

連絡先： 〒700 岡山県岡山市津島中3－1－1
岡山大学 工学部 機械工学科
鈴木 和彦
TEL(FAX) 086-251-8059

WA1-3

ファジイ推論による台風発生数の予測について
A Prediction of Typhoon Genesis Frequency by Using Fuzzy Reasoning

石島英　　河辺照之
Suguru Ishijima　　Teruyuki Kawabe

琉球大学教養部
General Education Division, University of the Ryukyus

1. はじめに

気象の長期予測への要望は年々たかまっている。台風についての発生数や襲来数、ある地方での降水量等の長期予測は人々の生活設計上から切実なものになりつつある。本研究では、年度半ばまでの発生状況からその年の終りまでの台風発生数、すなわち、年間台風発生数をファジイ推論により予測することについて考察した。

2. 解析方法

過去の統計データの特徴「梅雨明けまでの台風数が多ければ、その年の年間台風発生数も多くなる」傾向に準拠して(図1)、6月末までの台風数nと7月以降のある時期　(予測時期とする)までの台風数mの多少の挙動にもとづいて、ファジイ規則およびメンバーシップ関数を決定した。そして、それに基づいてnとmの一組の値(事実: xo,yo)があたえられた予測時期において、その年の台風発生数Nをmin-加算-重心法を使って予測した。

採用したファジイ規則は、n: 1月から6月末までの台風発生数、m: 7月末(7月だけの)、8月末(7－8月の)、、、、、12月末(7－12月の)等までの発生数、N: 年間発生数とすると、

1. nが多く(A)、mが多い(C)と、Nは非常に多い(P).

2. nが多く(A)、mが少ない(D)と、Nはやや少ない(Q).

3. nが少く(B)、mが多い(C)と、Nはやや多い(S).

4. nが少く(B)、mが少ない(D)と、Nは非常に少ない(R).

A,B,C,D,P,Q,R,Sはファジイ集合である. これらのファジイ集合のn,m,Nへの帰属度を示すメンバーシップ関数は図2のとおりにとった。これ等の決定は予測値が過去の台風発生数統計を表現するように試行錯誤的になされた。

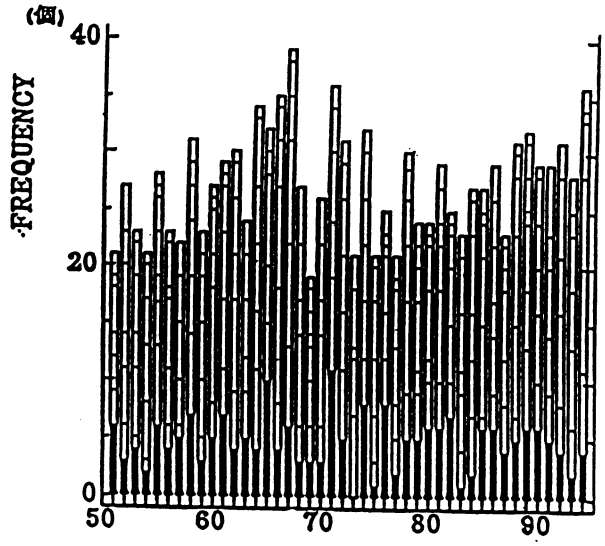


図1　月別の台風発生数。黒塗は1月から6月末までの発生数

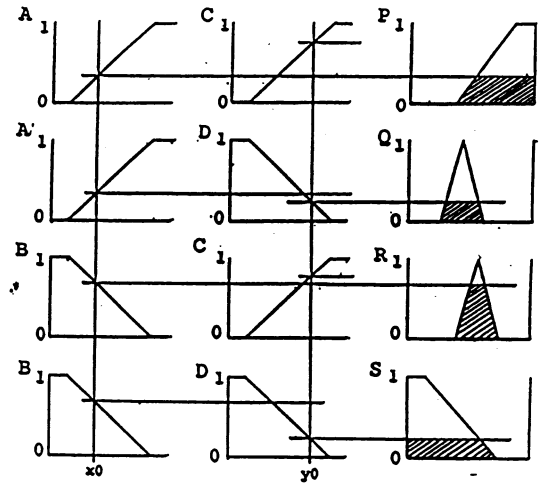


図2　規則14に対応するファジイ集合のメンバーシップ関数のモデル. 横軸はn,m,Nの変動幅, xoとyoは予測時期にえられるn,mの値

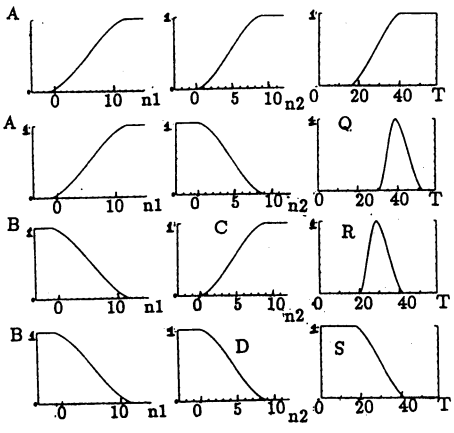


図3a 7月末の規則14に対応するファジイ集合のメンバーシップ関数. 横軸は n,m,N の変動幅, xo と yo は 予測時期にえられる n,m の値

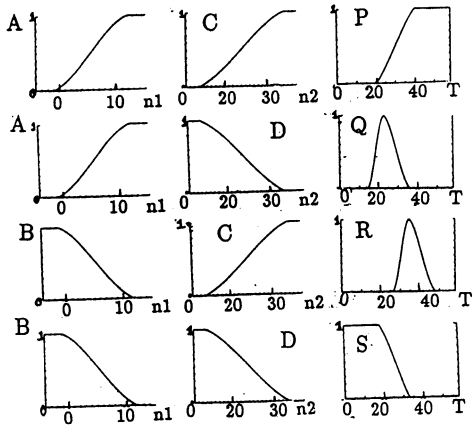


図3b 12月末の規則14に対応するファジイ集合のメンバーシップ関数. 横軸は n,m,N の変動幅, xo と yo は 予測時期にえられる n,m の値

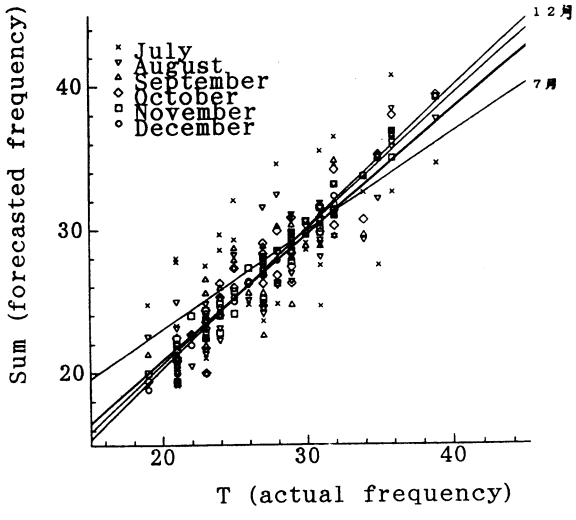


図4 予報時期、7月末、、、、12月末においてなされた予測値と実際の台風発生数統計との一致性。横軸は実際値、縦軸は予測値。

3. 結果と考察

過去の統計値と予測値があうように試行錯誤的に決定されたてメンバーシップ関数の例を予測時期を7月末(m：7月中の発生数)と12月末(m：7－12月の発生数)にとった2例について示す(図3 a、図3 b)。

44年間(1952-1994年)について、年間台風発生数の各予測時期における予測値と実際の発生数統計との一致性は図4のとおり。また、予測値の実測値からのずれを数値的にしめすと図5のようになる。

すなわち、7、8月の時点では2－3個の誤差で、また9月以降になると1－2個の誤差で、年間台風発生数を予測できることがわかった。ちなみに、1994年7月末の予測時期(n= 4 ,m= 7)における予測値として33がえられた。実測値は36である。

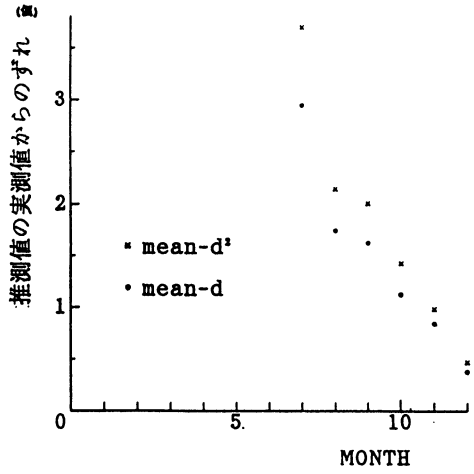


図5 年間発生数推測値の実測値からのずれ

参考文献

[1] 市川政治、"ファジイ数学の中国における状況"、気象研究ノート、第174号、1992

[2] 水本雅晴、" 最近のファジイ制御法"、No.333,1991, 数理科学

連絡先
受付番号：0153
沖縄県西原町千原1
琉球大学教養部 石島英
Tel.098-895- 6070

WA2-1

各種ファジィ推論法の最適化パラメータの検討
－模型自動車の走行制御シミュレーション－
Optimization Parameter of Several Fuzzy Reasoning Methods for Driving Control of a Model Car

嶋津 謙治 Kenji Shimazu　西守 克己 Katsumi Nishimori　宮内 肇* Hazime Miyauchi　加藤 義人 Yoshito Kato　石原 永伯 Ishihara Naganori

鳥取大学工学部 Tottori University　*松江工業高等専門学校 Matsue Technical College

In the report, the simulation of driving control for the right turning of a model car has been carried out in comparison with several fuzzy reasoning methods. We select the initial starting positions and the parameters to determine the transfer timing from curving control rules to straight-forward running control rules for the optimization of consequent fuzzy sets in the simulation.

1．はじめに

ファジィ推論法は数多くの方法が提案されているが、推論方法の最適化についての検討が十分なされているとは言えない。そこで、模型自動車の右折走行を用いて各種ファジィ推論法の比較、検討したので報告する。

2．模型自動車の走行モデル

L字型の右カーブを模型自動車に右折させる制御を考え、制御量として模型自動車の位置と方向を図1のように設定する[1]。模型自動車は始めy軸方向の遠方から原点に向かって走行してくる。ある所まで原点に近づけばルールを直進用のものから右折用に切り替える。ファジィ推論はτ=0.1［s］ごとに行い、模型自動車は速度V＝100［cm/s］で走行する。

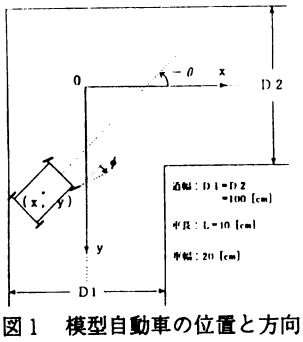


図1　模型自動車の位置と方向

3．推論方法

今回の研究対象として次の4つの推論方法を用いた[2]。

［1］論理積－論理積－論理和－重心法（マムダニ法）
［2］代数積－代数積－論理和－中央値法
［3］代数積－代数積－加算－重心法（水本法）
［4］代数積－塚本法

4．後件部メンバーシップ関数のチューニング

（1）模型自動車のコーナー部での初期位置を入力し、右折後、x軸上に収束するまでファジィ推論を行なう。なお、カーブ走行制御ルールから直進走行制御ルールに切り替るタイミングをそれぞれの車体角度θが$\theta_s \leqq -15, -10, -5, 0$［°］となる瞬間とした。

（2）このとき得られるX軸上に収束するまでの推論回数、車体角度変化量の絶対値の総和、およびハンドル切り角の最大変化量の絶対値の3つを評価指標とし、これらの荷重平均によって総合評価値を求める。

（3）ϕ_nを20［°］から120［°］まで0.5［°］刻みで総当たり的に変化させ、総合評価値が最小となる時のϕ_nを最適値ϕ_{best}とし、画面に表示する。

5．走行シミュレーション結果

各推論法に対し、3つの初期置（x_o［cm］,y_o［cm］,θ_o［°］）に対し、y_o＝160［cm］θ_o＝90［°］とし、8つのx_o＝40, 30, 20, 10, 0, －10, －20, －30とした。この8つの場合の走行シミュレーションを行なった。

最適化を行なった総合評価値T_nを、図2に示す。θ_s＝0, －5［°］のとき［2］,［3］の推論方法、および、θ_s＝－10, －15［°］のとき［2］の推論方法で総合評価値T_nが良かった。しかし、θ_s＝0, －5［°］のときの［3］の推論方法は、初期位置によるT_nの変動が目立っている。

また、θ_sの変化に対して［2］の推論方法は影響を受けにくいが、［3］の推論方法は影響を受けやすい。

θ_s＝－5［°］のときの、ϕ_n,初期位置x_oと総合評価値T_nの関係を3Dグラフで表したものを図3に示す。総合評価値T_nが小さいほど制御性が良いと考えられる。また、後件部のメンバーシップ関数のϕ_n、および、初期位置x_oが多少変化した場合でも制御性には影響が少ないことが望まれる。よって、［2］の推論方法が最良であることが分かる。

6．まとめ

模型自動車の右折走行シミュレーションにファジィ推論を応用し、各種ファジィ推論法の制御性の比較を行った。

その結果、［2］の推論方法（代数積－代数積－論理和－中央値法）が最良の制御性を示した。すなわち、［2］の方法は

（1）最適化を行ったときの総合評価値が良い。
（2）最適値ϕ_{best}付近での総合評価値T_nは大きな変動もなく安定している。
（3）ルール切り替えタイミングの変化に影響を受けにくい。

以上の3つの点より、［2］の推論方法が後件部のメンバ

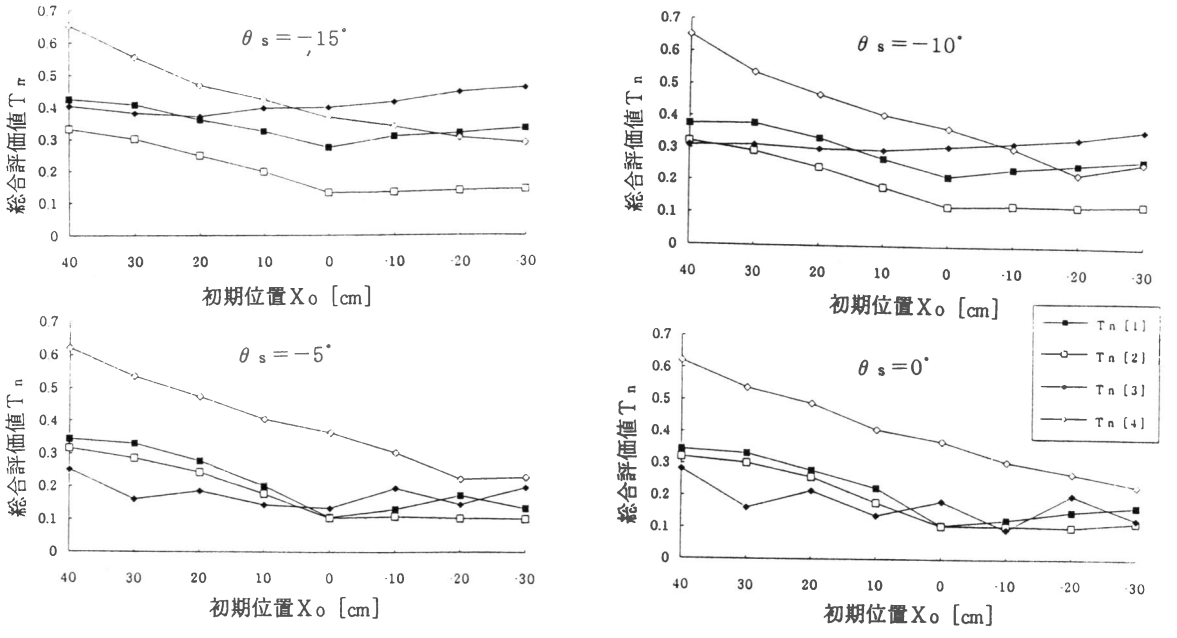


図2　初期位置におけるT_n

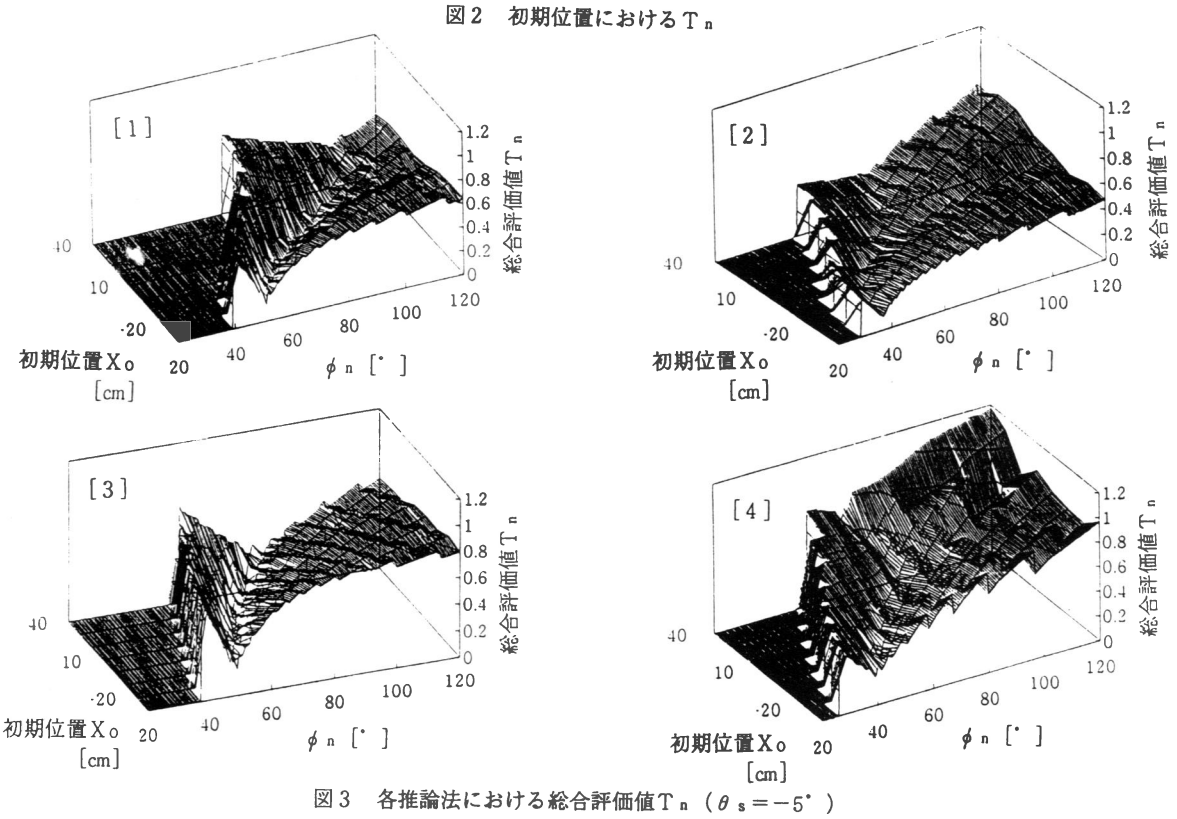


図3　各推論法における総合評価値T_n（$\theta_s=-5°$）

ーシップ関数のϕ_n、および、ルール切り替えタイミングθ_sが多少変化した場合でも、総合評価値T_n、つまり制御性には影響が少なく、また、カーブ走行制御ルールから直進走行制御ルールへの切り替えが上手に行うことのできる推論方法であることを示している。

参考文献

［1］平川，西守，石原他：”各種ファジィ推論法のチューニングによる比較”，電気学会論文集C，113－C巻，11月号，pp.1005－1012，（1993）

［2］石原，西守，石原他：”制御のための評価指標を用いたチューニングによる各種ファジィ推論法の比較”，第10回　ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.199－202（1994）

連絡先
〒680　鳥取市湖山町南4丁目101番地
鳥取大学工学部電気電子工学科
西守克巳
TEL　0857－31－5688
FAX　0857－31－0880

WA2-2

カート・ポール系ファジィ制御におけるポール立ち上げ方式の改善

An Improvement of Uprising Method of Pole in the Fuzzy Control of Cart-Pole System.

松浦克昌 Katsumasa Matsuura
永森光晴 Mitsuharu Nagamori

図書館情報大学
University of Library and Information Science

Abstruct- The fuzzy control method of cart-pole system consists of a fuzzy controller for uprising and invertedly stabilizing the pole and a fuzzy controller for positioning the cart location. In the former fuzzy controller, the fuzzy rules are effectively activated in the wide non-linear phase range of pole. A main cause withdrawing the activation comes out of the saturation characteristics of membership function at both ends. However, a result of 100 % dependence on the saturation characteristics of membership function as to the uprise of pole generates a little unnatural condition given by such an overholding characteristics that the inverted pole never falls down in any condition.

In this paper, a soft and natural fuzzy control method of cart-pole system which is performed by controlling the fire angle and the stabilization condition of inverted pole is proposed as to the former fuzzy controller, in which the pole can naturally fall down due to gravity.

Furthermore, it is proved by some numerical simulations that this method generates a small motion of cart when the pole is uprosen.

1．まえがき

倒立振子の安定化制御は新しい制御理論を検証するためのベンチマークとして1960年代より多くの研究がなされている。この研究は(1)人間の芸を真似る、(2)静的に不安定な系を動的に安定化する、(3)人間の直立、走行に関連するなどの特徴を持つ制御問題であり、工学的に興味深い、重要な基本研究課題を包含する。

ところで、筆者の一人はこの問題を”カート位置決め制御を含めたポールの振り上げ、安定化ファジイ制御”と題して、研究を纏め、平成５年度ファジイ学会誌４月号に発表している[1]。

この研究の特色は(4)静的に安定な系（ポールの垂下状態）を動的に不安定化し、ポールを垂下位置から振り上げる制御を演じ、ポールの倒立安定化とカートの任意位置への位置決めを含めた一連のファジィ制御をトータルに設計し、最適化しているところにある。

ファジィ制御器のゲインを調整し、カート走行量を最小限に最適化できることを示した点ではこの制御は成功と言えるが、制御方式の頑張りすぎに問題があった。

本研究はこの制御に多少の改善を加え、ポール傾斜角が大きい場合や倒立位置をポールが高速に回転する場合には無理に頑張らず、ポールの自由回転振動を許容しながらカート走行量を小さく押さえる自然でソフトなカートポール系ファジィ制御方式を提案する。

2．カート・ポール系ファジィ制御方式の概要

図1はカート・ポール系を示す。前、後進するカートによりポールがピボットまわりを揺動、回転する。図2はこのカート・ポール系から観測される４個の情報量θ、ω、x、vを用いてカート駆動力Fを制御し、垂下状態のポールをカートの揺動加振によって振り上げ、ポールの倒立安定化制御を行うとともにカートを目標場所に位置決め制御（原点復帰）する制御ブロックダイヤグラムで、制御にはファジイ推論を用いている。

2.1 ポール系状態ベクトル制御装置PFUZZY

図2のPFUZZY はポール系状態ベクトル$[\theta \ \omega]^T$を入力とし、ポールが倒立安定化するようカート駆動力Fをファジイ推論、出力する制御装置である。図3はPFUZZY の49個からなるIF-THENルールを示す。このファジイルールではNB～PB７個のファジイ集合（変数）を用いてルールを形成している。P,N は正負、B,M,S は大中小を意味する。図3の49ルール全てが大小のレベル差はあるが、ポールの傾斜角およびその変化速度を0に近づけるような意味あいになっている。図4は本制御で用いた三角型メンバシップ関数を示す。この場合ファジイ変数全体の台集合（横軸）は各入出力共通とし、それぞれ固有の正規化定数によって-1～1に正規化している。縦軸は0～1のグレードを示す。

なお、本制御では正規化定数の逆数を入力ゲインと呼ぶ。

図3のルールはポールの倒立状態を安定、維持するためのルールであるが、両端集合のメンバシップ関数は飽和特性を与えている。この結果正規外入力に対して両端メンバーがグレード1.0で生きており、ポールが垂下状態でも働く。垂下状態は倒立状態とは位相が180度異なる。このため、倒立安定化のルールは垂下状態ではポールを不安定化し、励振作用として働く。ただしこのルールは倒立安定化がメインであり、この場合の正規化定数は極く小さな値（大きな入力ゲイン）に設定される。従って垂下状態から倒立安定化までの殆どの角度領域でポールは正規外になり、θのPBやNBを用いたルールで励振、振りあげ制御が行われる。

図2でAGLNORMはPFUZZY制御装置への入力角θを$-\pi$～πに正規化する演算装置である。垂下状態のポールをカートの前、後進駆動によって励振し、倒立位置(0°)へ振り上げる場合、ポールは前後２通りの上がり方をする。PFUZZYは

傾斜角0度近辺での倒立安定化制御装置であるとともに振りあげ装置でもあるから、前後両側からの安定した振りあげを実現するためには入力角θの正規化が不可決である。AGLNORMはルール(図3)の働きを左右バランスのとれたものとし、ポールの固有振動を利用した円滑で自然な振り上げを行うことができる。ポールが180度の位置に向かう場合だけ、カートがポールの運動方向と逆方向に駆動され、ポールが加振される。

2.2 カート系状態ベクトル制御装置VFUZZY

図2でVFUZZYはカート位置決め制御装置である。PFUZZYの出力である駆動力Fはポールの倒立安定化に専用されるためカート位置決め制御用にはカート駆動力Fは直接利用できない。ところで、ポールをカートの移動目標方向に傾けてやるとポールの傾き補正のためカートが目標方向に動く。そこで本制御系ではこの先験的知識を利用してカート位置決め制御を間接的に行い、ポールの倒立安定化を含めたカート位置決め制御を可能にしている。

VFUZZY はカート系状態ベクトル$[x \quad v]^T$を入力とし、ポールの傾斜角sをファジイ推論、出力する制御装置である。この出力s（制御角）は図2に示すごとく、VFSWTを介してAGLNORMの角度入力側に負帰還される。VFSWTはポールの倒立安定後にVFUZZYを有効にし、カートの位置決めを行うために設けたものである。

PFUZZY はポール傾斜角θと負帰還量sとの偏差入力θ－sを0と制御する。結局、ポール傾斜角はθ＝sに到達し、カートはポール傾斜方向へ移動する状態になるが、本制御における特徴はこの負帰還量sを VFUZZYでファジイ制御することである。図5は VFUZZY の IF-THEN ルールを示す。VFUZZY への入力であるカートの状態がどんどん原点から遠ざかりつつある場合にはカート進行方向と逆の原点方向にポールを大きく傾ける。遠ざかり方の程度に合わせて制御角sも中、小と調整する。図5の２点鎖線で囲んだ上下２区画18ルールは以上の内容をルール化したものである。点線で囲んだ上下２区画10ルールはカートの復帰を速めるルールであるが本研究ではこの部分は'ZR'としている。中央部を含む'ZR'ルールはポールを倒立状態に保持し、カートの自然な状態の維持を狙ったものである。'ZR'は緩衝域としてポールのばたつきを防ぐ効果がある。なお図2に示す目標位置xoを0に設定すれば原点に、0以外ではカートを原点以外の任意の位置に制御できる。

2.3 無次元制御系モデル

系全体の設計知見を得るため無次元系を対象に制御シミュレーションを行う。ここで、カートの質量をM、粘性抵抗係数をC、カート駆動力をF、ポールの重心質量をMp、この重心とピボット軸中心の距離をLp、重心まわり回転慣性モーメントをIp,ピボットまわり粘性抵抗係数をCp、重力の加速度をgとする。無次元定数を

$$\mu M = Mp/(M+Mp)、\ \mu I = MpLp^2/(Ip+MpLp^2)、\ R = x/Lp$$

$$\zeta = C/(M+Mp)/\omega g、\ \zeta p = Cp/(Ip+MpLp^2)/\omega g、..(1)$$

$$\Gamma F = F/(M+Mp)g、\ \omega g = \sqrt{g/Lp}、\ \tau = \omega g \cdot t$$

と置くと無次元系運動方程式が次のごとく得られる。

$$\ddot{R} + \mu M \cdot \cos\theta \cdot \ddot{\theta} = -\zeta \cdot \dot{R} + \mu M \cdot \sin\theta \cdot \dot{\theta}^2 + \Gamma F$$

$$\ddot{\theta} + \mu I \cdot \cos\theta \cdot \ddot{R} = -\zeta p \cdot \dot{\theta} + \mu I \cdot \sin\theta \quad ...(2)$$

ここで微分記号はτに関するものである。

無次元系の場合も制御方式は図2と全く同じであるが、図2の制御情報x、v、θ、ωに対応する無次元系の情報はR, $dR/d\tau$, θ, $d\theta/d\tau$。なお、目標位置R0＝x0/Lp。

無次元カート駆動力ΓFは無次元系の制御出力ゲインKFをPFUZZY出力αに掛けて次のごとく得る。

$$\Gamma F = KF \cdot \alpha \quad ...(3)$$

振子制御角sは制御角出力ゲインKφをVFUZZY出力βに掛けて次のごとく得る。

$$s = K\phi \cdot \beta \quad ...(4)$$

3．カート・ポール系ファジィ制御方式の改善

以上の制御方式ではポールの全位相空間に対してルール(PFUZZY)が100%ポール立ち上げに向かう。この状況下で中途半端な立ち上がりはカートの暴走を招くが、駆動力に余裕があればポールの中途半端な立ち上がりを防ぎ、立ち上げに必要なカートの走行量を最小にする系の最適チューニングが可能であるを先に示した[1]。

ところで、中途半端な立ち上がりに対して制御系は頑張りすぎず、立ち上げのやり直しを可能にすればカート走行量を無理なく小さく押さえられる。これはこの場合の最適化とは別問題として、方式の改善が考えられる。

3.1 改善点の説明

主な改善点はPFUZZYの働きをポール倒立領域と垂下領域の１部分に制限し、ポールの自然な振る舞いを大幅に許容したことである。

3.1.1 ポール倒立領域でのPFUZZY発火条件

ポールの自然な立ち上がりから倒立安定化制御に無理なく移行するためにはポール系状態ベクトルを監視し、倒立安定状態に近い状態、

$$|\theta| < Y4X \quad 、 \quad |\omega| < Y5V \quad ....(5)$$

の条件を満足する状態でPFUZZYを発火する必要がある。この場合、当然ながらY4X, Y5Vは小さい正数で与える。この状況でPFUZZYが発火するとその後は発火は保持される。

3.1.2 ポール垂下領域でのPFUZZY発火位相

ポール振り上げをできるだけ自然な状態で行うには、ポールが倒立位置に到達できる最小限度のエネルギを系に供給するのが理想的である。すなわち、ポール垂下領域でのPFUZZY発火位相をできるだけ小さく抑えながら、(5)式が成立する程度のエネルギを供給できるよう発火位相を設定する必要がある。これは次のごとく与えられる。

$$|\theta| > \pi - \Lambda \quad ....(6)$$

この場合、θは$-\pi$からπに正規化されているからこの位相角はポール垂下位置を挟んで±Λの領域である。Λ＝0はPFUZZYが全く発火しない場合であり、ポールは自由減衰振動を呈する。この場合、系に減衰があればポール初期位相を垂下位置より高く設定しても同じ高さに到達できない。

ポール振り上げをできるだけ自然な状態で行うには、ポールが倒立位置に到達できる最小限度のエネルギを系に供給するのが理想的である。すなわち、ポール振り上げ領域でのPFUZZY発火位相をできるだけ小さく抑えながら、(5)式が成立する程度の大きさに設定する必要がある。

3.2 数値シミュレーション

3.2.1 数値シミュレーションの設定条件

カート・ポール系全体は$\mu M = 0.0 \sim 1.0$の範囲内に納まる。本研究では$\mu M = 0.2$の場合について検討する。慣性モーメント比μIとカート系、振子系の減衰比ζ、ζpの３定数は

$$\mu I = 0.75、\ \zeta = 0.5、\ \zeta p = 0.2$$

カート駆動出力ゲインは主にKF=7.0（カート・ポール系自重力の7倍の駆動力）を用いた。ポール初期位相φ=30度（φ以外の初期値は0）。制御角ゲインKφ=15度。τ MAX=75.0（$d\tau$=0.005）。目標カート位置は0。VFUZZY入力ゲインGx＝0.25、Gv＝4.0。PFUZZY入力ゲインGθ＝10.0、Gω＝4.0。PFUZZY発火条件Y4X=0.1, Y5V=0.5。

以上は標準値であり、変更時はその都度説明する。

図6はPFUZZY発火角度Λ＝24度の場合の制御結果を示す。図の横軸は無次元時間τを示し、縦軸はP=-1～1と与え、ポール角θ＝200P+180(度)、カート変位比R=5P、カート駆動トルク比ΓF＝15Pと得る。θは-20～380度を示すが、上下2本の内側の横線は0～360度を示す(P=±0.9)。図6の場合、ポールは初期位相とは逆側の360度側の倒立域に到達せず、戻り振りで0度側に振り上げられている。この間24度の駆動パルスが行きかえり1回づつ計2回発火されて倒立制御にスムーズに移行している。また、カート最大移動量3.0は小さく、目標位置0への位置決めも振動せず、安定し、制御は成功している。図7はΛ＝0度のときのポール減衰自由振動を示す。ポールのエネルギ減衰が相当大きいことはこの図から明白であるが、図6はこのエネルギ減衰をうわまわるエネルギがポール系に供給されていることを示す。

図8はΛ＝26度としたときの制御結果を示す。この場合は戻り振りは無く、1回のカート発火で直接ポール倒立安定化制御に移行している。カート最大走行量は4.32。

図9はΛ＝27度の場合の制御結果である。ポールが倒立移行条件(5)式を外れる状態のため、回転運動を継続する。ポール軌跡で示しているが、1回の回転で3.0程度の走行量となり、この場合の図示はτmax=20, Rmax=10。この場合について、回転を防ぎ、ポールを倒立安定化に移行するためには(5)式の条件を緩めればよい。この場合、ポールは必ず位相0位置を通過するから、条件緩和は位相速度の限界Y5Vを大きくすればよい。図10はこの場合の制御結果を示す。

条件緩和が大きいほどカート最大走行量は大きくなるが、制御の手法としては条件緩和を行わず、回転運動が発生した場合は直後の発火角度Λを0にするなどのソフトな方法も考えられる。これは今後の検討課題といえる。

図11はΛ＝23度の場合の制御結果を示す。この場合は2回戻り振り、計4回のパルス発火でポールが振り上がっている。さらに、図12はΛ＝22度の場合の制御結果を示す。この場合はポールは振り上がらず、減衰エネルギと供給エネルギがバランスした固有振動が持続する。

カート走行量は発火角度が小さいほど小さくなる。

図13はポール初期位相φ=180度、Λ＝24度としたときの制御結果を示す。ポールを垂下位置から振り上げる時のPFUZZY発火状況は複雑であるが、2波目からのポール挙動は図6の場合と類似している。カートの走行はこの場合は前後同程度になっている。

4．結　言

カート・ポール系のファジィ制御方式はポールを立ち上げ、倒立安定化するファジィ制御器とカートの位置決め用ファジィ制御器からなっているが、前者のファジィ制御器ではポールの広い非線形位相領域においてファジィルールが効果的に活性化される。この活性化の要因は両端メンバシップ関数の飽和特性にあるが、ポールの立ち上げをこの飽和特性に100%依存した結果はポールに倒れることを許さない、頑張りすぎる特性を与え、多少不自然さが生じる。

本報告ではポール立ち上げファジィ制御器の発火位相と倒立条件を制御することによって、自然なポールの自由落下を許容する、ソフトなカート・ポール系ファジィ制御方式を提案し、ポール振り上げ時のカート移動量を小さくできることを数値シミュレーションで示した。

参考文献

[1] 松浦克昌：カート位置制御を含めた倒立ポールの振り上げ、安定化ファジィ制御、日本ファジィ学会誌、VOL.5, No.2, pp.397-408, 1993

[2] Widrow,B:THE ORIGINAL ADAPTIVE NEURAL NET BLOOM-BALANCAER, IEEE Int. Symp. Circuits Syst., Vol.1987, No. Vol.2, pp.351～357, 1987

[3] Michie,D.:EXPERIMENTS IN RULE-BASED CONTROL, Proc. of the 5th Annual Conference of JSAI, 1991, pp.39～58

[4] Yamakawa,T:Stabilization of an Inverted Pendulum by a High-Speed Fuzzy Logic Controller Hardware System, Fuzzy Sets and Systems, Vol.32, No.2, pp.161～180, 1989

[5] 森正三、西原裕善、吉田勝久：倒立振子制御用ハイブリッド制御系、計測自動制御学会論文集、Vol.12, No.4, pp.116-121(1976)

[6] 池田直人、斎藤真也、北村新三：多層ネットワークによる倒立振子の安定化学習制御、システム制御情報学会論文誌、Vol.3, No.12, pp.405～413, 1990

[7] 川路茂保、野口巧：ファジイ推論による倒立振子の安定化制御、日本ファジイ学会主催　第五回ファジイシステムシンポジューム論文集、pp.107-113(1989)

[8] 北村新三、片山修編著、画像と制御（第11章、市橋秀友著：ファジイ制御と現代制御の折衷方式）、朝倉書店、1991

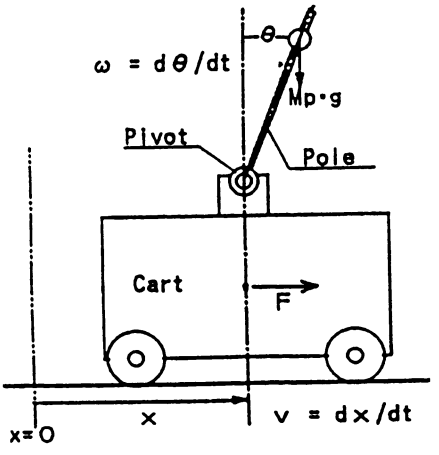


Fig. 1 Cart-Pole System

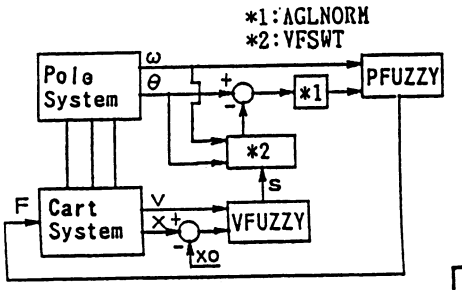


Fig. 2 Control Block Diagram

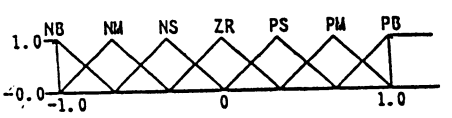


Fig. 4 Membership Function

θ \ ω	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PM	PM	PS	ZR
PM	PB	PM	PM	PM	PS	ZR	NS
PS	PM	PM	PS	PS	ZR	NS	NM
ZR	PM	PS	PS	ZR	NS	NS	NM
NS	PM	PS	ZR	NS	NS	NM	NM
NM	PS	ZR	NS	NM	NM	NM	NB
NB	ZR	NS	NM	NM	NM	NB	NB

Fig. 3 Rules of PPUZZY

x \ v	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZR
PM	NB	NB	NM	NS	NS	ZR	ZR
PS	NB	NM	NS	ZR	ZR	ZR	ZR
ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR
NS	ZR	ZR	ZR	ZR	PS	PM	PB
NM	ZR	ZR	PS	PS	PM	PB	PB
NB	ZR	PS	PS	PM	PB	PB	PB

Fig. 5 Rules of VPUZZY

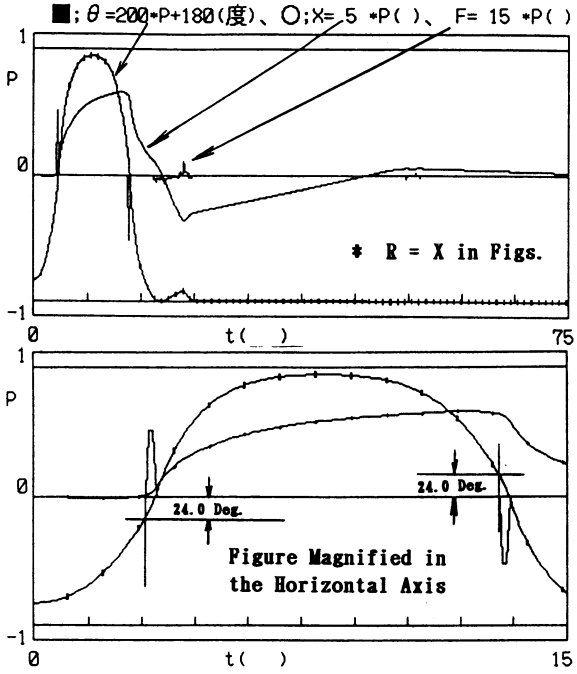


Fig. 6 Λ＝24.0 Deg.

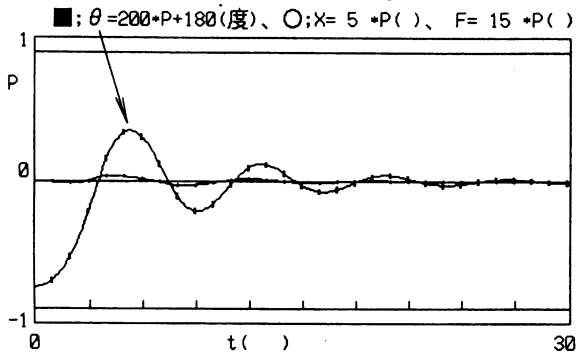


Fig. 7 Λ＝0.0

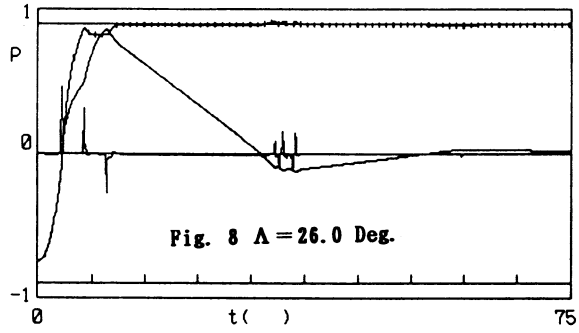


Fig. 8 Λ＝26.0 Deg.

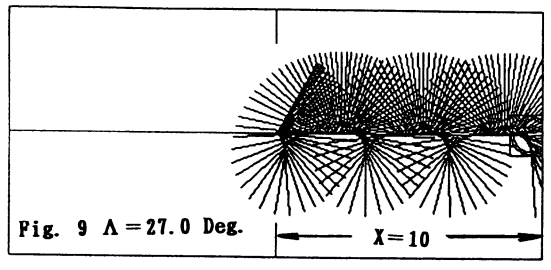


Fig. 9 Λ＝27.0 Deg.

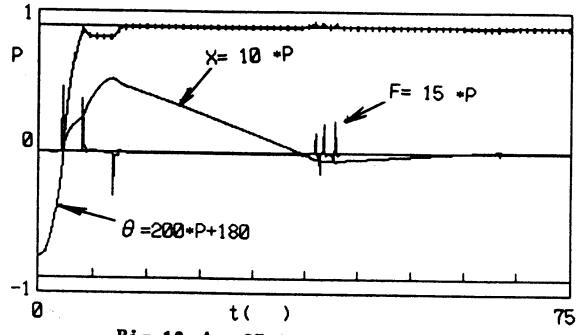


Fig. 10 Λ＝27.0 , Y5V＝2.5

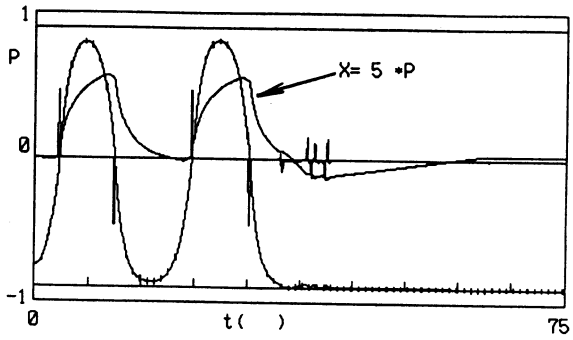


Fig. 11 Λ＝23.0 Deg.

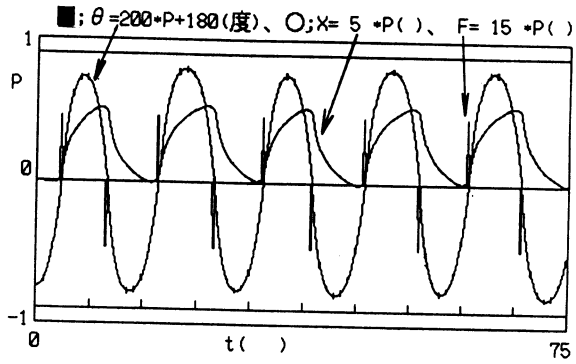


Fig. 12 Λ＝22.0 Deg.

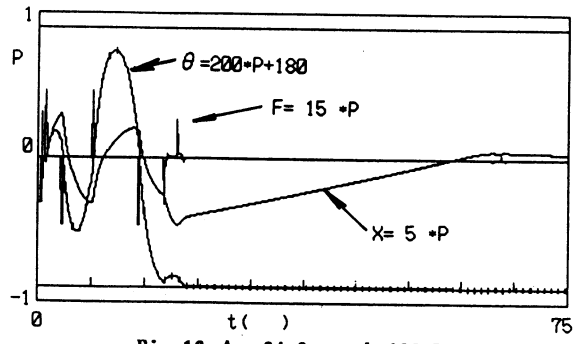


Fig. 13 Λ＝24.0 , φ=180 Deg.

連絡先：〒305　茨城県つくば市春日1-2
図書館情報大学
松浦 克昌
TEL：0298-52-0511内線356
FAX：0298-52-4326

WA2-3

ファジィシステム記述言語の試作処理系

A translator of fuzzy systems description language

鑓田　威†　　石畑　清

Takeshi YARITA　　Kiyoshi ISHIHATA

明治大学理工学部情報科学科

Department of Computer Science, Meiji University

Abstract

At present, an investigation of standardization of fuzzy system description language(FDL) is proceeded by SOFT(Japan Society for Fuzzy Theory and Systems) and EIAJ(Electronic Industries Association of Japan). The FDL is based on C language and has necessary functions to treat fuzzy data. To implement a software system described with FDL on various hardwares, we need to convert it into codes which can be executed on each hardware. Futhermore, we must prepare a compiler individually to generate the codes directly. It can't say this is an effective method for a purpose of the diffusion and standardization of this language. Therefore, in this paper, we produced the system which converts software systems described with FDL into C language experimentally for easy hardware implementation. And, we show an example of fuzzy control using this system, and discussed the related problems.

1　背景

現在ファジィ理論を応用したファジィシステムは，各メーカーが商品化したものや各研究所や大学が開発したものなど，様々なものが存在する．そして，それらのほとんどがファジィ推論を利用したファジィ制御を主な目的とした．これらのシステムで利用しているファジィ推論のための知識ベースは，実行環境の違いはあるものの，記述方法や構成は似通ったものがある．

しかし，システム記述は専用の言語もしくはＣ言語やアセンブリ言語などで記述されている場合がほとんどで，ファジィに関する記述の部分はそれぞれ独自の形態を取っている．従って，ユーザーにとってみれば，ハードウェアが変わると，そのハードウェア専用の言語で新たに記述しなければならない．また，各種のシステムを比較する場合にも，記述が統一されていないので，一概に比較検討することも容易ではない．さらに開発者の立場に立ってみると，アセンブリ言語などの場合には特に，開発した人がいなくなると，誰も理解できない複雑なものとなりかねない．また，ソフトウェア資源の共有という面からも様々な弊害をもたらす原因となることは明らかである．

2　目的

これらの問題点を解決するために，システム記述の容易さ，現存する知識ベースの共有化や今後開発される知識ベースの共有化の促進を目的とした共通規格のファジィシステム記述言語を制定する必要がある．そこで標準的な言語の１つの候補として，ファジィシステム記述言語 FDL(Fuzzy systems Description Language)を提案し，またそれを実行する試作処理系を作成した．

3　FDL の概要

FDL は，Ｃ言語をベースとしてファジィ理論を扱うために必要な機能を追加したものである．そのためファジィに関する部分以外はＣ言語と同じ機能を持つ．しかし，ファジィ理論の記述を目的としている FDL ではその対象としている領域が極めて大きくなり，またファジィ理論自体においても未解決な部分が多い．そこで，現時点ではファジィ推論一般とそれに対して必要な機能を実装することにした．現時点での FDL の主な機能は

・ファジィ型の記述
・メンバーシップ関数の記述
・ルールベースの記述
・ファジィの演算

等である．

4　FDL 言語の試作処理系

FDL 言語は，Ｃ言語をベースにした高級言語である．そのため，FDL で記述されたソフトウェアを実行するためには，ハードウェア固有のコードに変換する必要がある．もしくは，既に用意されている各ハードウェア専用のコンパイラが扱うことができる言語に一度変換した後，そのコンパイラを用いてコード変換すると言う方法が考えられる．前者は，あらかじめ特定のハードウェアを考えなければ開発することができない．そのため今回は，後者の一度他の言語に変換してからその言語の扱えるコンパイラを利用してコードを生成する方法を利用した処理系を作成した．現在，広く一般的に利用されている言語がＣ言語であること，また，FDL がＣ言語をベースにしているために，その変換が容易であることから今回は

変換する言語をＣ言語とし，その処理系を作成することにした．

FDL では，言語自体がＣ言語をベースにして設計されたものであるので，ファジィに関する部分をライブラリを用いるように置き換え，非ファジィに関する部分はそのままにする．このようにして変換されたものは，通常のＣ言語のプログラムになるので，Ｃ言語のコンパイラを利用し，実行ファイルを作成する事ができる．

なお，今回の処理系のバージョンでは，FDL の仕様の検討と並行して開発を行ったために，以下のような一部の機能のみが使用可能になっている．

・１次元のファジィ型の定義
・１次元のメンバーシップ関数の記述
・ルールベースの記述
・ファジィの演算

これらの機能は，基本的にファジィ制御を行う際に必要な機能をサポートすることにしたため，定義できるファジィ型や演算については全て１次元のもののみにした．

今回，構文解析には yacc を，字句解析には lex を用い，構文解析を行いながら変換後のソースを作成している．

5　変換法について

5．1　ファジィ型

ファジィ型の宣言では，使われるタグ名をそのまま新しい型名に使うことにし，メンバーシップ関数を表現するための構造体へのポインタをタグ名に typedef することにした．

```
[FDL]    fuzzy TAG { double, 0, 100, 100 };
[C]      typedef fuzzy_type * TAG;
```

この方法では，FDL では異なる型のものが C では内部的には全く同じ型になる．

5．2　label

FDL では，label というキーワードをつけてファジィ型の変数を定義した場合には，定数扱いとしている．また，label のキーワードがついた場合には，型が異なるときに同じ名前の label キーワードつきの変数を定義できることにしている．しかし，今回の処理系では，label とつけた場合でも通常の変数に変換することにした．

ところが，ここで問題になってくるのが，型が異なる場合には同じ名前をつけることができることである．C 言語では，型が異なっても同じ変数名をつけることは許されていない．そこで，これを解決するために変換をする際に型名＋変数名に変数名を変えることにした．また，参照する場合にはもともとの名前で変数名のテーブルを検索し，見つからない場合には，型名＋変数名の変更後の名前で検索しなおすようにした．

この検索方法で問題となるのが，これから参照しようとする変数のファジィ型の名前が分からなければならないことである．ファジィ型の演算では異なるファジィ型の演算は行なえない．そのため，演算子の両側に来る変数はともに同じ型に属していなければならない．よって，今回は構文解析を左から行なっているため，右側に label 付きの変数が来た場合には問題なく変換することが可能である．だが，逆に左側に来た場合には今回は動作が不定である．

5．3　メンバーシップ関数の作成

メンバーシップ関数の作成については，FDL で現在用意されているシステム定義の分だけライブラリを用意したので，ほぼ１対１で対応することが可能である．

```
[FDL] a = triangle{左端点，頂点，右端点} ;
[C]    a = MakeMembershipFunction{3,min,max,part,
                    左端点，0.0,頂点,1.0,右端点,0.0};
          min,max.part は領域の最大，最小，分割数
```

しかし，関数によるメンバーシップ関数の定義については，引数が不定であることから他の定義のように関数によるメンバーシップ関数定義のライブラリを作らなかった．そこで，今回採用した方法は，関数定義を利用する度にメンバーシップ関数作成用の関数を出力する方法である．

5．4　ファジィの演算

ファジィの演算は，同じ演算子でも文脈によって，ファジィ集合同士の演算である場合と，真理値同士の演算である場合がある．これは，演算子の両辺の数値の型がファジィ型であるかどうかで判断している．両辺がファジィ型の場合のみ集合同士の演算とし，それ以外の場合には，真理値の演算として扱うことにした．そのため，それぞれの変数には内部情報として所属グループを持たせた．これは，fuzzy で宣言されたものはファジィ変数，それ以外の場合には通常の変数として扱っている．また，演算を行った結果が真理値になるかファジィ集合になるかの区別をするために，式のツリーにも同様の所属グループを持たせた．変数を使用している場合や，式の値を参照する場合には常にこの所属グループを参照し，それによって演算を区別することにした．また，is 演算は，前件部と後件部にそれぞれあるがこれはルールベース内のみの話であるので容易に解決することができる．

ファジィの演算については，基本的に関数を呼び出すこととし，種類としては，真理値同士，集合同士，前件部 is，後件部 is を用意した．

5．5　ルールベース

ルールベースについては，関数として処理することとした．この場合，FDL では引数パラメータが，入力用と出力用の２つを用意している．そこで，変換する時に１

つにして処理することとした．また，出力側の引数には値が代入されるために，呼び出し側では&，受け取り側では，＊をつけることにした．また，既に定義されたルールベースを取り込む機能があるが，これはルールベースを呼び出すことで対処した．また，その際にも同じような引数の変換が必要となる．

FDL の仕様では，各ルールベースの中では推論方法を指定することができるが，この機能はＣ言語に変換する際に出力する関数名を切り替えることで対処した．また，ルールの記述の順番が推論結果に対して影響しないという規則から，変換後のプログラムでローカル変数をルール数だけ用意し，各ルールの後件部の結果は，このローカル変数に一時的に代入し，全ルールの処理を終えてから，それらの変数を統合することとした．

6　FDL を用いた制御サンプル

6．1　車速制御プログラム

今回 FDL の言語仕様の検討と，作成した変換プログラムの検証のために簡単な制御プログラムを作成した．また，メンバーシップ関数の表現についての考察のために，FDL で採用した分割点による方法と，三角形表現における各頂点に代表されるような関数の特徴的な点（以下代表点と呼ぶ）による方法の２つについてそれぞれライブラリを作成し，その比較検討も併せておこなった．

なお動作環境については

Sun SparcStation20+SunOS4.1.3+gcc 2.6.2
SHARP X68030+HUMAN68K+gcc+XC ライブラリ

の２つの環境を利用した．

今回作成した制御プログラムは，前者の速度と車間距離から自車の速度を求めるものである．ルールとしては，

1　車間距離が狭く速度が遅いなら，速度を維持する．
2　車間距離が狭く速度が速いなら，減速する．
3　車間距離が広く速度が遅いなら，加速する．
4　車間距離が広く速度が速いなら，速度を維持する．

という簡単なものとした．また，車間距離，速度，加速度のメンバーシップ関数は，図１，図２，図３にしめしたものを使用した．また，車間距離，速度については，センサーなどから入力するのでなく，ファジィ推論によって求められた加速度から計算して求めることにした．そして，推論方法としては，FDL 推論方法のデフォルト指定である min-max 重心法（マムダニの推論法）を使用し，前者速度 60km/h，自車の初速度を 60km/h，車間距離を 15m を初期設定とした．

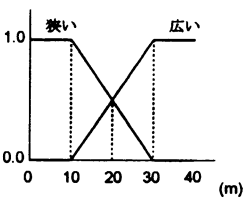


図１ 車間距離のメンバーシップ関数

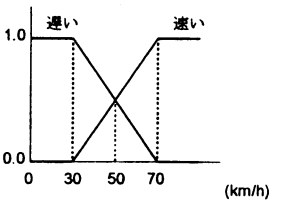


図２ 速度のメンバーシップ関数

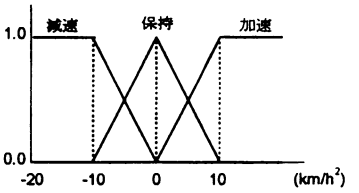


図３ 加速度のメンバーシップ関数

6．2　結果

推論結果は表１のようになった．この結果については多少ぎこちないものになってはいるが，車間距離と現在の速度から，それにふさわしい加速度を求めている．ぎこちなさについては，ルールやメンバーシップ関数を調整することで解決できる問題であると考えられる．一方，処理にかかった時間については表２のような結果が得られた．

	車間距離	速度	加速度		車間距離	速度	加速度
1	15.000000	60.000000	-7.500000	8	25.807811	53.288311	0.329040
2	15.578704	57.816887	-7.210648	9	27.446780	53.379710	0.609360
3	16.713785	55.913709	-5.229167	10	29.238808	53.548869	0.809912
4	18.252351	54.481162	-2.800703	11	30.998343	53.773675	0.949716
5	20.014736	53.655412	-1.321564	12	32.824597	54.037485	1.041662
6	21.879094	53.288311	0.000000	13	34.200476	54.328835	1.097171
7	23.743453	53.288311	0.000000				

表１　車速制御プログラム結果

	実行時間
分割数を用いた表現方法	25.0
代表点を用いた表現方法	0.7

表２　実行結果の比較

この結果は，プログラム中で使われるファジィ型の変数の表現を分割点を用いた方法と代表点を用いた方法で表現した場合，この制御プログラムを１００回ループをさせ，その処理時間を Unix の time コマンドを用いて計測した結果である．全体として FDL で採用した分割点による表現方法よりも代表点をによる表現方法の法が３５倍近く高速に処理されているこのがこの表からわかる．

そこで，この処理速度の違いを詳しく調べるために推論で使われる演算を１００００回繰り返したときの処理時間を同じように２つの表現方法に対して計測を行った．

その実験結果を表３としてまとめた．

	分割点による表現	代表点による方法
積演算	2.9	3.1
和演算	2.8	2.9
前件部 is	3.3	3.2
後件部 is	2.2	3.7
脱ファジィ化	14.9	0.2

表３　各演算の処理時間の比較

この表からわかることは，ほとんどの演算では２つの表現方法ではあまり差が出ていないことがわかる．しかし，脱ファジィ化については明らかな処理速度の違いを見つけることができた．このことから分割点を用いたメンバーシップ関数の表現方法では特に脱ファジィ化をいかに高速に行うかが大変重大な問題になってくることがわかった．

7　まとめ

今回，FDL によって記述されたプログラムをＣ言語へ変換する試作処理系を作成した．また，サンプルプログラムを使い，本処理系を使い実行ファイルを作り，FDL によって記述されるプログラムについての検証を行った．この結果から，ファイジィ制御，特に脱ファジィ化では分割点を用いた方法は，代表点を用いた方法と比較して，実効速度に問題があることがわかった．また，制御などで使われる直線を組み合わせて表現されるメンバーシップ関数では，分割点を用いた方法の方が，代表点を用いた方法に比べてより多くのメモリも消費することは明らかである．

しかし，代表点による表現方法は，今回のファジィ制御のようにメンバーシップ関数が直線で表現され，min-max 法で推論されている場合には問題がないが，複雑なメンバーシップ関数や一般的に使われる論理演算以外の演算については，この方法ではメンバーシップ関数がどこまで正しく表現できるかという問題が残される．したがって，メンバーシップ関数の表現については，対象としているものを念頭においたより高度な論議が必要であると思われる．

また，今回作成した処理系は，現在論議されている FDL の機能の一部しか満たしていない．更に，採用した機能の中にも FDL で定めた機能と若干異なっている部分も存在している．今後は，これらの部分を改善した FDL に完全に準拠した処理系が必要であると考えられる．しかし，今回作成した処理系は，１次元のファジィ集合しか扱えないものであったが，ファジィ制御に関してのみでは，それなりに実用になることがわかったが，やはり本格的にファジィ理論を取り扱うためには多次元ファジィ集合を取り扱える必要がある．ところが，多次元ファジィ集合を扱う場合には理論的な問題や実装面での問題が数多く残されているので，今後それらの問題に対する検討が待たれる．

本システムは，まだ，多くの問題を残しているが，ファジィに関する記述，特に制御で利用する場合には大変便利な言語となるであろう．また，FDL 仕様の制定作業の途中ではあるが，今後この言語が標準となれば当初の目的であるルールベースをはじめとするソフトウェア資源の共有化の促進や記述の統一が実現されることになるであろう．

なお，本研究は，（社）日本電子機械工業会（EIAJ）からの委託により日本ファジィ学会ファジィ言語仕様調査研究委員会の下で行われたファジィシステム記述言語標準化の活動の一環として行われたものである．

参考文献

[1] M.Abe, M.Nakatsuyama and H.Kaminaga, "Fuzzy C and its application", 1st Asia Fuzzy System Symposium, pp.666-670, Nov 1993.

[2] M.Umano, "Fuzzy-set manipulating system in Lisp", 2nd IFSA congress, vol.2, pp.840-843, 1987.

[3] T.Teichrow, E.Horstkotte and M.Togai, "The Fuzzy-C compiler: a software tool for producing portable fuzzy expert systems", 3rd IFSA congress, pp.708-711, 1989.

[4] 向殿　政男，ファジィのはなし，日刊工業新聞社，1989.

[5] 日本ファジィ学会，ファジィ理論，日刊工業新聞社，1993.

[6] 日本ファジィ学会，ファジィ制御，日刊工業新聞社，1993.

[7] 野間　恒毅，華門　真人，温泉とコンピュータのファジィな関係，Oh! X, pp.107-121, Apr 1991.

[8] 五月女　健治，yacc/lex，啓学出版，1992.

[9] 鑓田　威，"ファジィ記述言語のＣ言語への変換"，明治大学修士論文，1995.

[7] 石畑　清，森　雄一郎，大塚　和彦，新沢　洋太，向殿　政男，"ファジィシステム記述言語の標準化に向けて"，11th Fuzzy System Symposium, Jul 1995.

連絡先
〒214-71　川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科
石畑　清
電話：(044)934-7446　　Fax：(044)934-7912
e-mail：ishihata@cs.meiji.ac.jp

† 現シャープ株式会社所属．

WA2-4

ファジィシステム記述言語の標準化に向けて

Steps toward standardization of fuzzy systems description language

石畑 清† 森 雄一郎†† 大塚 和彦† 新沢 洋太† 向殿 政男†

Kiyoshi Ishihata Yuichiro Mori Kazuhiko Otsuka Youta Shinzawa Masao Mukaidono

†明治大学理工学部情報科学科

Department of Computer Science, Meiji University

††高知大学理学部情報科学科

Department of Information Science, Kochi University

Abstract

Fuzzy theory has been successfully used in many applications. Theoretical aspects of the theory has been established and well understood. However, description method of fuzzy systems has not been thoroughly discussed, and there is no standardized way of fuzzy systems description. Systems have been described in rather ad hoc ways. Thus, it would be very difficult to transport a fuzzy system to different environments. As a remedy to this situation, we propose a programming language FDL designed to support fuzzy systems description. FDL is based on C. Namely, data types and control structures suitable for fuzzy entities are added to C. In this paper, we describe the fundamental aspects of the language. Some programming examples and discussions on the language design will be given.

1 はじめに

システムの制御などにファジィ理論を応用する例が増えてきており，多くの成功例が報告されている。しかしながら，その記述の方法を見ると，理論に比べて未成熟であるという感を否めない。各システムの開発者がそれぞれ独自に設計した言語を使って記述していることが多く，他のシステムへの移植などはほとんど不可能な状況にある。これでは，それぞれのシステムで得られた知見を有効に活用することができない。

このような状況を解決するためには，標準化されたプログラミング言語でファジィシステムを記述できるようにすることが必要である。我々は，このようなファジィ言語の一つの候補として，FDL（Fuzzy systems Description Language）と呼ぶ言語を設計し，試作処理系を開発した。FDL は，ファジィデータを扱うための機能を持ち，しかも多くの計算機システムの上で実現可能なプログラミング言語である。ファジィの世界で従来使われてきた表記法を取り入れて，分かりやすい記述ができるようにした。また，現実の計算機やファジィチップの上で能率よく実現するための配慮も加えてある。この論文では，FDL の主な言語仕様とその設計思想について述べる。

2 FDL の言語仕様

2.1 FDL 言語の位置付け

FDL は，C を拡張した言語である。ファジィデータを宣言し，その性格を記述するための機能，各種演算子，ファジィ推論を表現するためのルールベースなどが C に追加されている。これらファジィに関する部分以外は C と変わらない。すべての C プログラムは，そのまま FDL のプログラムとして受け付け可能である。

FDL の処理系は，ファジィ関係の部分を C のコードに置き換える形の，一種の前処理系として実現するのが現実的だと考えられる。この処理系の出力結果を C コンパイラにかければ，計算機の上で実行させることができる。また，処理系の移植も容易である。我々が試作した FDL 処理系もこの方式を採用している。

2.2 ファジィ型

ベース言語として C を選んだので，あらゆるデータは，それが属する型を明示する形で宣言しなければならない。ファジィ集合（以降，ファジィデータという）の型がファジィ型である。ファジィ型は，その台集合（軸）の型と範囲を指定することによって宣言する。たとえば，

```
fuzzy weight { int, 0, 100 };
```

weight がファジィ型の名前である。この名前は，C の struct や union のタグと同様の扱いを受ける。int が台集合の型，0 と 100 がその最小値と最大値である。

台集合の型は，整数型のほかに列挙型と浮動小数点型が可能である。台集合が列挙型の場合のファジィ型は，次のようになる。

```
enum color { red, yellow, blue };
fuzzy hue { enum color };
```

浮動小数点型の場合は，最小値と最大値のほかに，内部表現における区間の個数を指定する。

```
fuzzy speed { double, 0.0, 200.0, 10 };
```

10 が区間数である。0.0 から 200.0 までの区間を 10 等分した点（11 個）のファジィ真理値だけがメモリー上に記憶される。これら以外の点の真理値を要求した場合は，最も近い区間端点の真理値を返す。たとえば，図 1 のメンバーシップ関数の内部表現は，次に示すとおりである。

[0.0,0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.0, 1.0, 0.5, 0.0, 0.0, 0.0]

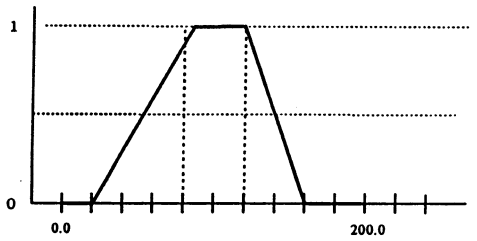


図1　ファジィデータの内部表現

ファジィデータの内部表現は，何らかの形の近似によらざるを得ない。区間数の指定は，近似の程度のユーザによる指定と考えることができる。区間数を省略した場合は，区間数として 10 を仮定する。

2 次元以上のファジィ型も可能である。

```
fuzzy grid { int, 0, 5 } { double, 0.0, 5.0, 10 };
```

ファジィ型の変数の宣言は，C の普通の変数の宣言と同様である。

```
fuzzy speed slow, medium, fast;
fuzzy hue bright;
```

2.3 メンバーシップ関数とその値の表記

ファジィ型の値，すなわちメンバーシップ関数をプログラムの中に表記する方法として，列挙，関数，その他の 3 種類がある。これらの記法は，変数の宣言の際の初期値の指定として用いることができる。

列挙表記は，座標とその点におけるメンバーシップ関数の値（便宜上，これ以降ファジィ真理値と呼ぶことにする）の対を並べることでメンバーシップ関数を表記する。指定していない点におけるファジィ真理値は 0 になる。

```
fuzzy hue x =
    elements { (red, 0.5), (yellow, 0.1), (blue, 1.0) };
```

関数表記は，座標を引数として受け取り，その点におけるファジィ真理値を返すような関数の名前を指定することによって行う。

```
fuzzy speed slow = function slow_value();
.....
fuzzy_truth slow_value(double pos)
{
    .....
}
```

ファジィ変数 slow のそれぞれの座標点のファジィ真理値は，その座標を引数として関数 slow_value を呼び出した時に返ってきた値によって決められる。なお，型 fuzzy_truth は，ファジィ真理値（0 以上 1 以下の実数値）を表わすための型である。

列挙と関数の二つのほかに，1 次元の数値ファジィ型（台集合が整数型または浮動小数点型であるファジィ型）に限って，いくつかの簡便な表記法がある。補間あり列挙，シングルトン、ベクトル，三角形，台形の 5 種類である。これらは，代表的な座標点における真理値を指定することでメンバーシップ関数を表記する。この場合，指定した点に一致しない点のファジィ真理値は，補間によって求める。通常の列挙表記が指定した点以外すべて 0 にするのと対照的な扱いとしている。

2.4 演算子

ファジィデータに対しても，代入は通常のデータと同様に行なえる。

比較は，==, !=, <, > の 4 種類の演算子に限って台集合が数値の場合のみ定義される（<= と >= はない）。メンバーシップ関数の大小は，真理値が 0 でない点の座標の大小によって決める。当面，比較結果は 0 または 1 とし，0 でない点の座標に重なりがある場合，大小は定義できない（< も > も偽となる）ことにしている。別の言い方をすると，メンバーシップ関数同士の大小比較は半順序関係に基づく比較である。

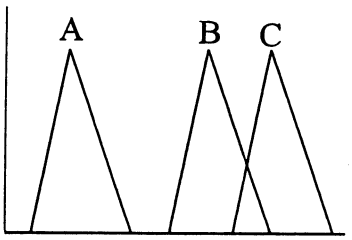


図2　メンバーシップ関数の比較

図2で，A は B よりも C よりも小さいが，B と C の間の大小は定義されない。

論理演算子として，and, or, not の 3 種類がある。それぞれの演算子の意味は，論理積（min），論理和（max），1 からの差が標準であるが，宣言によって切り替えることができる。たとえば，

```
fuzzy_and fuzzy_algebraic_and;
```

と宣言することによって，and 演算子の意味を代数積に変更することができる。ユーザ定義の任意の関数（二つのファジィ真理値の演算を行なってファジィ真理値を返す）によって演算子の意味を定義することも可能である。ファジィ集合同士の論理演算は，同じ座標のファジィ真理値同士の演算を行なって，同じ座標に格納したようなメンバーシップ関数が演算の結果である。

新たな演算子として，メンバーシップ関数同士のマッチングの程度を返す is 演算を設けた。メンバーシップ関数の部分的な変更，α－カット，円筒的拡張などの操作は，ライブラリ関数として提供する。

ファジィデータに対する演算は，同じ型同士の場合に限って行なうことができる。違うファジィ型であっても，台集合の型が同じであれば，明示的に型変換を行なうことはできる。ただし，内部表現の点が一致しなければ，若干の情報が失われることを覚悟しなければならない。

2.5 ルールベース

ルールベースは，if-then の形のルールを並べたものである。すべての if-then ルールの前件部（if の後の式）を評価して，それぞれのルールの貢献度を求める。そして，

この貢献度によって後件部の値を修飾した値を集めて，すべてを統合し，その結果を出力引数に代入する働きを持つ。通常の C のプログラムと違って，if-then ルールは順次実行する性格のものではなく，その記述の順序は結果に影響しない。

```
rule_base control (fuzzy speed self, fore)
                        (fuzzy action result) {
  if self is slow and fore is slow then
    result is no_action;
  if self is slow and fore is fast then
    result is accelerate;
  if self is fast and fore is slow then
    result is brake;
  .....
}
```

最初の括弧の中の self と fore が入力引数，次の括弧の中の result が出力引数である。後件部の is の前には出力引数しか書けない。

後件部には，「出力引数 is ...」の形をいくつか並べて書くことができる。この is は，通常のマッチング演算とは別のものであり，ルールベースのこの場所にだけ使う特別な表記法である。出力引数の型は，ファジィの場合とクリスプの場合がある。クリスプの場合は，高木一菅野法によって最終的な値を決定する。

各ルールには，「with ...」の形で重みを指定することができる。また，else 部を設けることもできる。

3 言語仕様に関する議論

3.1 言語が提供すべき機能

ファジィ計算のプログラミングを支援する言語には，どんな機能が求められるのだろうか。これは，それほど明らかなことではない。

ファジィという分野は，理論の面から出発し，次第に現実のシステムにも応用されるようになってきた。しかし，理論をどのように応用するかは，システムごとにまちまちであるのが現状である。ファジィのデータに対してどんな操作を用意すればよいか，ファジィデータの表現にはどれほどの精度が要求されるか，等々，具体的な言語の形にまとめるほどの統一的な見解に到達しているとは思えない。

現時点でファジィ言語の持つべき機能を確定することは不可能である。そこで，FDL には，最低限必要と思われる機能だけを取り入れることにした。これは，この形のまま確定しようというものではない。第 0 近似を示して，プログラミング経験を積み，そこから新たに必要とされる機能を随時取り入れていこうという考えに基づくものである。

ファジィのデータを表現する機能は絶対に必要である。これには，ファジィを表わすデータ型を用意することで対処した。これによって，ファジィ型の変数を宣言することができる。また，ファジィの値を表記するメンバーシップ関数の記法も，あることが望ましい。

ファジィ型さえあれば，それに対する操作を関数ないし演算子として用意することで，プログラミング言語としての形は整う。この観点から見れば，ルールベースは余分な機能である。ルールベースと同等のことは，関数や演算子を組み合わせることで書けるからである。しかし，現実にファジィ推論がファジィ理論の応用の主要な形態であることを見れば，推論を簡潔に記述する記法が要求されることは間違いないと考えられる。FDL では，現実的な需要を考慮して，ルールベースの機能を取り入れることにした。

3.2 ベース言語の選択

ファジィ言語を何もない状態から新しく設計することが得策とは思えない。ファジィ言語であっても，普通のクリスプデータ，つまり実数や整数を取り扱う機能は必要である。この面では，通常のプログラミング言語と変わらない。したがって，通常の言語にファジィデータに関する機能を付け加えるのが，現実的な考え方だと思われる。

FDL では，ベース言語として C を選んだ。これは，言語（処理系）の普及度やプログラマの熟達度を考慮した結果である。C にはデータ型の概念があるので，ファジィ型を新たなデータ型として付け加えることは容易である。ファジィの値の表記も，変数の初期値の指定の一種と見なせば，容易に言語に組み込める。

これら以外に FDL に必要な新しい概念は，ルールベースだけである。ルールベースには，従来の C とはまったく違った構文と計算規則が必要だが，これは関数と同じレベルの外部定義と考えることで解決した。ルールベースと通常の関数が構文の上で完全に切り離された形になるため，独立の構文と計算規則を与えても，言語設計の上で何も問題は生じない。

C をベースとするファジィ言語が設計できることは証明できたと考えているが，長い目で見た時に，このような言語設計が妥当なものであるかどうかは別問題である。最も明らかな問題点は，C の関数の引数や結果の型が固定されていることである。ファジィデータに対する操作の多くは，すべてのファジィ型に共通に提供しなければならない。ところが，これは同じ関数を違った型のデータに適用することになるため，通常の C の型に関する規則では記述できない。複数の型に共通な操作という概念がないためである。

このような問題点を解決するためには，オブジェクト指向言語（たとえば C++）をベースとして選ぶのがよいと考えられる。原始ファジィ型とでも呼ぶ型をあらかじめ提供しておき，個々のファジィ型はこの型からの継承の形で定義する。こうすれば，原始ファジィ型で使える操作は，すべてのファジィ型で使えることになる。

オブジェクト指向言語をベースとして採用すると，新たな問題が発生することも予想される。たとえば，ルールベースを継承することが可能か，可能ならばどんな規則に基づくのか，などである。我々も，いずれオブジェクト指向の考えを取り入れたファジィ言語の設計に着手したいと考えている。

3.3 ファジィデータの表現

ファジィデータは，計算機の上で普通に扱うデータに比べて情報量が大きい。これは，情報をより精密に表現しようというファジィの考え方からして当然である。ファジィデータを計算機上のデータとして忠実に表現しようとすれば，データの量が膨大になる。したがって，何らかの形で近似して表現することが必要である。ここでは，ファジィデータを表現する方法をいくつか示し，その得失を議論する。

議論を簡単にするために，ファジィデータとしては 1 次元のものだけを考える。1 次元のファジィの値は，x-y 平面上の y = f(x) の形のグラフだと考えることができる。ただし，y の値は [0..1] の範囲に限られる。x 軸は連続の実数だけでなく，離散整数の場合もあるし，名前の列挙である場合もあるが，表現が問題になるのは，主に x 軸が実数の場合である。

グラフを計算機内部で表現する方法としては，まず折れ線グラフの形で近似した上で，代表点（グラフが折れる点）に関するデータだけを保持する方法が考えられる。この方法は，精度がよいし，代表点が少ない場合は記憶域の消費量も少ない。しかし，メンバーシップ関数同士の演算を繰り返していくと，しだいにグラフの形が複雑になり，代表点の数がいくらでも多くなりうる。このようなことを考えると，汎用言語の中でこの表現法を採用することが現実的とは思えない。

別の方法として，グラフを関数と見なして，その関数の性格を数学的に表現することも考えられる。たとえば，sin 関数であれば sin という名前だけを記録する方法である。一般の関数の場合は，引数値 x から y = f(x) の値を計算する関数を用意しておいて，この関数の名前を記録すればよい。この方法は，グラフの忠実な表現という観点からは最善である。しかし，メンバーシップ関数同士の演算をどのように実現するかという点ではまったく見込みがない。FDL は，ファジィの値に対して実際の演算を施した結果を利用するという観点に立っているので，この方法は非現実的である。別の言葉で言えば，我々の目指しているのは，数式処理用の言語でなく，数値計算用の言語である。

結局，グラフを x 軸方向に一定の刻みで切って，その点に関する値だけを配列の形で表現するしか現実的な方法はないと考えられる。これが FDL で採用した方法である。この方法だと，刻みに一致しない点の値が正確には表現できないし，記憶域の点でも計算時間の点でも能率が悪いが，これはやむを得ないと考える。表現法が単純なので，ベクトル化や並列化による高速化が比較的簡単にできるはずである。結果の精度に関しては，数値計算における誤差解析のような理論が必要になるかも知れない。

さらに言えば，このようにしてグラフの形を記憶域の上で忠実に表現する必要が本当にあるのかどうかも考え直す必要があるだろう。理論の上でファジィの概念が有用ではあっても，それをそのままの形で現実のシステム記述に用いるべきかどうかは別問題である。この言語で実際にプログラムを書く経験を積んだ上で，このような議論に結論が得られればよいと考えている。

4 おわりに

ファジィ集合に基づくシステムの表現や処理に関して，そのための理論的な研究と，実際にコンピュータ上で表現し処理するためにプログラムを記述する事との間には，大きなギャップがある。コンピュータ上で表現して処理を行おうとすると，ディジタル表現による記述の実現性や容易性，及びプログラムの使い易さ等を考慮する時，理論的研究では見えない困難な側面が明らかになってくる。更に，ファジィシステムの記述の標準化は，ファジィチップやファジィ制御などの実際に既に存在するファジィシステムを考慮するとき，上記の問題は更に複雑となる。

本提案は，実用性，実現性を考慮したファジィシステム記述言語の標準化の試みの第一歩である。これをたたき台として更に訂正，拡張を行っていく予定である。なお，本研究は，（社）日本電子機械工業会（EIAJ）からの委託により，日本ファジィ学会ファジィ言語仕様調査研究委員会の下で行われた活動の一環によるものである。

参考文献

[1] M.Abe, M.Nakatsuyama and H.Kaminaga, "Fuzzy C and its application", 1st Asia Fuzzy System Symposium, pp.666-670, Nov 1993.

[2] M.Umano, "Fuzzy-set manipulating system in Lisp", 2nd IFSA congress, vol.2, pp.840-843, 1987.

[3] T.Teichrow, E.Horstkotte and M.Togai, "The Fuzzy-C compiler: a software tool for producing portable fuzzy expert systems", 3rd IFSA congress, pp.708-711,1989.

[4] 日本規格協会, "JIS X 3010 プログラム言語 C", 1994.

[5] 日本ファジィ学会，ファジィ理論，日刊工業新聞社，1993.

[6] 日本ファジィ学会，ファジィ制御，日刊工業新聞社，1993.

[7] 鑓田　威，石畑　清，"ファジィシステム記述言語の試作処理系", 11th Fuzzy System Symposium, Jul 1995.

連絡先
〒214-71　川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科
石畑　清
電話：(044)934-7446　　Fax：(044)934-7912
e-mail：ishihata@cs.meiji.ac.jp

WA3-1

不完全な知識下での「アバウト推論」方式

ABOUT Project for a robust problem solving

松澤 和光* 藤本 和則* 石川 勉**
Kazumitsu Matsuzawa Kazunori Fujimoto Tsutomu Ishikawa

* NTTコミュニケーション科学研究所
NTT Communication Science Laboratories

**拓殖大学工学部
Takushoku University

Abstruct— This paper introduces the ABOUT project concerned with a new problem solving paradigm. This project aims to realize an inference system, which can induce approximate solutions even if knowledge is incomplete and inconsistent. To achieve this, the project has provided a method of measuring semantic similarity between words using a knowledge base constructed automatically from several dictionaries. And the project has also provided a new logic system which can compute reliability of resuls from incomplete kmowledge. This paper also describes a relationship between the ABOUT paradigm and Fuzzy theory.

1. はじめに

最近、コンピュータに「現実の世界」の問題を解かせようと言う様々な試み[1][2]が開始されている。従来の情報処理技術では「コンピュータの世界」の問題、つまり全てのデータや処理方法がきちんと整理された問題だけを対象にして来た。これはＡＩと呼ばれる人工知能技術においても同様である。一方、現実の問題では全ての情報が得られるとは限らないし、決まったやり方がある訳でもない。こうした不完全な知識の下でも問題解決を可能とする「柔らかな」技術の実現が、今後の情報処理分野での大きな課題の一つとなっている。

これに対し我々は、人間が不完全な知識の下で行う概括的な判断（俗に言う「アバウトな」判断）に着目し、これをコンピュータで実現する処理方式を「アバウト推論」と名付けて研究を進めてきた[3]-[9]。

アバウト推論は、主として「常識の活用」と「厳密性の緩和」を武器に、従来とは全く異なった新しい推論方式の確立を目指す研究である。その対象範囲は幅広く研究はまだ初期段階であり、今までは主としてＡＩの分野において新しい研究方向を探ってきた。今回は、やはり同様、現実世界の不完全さに対し「曖昧さ」と言う側面からアプローチしている「ファジィ」との対比においてアバウト推論の研究を位置付け、両者の立場の違い、融合の可能性等を論じる。

以下、２章でまずアバウト推論の全体構想と、概念ベースを用いた類似性判別やアバウト論理等の諸技術を紹介する。次に３章で「ファジィ」の考え方との違いを明らかにした上で、ファジィ理論を応用／融合させた、アバウト推論の新しい発展性について提案を行う。

2. アバウト推論の概要

2.1 アバウト推論の研究構想

人間は、たとえ漠然とした指示や質問を受けても、常識で補って概括的に判断し、適当に実行／解答することができる。例えば「正月の催しについて調べて欲しい」と言う指示に対し、もし「年末年始予定表」なるデータが手元にあれば誰もがそれを提示するだろう。しかし、これをコンピュータに行わせようとすると、「正月の催し」から「年末年始予定表」に至る推論をさせるために、一般的にどのような知識をどれほど用意すべきかと言う深刻な問題に突き当たってしまう。

我々はこうした「常識的な判断」に必要な知識（常識）を、その内容ではなく性質／形態から捉えようと考えた。すなわち何と何が常識かと言った個別の知識内容ではなく、大規模な知識が総体として「どのように常識として振る舞うか」に着目する。この方針に沿い、常識ベースを具体的に構築しながらその性質を探る「常識系の研究」と、常識の持つ性質を利用した推論方式を検討する「推論系の研究」を、互いに連携させながら進めてきた。

常識の総体的特徴としては、以下の３つに着目した。

【階層性】上位の知識が下位を概略的／多層的に包含する
【多様性】多様な状況に応じ多様な知識を多義的に持つ
【全体性】部分は全体との関連によって始めて意味を持つ

これら３つの面から実世界を捉える「知能の基本的な仕組み」を各々「概眼」「詠眼」「漠眼」と呼び（「知能の GBBモデル」詳しくは文献[4]）、この構想の下に次に示す研究を展開している。

まず、常識ベース構築の第一段階として、最も基本的と思われる「言葉に関する知識ベース（概念ベースと呼ぶ）」の構築から着手した。これを足掛かりに言葉で書かれた知識を収集／獲得し、解法／因果知識から価値観までの様々な知識ベースを構築していく計画である。

一方、推論系の研究では、この概念ベースを活用し概念間の類似性を判別する機構[5]-[7]を開発した。これは多様な言葉が表象する種々の概念を、状況を表す「観点」に応じて捉えるもので、「詠眼」の機能に相当する。次に「漠眼」相当の機能として、不完全な知識から得られる多数の論理的帰結から、知識全体の構造により総合的に確からしい解を選ぶ「アバウト論

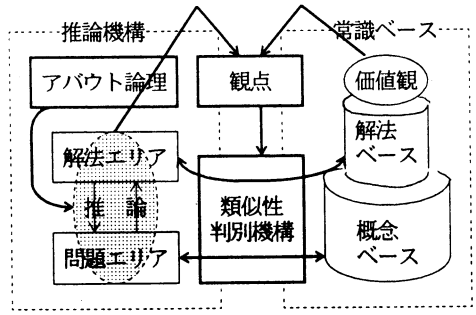


図1．アバウト推論の動作ｲﾒｰｼﾞ

理」を提案[8][9]した。（「概眼」は現在研究中）

以上から想定するアバウト推論の動作ｲﾒｰｼﾞを図1に示す。

2.2 概念ベースと概念間の類似性判別

前節で述べた概念ベース技術について、具体的に説明する。

(1)概念の表現法と基本概念ベースの構築

概念の表現法は種々考えられるが、具体性／一般性を持つ判別機構の実現を第一義に、大量の概念について知識を機械的に獲得できるよう、以下の簡潔な表現形式とした。

概念ｇ＝ $\{(p_1, q_1), (p_2, q_2), \cdots\}$ ・・・(1)

ここでp_iは概念ｇの特徴を表す属性、q_iはその重要度で、国語辞典等の語義文中の独立語と頻度から獲得する。また属性p_iの全体集合は概念ｇの全体集合と同一であるとする。しかし、このままでは語義文の表記法に依存し過ぎるので、次のように意味ｼｿｰﾗｽ[10]を用いた規格化表現Ｇに変換して扱う。

概念Ｇ＝ $\{(C_1, Q_1), (C_2, Q_2), \cdots\}$ ・・・(2)

ここでC_iは属性が属すｼｿｰﾗｽの意味ｶﾃｺﾞﾘ、Q_iはC_i毎に集計した重要度で、ノルム1に正規化（$\Sigma\ Q_i^{\ 2} = 1$）する。

具体的には日常的な基本単語約4万語に対し、国語辞典4種[11]-[14]の語義文を参考に属性を自動選択し、平均50属性を獲得した。さらに、概念相互の関係等の内部情報を利用して属性の追加／調整を行う「自己精錬化」の手法を開発し、概念ベースの「質」向上を図った[6]。

(2)観点変調方式による概念間の類似性判別

ある概念Ｋを観点としたとき、この観点の下で考える概念Ｇを、観点Ｋでの変調概念G^K

$G^K = \{(C_i, Q_i \times M(Q^K{}_i))\}$ ・・・(3)

で表す。ここでQ_iは概念Ｇの、$Q^K{}_i$は観点Ｋの重要度である。変調関数Ｍ(Ｑ)はＱが基準値以上で1、以下で0となる等の、変調の度合いを決定する。これにより、観点Ｋにおける重要な属性に応じ、概念Ｇの重要度が強調される。

ある観点Ｋの下での概念G_1とG_2との類似度Ｒ(Ｋ,G_1,G_2)は、変調概念G_1^K，G_2^Kを意味ｶﾃｺﾞﾘ次元のﾍﾞｸﾄﾙと見て、これらの内積で計算する。

$R(K, G_1, G_2) = G_1^K \cdot G_2^K$

$= \Sigma\ Q_{1j} \times Q_{2j}$ ・・・(4)

ここでQ_{1j}，Q_{2j}はG_1^K，G_2^Kの正規化された重要度を表す。また類似度Ｒは、G_1，G_2が全く似ていない場合の0から同一の場合の1まで、似ているほど大きな値をとる。

以上のﾒｶﾆｽﾞﾑを図2に模式的に示す。

(3)類似性判別能力の評価

現在、節(1)の実際に構築した概念ベースについて、節(2)の類似性判別に関する種々の実験を行っている。類似性判別の評価法に定説はないが、既存ｼｿｰﾗｽとの比較や、人間によるｵﾋﾟﾆｵﾝﾃｽﾄ等において良好な結果を得てきた[4]-[7]。さらに本ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑでは、ｸﾛｽﾜｰﾄﾞﾊﾟｽﾞﾙに適用して人間の感覚と良く一致する結果を得たこと[15]、およびこれらの成果のデモ展示も行うので、ご覧頂きたい。

2.3 アバウト論理

(1)基本的な考え方

図1に示したように、アバウト推論では不完全な知識を常識で補完／代替するため、推論パスは数多く分岐して不完全な結果が無数に得られる。このとき個々の推論結果は不確実でも、その総体は「そこそこ合っている」期待がもてる。そこでこの「全体性」を利用して複数パスを総合的に評価／制御する仕組みが必要になる。

結論の確からしさを扱う技術としては、従来から確率推論、確信度(CF)付きの推論、ﾃﾞﾝﾌﾟｽﾀｰ・ｼｪｰﾌｧ理論、ファジィ論理、等々が提案されてきた。しかし、これらはどれも「扱う知識の信頼度」を入力する側で意識的に数値化している。つまり、扱う知識の「実世界における確からしさ」を、システムの“外で”

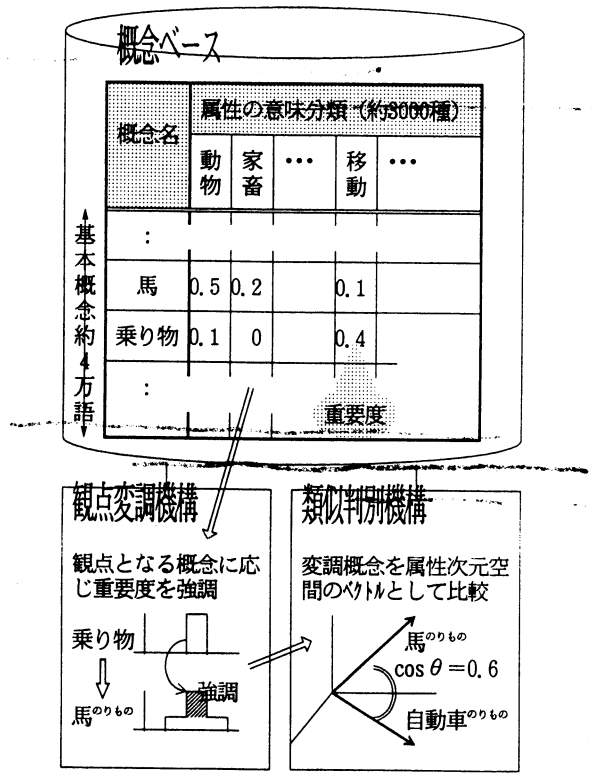


図2．概念間の類似性判別方式の概要

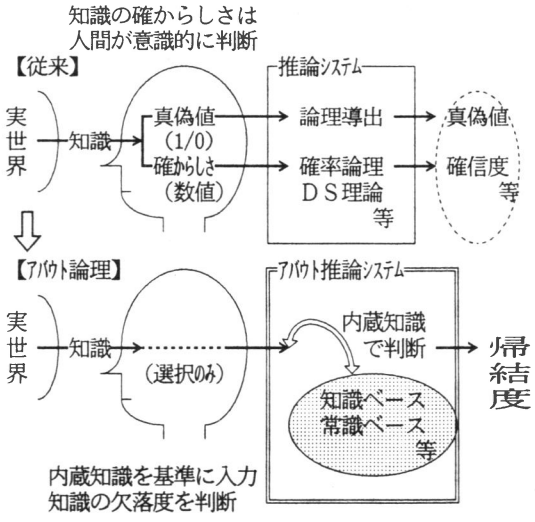


図3．アバウト論理の考え方

規定した後で、それが推論等の内部処理によりどう変化するかを計算している（図3）。

しかしながら、我々がここで問題にしたいのは「扱う知識」が外の世界で「どう見られているか」ではない。入力された知識は知識として受け入れた上で、「何かを結論するには本来知識が不十分であるが、でもまぁこれだけ分かれば大体は･･･」とか、「矛盾した入力もあるようだが、常識的に考えて･･･」と言った「人間的な」判断を行わせたい。すなわち「知識の正当性」よりも「判断の正当性」を問題にしたい。

そこで、システムが不完全な知識から（無理にでも）帰結した結論の「確からしさ」を、内蔵する知識ベースや常識ベースを基準に判断した「入力知識の不完全さ」に応じて、システムの“内で”評価する。つまり、知識でなく、判断自体の評価を行うこと、これがアバウト論理の狙いである。

(2)アバウト論理の実際

以上を背景に、ホーン節命題論理の形の知識ベースを対象として、帰結に必要な知識の不足度合いから、結論の確からしさを「帰結度」として定量化する計算法を提案した。

より具体的には、まず結論を帰結するのに最小限必要な知識の組（条件命題集合）を考え、知識の不足度合いを各集合について評価する。次に、各命題が結論にとって特徴的か否かを、内蔵知識全体における情報量から重み付けして、結論の帰結度を総合的に計算する。詳細は[8][9]を参照されたい。

3．ファジィ理論との融合に向けて

3.1 基本思想の同異

中島[16]向殿[17]らによれば、ファジィ推論は近似推論の一手法と捉えられる。近似推論は「人間が日常実行しているような曖昧で近似的な推論」であり、[17]では以下のような特性が挙げられている。

①完全な情報が得られなくても推論できる

②いい（良い？）加減のところで判断を下す

③正しい確信がなくても、もっともらしい結論を引き出す

④大体の傾向を大雑把に摑み、必要に応じ細かく見る

⑤結論の出し方に主観が入る

こうして見ると、アバウト推論はまさに近似推論と同じ機能の実現を目指していることがわかる。

ただし、近似推論はきちんと定式化されたものではない。これはアバウト推論も同様であるが、ザデー自身はファジィ推論を近似推論と呼んでいたこと、および近似(approximate）という言葉が示すように、近似推論では上記①～③に代表されるような「正解との近接性」が主眼とされているように思われる。この「近接性」はファジィが対象とする概念である。

これに対し我々のアバウト推論では、上記④⑤に象徴されるような「階層性／主観性」をも視野に入れて行きたいと考えている。2.1 節で述べた「常識ベースとしての価値観」や「階層性を扱う概眼機能」等は、まだ研究は進んでいないが、この方向を狙ったものである。

もちろん、アバウト推論では近接性も取り扱う。ファジィ理論が扱う曖昧さ(ﾌｧｼﾞｨﾈｽ)は、ぼやけた境界を持つ概念の曖昧さ(vagueness）と、多くの可能性を特定できない曖昧さ(ambiguity）に大別される[18]が、これらがちょうどアバウト推論の詠眼、漠眼の機能が対象とするものに相当する。

ただし、ファジィ理論が主にファジィ集合あるいはメンバシップ関数が与えられた以降の処理法を扱っているのに対して、アバウト推論ではまず実世界の曖昧な対象をどのようにシステム内に取り込むか検討してきた。一つは「言葉の概念」が持つ曖昧さを概念ベースとして内蔵することであり、もう一つは入力された知識が結論を得る上でどの程度十分かを問題とするアバウト論理である（図4）。

したがって、今後はシステム内に獲得された「曖昧さ」、およびシステム内で評価された「確からしさ」に対し、ファジィ理論を応用することにより、これらの効率的な取扱いが可能になると期待できる。この方向に向けた試論を次節で展開する。

3.2 概念のファジィ集合表現と類推的推論

(1)概念表現のファジィ集合視

例えば図5.aは、ある状況における「大きい」と言う概念のﾒﾝﾊﾞｼｯﾌﾟ関数を表したものである。数値xの各々の値に対し、そ

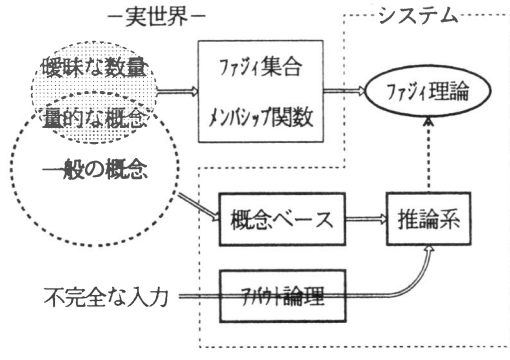


図4．ファジィ理論とアバウト推論

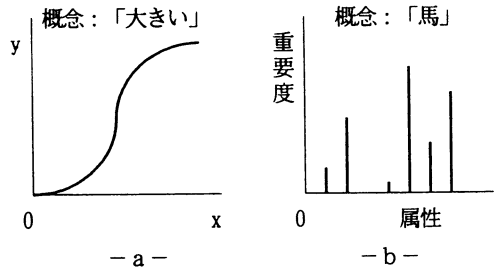


図5．概念の表現法

れが「大きい」と言う概念に属する度合いを数値yが表している。xとyの対応（ﾒﾝﾊﾞｼｯﾌﾟ関数）は状況によって変わる。

一方、2.2 節で述べた概念ベースでは、例えば「馬」と言う概念が属性と重要度の組で表される。これを図5．bのように表現すると、これは各々の属性が「馬」と言う概念に属す度合いを表していると見做せる。つまり通常のファジィ集合が「量的な概念」を数値に対応付けるのと同様に、概念ベースにおける概念の表現も「一般の概念」を属性に対応させており、これを一種のファジィ集合だと考えるのである。

もちろん通常のﾒﾝﾊﾞｼｯﾌﾟ関数と異なって、不連続な離散関数であり、属性軸の並び順は意味を持たない。しかし、ファジィ集合の特徴はﾒﾝﾊﾞｼｯﾌﾟ関数の値が1でないことにあり、変数軸の並び／連続性自体はさほど意味を持たない。一方、属性軸における個々の属性は全く無関係なものではなく、例えばｼｿｰﾗｽ の木構造等で表されるような相互関係を持っている。したがって、上記のような対応はそれほど不自然ではないと考える。

なお、概念ベースの記述は固定的であるが、状況によるﾒﾝﾊﾞｼｯﾌﾟ関数の違いには「観点による変調」が対応している。

(2)ファジィ推論機構の適用

アバウト推論では不完全な知識を常識で補完することを狙うが、その具体的な機構については未だ検討段階にある。制約充足型の問題に対しては、充足不可能な制約を類似した制約で置換して近似解を得る「制約緩和探索法」を既に提案した[19]。しかし、より柔軟な推論を行うには類推的な推論機構、つまり「AならばB」と言うルールを知識「A’」に適用して知識「B’」を得る仕組みが必要である。

ここで、概念ベースを用いればAとA’との類似性を判別することはできるが、この類似性を基にBをどうB’に変化させるかが不明である。一方ファジィ推論では、A等がファジィ集合で与えられた場合に結論B’を得る方法として、一致度や射影、ファジィ関係合成等の手法が研究されている[17]。そこで前節で述べた「概念とファジィ集合の対応」を用いれば、量的な概念[20]だけでなく、一般の概念に対して類推的な推論を行える可能性があると考える。

もちろんこれらの手法の適用にあたっては、前節で述べたようなﾒﾝﾊﾞｼｯﾌﾟ関数の非連続性等の違いを十分に勘案する必要があろう。これについては、今後さらに研究を進めて行く予定である。

(3)ファジィ含意の意味解釈について

最後にやや蛇足的ではあるが、ファジィ含意の意味解釈について私案を述べたい。

ファジィ推論における含意表現には、ﾏﾑﾀﾞﾆ含意、ﾙｶｼﾋﾞｯﾂ含意等、種々の形式が存在し、どれを適用するかで当然結論も異なる[21]。これらの含意の使い分けは、主に適用する問題毎に行われているようである。

一方アバウト推論では、概念ベースの次の常識ベースとして様々な推論ルールを体系化した「解法ベース」の構築を予定している。この研究は未だ予備検討の域を出ないが、獲得すべきルールには「論理的関係の記述」「経験的な因果律」等、種々様態が予想される。これらの違いを上記の「含意の違い」で使い分けできるのではないかと考えており、検討して行きたい。

4．おわりに

知識が不完全でも適切な概略解を得ることを目指して研究を進めている「アバウト推論」についてその概要を紹介し、ファジィとの考え方の違い、ファジィ理論との融合の可能性について述べた。より具体的なファジィの適用法については、さらに検討を進めてから報告したい。

【参考文献】

[1] 特集ﾘｱﾙﾜｰﾙﾄﾞｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞ研究計画，情報処理，Vol.34，No.12
[2]Proc. of Int. Conf. on Building and Sharingof Very Large-Scale Knowledge Bases，1993.
[3] 松澤他「ｱﾊﾞｳﾄ推論：柔らかな知識処理」情処全大，1992.
[4] 松澤他「ｱﾊﾞｳﾄ推論とその類似性判別機構」AIｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ，1994.
[5] 笠原他「観点に基づく概念間の類似性判別」情処論，Vol.36，No.3，pp505-509，1994.
[6] K. Kasahara, et. al"Viewpoint-Based Measurement of Semantic Similarity between Words"，5th Int. Work. on AI and Statstics，1995.
[7] 笠原他「精錬化に基づく概念ﾍﾞｰｽ 構成法」信学技報，DE95-7，1995.5
[8] 藤本他「知識の欠落を扱うｱﾊﾞｳﾄ論理」AI全大，3-7，1994.
[9] 藤本他「ｱﾊﾞｳﾄ論理に基づく分類法と評価」AI全大，1995.
[10]池原他「日英機械翻訳のための意味解析用の知識とその分解能」情処論，Vol34，No.8，pp1692-1704，1993
[11]「広辞苑」岩波書店，1991.
[12]「大辞林」三省堂，1992.
[13]「三省堂現代国語辞典」三省堂，1992.
[14]「類語国語辞典」角川書店，1990.
[15]松澤他「概念ベースによる類似性判別のｸﾛｽﾜｰﾄﾞﾊﾟｽﾞﾙ への適用」本ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ
[16]中島「推論とﾌｧｼﾞｨ推論の数理」ﾌｧｼﾞｨ誌，Vol.6，No.6，1994.
[17]向殿「ﾌｧｼﾞｨ論理」講座ﾌｧｼﾞｨ第4巻，1993.
[18]菅野他「ﾌｧｼﾞｨ測度」講座ﾌｧｼﾞｨ第3巻，1992.
[19]湯川他「ｱﾊﾞｳﾄ推論における階層推論方式」情処全大，1992.
[20]岩谷他「ﾌｧｼﾞｨ理論を利用した類推推論手法について」ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ，TB2-2，1994.
[21]水本「ﾌｧｼﾞｨ推論(2)」ﾌｧｼﾞｨ誌，Vol.4，No.3，1992.

問合せ先：〒238-03 横須賀市武1-2356 NTT-CS研推論G
松澤和光 tel:0468-59-3133 fax:-3633 matsu@nttkb.ntt.jp

WA3-2

t-ノルムに基づく合成を用いた一般化分離規則の実現について

Realization of the Generalized Modus Ponens with the Composition Based on t-Norms

河口 万由香　　立花 啓　　伊達 惇
Mayuka F. KAWAGUCHI　Hiroshi TACHIBANA　Tsutomu DA-TE

北海道大学工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract —— This study focuses on the generalized modus ponens in which a fuzzy inference rule is represented as a fuzzy relation by a t-norm or a $\mathcal{R}$-implication, and in which the inference consequence for a given fact is obtained by sup-(t-norm) composition of the fact and the rule. The authors make attempts to identify some general types of combinations of such functions as t-norms and $\mathcal{R}$-implications so that the generalized modus ponens will satisfy certain desirable properties.

1　はじめに

ファジィ推論の種々の手法のうち，二値論理における分離規則（modus ponens）のファジィ化である一般化分離規則（generalized modus ponens）に基づくものが最も基本的でかつ応用範囲の広い方法として知られている。Zadeh や Mamdani によって提唱された推論法はその代表格である。一般化分離規則においては，推論規則の合成に用いる t-ノルムと推論規則を記述する演算の組み合わせによって多数の推論法を実現することが可能であり，いずれの推論法が合理的であるかについて個別具体的な既知の演算を網羅すべく様々な観点から数多くの調査が行われている[1,3,4,7,10,11,13]。特に，ファジィ推論が二値論理に基づいた推論の拡張であるという意味から，一般化分離規則に基づく推論法は分離規則（推論規則の前件部と等しい事実が観測されたとき後件部と同じ結論を導くこと）を満足するべきであると考えられている。

本報告では，推論規則を記述する演算として t-ノルムと R-含意をとりあげ，これらの演算の組み合わせから成る一般化分離規則が，ある一定の条件の下で分離規則を含むいくつかの性質を満足することを一般的に証明する。さらに，ここで得られた定理がこれまでの個別具体的な研究成果と整合していることを確認する。

2　一般化分離規則

t-ノルム $T:[0,1]^2 \to [0,1]$ は任意の $a,b,c \in [0,1]$ に対して

(T1) 境界条件 : $T(1,a)=a,\ T(0,a)=0$;
(T2) 単調性 : $a \le b \to T(a,c) \le T(b,c)$;
(T3) 可換性 : $T(a,b)=T(b,a)$;
(T4) 分配性 : $T(a,T(b,c))=T(T(a,b),c)$

を満足する関数であり，ファジィ論理における連言演算である。また，ファジィ方程式の解法において重要な役割を果たす φ-オペレータ $\varphi:[0,1]^2 \to [0,1]$ は t-ノルム T に対応して次式で定義される。

$$a \varphi b \equiv \sup\{x \mid T(a,x) \le b\} \tag{1}$$

φ-オペレータはファジィ論理の研究における R-含意に一致するので，本稿では R-含意と呼ぶこととする。

t-ノルムと R-含意について，以下の議論に必要な既知の性質を列挙する。ここで，$a,b \in [0,1]$，$\{c_i\}_{i \in I}$ は $[0,1]$ の要素からなる任意の族（ただし I は自然数の集合），φ, φ_1 および φ_2 はそれぞれ T, T_1 および T_2 から式(1)によって導出される R-含意である。

(P1) [6,9] T が下半連続 $\to$ $T(a,a\varphi b) \le b$
(P2) [8] $T_1 \le T_2 \to \varphi_1 \ge \varphi_2$
(P3) $1 \varphi b = b$　（式(1)および(T1),(T2)より明らか）
(P4) [2] T が下半連続 $\to$ $T(a,a\varphi b) \le \min(a,b)$
(P5) [5] T が下半連続あるいは $\sup_i c_i \in \{c_i\}_{i \in I}$

$$\to \sup_i T(a,c_i) = T\left(a, \sup_i c_i\right)$$

「If x is A then y is B.」あるいは簡単に「$A \to B$」という形式のファジィ推論規則が与えられたとき，一般化分離規則は以下のように表される。

$$\begin{array}{ll} \text{推論規則} : & A \to B \\ \text{事実} : & A' \\ \hline \text{結論} : & B' \end{array} \tag{2}$$

ここで，A,A',B,B' はファジィ命題であり，それぞれ全体集合 X,X,Y,Y の部分集合とする。事実 A' が推論規則の前件部 A に等しいとき結論 B' が推論規則の後件部 B に一致するならばこの推論法は分離規則を満足するという。

一般化分離規則に基づくファジィ推論の計算手順を示す。推論規則 $A \to B$ は二つの全体集合の直積 $X \times Y$ のファジィ集合すなわちファジィ関係であるとみなされ，結論 B' は事実 A' と推論規則 $A \to B$ との関係合成によって得られる。ここで，

$$I(\mu_A(x), \mu_B(y)) = \mu_{A \to B}(x,y) \tag{3}$$

とおき，$\circ$ は sup-(t-ノルム) 合成を表すとすると，式(2)は以下の式で与えられる。

$$B' = A' \circ (A \to B) \tag{4}$$

$$\mu_{B'}(y)=\sup_x T\big(\mu_{A'}(x),I(\mu_A(x),\mu_B(y))\big) \qquad (5)$$

関数Iとしては，t-ノルムのいずれかが選択される場合と含意演算の一つが選択される場合に大別されるが，本研究では，以下の4通りの場合に分類して取り扱う。

① IとしてTすなわち推論の合成に用いられるt-ノルムと同一の演算を用いる。（例）Mamdaniの推論法
② IとしてTとは異なるt-ノルムT^*を用いる。
③ IとしてTから導出されるR-含意φを用いる。
④ IとしてTとは異なるt-ノルムT^*から導出されるR-含意φ^*を用いる。（例）Zadehの推論法

また，推論規則の前件部Aは常に正規であると仮定し，事実A'については以下の3通りの場合を扱う。

(a) $A'=A$
(b) $A'\subseteq A$，A'は正規
(c) $\exists x_0:\mu_A(x_0)=\mu_{A'}(x_0)=1$

明らかに，(a)は(b)の特別な場合であり，(b)は(c)の特別な場合である。(a)は観測された事実A'が推論規則の前件部Aに等しい場合で，このとき$B'=B$となるなら分離規則が成立していることとなる。(b)は事実A'がAより曖昧さの少ない場合である。このとき，推論規則の後件部Bより曖昧さの少ない結論が得られるのはむしろ不合理であり，$B'=B$となるべきであると考えられる[1,4,7]。次節以降では，①-(a)，①-(c)，②-(a)，②-(c)，③-(a)，③-(b)，④-(a)，④-(b)の場合について，無条件あるいはある一定の条件の下で，結論B'がBに一致するということを，それぞれ[定理1]~[定理8]に証明を示す。

3　推論規則$A\to B$をt-ノルムで実現する場合

本節では，式(5)における関数Iとしてt-ノルムのいずれかを用いる場合を扱う。TとIに論理積を用いるMamdaniの推論法はこの場合の代表例である。ただし，推論規則$A\to B$を記述する関数として，含意の公理を満足しない連言演算であるt-ノルムを用いることについては，理論面から問題提起がなされているが，本稿ではこの問題は扱わない。

[定理1] 一般化分離規則 式(5)において，$I=T$，$A'=A$，Aは正規ファジィ集合とする。このとき，結論B'は推論規則の後件部Bに一致する。（分離規則）

（証明）　Aは正規であるから$T(\mu_A(x_0),\mu_A(x_0))=1$となる$x_0$が必ず存在する。これと(T1), (T4), (P5)より，以下の式が得られる。

$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y)&=\sup_x T\big(\mu_A(x),T(\mu_A(x),\mu_B(y))\big)\\&=\sup_x T\big(T(\mu_A(x),\mu_A(x)),\mu_B(y)\big)\\&=T\Big(\sup_x T(\mu_A(x),\mu_A(x)),\mu_B(y)\Big)\\&=T(1,\mu_B(y))\\&=\mu_B(y)\end{aligned} \qquad (6)$$

（証明終）

[定理2] 一般化分離規則 式(5)において，$I=T$とし，さらに$\mu_A(x_0)=\mu_{A'}(x_0)=1$となる$x_0$が存在すると仮定する。このとき，結論$B'$は推論規則の後件部$B$に一致する。

（証明）　仮定より，

$$\sup_x T(\mu_{A'}(x),\mu_A(x))=T(\mu_{A'}(x_0),\mu_A(x_0))=1 \qquad (7)$$

となるから，$\mu_{B'}(y)=\sup_x T\big(\mu_{A'}(x),T(\mu_A(x),\mu_B(y))\big)$は式(6)と全く同様に変形され，$\mu_{B'}(y)=\mu_B(y)$を得る。

（証明終）

[定理3] 一般化分離規則 式(5)において，$I=T^*(\neq T)$，$A'=A$，Aは正規ファジィ集合とする。このとき，結論B'は推論規則の後件部Bに一致する。（分離規則）

（証明）　$\mu_A(x_0)=1$とおくと任意のT^*とyに対して

$$\begin{aligned}T^*(\mu_A(x_0),\mu_B(y))&=T^*(1,\mu_B(y))\\&=\max_x T^*(\mu_A(x),\mu_B(y))\end{aligned} \qquad (8)$$

となり，$\mu_A(x)$と$T^*(\mu_A(x),\mu_B(y))$は共に$x=x_0$において最大値をとることがわかる。このことと(T1), (P5)より次式が得られる。

$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y)&=\sup_x T\big(\mu_A(x),T^*(\mu_A(x),\mu_B(y))\big)\\&=T\Big(\max_x \mu_A(x),\max_x T^*(\mu_A(x),\mu_B(y))\Big)\\&=T(1,\mu_B(y))\\&=\mu_B(y)\end{aligned} \qquad (9)$$

（証明終）

[定理4] 一般化分離規則 式(5)において，$I=T^*(\neq T)$とし，さらに$\mu_A(x_0)=\mu_{A'}(x_0)=1$となる$x_0$が存在すると仮定する。このとき，結論$B'$は推論規則の後件部$B$に一致する。

（証明）　[定理3]と同様に，$\mu_{A'}(x)$と$T^*(\mu_A(x),\mu_B(y))$は共に$x=x_0$において最大値をとる。従って，$\mu_{B'}(y)=\sup_x T\big(\mu_{A'}(x),T^*(\mu_A(x),\mu_B(y))\big)$は式(9)と全く同様に変形され，$\mu_{B'}(y)=\mu_B(y)$を得る。

（証明終）

以上，[定理1]~[定理4]により，Iとしていかなるt-ノルムを用いた場合にも(c)を満足する事実A'に対して，結論B'はBに一致することが示された。

4　推論規則$A\to B$をR-含意で実現する場合

本節では，式(5)における関数IとしてR-含意のいずれかを用いる場合を扱う。ファジィ推論の草分けといえるZadehの推論法はこの場合の代表例であり，Tとして論理積，IとしてLukasiewiczの含意（限界積$T(x,y)=\max(0,x+y-1)$から式(1)によって導出されるR-含意）が用いられる。

本節での議論に必要な補題を述べる。

[補題1] φ_1およびφ_2をそれぞれ任意のt-ノルムT_1およびT_2から導出されるR-含意とする。このとき，$T_1\le T_2$

であるなら，任意のt-ノルム T および $a,b\in[0,1]$ に対して $T(a,a\varphi_1\ b)\geq T(a,a\varphi_2\ b)$ が成り立つ。

（証明）　(P2) および (T2) より明らか。　　（証明終）

[補題2]　$\mu_A(x_0)=\mu_{A'}(x_0)=1$ となる x_0 が存在するならば，任意のt-ノルム T と任意の R-含意 φ に対して次式が成りたつ。

$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y)&=\sup_x T(\mu_{A'}(x),\ \mu_A(x)\ \varphi\ \mu_B(y))\\&\geq\mu_B(y)\end{aligned}\tag{10}$$

（証明）　仮定より (T1), (P3) を用いて次式が得られる。

$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y)&=\sup_x T(\mu_{A'}(x),\ \mu_A(x)\ \varphi\ \mu_B(y))\\&\geq T(\mu_{A'}(x_0),\ \mu_A(x_0)\ \varphi\ \mu_B(y))\\&=T(1,1\ \varphi\ \mu_B(y))\\&=\mu_B(y)\end{aligned}\tag{11}$$

（証明終）

[補題2]により I として R-含意を用いる推論法においては，(c)を満足するすべての事実 A' に対して $B'\supseteq B$ となることが示された。よって，以下の定理において分離規則が成立するか否かを調べるには $B'\subseteq B$ を示せば十分であることがわかる。[補題2]においては T と φ の間に式(1)の関係が成立している必要はない。しかし，以下の定理では，φ, φ^*, φ_1, φ_2 はそれぞれ T, T^*, T_1, T_2 から式(1)によって導出される R-含意であることに注意されたい。

[定理5]　一般化分離規則 式(5)において，T は下半連続，$I=\varphi$，$A'=A$，A は正規ファジィ集合とする。このとき，結論 B' は推論規則の後件部 B に一致する。（分離規則）

（証明）　(T1), (P4), (P5) を用いると以下のように直接 $B'=B$ が得られる。

$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y)&=\sup_x T(\mu_A(x),\ \mu_A(x)\ \varphi\ \mu_B(y))\\&=\sup_x\min(\mu_A(x),\ \mu_B(y))\\&=\min\left(\sup_x\mu_A(x),\ \mu_B(y)\right)\\&=\mu_B(y)\end{aligned}\tag{12}$$

（証明終）

[定理6]　一般化分離規則 式(5)において，T は下半連続，$I=\varphi$，$A'\subseteq A$，A および A' は正規ファジィ集合とする。このとき，結論 B' は推論規則の後件部 B に一致する。

（証明）　$\mu_{A'}(x)\leq\mu_A(x)$ および (T2), (P1) より次式が得られる。

$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y)&=\sup_x T(\mu_{A'}(x),\ \mu_A(x)\ \varphi\ \mu_B(y))\\&\leq\sup_x T(\mu_A(x),\ \mu_A(x)\ \varphi\ \mu_B(y))\\&\leq\sup_x\mu_B(y)\\&=\mu_B(y)\end{aligned}\tag{13}$$

式(13)と[補題1]より $\mu_{B'}(y)=\mu_B(y)$ となる。（証明終）

[定理7]　一般化分離規則 式(5)において，T は下半連続，$T^*\geq T$，$I=\varphi^*(\neq\varphi)$，$A'=A$，A は正規ファジィ集合とする。このとき，結論 B' は推論規則の後件部 B に一致する。（分離規則）

（証明）　$T\leq T^*$ および[補題1]より次式が得られる。

$$\begin{aligned}&T(\mu_A(x),\mu_A(x)\ \varphi\ \mu_B(y))\\&\geq T(\mu_A(x),\mu_A(x)\ \varphi^*\ \mu_B(y))\end{aligned}\tag{14}$$

式(14) および (P1) より次式が得られる。

$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y)&=\sup_x T(\mu_A(x),\mu_A(x)\ \varphi^*\ \mu_B(y))\\&\leq\sup_x T(\mu_A(x),\mu_A(x)\ \varphi\ \mu_B(y))\\&\leq\sup_x\mu_B(y)\\&=\mu_B(y)\end{aligned}\tag{15}$$

式(15)と[補題1]より $\mu_{B'}(y)=\mu_B(y)$ となる。（証明終）

[定理8]　一般化分離規則 式(5)において，T は下半連続，$T^*\geq T$，$I=\varphi^*(\neq\varphi)$，$A'\subseteq A$，A および A' は正規ファジィ集合とする。このとき，結論 B' は推論規則の後件部 B に一致する。

（証明）　$\mu_{A'}(x)\leq\mu_A(x)$，式(14) および (T2), (P1) より次式が得られる。

$$\begin{aligned}\mu_{B'}(y)&=\sup_x T(\mu_{A'}(x),\mu_A(x)\ \varphi^*\ \mu_B(y))\\&\leq\sup_x T(\mu_A(x),\mu_A(x)\ \varphi^*\ \mu_B(y))\\&\leq\sup_x T(\mu_A(x),\mu_A(x)\ \varphi\ \mu_B(y))\\&\leq\sup_x\mu_B(y)\\&=\mu_B(y)\end{aligned}\tag{16}$$

式(15)と[補題1]より $\mu_{B'}(y)=\mu_B(y)$ となる。（証明終）

以上，[定理5]-[定理8]により，下半連続な T に対して，I として $T^*(\geq T)$ より導出される R-含意を用いた場合には，(b)を満足する事実 A' に対して結論 B' は常に B に一致することが示された。

5　まとめと考察

一般化分離規則 式(5)において，推論規則を記述する関数 I としてt-ノルムを用いた場合と R-含意を用いた場合の結論 B' に関して以下の結果を得た。

●分離規則の成立について（A：正規）

I がt-ノルムである場合には，すべてのt-ノルムについて分離規則が成立する。

I が R-含意である場合には，関係合成におけるt-ノルム T が下半連続であるという条件の下で，$T^*\geq T$ なる任意のt-ノルム T^*（ただし，T 自身を含む）から導出される φ^* を I として用いる時に分離規則が成立する。

以上の結果を著者等が既に行った数値実験[13]の結果と照合する。T として文献[12]より以下に示す代表的な9種類のt-ノルム T_1~T_9 を選び，I として T_1~T_9 および φ_1~φ_9 の18種類をとりあげた。

$T_1(x,y)=\min(x,y)$　　（論理積）

$$T_2(x,y)=\frac{xy}{x+y-xy} \quad \text{(Hamacher 積)}$$

$$T_3(x,y)=\frac{2}{\pi}\cot^{-1}\left(\cot\frac{1}{2}\pi x+\cot\frac{1}{2}\pi y\right) \quad \text{(cot 積)}$$

$$T_4(x,y)=xy \quad \text{(代数積)}$$

$$T_5(x,y)=\frac{xy}{1+(1-x)(1-y)} \quad \text{(Einstein 積)}$$

$$T_6(x,y)=\max(0,x+y-1) \quad \text{(限界積)}$$

$$T_7(x,y)=\frac{2}{\pi}\cos^{-1}\min\left(\cos\frac{1}{2}\pi x+\cos\frac{1}{2}\pi y,1\right) \quad \text{(cos 積)}$$

$$T_8(x,y)=\begin{cases}x & (y=1)\\ y & (x=1)\\ 0 & (x,y<1)\end{cases} \quad \text{(激烈積)}$$

$$T_9(x,y)=\frac{2}{\pi}\sin^{-1}\max\left(\sin\frac{1}{2}\pi x+\sin\frac{1}{2}\pi y-1,0\right) \quad \text{(sin 積)}$$

t-ノルム T_1~T_9 の間には以下の大小関係が成立することが知られている[12]。

$$T_1\geq T_2\geq T_3\geq T_4\geq T_5\geq T_6\geq T_7\geq T_8 \quad (17)$$

$$T_1\geq T_9\geq T_6 \quad (18)$$

数値実験によって，$I=T_1$~T_9 の場合には，すべて分離規則を満足していることが確認されており，本研究の結果と一致する。$I=\varphi_1$~φ_9 の場合の結果は表1に示す通りであり，$T=T_1$~T_7, T_9 の場合はやはり本研究の結果と一致する。表1の$T=T_8$の行に関しては激烈積が下半連続ではないので，今回の結果の範囲外であり今後の課題である。

表1　数値実験結果[13]：$A'=A$の場合

○：$B'=B$（分離規則成立）　　×：$B'\neq B$

T \ I	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	φ_7	φ_8	φ_9
T_1	○	×	×	×	×	×	×	×	×
T_2	○	○	×	×	×	×	×	×	×
T_3	○	○	○	×	×	×	×	×	×
T_4	○	○	○	○	×	×	×	×	×
T_5	○	○	○	○	○	×	×	×	×
T_6	○	○	○	○	○	○	×	×	○
T_7	○	○	○	○	○	○	○	×	○
T_8	○	○	○	○	○	○	○	×	○
T_9	○	×	×	×	×	×	×	×	○

● A'がAより曖昧さの少ない場合（$A'\subseteq A$，A',A：正規）

Iがt-ノルムである場合には，すべてのt-ノルムに対して$B'=B$となる。IがR-含意である場合には，分離規則が成立するTとIの組み合わせに対しては$B'=B$となり，その他の場合には$B'\supseteq B$となる。従って，Iとしてt-ノルムもしくはR-含意を用いる一般化分離規則においては，$A'=\text{very}\,A$（ただし$\mu_{\text{very}\,A}(x)=\{\mu_A(x)\}^2$と定義される）に対して$B'=\text{very}\,B$という結論が得られることはない。

● $\mu_A(x_0)=\mu_{A'}(x_0)=1$ となるx_0が存在する場合

Iとしてt-ノルムが用いられる場合には，常に$B'=B$となる。例えば事実A'がAよりはるかに曖昧な情報である場合にも結論B'はBとなり，かなり不自然な性質となっている。ただし実際のファジィ推論においては，推論規則の前件部が重なり合うような複数のルールが用いられることにより，この性質から生じる問題は回避されていると考えられる。

今回は含意関数としてR-含意のみを取り扱ったが，他のタイプの含意関数を用いた場合についても同様の研究が必要である。また，t-ノルムをさらに一般化した広義の連言関数とそこから導出される含意関数を用いる一般化分離規則[3]についても，今後の課題である。

参考文献

[1] B.De Baets & E.E.Kerre : The generalized modus ponens and the triangular fuzzy data model, *Fuzzy Sets and Systems*, **59** (1993) 305-317.

[2] L.Bour & M.Lamotte : Solution minimales d'équations de relations floues avec la composition MAX T-NORME, *BUSEFAL*, **31** (1987) 24-31.

[3] K.Demirli & I.B.Turksen : A review of implications and the generalized modus ponens, *Proc. FUZZ-IEEE'94*, Orlando (1994) 1440-1445.

[4] D.Dubois & H.Prade : Fuzzy sets in approximate reasoning, Part 1 : Inference with possibility distributions, *Fuzzy Sets and Systems*, **40** (1991) 143-202.

[5] 河口, 伊達 : t-ノルムに基づくファジィ算法に関する諸性質, 日本ファジィ学会誌, **5** (1993) 1113-1121.

[6] M.F.Kawaguchi & T.Da-te : Hybrid fuzzy arithmetic based on lower semicontinuous t-norms, *Int. J. Intelligent Automation and Soft Computing*, to appear.

[7] E.E.Kerre : A comparative study of the behavior of some popular fuzzy implication operators on the generalized modus ponens, in L.A.Zadeh & J.Kacprzyk(eds.), *Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty*, John Wiley & Sons (1992) 281-295.

[8] 宮腰, 新保 : T-ノルムを用いたファジィ関係の合成とそのファジィ推論への応用, 電子通信学会論文誌, **J67-D** (1984) 391-398.

[9] M.Miyakoshi & M.Shimbo : Solutions of composite fuzzy relational equations with triangular norms, *Fuzzy Sets and Systems*, **16** (1985) 53-63.

[10] M.Mizumoto : Fuzzy control under various fuzzy reasoning methods, *Information Sciences*, **45** (1988) 129-151.

[11] 水本雅晴 : ファジィ推論(1),(2), 日本ファジィ学会誌, **4** (1992) 256-264, 433-444.

[12] M.Mizumoto : Pictorial representations of fuzzy connectives, part I : Cases of t-norms, t-conorms and averaging operators, *Fuzzy Sets and Systems*, **31** (1989) 217-242.

[13] 立花, 河口, 伊達 : 一般化分離規則に着目したファジィ推論の合成規則の妥当性に関する検討, 情報処理北海道シンポジウム'95講演論文集, (1995) 12-13.

[問い合わせ先]

〒060　札幌市北区北13条西8丁目

北海道大学工学部情報工学科

河口 万由香

TEL.: 011-706-6805　　FAX.: 011-706-7830

E-mail: mayuka@huie.hokudai.ac.jp

WA3-3

ファジィ論理関数あてはめアルゴリズムに基づく知識抽出システム
Knowledge Extraction System Based on the Fitting Fuzzy Switching Functions Algorithm(FSF)

塚原泰明 Yasuaki Tsukahara
菊池浩明 Hiroaki Kikuchi
中西祥八郎 Shouhachirou Nakanisi

東海大学工学部
Faculty of Engineering, University of Tokai Prefecture

Abstract: This paper studies an attempt of knowledge extraction based on fuzzy switching functions. After the essential algorithm is defined and the system specification is described. The system applies to an actual data generated by a questionnaire to several sets of students. The results of the algorithm are represented with binary decision tree, which provides understandable description of knowledge. The main results is the execution time is exponential to a number of input variables.

1 はじめに

近年、ファジィ推論やニューラルネットワークにより、人の知識を獲得する試みが盛んである。ところが、実際の知識獲得においては、ファジィ推論のルール作製が困難であったり、ニューラルネットワークによる、知識の表現が明確でないなどの問題点が生じる。

そこで、本研究では、ファジィ論理関数を知識獲得の手段とする全く異なるアプローチとる[1,2,3]。ファジィ論理関数とは、論理式によって表現される写像 $[0,1]^n \to [0,1]$ である。提案方法は、$[0,1]^n$の部分集合 A から $[0,1]$ の写像 $f : A \to [0,1]$ を与えたとき、それを表現するファジィ論理関数を求めるものである。ただし、提案方法には以下の課題があった。

1. ファジィ論理関数の数は、2^{3^n}の極限値で増加するため、総当たりは現実的ではない。
2. ファジィ論理関数に特徴的な、相補項(変数とその相補の両方を含む項)の解釈が困難。
3. 論理式で表現される知識は、読みにくい。

そこで、本研究では、誤差最小のファジィ論理関数を求めることを諦め、代わりにその意味のある部分集合(2値関数表現できるファジィ論理関数の集合)についてあてはめを試みる。この部分集合は、2値関数の集合と合同なもので相補項を生じず、n が小さい範囲は十分に有効である。この n の限界を明らかにするために、アルゴリズムをワークステーションへ実装し各種評価を与える。また、視覚的に2分木による表現[4]を試みる。

はじめに、2値型あてはめアルゴリズム及び2分木を定義する。次に、本システムの有効性をを示す知識抽出実験の方法及び実験結果を示す。最後に、処理時間などについてシステムを評価し、処理限界などについて考案する。

2 抽出原理

2.1 2値型あてはめアルゴリズム

本研究で定義するあてはめアルゴリズムは、3つのステップからなっている。まず、ある論理関数を生成し、次に、誤差を計算する。これをすべての2値関数について行なった後、最小誤差の論理関数を選出する。

input: V^nの有限部分集合 $A = \{a_1,\ldots,a_m\}$ と、A の各要素に対して評価値を与える写像 $f_0 : A \to V$

step1: n 変数のすべての2値関数 $f(x_1,\ldots,x_n)$ を求める。ただし、$x \in V_2(=\{0,1\})$ である。ここで、生成するファジィ論理関数は、2値関数と1対1で対応しており、相補項を生じない。(図1参照)

step2: A のすべての元 $a_j(j = 1,\ldots,m)$ について、2値関数をファジィ論理関数とみなし、n 変数のすべての2値関数 fに代入して計算し、さらに f_0との誤差を求める。

step3: 誤差が最小となるファジィ論理関数をすべて選出する。

output: 誤差最小のファジィ論理関数

2.2 2分木

2分木は、論理関数の表現法の1つであり、論理式に対して表現が小さく、理解しやすいという利点がある[4]。図2－(a),(b)は、いずれも論理関数 $x_1x_2 \vee x_3$ を表現する2分木である。2分木は、雑誌などに良く掲載されている“性格診断のＹｅｓ－Ｎｏチャート”などと同じものであると思ってもよい。一番上の節点より始めて、丸い節点に記された変数の値が0ならば0の枝、1ならば1の枝をたどる

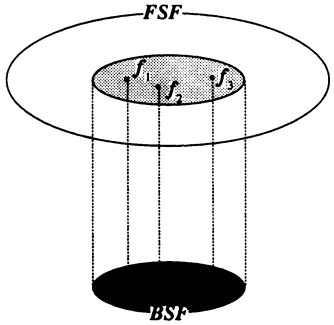


図 1: ファジィ論理関数と 2 値関数との対応

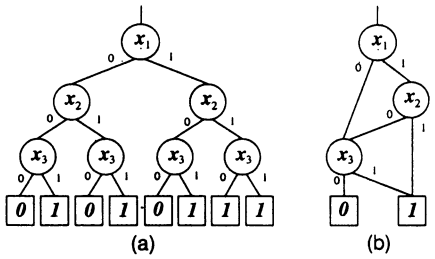


図 2: 2 分木表示

という操作を繰り返す。最終的にたどり着いた 4 角い節点に記された値が、与えられた変数の値に対する関数の値になるというものである。

2 分木中の非終端節点は、変数でラベル付けされており、変数節点と呼ばれ、終端節点は、論理値でラベル付けされており、定数節点と呼ばれる。変数の値が 0 , 1 の時たどる枝は、それぞれ 0 枝, 1 枝と呼ばれる。変数節点 vの 0 枝で指される節点を $low(v)$、1 枝で指される節点を $high(v)$ と表すことにする。節点 v が $low(v) = high(v)$ を満たすとき、v は**冗長な節点**と呼ばれる。このような節点は、図 3 − (a) のように、2 分木の表現する論理関数を変更することなく削除することができる。節点 u と v が $low(u) = low(v)$, $high(u) = high(v)$ を満たすとき、u と vは**等価である**と言われ、u と vは同一の論理関数を表現する。等価な節点の一方は、図 3 − (b) のように、2 分木の表現する論理関数を変更することなく削除することができる。このような冗長な節点と等価な節点の削除をもうこれ以上できなくなるまで繰り返す操作を**既約化**という。ここで、図 2-(a) を既約化したのが図 2-(b) である。

3 実験

3.1 実験方法

この実験の目的は、抽出した論理関数の妥当性などのシステムの有効性を確かめることである。アンケート結果より、変数 n を 4 、データ数 m を 5 0 にして、知識抽出システムに入力する。さらに、システムより出力された論理

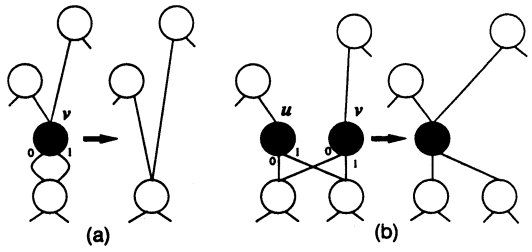


図 3: 既約形式

式を 2 分木表示し、既約化する。ここで、選んだ 4 つの質問 (n) は、アンケート結果より算出した平均、標準偏差より、選出した特徴的なものである。

表 1: 平均及び標準偏差

学部	質問項目	平均	標準偏差
文学部	1	0.65	0.25
	3	0.75	0.22
	9	0.41	0.21
	16	0.40	0.30
工学部	1	0.45	0.30
	3	0.92	0.17
	9	0.32	0.28
	16	0.54	0.29
体育学部	1	0.41	0.29
	3	0.76	0.26
	9	0.31	0.28
	16	0.40	0.34

アンケートは、表 2 に示すような質問を文学部、工学部、体育学部の 3 学部各 5 0 人に対して行った。各学部に対して、特徴的な結果が得られることを期待している。評価値は、“現在の所属学部が好きか” という質問である。ここで、“3” などの全く関係のない質問を入れたのは、論理式を抽出する上で、何らかの影響があるかどうか調べるためである。

3.2 実験結果

3.2.1 論理式表現

アンケート結果をもとに、システムより抽出した誤差が等しいファジィ論理関数は、複数存在した。その中から、各学部 1 つずつ選んだのものがファジィ論理関数 f_1, f_2, f_3 である。今回は、誤差が等しいという同条件の為、数あるファジィ論理関数の中から最も項の少ないファジィ論理関数を選出した。括弧内は、“(抽出されたファジィ論理関数) ／ (すべてのファジィ論理関数)” を示している。
(文学部) (1536/65536 個)

$$f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) =$$
$$\overline{x_1}\,\overline{x_2}\,\overline{x_3}\,\overline{x_4} \vee \overline{x_1}x_2\overline{x_3}\,\overline{x_4} \vee x_1x_2\overline{x_3}\,\overline{x_4}$$
$$\vee x_1x_2x_3\overline{x_4} \vee \overline{x_1}x_2\overline{x_3}x_4 \vee x_1x_2\overline{x_3}x_4$$

表 2: アンケートの質問内容

番号	質問項目
1	小説をよく読む
2	スポーツが好きである
3	異性に興味がある
4	毎日、新聞かニュースをみる
5	子供が好きである
6	芸術、美術に興味がある
7	約束の時間に遅れない
8	お酒が好きである
9	外国語が得意である
10	政治家になりたい
11	コツコツとやる方である
12	デートは予定を立ててから行く
13	カップラーメンが好きである
14	数式を見ると嫌気がさす
15	集団よりも、一人が好き
16	徹夜しても平気
17	体力には自身がある
18	面倒見が良い方である
19	口喧嘩が強い方である
20	東海大学が好きである

(工学部) (384/65536 個)

$$f_2(x_1,x_2,x_3,x_4) =$$
$$x_1\overline{x_2}\,\overline{x_3}\,\overline{x_4} \vee \overline{x_1}x_2\overline{x_3}\,\overline{x_4} \vee x_1x_2\overline{x_3}\,\overline{x_4}$$
$$\vee\overline{x_1}x_2x_3\overline{x_4} \vee x_1x_2\overline{x_3}x_4 \vee \overline{x_1}x_2x_3x_4$$

(体育学部) (4/65536 個)

$$f_3(x_1,x_2,x_3,x_4) =$$
$$\overline{x_1}x_2\overline{x_3}\,\overline{x_4} \vee x_1x_2\overline{x_3}\,\overline{x_4} \vee \overline{x_1}x_2x_3\overline{x_4} \vee x_1x_2x_3\overline{x_4}$$
$$\vee\overline{x_1}\,\overline{x_2}\,\overline{x_3}x_4 \vee x_1\overline{x_2}\,\overline{x_3}x4 \vee \overline{x_1}x_2x_3x_4$$

3.2.2 2 分木表示

抽出されたファジィ論理関数を 2 分木表示する。文学部の例を図 4 に示す。

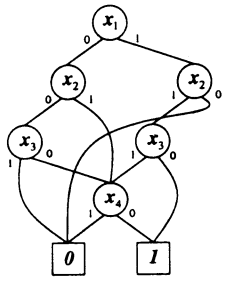


図 4: f_1の 2 分木表示

4 評価

4.1 システムの評価方法

1. 変数 n を一定にして、データ数 m を１０～５０まで１０ずつ増やして、システムに入力し、誤差及び処理速度を測定する。
2. アンケート結果より、データ数 m を一定、変数 n を１～４まで１ずつ増やした時の処理速度を測定する。

4.2 システムの評価

図 5 は、変数 n をパラメータとした時のデータ数 m に対する誤差 $error$のグラフである。グラフより明らかに $error$ は、m に比例している。また、パラメータ n が大きくなるにつれて $error$ は減少している。つまり、質問の数に対して、それに見合った理想的な人数が存在する。

図 6 は、変数 n に対する時間 t のグラフである。y軸に対して対数をとっている。ここで、ファジィ論理関数の数は変数に対して 2^{2^n}で増加することから、t を、次式で仮定する。

$$t = cm2^{2^n} \tag{1}$$

ここで、実際に測定した処理速度と, 式 (1) から算出した処理速度とを比較する。n=4 の時の t の値を用いて式 (1) に代入し定数 c を求める。次に、c が定まったらそれを式 (1) に戻す。最後に、$n = 4$ 以外の値を代入して計算する。$m = 50$ の時の結果が表 3 である。

表 3: $m = 50$ における処理速度

変数 n	実際の処理速度	算出した処理速度
1	0.070	0.022
2	1.130	0.089
3	1.170	1.437
4	367.830	—

例えば、$n = 5$ における処理速度を式 (1) から求めると、次のようになる。

$$c = \frac{t}{m2^{2^n}} = \frac{367.830}{50 \cdot 2^{2^4}} = 1.123 \cdot 10^{-4}$$
$$t = cm2^{2^n} = 1.123 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 2^{2^5}$$
$$= 2.41 \cdot 10^7\,[\text{sec}] = 279\,[\text{day}]$$

したがって、本システムでは、$n = 4$ が限界であると考られる。

処理時間は、図 7 に示すように m に対しての線形であり、n に比べて影響は少ない。

5 考察

5.1 論理式の意味及び妥当性

各学部のファジィ論理関数は、それぞれ幾つかの項から成り立っている。この項が、各学部を幾つかのタイプに分類している。例えば、文学部の第 4 項 "$x_1x_2\overline{x_3}\,\overline{x_4}$" にアンケートの質問を対応させると、"小説をよく読み、かつ、異性に興味があり、かつ、外国語が得意でない、かつ、徹夜しても平気ではない人" という、１つのタイプと解釈できる。このように、文学部は６つのタイプに分類できる。他の学部についても同様に考えることができる。

このように、知識を論理式で表すことによって、各学部に所属している人を幾つかのタイプに分類できた。この結

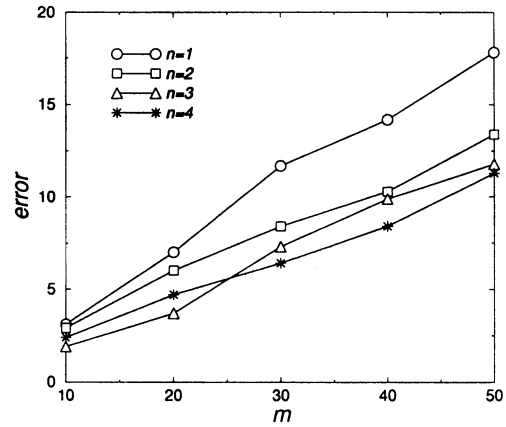


図 5: m に対する誤差

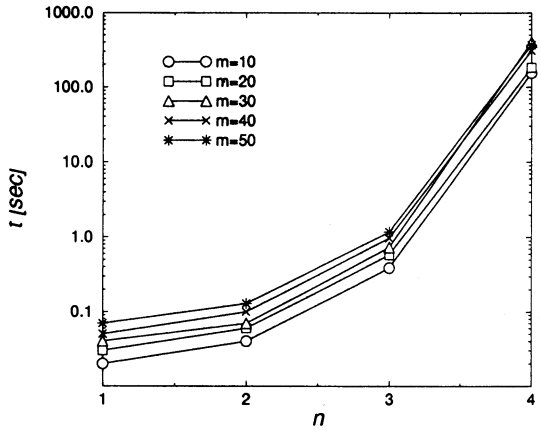


図 6: n に対する処理時間

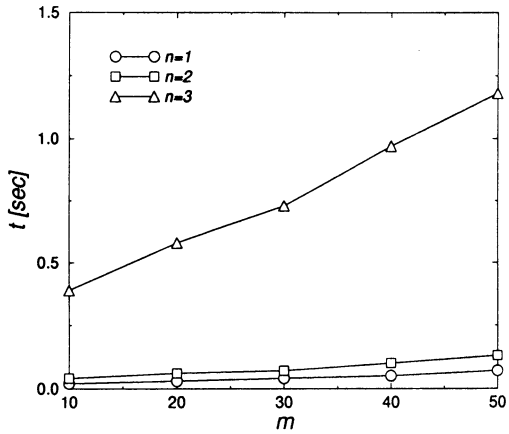


図 7: m に対する処理時間

果、ある学生に同様な質問をすることによって、“どの学部に向いているか”あるいは“どの学部に所属しているか”判断できると考える。

5.2 2分木表示の妥当性

論理式表現では、視覚的に見づらく、意味を考えないと何を表しているのか良くわからない。一方、2分木表示は、変数に意味をあてはめれば、雑誌などで良く見かける $Yes-No$ チャートと同様に考えることができ、理解しやすい。

このように、論理式表現を2分木表示することは、有効である。

6 おわりに

知識を獲得する為に、2値型あてはめアルゴリズムを定義し、それをもとにシステムを開発した。システムの有効性を確かめる為、実際にアンケートを取り、その結果をシステムに入力し、知識を抽出した。処理速度などを測り、システムを評価し、その限界を明らかにした。抽出結果より、論理式の妥当性を確かめた。さらに、抽出したファジィ論理関数を2分木表示し、その有効性を確かめた。

今後の課題としては、複数抽出されたファジィ論理関数の中でどれが最適であるか調べる問題が残されている。さらに、また、本システムでは、変数 n が4で限界であったが、変数が増加しても、短時間で処理できるシステムの開発が望まれる。

謝辞

本研究を推進するにあたり、ご討論いただいた松崎浩史氏、宮本武弘氏、陶山洋士氏に深く感謝します。

参考文献

[1] 向殿政男, ”講座ファジィ第4巻－ファジィ論理”, 日刊工業新聞社 (1993).

[2] 菊池浩明, ”評価の論理”, 第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp357-360(1993).

[3] 菊池浩明, 向殿政男, ”ファジィ論理関数の当てはめ問題－論理式による知識獲得－”, 信学論 (D-I), J77-D-I, 9, pp595-604(1994-09).

[4] 石浦菜岐佐, ”BDDとは”, 情報処理, vol.34, No.5, p585-592(1993-05).

連絡先

塚原 泰明　Email: tsuka@ep.u-tokai.ac.jp
259-12 平塚市北金目 1117
東海大学工学部電気工学科
Tel: 0463-58-1211 ext. 4025　Fax: 0463-59-4014

WA4-1

ファジィ関係方程式の解集合の性質について

Some properties on the solution set of fuzzy relation equation

今井英幸　宮腰政明　伊達惇
Hideyuki Imai, Masaaki Miyakoshi and Tsutomu Da-te
北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract

Some properties of the solution set and minimal solutions of a fuzzy relation equation are considered. In this paper, we show the necessary and sufficient condition for existence of a minimal solution of a finite fuzzy relation equation defined on infinite index sets.

1 Introduction

Let I and J be the index sets, and let $A = (a_{ij})$ be a coefficient matrix, $\boldsymbol{b} = (b_j)$ be a constant vector where $i \in I$ and $j \in J$. Then an equation

$$\boldsymbol{x} \circ A = \boldsymbol{b}, \tag{1}$$

or,

$$\bigvee_{i \in I} (x_i \wedge a_{ij}) = b_j \text{ for all } j \in J,$$

is called a fuzzy relation equation, where $\circ$, $\vee$, and $\wedge$ denote the sup-min composition, the max and the min, respectively. and all x_i, b_j, a_{ij}'s are in the interval $[0,1]$. An $\boldsymbol{x}$ which satisfies the equation (1) is called a solution of the equation (1). The solution set of a fuzzy relation equation has been investigated by many researchers [1, 3, 4, 6, 8]. Furthermore, properties of the solution set of fuzzy arithmetic equation have been also investigated [2, 7].

We recapitulate some underlying definitions and results for the equation (1).

Definition 1.1 *Let $(P, \leq)$ be a partially ordered set(poset) and $X \subset P$. A minimal element of X is an element $p \in X$ such that $x < p$ for no $x \in X$. The greatest element of X is an element $g \in X$ such that $x \leq g$ for all $x \in X$.*

In what follows, X^0 denotes the set of all minimal elements of $X \subset P$.

Definition 1.2 *Let $\boldsymbol{a} = (a_i)$ and $\boldsymbol{b} = (b_i)$ be vectors. Then the partial order $\leq$ and the inequality sign $<$ are defined as follows:*

$$\boldsymbol{a} \leq \boldsymbol{b} \Longleftrightarrow a_i \leq b_i \text{ for all } i \in I,$$

$$\boldsymbol{a} < \boldsymbol{b} \Longleftrightarrow \boldsymbol{a} \leq \boldsymbol{b} \text{ and } a_{i_1} < b_{i_1} \text{ for } \exists i_1 \in I.$$

Definition 1.3 *Let $([0,1]^I, \leq)$ be a poset with the partial order defined in Definition 1.2, and let $\mathfrak{X} \subset [0,1]^I$ be the solution set of the equation (1). The greatest element of $\mathfrak{X}$, a minimal element of $\mathfrak{X}$, and $\mathfrak{X}^0$ are called the greatest solution, a minimal solution, and a set of minimal solutions of the equation (1), respectively.*

Definition 1.4 *For $a, b \in [0,1]$*

$$a \alpha b \equiv \begin{cases} 1, & \text{if } a \leq b, \\ b, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Moreover

$$A @ \boldsymbol{b}^{-1} \equiv \left[\bigwedge_{j \in J} a_{ij} \alpha b_j \right]$$

where $\boldsymbol{b}^{-1}$ denotes the transposition of the vector $\boldsymbol{b}$.

The following theorem given by Sanchez[6] may be important.

Theorem 1 ([6])

$$\mathfrak{X} \neq \emptyset \Longleftrightarrow A @ \boldsymbol{b}^{-1} \in \mathfrak{X},$$

and then, $A @ \boldsymbol{b}^{-1}$ is the greatest solution of the equation (1).

In what follows, the greatest solution is denoted by $\hat{x}$, that is, $\hat{\boldsymbol{x}} = A @ \boldsymbol{b}^{-1}$

When the index sets I and J are both finite, the following theorem was proved by Higashi et al.[1].

Theorem 2 ([1]) *When the index sets I and J are both finite, $\mathfrak{X} \neq \emptyset$ implies $\mathfrak{X}^0 \neq \emptyset$, and then,*

$$\boldsymbol{x} \in \mathfrak{X} \Longleftrightarrow (\exists \check{\boldsymbol{x}} \in \mathfrak{X}^0)(\check{\boldsymbol{x}} \leq \boldsymbol{x} \leq \hat{\boldsymbol{x}}).$$

These two theorems show that when the index sets I and J are both finite, the solution set of the equation (1) is completely determined by the greatest solution and the set of minimal solutions. On the other hand, when the cardinalities of I and J are both infinite, few properties of minimal solutions are investigated[5]. When I is a metric compact space, the conditions for existence of the minimal solutions are also found in [8].

2 Attainable and unattainable solution

In this section, we prepare some definitions and basic properties, which are useful for consideration on minimal solutions with infinite index sets.

Definition 2.1 *The solution $x = (x_i) \in \mathfrak{X}$ is attainable for $j \in J$ if there exists $i_j \in I$ such that $x_{i_j} \wedge a_{i_j j} = b_j$, and the solution $x = (x_i) \in \mathfrak{X}$ is unattainable for $j \in J$ if $x_i \wedge a_{ij} < b_j$ for all $i \in I$.*

The set of all solutions which are attainable for $j \in J$ is denoted by $\mathfrak{X}_j^{(+)}$, and the set of all solutions which are unattainable for $j \in J$ is denoted by $\mathfrak{X}_j^{(-)}$.

Furthermore, for $J_1 \subset J$, we define as follows:

$$\mathfrak{X}_{J_1}^{(+)} \equiv \bigcap_{j \in J_1} \mathfrak{X}_j^{(+)},$$
$$\mathfrak{X}_{J_1}^{(-)} \equiv \bigcap_{j \in J_1} \mathfrak{X}_j^{(-)}.$$

Definition 2.2 *The solution $x \in \mathfrak{X}$ is called an attainable solution if x is attainable for all $j \in J$, the solution $x \in \mathfrak{X}$ is called an unattainable solution if x is $\mathfrak{X}_j^{(-)}$ for all $j \in J$, and the solution $x \in \mathfrak{X}$ is called a partially attainable solution if $x \in \mathfrak{X}$ is neither an attainable solution nor an unattainable solution. The set of all partially attainable solutions is denoted by $\mathfrak{X}^{(*)}$.*

Note that when the index sets I and J are both finite, all solutions are attainable solutions, that is, $\mathfrak{X} = \mathfrak{X}^{(+)}$ and $\mathfrak{X}^{(-)} = \mathfrak{X}^{(*)} = \emptyset$.

Remark 2.1 *Let x be the element of $\mathfrak{X}$, then*

$$(\exists j \in J)(b_j = 0) \Longrightarrow x \in \mathfrak{X}_j^{(+)}.$$

Lemma 2.1 *Let x and y be the elements of $\mathfrak{X}$.*

1. *$x \leq y$ and $x \in \mathfrak{X}_J^{(+)} \Longrightarrow y \in \mathfrak{X}_J^{(+)}$.*
2. *$x \geq y$ and $x \in \mathfrak{X}_J^{(-)} \Longrightarrow y \in \mathfrak{X}_J^{(-)}$.*

Theorem 3 *Let $\hat{x}$ be the greatest solution of the equation (1) defined in Theorem 1, then*

$$\mathfrak{X}_J^{(+)} \neq \emptyset \Longleftrightarrow \hat{x} \in \mathfrak{X}_J^{(+)}$$

Lemma 2.2 *Let x be the element of $\mathfrak{X}$, then*

$$x \notin \mathfrak{X}_J^{(+)} \Longrightarrow \#\{i \in I \mid x_i > 0\} = \infty,$$

where $\#\{\cdot\}$ denotes the cardinality of the set $\{\cdot\}$.

3 Minimal Solution

In this section, we show the necessary and sufficient condition for existence of a minimal solution of a finite fuzzy relation equation defined on infinite index sets.

Definition 3.1

$$I_j^1 \equiv \{i \in I \mid a_{ij} > b_j\},\ I_j^2 \equiv \{i \in I \mid a_{ij} = b_j\},$$
$$I_j^3 \equiv \{i \in I \mid a_{ij} < b_j\}.$$

Lemma 3.1

$$\mathfrak{X}_j^{(+)} = \bigcup_{k \in I_j^1 \cup I_j^2} [\check{x}_j(k), \hat{x}_j],$$

where $\hat{x}_j = (\hat{x}_{ji})$ and $\check{x}_j(k) = (\check{x}_{ji}(k))$ are defined as follows:

$$\hat{x}_{ji} = \begin{cases} b_j, & \text{if } i \in I_j^1, \\ 1, & \text{if } i \in I_j^2 \cup I_j^3, \end{cases} \qquad \check{x}_{ji}(k) = \begin{cases} b_j, & \text{if } i = k, \\ 0, & \text{if } i \neq k. \end{cases}$$

Lemma 3.2 *If J is a finite set and $\mathfrak{X}_J^{(+)}$ is a nonvoid set, there exists at least one minimal solution $x_0 = (x_{0i}) \in \mathfrak{X}_J^{(+)}$. Moreover, the cardinality of $\{i \in I \mid x_{0i} > 0\}$ is finite.*

Lemma 3.3 *If x is the element of $\mathfrak{X}^{(-)}$, there exists $y \in \mathfrak{X}^{(-)}$ with $x > y$.*

Lemma 3.4 *If J is a finite set,*

$$\mathfrak{X}^0 \cap \mathfrak{X}^{(*)} = \emptyset.$$

By Lemmas 3.2, 3.3, and 3.4, we obtain the following theorem.

Theorem 4 *Let $\hat{x}$ be the greatest solution of the equation (1) defined in Theorem 1. If J is a finite set,*

$$\hat{x} \in \mathfrak{X}_J^{(+)} \Longleftrightarrow \mathfrak{X}^0 \neq \emptyset.$$

References

[1] M. Higashi and G. J. Klir. Resolution of finite fuzzy relation equations. *Fuzzy Sets and Systems*, 13:65 – 82, 1984.

[2] M. F. Kawaguchi and T. Da-te. A calculation method for solving fuzzy arithmetic equations with triangular norms. Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems. San Francisco, (1993) 470 – 476.

[3] M. Miyakoshi and M. Shimbo. Sets of solution – set – invariant coefficient matrices of simple fuzzy relation equations. *Fuzzy Sets and Systems*, 21:59 – 83, 1987.

[4] M. Miyakoshi and M. Shimbo. Sets of solution-set equivalent coefficient matrices of fuzzy relation equations. *Fuzzy Sets and Systems*, 35:357 – 387, 1990.

[5] 宮腰政明, 今井英幸, 伊達悼. ファジィ関係方程式の極小解の集合の性質. 北海道大学工学部研究報告, 167:1–10, 1994.

[6] E. Sanchez. Resolution of composite fuzzy relation equation. *Information and Control*, 30:38 – 48, 1976.

[7] E. Sanchez. Solution of fuzzy equations with extended operations. *Fuzzy Sets and Systems*, 12:237 – 248, 1984.

[8] M. Wagenknecht and K. Hartmann. On the existence of minimal solutions for fuzzy equations with tolerances. *Fuzzy Sets and Systems*, 34:237 – 244, 1990.

連絡先：

〒 060 札幌市北区北 13 西 8
北海道大学工学部情報工学科
今井英幸
TEL:011-706-6809
FAX:011-706-7830
e-mail:imai@huie.hokudai.ac.jp

WA4-2

ファジィ直線の定義への考察
Approach to Definition of Fuzzy Straight Line

劉 偉傑　　菅野道夫
Liu Wei Jie　　Sugeno Michio

東京工業大学 システム科学専攻
Department of Systems Science, Tokyo Institute of Technology

Abstract : In the paper,the fuzziness of a set with gray level points is examined when the set being described with its fitting straight line. To evaluate the difference between the set and the fitting straight line, several statistical and morphological indexes are considered and the results compared with a questionnaire result of human beings. It's showed that it's difficult to use the usual statistical and morphological indexes to represent the fuzziness of the evaluation of human beings to a straight line. It's also showed that the morphological indexes that we developed in the paper have better performance than the statistical ones.

1　はじめに

画像理解の研究において、識別しようとする物体の形状を描くモデル（物体モデル）と、画像から抽出されたエッジ図形のような画像を記述するモデル（画像モデル）が共に必要である。識別とは、この二つのモデルをマッチングすることだとも言える。識別しようとする物体が限定されない場合、物体モデルが常に定性的に、つまり人間のように言葉で表される。この中で、よく使っている言葉の一つが「直線」である。しかし、ここでの「直線」が数学上で厳密に定義された「直線」の意味とは限らない。「直線みたい」または「大体直線」などのファジィな意味も含まれている。だから、画像モデルをエッジ図形と記述し、そして、物体モデルとマッチングするために、このようなファジィな意味が理解できなければいけない。本論文では「ファジィ直線」を用いてこの意味を描写したいと思う。具体的に、エッジ図形のどのようなセグメントが直線で近似できるか、どの程度の直線であるか、もし直線で近似したら、後でより高いレベルの図形性質（例えば、並行性）の抽出に対してどんな影響を与えるかなど色々な問題がある。本論文で、エッジ図形のセグメントがどの程度直線で近似できるかということを検討したい。

ファジィの手法を用いて物体の形状を記述する研究があるが[5]、処理できるエッジ図形が理想的なチェーンコードで表現できる場合に限る。つまりエッジ図形（あるいは一つ一つのセグメント）の全画素点（点集合）が滑らかな単一的順番に揃えられて、角度の変化率などの数値が計算できるエッジ図形に限る。しかし、画像から抽出されたエッジ図形はほとんどこの要求を満たさない。

一方、従来、点集合を直線または特定の曲線にフィッティングする統計方法がある。点集合とフィッティングされた線の間の誤差を測るには、分散などの数値（統計数値と呼ぶ）がある。しかし、本研究を行なうにあたって、これらには基本的に三つの欠点があると考える。1、これらの統計数値と人間の直線への認識との関係がはっきり言えない、つまりこれらの統計数値とファジィ直線のメンバーシップとの関係がまだ検討されていない；2、画像から抽出されたエッジ図形が実際にグレーレベル図形と見られるはずである[6]。このグレーレベルが人間の認識にどの程度影響を加えるかまだ検討されないが、これらの統計数値の計算式にグレーレベルを直接に用いるのは難しい；3、これらの統計数値では点とフィッティングされた直線との距離の分布を考えたが、直線に沿う方向の点の分布は基本的に考えていない。

この2と3という欠点を考えて、統計数値より適当な数値が存在するだろうか。直観的な考えであるが、グレーレベル点集合のグレーレベルや点の分布を統合して考えるには、ファジィ幾何学（fuzzy geometry）という研究[4]の基本的な概念としてファジィ集合の面積が適当な一つだと思う。それに、グレーレベル点集合を他のグレーレベル点集合によって拡張したり縮小したりすることに関してファジィ形態学（fuzzy morphology）という研究がある[1]。グレーレベル点集合とフィッティングされた直線を共にある程度拡張してから、差集合の面積を両方の違いを測る数値として用いてはどうだろうか。本論文でファジィ幾何学とファジィ形態学の基本的な概念に基づく測る数値を形態数値と呼ぶ。

他に、本論文を実際に応用する時、関連のあるもう二つの概念も少し説明したい。つまり図形の基本的な構成セグメント（例えば、直線）を抽出するには、従来から、Hough 変換とクラスタリングという方法がある。これらの方法のファジィバージョンもすでに提出された。つまり、ファジィHough 変換[2]と FCM（最近は FCS[3]）という方法である。これらの方法で、図形を構成するセグメントの数を決めるために、分割された点集合あるいは一つ一つのクラスタリングの有効性、例えばどの程度直線であるかを検討しなければならない。しかし、今まで統一的で有効な検討数値と見られるものはなさそうである。それに、Hough 変換は全図形の幅で直線を探すので、図形を有意義的にセグメントするのはあまり有効ではないと考えている。それからの応用を考えて、本論文は Hough 変換による直線の検討を行なわない。FCS は最近随分論文が出てきたが、クラスタリングの有効性を検討する数値は基本的にクラスタ間の相互関係に基づく。本論文は人間の直線への認識と評価数値を検討したい ので、独立したクラスタ（セグメント）しか考えない。本論文では FCS の有効性の検討数値にも触れない。ただし、本論文の結果を参照して、FCS の有効性の検討に新しい数値を導入できないかと思っている。

本論文の構成は、節 2 で統計数値と形態数値を説明する。節 3 は人間の直線への認識に対するアンケート結果と統計数値や形態数値の計算結果の比較である。節 4 が結論である。

2 統計数値と形態数値の計算式

点集合と点集合からフィッティングされた直線の誤差を測る数値を紹介する。

グレーレベル点集合 P が

$$P = \{(p_j, g_j), j = 1, 2, ..., N\} \tag{1}$$

で表す。ただし、p_iが点の座標を表して、g_iが点のグレーレベルを表す。

グレーレベルを考えない場合、点集合をブレックレベル点集合と呼ぶ。特に、グレーレベル点集合 P のグレーレベルにしきい値 q を設置して、グレーレベルがしきい値以下の点を全部取り消して、残った点のグレーレベルも考えないようにすれば、一つのブレックレベル点集合になる。このブレックレベル点集合を P_qで表す。

2.1 統計数値

統計数値の計算は基本的にブレックレベル点集合しか計算できない。グレーレベル点集合 P から得られたブレックレベル点集合 P_q を整理して、以下のように

$$Q = \{(q_i), i = 1, 2, ..., M\} \tag{2}$$

記述する。ブレックレベル点集合 Q は最小二乗法で回帰直線にフィッティングできる。この直線も一つのブレックレベル点集合と見ら、ここでは S によって表す。ブレックレベル点集合 Q と直線 S との偏差を表現する数値は色々な計算式と変形があるが、本論文で、主に以下の三つを検討する。

$$S_1 = \sum_{i=1}^{M} d_i^2 \tag{3}$$

$$S_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} d_i^2 \tag{4}$$

$$S_3 = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^{M} d_i^2 \tag{5}$$

ただし、d_iは点 q_iと直線 S との距離で、lは直線 S の長さである。

2.2 形態数値

まずグレーレベル点集合の面積の概念を定義する。

定義 1（グレーレベル点集合の面積）：グレーレベル点集合の面積を全点のグレーレベルの和と定義する。面積を A で表せば

$$A(P) = \sum_{i=1}^{N} g_i \tag{6}$$

になる。ただし、P は式（1）と同じである。

次に、本論文で使いたいファジィ形態学の概念を簡単に解説する。

定義 2（拡張演算子）：一定の形を持つグレーレベル点集合

$$E_c = \{(p_j, g_j^c) | g_j^c = f(p_j - p_c, g_c), j = 1, 2, ..., J\} \tag{7}$$

を拡張演算子と定義する。ただし、p_cを E_cの中心点と呼ぶ。点 p_jのグレーレベルが p_jと p_cとの相対位置及び g_cで関数 f によって決められる。

定義 3（点の拡張演算）：点 p_iの E_cによる拡張演算は p_iを E_cの中心点にして得られる点集合である。p_i^Eで表す。

定義 4（点集合の拡張演算）：グレーレベル点集合の拡張演算を点の拡張演算の和集合と定義する。式で表すと

$$P^E = \bigcup_{i=1}^{N} p_i^E \tag{8}$$

になる。ただし、ある点 p_jのグレーレベルは

$$g_j = \bigvee_{i=1}^{N} g_j^i \tag{9}$$

で求める。

本論文で形態数値を使う時、まずグレーレベル点集合Pから、適当なブレックレベル点集合P_qを求めて、そして、P_qによってフィッティング直線Sを計算する。それから、PとSを共に拡張演算子Eで拡張演算を行なって、P^EとS^Eのグレーレベルの違いを測る。具体的に、ケース1（G1、B1対応）では拡張演算子Eの形を点にする、つまり拡張しないのである。同時に、グレーレベルとブレックレベルの区別を考察するために、G1数値がグレーレベル点集合を用いたものであり、B1がブレックレベル点集合を用いたものである。ケース2（G2、B2対応）では拡張演算子Eの形を正方形にする、つまり点p_iを中心点として、p_iによる点p_jのグレーレベルを

$$g_j^i = (1 - \frac{d}{\bar{d}})g_i \tag{10}$$

で計算する。ただし、dが点p_jと点p_iのブロック距離で、$\bar{d}$が適当な定数である。ケース1と同じように、G2とB2がある。

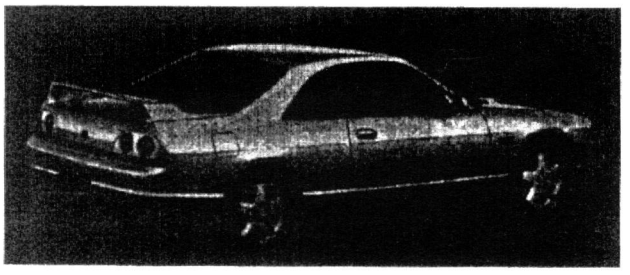
点集合の拡張演算によってP^EとS^Eが得られてから、

$$MOR = \frac{A(|P^E - S^E|)}{l^2} \tag{11}$$

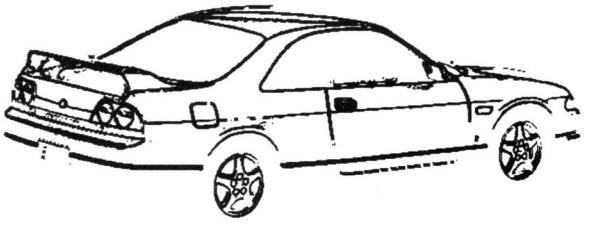
を用いて形態数値を求める。ただし、lが直線の長さである。

3 実験と結果

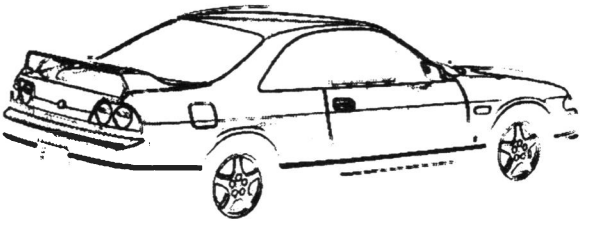
図1（a）が実験用元画像（６１７ｘ２６６）である。図1 (b)と図1（c）がSobelフィルターを用いて抽出されたエッジ図形である、ただし、(b）は全画素点のグレーレベルによって、最大の１０パーセントをエッジ点として、かつ最大グレーレベル（６５５３５）と最小グレーレベル（０）しか使わないエッジ図形である。(c）は全画素点の１５パーセントをエッジ点として、中には最大の5パーセントが最大グレーレベルで、5パーセントから１５パーセントまでの点が線形関数によって、最大グレーレベルから最小グレーレベルに変換されたものである。このように点のグレーレベルがエッジに所属するメンバーシップとも見られる。図1（d）は（c）から抽出された１０本のセグメントである。これを１０個のグレーレベル点集合と設定する。



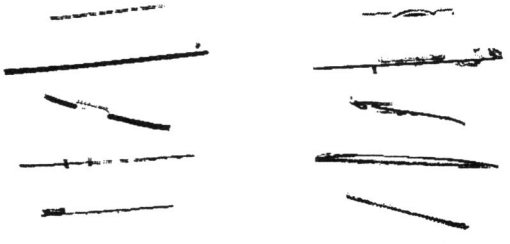
(a)



(b)



(c)



(d)

図1 (a) 実験用元画像 (b) 抽出されたブッレクレベルエッジ図形 (c) 抽出されたグレーレベルエッジ図形 (d) アンケート用セグメント

一方、人間の直線への認識を調べるために、図1（d）に対して、19人にアンケートをした。アンケートの問題は図の中の１０本のセグメントはどの程度直線と表現できるかというものである。答えは0から5までの数値にする。0は絶対直線でない場合に応じて、5は絶対直線である。

アンケートの結果が表1に示されている。順番は図1 (d) の左側の五つが上から順に1から5まで、右側がそれぞれ6から１０までである。

表1 アンケートの結果

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.0	4.3	1.7	3.4	3.4	1.8	3.2	1.4	1.9	2.9

表2が統計数値の計算結果である。実際の数値から線形変換して1.4から4.0までになった。S1、S2、S3がそれぞれ式(3)(4)(5)に応じる。

表2 統計数値の計算結果

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S1	4.3	3.1	3.3	4.1	4.0	4.1	1.4	3.3	1.9	4.2
S2	4.2	3.7	3.1	3.7	3.6	3.4	1.4	2.7	1.5	4.3
S3	4.3	3.3	2.8	4.1	3.9	3.9	1.4	2.6	1.8	4.2

表3が形態数値の計算結果である。

表3 形態数値の計算結果

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G1	2.9	2.4	1.4	4.3	3.2	2.0	2.2	1.9	1.6	3.6
B1	3.0	2.6	1.5	4.3	3.0	1.9	2.2	1.9	1.4	3.4
G2	3.0	3.6	1.6	4.3	3.2	1.7	2.7	1.4	2.2	2.6
B2	3.5	3.5	1.4	4.3	3.4	2.5	2.9	1.8	2.6	3.5

以上の結果によって、統計数値でも形態数値でも人間の認識とは予想以上の偏差があるということが見られた。

アンケートの結果を標準として、以上の方法の平均二乗誤差が表4に示された。

表4 計算結果の比較

方法	S1	S2	S3	G1	B1	G2	B2
誤差	1.85	1.19	1.38	0.75	0.65	0.33	0.26

以上の結果によって、本論文の提案された形態数値が従来の統計数値よりいい結果が得られた。

4 結論

本論文で、グレーレベル点集合をどの程度直線で近似できるかということを検討した。点集合とフィッティングされた直線との偏差を評価するために、統計数値と形態数値を用いた。これらの数値の計算結果を人間の認識のアンケート結果と比較した。結論として、本論文の提案された形態数値が従来の統計数値よりいい結果が得られる。ただし、従来の統計数値を用いた場合も形態数値を用いた場合も人間の直線への認識とは予想以上の偏差があるということが明かになった。

5 参考文献

[1] I.BLOCH, etc., "Constructing a fuzzy mathematical morphology:alternative ways", FUZZ-IEEE'93, pp.1303-1308

[2] J.H.Han, etc., "Fuzzy Hough transform", FUZZ-IEEE'93, pp.803-808

[3] R.Krishnapuram, etc., "Fuzzy and possibilistic shell clustering algorithms and their application to boundary detection and surface approximation", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.3, No.1, Feb.1995, pp.29-60

[4] S.K.Pal, etc., "Fuzzy geometry in image analysis", Fuzzy Sets and Systems 48(1992), pp.23-40

[5] 廣田 薫 他、ファジィ画像処理、日刊工業新聞社

[6] 森 俊二 他、画像認識の基礎、オーム社

問い合わせ先：〒226
横浜市 緑区 長津田町 4259
東京工業大学システム科学専攻
菅野研究室 劉 偉傑
Tel 045-924-5645
Email: liu@sys.titech.ac.jp

WA4-3

除外のルールを用いた合成ファジィ関係式の一解法

Solution of the Composite Fuzzy Relation-Equations Using Rule of Exclusion

宮城　隼夫　　登川　誠　　山下　勝己
Hayao Miyagi　　Makoto Noborikawa　　Katsumi Yamashita
琉球大学工学部
Faculty of Engineering, Ryukyu University

Abstract : Since the notion of fuzzy relation equations and the way to solve the fuzzy relation equations were proposed by Sanchez , a number of researches about the way to solve the fuzzy relation equations have been reported . The problem to solve the fuzzy relation equations is found to be interesting and important theme in applications of fuzzy theory .

This paper proposes a way to solve the Sup･min or Inf･max composite fuzzy relation equations using rule of exclusion . The proposed method can exclude fuzzy relation sets which can not represent the given fuzzy system , and thus , the method is useful for practical applications .

1. はじめに

入出力がファジィ集合で与えられるシステムは，ファジィ関係式によって記述されることが多い．そのなかで，Sanchez はファジィ関係式の概念と関係式のなかに未知の集合が存在する場合に，それを求める解析的手法を与えた[1]．この手法は，ファジィシステムの解析，実現において重要であり，これまでいくつかの研究成果が提示されている[2]-[6]．

本報告では，ファジィシステムの定式化に際し，従来多く用いられている Sup･min 合成および Inf･max 合成のそれぞれの演算式に対して，演算式の解となるファジィ関係を求める方法を提案する．本解法は，与えられたシステムの出力を区間値で表した演算式の解法である．区間値表現は，通常のファジィ数のみのシステムよりも応用面において柔軟性に富んでいると考えられる[4]．また，システムを表現できないファジィ関係が存在する場合，そのようなファジィ関係を事前に効率よく取り除くためのルールとして，除外のルールを提案する．

2. 問題の記述

ここでは，ファジィ関係式の定義を述べ，また本報告で扱う Sup･min 合成および Inf･max 合成ファジィ関係式を示す．

＜定義＞： ファジィ集合 x ファジィ関係 r との Sup･min 合成（○合成）および Inf･max 合成（△合成）ファジィ関係式は以下のように定義される．

$$(x \circ r) = \sup_{x \in X}\left[\min(x, r)\right] \tag{1}$$

$$(x \triangle r) = \inf_{x \in X}\left[\max(x, r)\right] \tag{2}$$

ただし，Sup，Inf，max，min はそれぞれ上限，下限，最大，最小を表す．

本報告で扱う Sup･min 合成および Inf･max 合成ファジィ関係式は次式のように記述される．

$$X \circ \overset{\vee}{r} = [y] \tag{3}$$

$$X \triangle \hat{r} = [y] \tag{4}$$

ただし，

$$X = [x_1, x_2, \cdots, x_m]^{\mathrm{T}}$$

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in}]$$

$$y = \left[[\underline{y_1}, \overline{y_1}], [\underline{y_2}, \overline{y_2}], \cdots, [\underline{y_m}, \overline{y_m}]\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\overset{\vee}{r} = \left[\overset{\vee}{r_1}, \overset{\vee}{r_2}, \cdots, \overset{\vee}{r_m}\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\hat{r} = \left[\overset{\wedge}{r_1}, \overset{\wedge}{r_2}, \cdots, \overset{\wedge}{r_m}\right]^{\mathrm{T}}$$

T は転置を表す．

ここでは，式(3)，(4)それぞれにおいて，$X, [y]$ を既知とし，未知の $\overset{\vee}{r}, \hat{r}$ を求める問題を考える．

3. 合成ファジィ関係式の解法

3.1. Sup･min 合成ファジィ関係式の解法

式(3)を満足するすべての解を求めるには，次に示すルールを順に追っていくアルゴリズムに従えばよい．

[ルール 1.1]　（行列 M の作成）

行列 X の (i, j) 要素に対して，以下のように行列 M の各要素を定める．

$$\begin{cases} m_{ij} = [\underline{y_i}, \overline{y_i}] & \text{if} \quad x_{ij} > \overline{y_i} \\ m_{ij} = [\underline{y_i}, 1] & \text{if} \quad \overline{y_i} \geq x_{ij} \geq \underline{y_i} \\ m_{ij} = \varphi & \text{if} \quad x_{ij} < \underline{y_i} \end{cases}$$

ただし，$\varphi = [0, 1]$ ，　$i = 0, 1, \cdots, m$ ，$j = 0, 1, \cdots, n$

［ルール 1.2］（除外のルール）

$$\overline{y_p} \geq \underline{y_q} \tag{5}$$

$$\text{for all } p \in \boldsymbol{P}, q \in \boldsymbol{Q}$$

ただし，$\boldsymbol{P} = \left\{ p \mid x_{ps} > \overline{y_p} \right\}$, $\boldsymbol{Q} = \left\{ q \mid \overline{y_q} \geq x_{qs} \geq \underline{y_q} \right\}$

ここで，式(5)の条件が満たされない場合，m_{qs} を φ と置き換える．このとき，ある行の要素がすべて φ となれば，式(3)の関係式は解が存在しない．したがって，そのような式は解なしとして除外する．φ 以外の要素が各行に一つ以上存在する場合，そのような要素を各行に一つずつ配列されるようにし，その配列された要素以外を φ と置き換える操作を行う．この操作を要素の組み合わせの数だけ繰り返し，行列 $\boldsymbol{M}_t$ を作成する．

［ルール 1.3］（行列 $\boldsymbol{C}$ の作成）

行列 $\boldsymbol{X}$ の (i, j) 要素に対して，以下のように行列 $\boldsymbol{C}$ の各要素を定める．

$$\begin{cases} c_{ij} = \left[0, \overline{y_i} \right] & \text{if} \quad x_{ij} > \overline{y_i} \\ c_{ij} = \varphi & \text{if} \quad x_{ij} \leq \overline{y_i} \end{cases}$$

［ルール 1.4］（解の作成）

行列 $\boldsymbol{M}_t$ と行列 $\boldsymbol{C}$ について以下の演算を行うことにより，行列 $\boldsymbol{W}_t$ を作成する．

$$\boldsymbol{W}_t = \boldsymbol{M}_t \cap \boldsymbol{C} \tag{6}$$

その後，求めた行列 $\boldsymbol{W}_t$ の各列について積集合を取ることにより解を求める．

3.2. Inf･max 合成ファジィ関係式の解法

式(4)を満足するすべての解を求める方法は，次に示すルールを順に追っていくアルゴリズムとして与えられる．

［ルール 2.1］（行列 $\boldsymbol{L}$ の作成）

行列 $\boldsymbol{X}$ の (i, j) 要素に対して，以下のように行列 $\boldsymbol{L}$ の各要素を定める．

$$\begin{cases} l_{ij} = \left[\underline{y_i}, \overline{y_i} \right] & \text{if} \quad x_{ij} < \underline{y_i} \\ l_{ij} = \left[0, \overline{y_i} \right] & \text{if} \quad \overline{y_i} \geq x_{ij} \geq \underline{y_i} \\ l_{ij} = \varphi & \text{if} \quad x_{ij} > \overline{y_i} \end{cases}$$

［ルール 2.2］（除外のルール）

$$\underline{y_p} \leq \overline{y_q} \tag{7}$$

$$\text{for all } p \in \boldsymbol{P}, q \in \boldsymbol{Q}$$

ただし，$\boldsymbol{P} = \left\{ p \mid x_{ps} < \underline{y_p} \right\}$, $\boldsymbol{Q} = \left\{ q \mid \overline{y_q} \geq x_{qs} \geq \underline{y_q} \right\}$

ここで，式(7)の条件が満たされない場合，l_{qs} を φ と置き換える．このとき，ある行の要素がすべて φ となる場合，式(4)の関係式は解が存在しない．したがって，そのような式は解なしとして除外する．φ 以外の要素が各行に一つ以上存在する場合，そのような要素を各行に一つずつ配列されるようにし，その配列された要素以外を φ と置き換える操作を行う．この操作を要素の組み合わせの数だけ繰り返して，行列 $\boldsymbol{L}_t$ を作成する．

［ルール 2.3］（行列 $\boldsymbol{C}$ の作成）

行列 $\boldsymbol{X}$ の (i, j) 要素に対して，以下のように行列 $\boldsymbol{C}$ の各要素を定める．

$$\begin{cases} c_{ij} = \left[0, \overline{y_i} \right] & \text{if} \quad x_{ij} < \underline{y_i} \\ c_{ij} = \varphi & \text{if} \quad x_{ij} \geq \underline{y_i} \end{cases}$$

［ルール 2.4］（解の作成）

行列 $\boldsymbol{L}_t$ と行列 $\boldsymbol{C}$ について以下の演算を行うことにより，行列 $\boldsymbol{W}_t$ を作成する．

$$\boldsymbol{W}_t = \boldsymbol{L}_t \cap \boldsymbol{C} \tag{8}$$

その後，求めた行列 $\boldsymbol{W}_t$ の各列について積集合を取ることにより解を求める．

4. おわりに

本報告では，システムの出力を区間値で表したファジィ関係式のそれぞれに対して，未知のファジィ関係を求める方法を提案した．本解法によれば，除外のルールにより，システムを表現できないファジィ関係を取り除くことができる．また，容易に解を求めることができる解法であるため，ファジィエキスパートシステム，意思決定問題等の具体的問題への応用がたやすくなる．

参考文献

[1] E.Sanchez：Resolution of Composite Fuzzy Relation Equations, Information and Control 30, 38-48 (1976)

[2] 塚本・田代：Fuzzy 逆問題の解法，計測自動学会論文集，第 15 巻，第 1 号，21-25 (1979)

[3] 大里・関口：凸結合された Sup･min-Inf･max 合成 Fuzzy 関係式の解法，計測自動学会論文集，第 19 巻，第 3 号，212 - 219(1983)

[4] 韓・関口：ファジィ関係不等式の一解法，日本ファジィ学会誌，Vol. 4，No. 4，710 - 721 (1992)

[5] 韓・関口：符号行列によるファジィ関係式の解法，日本ファジィ学会誌，Vol. 4，No. 1，160 - 171 (1992)

[6] 韓・関口・高橋：ファジィ関係逆問題における解の存在性判別，日本ファジィ学会誌，Vol. 5, No. 5, 1142 - 1154 (1993)

連絡先：〒903-01　沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地
琉球大学工学部電気・情報工学科
登川　誠
℡ 098-895-2221　（内線）3263

不完全記述多値クリーネ関数の存在条件

Identification of Incompletely Specified Multiple-Valued Kleenean Functions

高木 昇
Noboru Takagi
富山県立大学工学部電子情報工学科
Dept. Electronics and Informatics
Toyama Prefectural University

菊池 浩明
Hiroaki Kikuchi
東海大学工学部電気工学科
Dept. Electrical Engineering
Tokai University

中島 恭一
Kyoich Nakashima
富山県立大学工学電子情報工学科
Dept. Electronics and Informatics
Toyama Prefectural University

向殿 政男
Masao Mukaidono
明治大学理工学部情報科学科
Dept. Computer Science
Meiji University

Abstract: An n-variable multiple-valued Kleenean function is defined as a function from $[0,1]^n$ to $[0,1]$ represented by a logic formula, which is a finitely application of n variables, any constants of $[0,1]$ and three kinds of logic operations. The set of multiple-valued Kleenean functions is not functionally complete for functions $f:[0,1]^n \to [0,1]$. Therefore, for any given incompletely specified function, it is not always to exit the multiple-valued Kleenean function representing it. In this paper, we will show a necessary and sufficient condition for an incompletely specified function to represent a multiple-valued Kleenean function, and moreover show an algorithm to derive the logic formula representing the multiple-valued Kleenean function if it exit.

1 はじめに

あいまいさを数量的に取り扱う一つの試みとしてファジィ集合の概念が提案され, 現在その応用が盛んに行われている. ファジィ集合を表現している多値論理体系はファジィ論理であり, その代数的性質はファジィ論理関数の基で, 数多くのことが明らかにされている [3], [4], [5].

ファジィ論理関数とは, n 個の変数, 3 種類の演算子及び定数 0, 1 から構成される論理式が表現する関数である. 本文ではファジィ論理関数の論理式に $[0,1]$ の任意の実数値を認めた多値論理関数 (多値クリーネ関数)[1], [2], [7] について述べる. なお, 多値クリーネ関数は, 1/2 をあいまいな状態を表す真理値として解釈したときに意味を持つような, しかも真または偽の度合を表現できるような多値論理関数である.

最近, いくつかの入出力データの組みから, これらのデータを満足するようなファジィ論理関数を導出する研究が行われている [6]. このような研究は, 与えられた入出力データを論理式のレベルで表現をし, 我々の自然言語に比較的近い状態で知識表現が行えるという点において, 極めて意義のあることといえる. しかしながらファジィ論理関数は $[0,1]^n$から $[0,1]$ への写像全体の内, かなり限られた部分しか表現することができず [3], [4], 実際には与えられた入出力データを表現できる論理式 (ファジィ論理関数) が導出できることは稀れである. そこで, 本文ではファジィ論理関数よりも表現力が豊かである多値クリーネ関数の論理式を用いての知識表現を試みる. つまり, $[0,1]^n$の有限部分集合 A から $[0,1]$ への任意の関数 $f:A \to [0,1]$ が与えれたとき, A の任意の元$\boldsymbol{a}$に対して $f(\boldsymbol{a}) = f_k(\boldsymbol{a})$ であるような多値クリーネ関数 f_kが存在するための必要十分条件を与え, かつ存在するならばその一つの論理式を導出するアルゴリズムを示す.

2 多値クリーネ関数及び諸定義

本節では, まず多値クリーネ関数の定義を与え, 次いでいくつかの基本的な性質について述べる.

真理値の集合を 0 から 1 の閉区間 $[0,1]$ で与え, これを記号 Vで表す. このとき, 2 値論理における論理演算 AND($\wedge$),OR($\vee$) 及び NOT($\sim$) を以下のようにして集合 Vにまで拡張定義する.

$$x \wedge y = \min(x,y), \quad x \vee y = \max(x,y), \quad \sim x = 1 - x.$$

但し, $x, y \in V$.

n 変数の多値クリーネ関数 fとは, 変数 $x_1, \ldots, x_n$, V の任意の定数及び論理演算$\wedge$, $\vee$, $\sim$の有限回の結合により構成される論理式が表現する V^nから Vへの写像 ($f : V^n \to V$) である.

本文では, 特に断りのない限り一般の n 変数について議論をするので, このことはしばしば省略されることがある. また, 特に誤解のない限りにおいては論理式とそれが表現する多値クリーネ関数とを同一視する. 更に, 括弧の省略のため演算子の間に強弱関係を設け, NOT($\sim$), AND($\wedge$), OR($\vee$) の順に左の方ほど強いこととする. また, AND($\wedge$) はしばしば省略される.

次に, 真理値の集合 Vにあいまいさの半順序関係$\succ$ [3], [4] を定義する.

定義 1 a, b を Vの任意の元とする. このとき, $a \succ b$ であるのは $b \geq a \geq 0.5$ または $0.5 \geq a \geq b$ であるとき及びその時に限る. また, 関係$\succ$は V^nの元にまで以下のようにして拡張定義される. 即ち, $\boldsymbol{a} = (a_1, \ldots, a_n)$, $\boldsymbol{b} = (b_1, \ldots, b_n)$ を V^nの任意の元とするとき, $\boldsymbol{a} \succ \boldsymbol{b}$であるのは任意の i について $a_i \succ b_i$であるとき及びそのときをいう.//

あいまいさの半順序関係$\succ$に関しての上限を $\mathrm{lub}_{\succ}$で表すことにする. つまり, B を Vの任意の部分集合としたとき, $\mathrm{lub}_{\succ} B$は集合 Bでの関係$\succ$についての上限を表すものとする.

変数 x_iまたはその否定$\sim x_i$を文字と呼ぶ. ある文字とその否定とを同時に含まないような幾つかの文字の積 (AND) を単項, 少なくとも一つの変数についてその肯定及び否定の文字を同時に含むような幾つかの文字の積を相補項と呼ぶ. 全ての変数が存在している単項及び相補項を, それぞれ最小項及び相補最小項と呼ぶ.

単項及び相補最小項と集合 $\{0, 0.5, 1\}$ の対応を次のように定義する. 但し, 以下において $V_3 = \{0, 0.5, 1\}$, $V_2 = \{0, 1\}$ である.

定義 2 V_3^nの元 $\boldsymbol{a} = (a_1, \ldots, a_n)$ と単項 $\alpha = x_1^{a_1} \wedge \ldots \wedge x_n^{a_n}$ は任意の i に対して, $a_i = 0$ ならば $x_i^{a_i} = \sim x_i$, $a_i = 0.5$ ならば $x_i^{a_i} = 1$, または $a_i = 1$ ならば $x_i^{a_i} = x_i$であるとき, 及びそのときに限り互いに対応しているという.//

定義 3 $V_3^n - V_2^n$の元 $\boldsymbol{a} = (a_1, \ldots, a_n)$ と相補最小項 $\beta = x_1^{a_1} \wedge \ldots \wedge x_n^{a_n}$は任意の iに対して, $a_i = 0$ ならば $x_i^{a_i} = \sim x_i$, $a_i = 0.5$ ならば $x_i^{a_i} = x_i \sim x_i$, または $a_i = 1$ ならば $x_i^{a_i} = x_i$であるとき, 及びそのときに限り互いに対応しているという.//

定理 1 [1] fを多値クリーネ関数, $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$を V^nの任意の元とする. このとき, $\boldsymbol{a} \succ \boldsymbol{b}$ならば $f(\boldsymbol{a}) \succ f(\boldsymbol{b})$ である.//

定理 2 [1] g, h を多値クリーネ関数とする. V_3^nの任意の元$\boldsymbol{a}$において $g(\boldsymbol{a}) = h(\boldsymbol{a})$ であるとき, 及びそのときに限り V^nの任意の元$\boldsymbol{a}$において $g(\boldsymbol{a}) = h(\boldsymbol{a})$ である.//

定理 3 [2] 任意の多値クリーネ関数 fは, 以下の論理式表現することができる.

$$f(\boldsymbol{x}) = \bigvee_{\boldsymbol{c} \in V_3^n} \left\{ \bigwedge_{\boldsymbol{c} \succ \boldsymbol{c}'} f(\boldsymbol{c}') \alpha_{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x}) \vee f(\boldsymbol{c}) \beta_{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x}) \right\},$$

但し, $\alpha_{\boldsymbol{c}}$及び$\beta_{\boldsymbol{c}}$は, それぞれ$\boldsymbol{c}$に対応する単項及び相補最小項 ($\boldsymbol{c} \in V_2^n$のときには$\beta_{\boldsymbol{c}} = 0$ とする) である.//

定義 4 $a, b \in V$とする. このとき, $\overline{a}^b, \underline{a}_b \in V_3$となる Vから V_3への 2 つの写像を以下のように定義する.

$$\overline{a}^b = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq a \leq \min(b, 1-b) \text{ かつ } a \neq 0.5 \\ 1 & \text{if } \max(b, 1-b) \leq a \leq 1 \text{ かつ } a \neq 0.5 \\ 0.5 & \text{その他} \end{cases}$$

$$\underline{a}_b = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq a < \min(b, 1-b) \text{ または } a = 0 \\ 1 & \text{if } \max(b, 1-b) < a \leq 1 \text{ または } a = 1 \\ 0.5 & \text{その他} \end{cases}$$

また, この定義は V^nの元にまで次のようにして拡張定義される. $\boldsymbol{a} = (a_1, \ldots, a_n) \in V^n$, $b \in V$としたとき

$$\begin{aligned} \overline{\boldsymbol{a}}^b &= (\overline{a_1}^b, \ldots, \overline{a_n}^b), \\ \underline{\boldsymbol{a}}_b &= (\underline{a_1}_b, \ldots, \underline{a_n}_b) \end{aligned}$$

で定義する.//

定義 5 A を V^nの任意の有限部分集合とする. $f : A \to V$ のとき, A の任意の元$\boldsymbol{a}$に対して $f(\boldsymbol{a}) = b$ とすると,

$$\begin{aligned} C_f(\boldsymbol{a}) &= \{\boldsymbol{c} \in V_3^n | \overline{\boldsymbol{a}}^b \succ \boldsymbol{c} \text{または} \boldsymbol{c} \succ \underline{\boldsymbol{a}}_b\} \\ C_f^{-1}(\boldsymbol{c}) &= \{\boldsymbol{a} \in A | \boldsymbol{c} \in C_f(\boldsymbol{a})\} \end{aligned}$$

で V_3^n及び A の部分集合 C_f及び C_f^{-1}を定義する.//

定義 6 A を V^nの任意の有限部分集合とする. また, fを写像 $f : A \to V$, $\boldsymbol{a}$を A の任意の元とし, $f(\boldsymbol{a}) = b$ とする. このとき, $C_f(\boldsymbol{a})$ の任意の元$\boldsymbol{c}$に対して,

$$I_a(\boldsymbol{c}) = \begin{cases} \{x \in V | b \succ x\} & \text{if } \overline{\boldsymbol{a}}^b \succ \boldsymbol{c}, \\ \{x \in V | x \succ b\} & \text{if } \boldsymbol{c} \succ \underline{\boldsymbol{a}}_b, \end{cases}$$

但し, $\overline{\boldsymbol{a}}^b = \underline{\boldsymbol{a}}_b$のときには, $I_a(\overline{\boldsymbol{a}}^b) = I_a(\underline{\boldsymbol{a}}_b) = \{b\}$ で定義する.//

例 1 $A = \{(0.4, 0.2)\}$ として, $f(0.4, 0.2) = 0.3$ とする. このとき, $\overline{(0.4, 0.2)}^{0.3} = \underline{(0.4, 0.2)}_{0.3} = (0.5, 0)$. 従って, $C_f(0.4, 0.2) = \{(0,0), (0.5, 0), (0.5, 0.5)\}$ となる. 故に,

$$\begin{aligned} I_{(0.4,0.2)}(0,0) &= \{x \in V | 0.3 \succ x\} \\ &= [0, 0.3], \\ I_{(0.4,0.2)}(0.5, 0) &= \{0.3\}, \\ I_{(0.4,0.2)}(0.5, 0.5) &= \{x \in V | x \succ 0.3\} \\ &= [0.3, 0.5]. \end{aligned}$$

3 実現可能性

ここでは, $f : A \to V$(但し, A は V^nの任意の有限部分集合) が与えられたとき, $f = f_k|_A$なる多値クリーネ関数 f_kが存在するための必要十分条件を示す. 但し, $f_k|_A$は A の任意の元$\boldsymbol{a}$に対して $f_k|_A(\boldsymbol{a}) = f_k(\boldsymbol{a})$ なる Aから V への写像を意味する.

$A = \{\boldsymbol{a}_1, \ldots, \boldsymbol{a}_m\} \subseteq V^n$なる有限集合 A 及び写像 $f : A \to V$が与えられたとき, V_3^nの部分集合 A_3^*を以下のように定義する.

$$A_3^* = \{\overline{\boldsymbol{a}}^b \in V_3^n | \boldsymbol{a} \in A\} \cup \{\underline{\boldsymbol{a}}_b \in V_3^n | \boldsymbol{a} \in A\}$$

定義 7 A を V^nの任意の有限部分集合とする. fを $f : A \to V$なる写像とする. fから構成される多値クリーネ関数 f_kとは,

$$f_k(\boldsymbol{x}) = \bigvee_{\boldsymbol{c} \in A_3^*} F_{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x})$$

なる論理式で定義される. 但し,

(1) $\boldsymbol{c} \in V_2^n$ならば $F_{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x}) = \mathrm{lub}_{\succ} I_A(\boldsymbol{c}) \wedge \alpha_{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x})$,

(2) $\boldsymbol{c} \notin V_2^n$ならば

- (a) $\mathrm{lub}_{\succ} I_A(\boldsymbol{c}) > 0.5$ のとき, $F_{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x}) = \mathrm{lub}_{\succ} I_A(\boldsymbol{c}) \wedge \alpha_{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x})$,
- (b) $\mathrm{lub}_{\succ} I_A(\boldsymbol{c}) \leq 0.5$ のとき, $F_{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x}) = \mathrm{lub}_{\succ} I_A(\boldsymbol{c}) \wedge \beta_{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x})$

で, $\alpha_{\boldsymbol{c}}$と$\beta_{\boldsymbol{c}}$は, それぞれ A_3^*の元$\boldsymbol{c}$に対応する単項及び相補最小項を表している.//

定理 4 Vの任意の有限部分集合を A とし, $f : A \to V$ とする. また, fから構成される多値クリーネ関数を f_k とする. このとき, $\bigcup_{1 \leq i \leq m} C_f(\boldsymbol{a})$ の任意の元$\boldsymbol{c}$に対して, $\bigcap_{\boldsymbol{a}_i \in C_f^{-1}(\boldsymbol{c})} I_{\boldsymbol{a}_i}(\boldsymbol{c}) \neq \emptyset$であるとき, 及びそのときに限り, $f = f_k|_A$である.//

4 例題

ここでは, 定理 4に基づく簡単な例題を示す. V^2の有限部分集合 A を

$$A = \{(0.1, 0.6), (0.4, 0.5), (0.1, 0.2), (0.9, 0.2), (0.7, 0.9)\}$$

とし, 関数 $f : A \to V$が表 1によって与えられたとする. このとき, 定義 4により得られる V_3^nの元$\overline{\boldsymbol{a}_i}^{f(\boldsymbol{a}_i)}$及び$\underline{\boldsymbol{a}_i}_{f(\boldsymbol{a}_i)}$は表 2のように得られる.

従って, $\boldsymbol{a}_1 \in A$ に対応する V_3^nの部分集合 $C_f(\boldsymbol{a}_1)$ は

$$\begin{aligned} C_f(\boldsymbol{a}_1) &= \{\boldsymbol{c} \in V_3^n | \overline{\boldsymbol{a}_1}^{f(\boldsymbol{a}_1)} \succ \boldsymbol{c} \text{または} \boldsymbol{c} \succ \underline{\boldsymbol{a}_1}_{f(\boldsymbol{a}_1)}\} \\ &= \{(0,0), (0,1), (0,0.5), (0.5,0.5)\} \end{aligned}$$

表 1 関数 $f : A \to V$

$\boldsymbol{a}_i$	$f(\boldsymbol{a}_i)$
$\boldsymbol{a}_1 = (0.1, 0.6)$	0.3
$\boldsymbol{a}_2 = (0.4, 0.5)$	0.4
$\boldsymbol{a}_3 = (0.1, 0.2)$	0.2
$\boldsymbol{a}_4 = (0.9, 0.2)$	0.8
$\boldsymbol{a}_5 = (0.7, 0.9)$	0.6

表 2 定義 6による V_3^nの元

$\boldsymbol{a}_i$	$\overline{\boldsymbol{a}_i}^{f(\boldsymbol{a}_i)}$	$\underline{\boldsymbol{a}_i}_{f(\boldsymbol{a}_i)}$
$\boldsymbol{a}_1 = (0.1, 0.6)$	$(0, 0.5)$	$(0, 0.5)$
$\boldsymbol{a}_2 = (0.4, 0.5)$	$(0, 0.5)$	$(0.5, 0.5)$
$\boldsymbol{a}_3 = (0.1, 0.2)$	$(0, 0)$	$(0, 0.5)$
$\boldsymbol{a}_4 = (0.9, 0.2)$	$(1, 0)$	$(1, 0.5)$
$\boldsymbol{a}_5 = (0.7, 0.9)$	$(1, 1)$	$(1, 1)$

である. 同様にして

$$\begin{aligned} C_f(\boldsymbol{a}_2) &= \{(0,0), (0,1), (0,0.5), (0.5,0.5)\}, \\ C_f(\boldsymbol{a}_3) &= \{(0,0), (0,0.5), (0.5,0.5)\}, \\ C_f(\boldsymbol{a}_4) &= \{(1,0), (1,0.5), (0.5,0.5)\}, \\ C_f(\boldsymbol{a}_5) &= \{(1,1), (1,0.5), (0.5,1), (0.5,0.5)\}. \end{aligned}$$

以上から $\bigcup_{i=1}^{5} C_f(\boldsymbol{a}_i)$ の任意の元$\boldsymbol{c}$ に対応する Vの部分集合 $I_{\boldsymbol{a}_i}(\boldsymbol{c})$ は次ぎのように得られる.

$$\begin{aligned} I_{\boldsymbol{a}_1}(0,0) &= \{x \in V | f(\boldsymbol{a}_1) \succ x\} = [0, 0.3] \\ &= I_{\boldsymbol{a}_1}(0,1) \\ I_{\boldsymbol{a}_1}(0,0.5) &= \{0.3\} \\ I_{\boldsymbol{a}_1}(0.5,0.5) &= \{x \in V | x \succ f(\boldsymbol{a}_1)\} = [0.3, 0.5] \\ I_{\boldsymbol{a}_2}(0,0) &= [0, 0.4] = I_{\boldsymbol{a}_2}(0,1) = I_{\boldsymbol{a}_2}(0,0.5) \\ I_{\boldsymbol{a}_2}(0.5,0.5) &= [0.4, 0.5] \\ I_{\boldsymbol{a}_3}(0,0) &= [0, 0.2] \\ I_{\boldsymbol{a}_3}(0,0.5) &= [0.2, 0.5] = I_{\boldsymbol{a}_3}(0.5,0.5) \\ I_{\boldsymbol{a}_4}(1,0) &= [0.8, 1] \\ I_{\boldsymbol{a}_4}(1,0.5) &= [0.5, 0.8] = I_{\boldsymbol{a}_4}(0.5,0.5) \\ I_{\boldsymbol{a}_5}(1,1) &= \{0.6\} \\ I_{\boldsymbol{a}_5}(1,0.5) &= [0.5, 0.6] = I_{\boldsymbol{a}_5}(0.5,1) = I_{\boldsymbol{a}_5}(0.5,0.5) \end{aligned}$$

従って, $\bigcup_{i=1}^{5} C_f(\boldsymbol{a}_i)$ の元 $(0, 0.5)$ に対応する集合 $\bigcap_{(0,0.5) \in C_f^{-1}(\boldsymbol{a}_i)} I_{\boldsymbol{a}_i}(0, 0.5)$ は以下

のようにして得られる.

$$\begin{aligned}&\bigcap_{(0,0.5)\in C_f^{-1}(a_i)} I_{a_i}(0,0.5)\\ =\ & I_{a_1}(0,0.5)\cap I_{a_2}(0,0.5)\cap I_{a_3}(0,0.5)\\ =\ & \{0.3\}\cap[0,0.4]\cap[0.2,0.5]\\ =\ & \{0.3\}\end{aligned}$$

同様にして, $\bigcup_{i=1}^{5} C_f(\boldsymbol{a}_i)$ の任意の元$\boldsymbol{c}$ に対応する集合 $\bigcap_{a_i\in C_f^{-1}(c)} I_{a_i}(\boldsymbol{c})$ は表 3のように得られる. 表 3から

表 3 定義 8による Vの部分集合

$x_2\backslash x_1$	0	0.5	1
0	$[0,0.2]$	·	$[0.8,1]$
0.5	$\{0.3\}$	$\{0.5\}$	$[0.5,0.6]$
1	$[0,0.3]$	$[0.5,0.6]$	$\{0.6\}$

$\bigcup_{i=1}^{5} C_f(\boldsymbol{a}_i)$ の任意の元$\boldsymbol{c}$ に対して $\bigcap_{c\in C_f^{-1}(a_i)} I_{a_i}(\boldsymbol{c}) \neq \emptyset$ となり, 定理 4から $f = f_k|_A$なる多値クリーネ関数 f_kは存在する. また, 以下に示す論理式は $f = f_k|_A$となる多値クリーネ関数 f_k の一つの例である.

$$\begin{aligned}f_k &= \bigvee_{c\in A_3^*} F_c(x_1,x_2)\\ &= 0.2\alpha_{(0,0)}\vee 0.3\beta_{(0,0.5)}\vee 0.5\beta_{(0.5,0.5)}\vee\\ &\quad 0.8\alpha_{(1,0)}\vee 0.6\alpha_{(1,0.5)}\vee 0.6\alpha_{(1,1)}\\ &= 0.2{\sim}x_1{\sim}x_2\vee 0.3{\sim}x_1x_2{\sim}x_2\vee\\ &\quad 0.5x_1{\sim}x_1x_2{\sim}x_2\vee 0.8x_1{\sim}x_2\vee 0.6x_1\vee\\ &\quad 0.6x_1x_2\\ &= 0.2{\sim}x_1{\sim}x_2\vee 0.3{\sim}x_1x_2{\sim}x_2\vee\\ &\quad 0.8x_1{\sim}x_2\vee 0.6x_1\end{aligned}$$

但し,

$$\begin{aligned}A_3^* &= \left\{\overline{\boldsymbol{a}_i}^{f(a_i)}|\boldsymbol{a}_i\in A\right\}\cup\left\{\underline{\boldsymbol{a}_i}_{f(a_i)}|\boldsymbol{a}_i\in A\right\}\\ &= \{(0,0),(0,0.5),(0.5,0.5),(1,0),(1,0.5),(1,1)\}\end{aligned}$$

である.

5 むすび

本文では, ファジィ論理関数に任意の定数を許した多値論理関数 (多値クリーネ関数) について, 特にドント·ケアを認めた不完全記述の多値クリーネ関数について述べた. 本文の主な結論は, ある不完全記述な関数 $f : A \to V$ が与えられたとき, $f = f_k|_A$となる多値クリーネ関数 f_k が存在するための必要十分条件を示したこと, 及びその一つの論理式の導出アルゴリズムを示したことである.

参考文献

[1] 高木 昇, 向殿 政男: "多値クリーネ関数の基本的性質", 信学論 D-I, Vol. J74-D-I, No. 12, pp. 797-804 (1991)

[2] 高木 昇, 向殿 政男: "多値クリーネ関数の論理式表現", 信学論 D-I, Vol. J75-D-I, No. 2, pp. 69-75 (1991)

[3] 向殿 政男: "ファジィ論理関数における 2,3 の性質について", 信学論 (D), Vol. 58-D, No. 3 pp. 150-157 (1975)

[4] 向殿 政男: "Fuzzy 論理関数の代数的構造とその最簡形式および既約形式", 信学論, Vol. 58-D, No. 12, pp. 748-755 (1975)

[5] A. Kandel and J. M. Francioni: "On the Properties and Applications of Fuzzy-Valued Switching Functions", *IEEE Trans. on Comput.* Vol. C-29, No. 11, pp. 986-994 (1980)

[6] 菊地 浩明, 向殿 政男: "ファジー論理関数の同定問題—部分関数がファジー論理関数で表されるための必要十分条件—", 信学論 D-I, Vol. J77-D-I, No. 7, pp. 465-476 (1994)

[7] Y. Hata, K. Nakashima and K. Yamato: "Some Fundamental Properties of Multiple-Valued Kleenean Functions and Deetermination of Their Logic Formulas", *IEEE Trans. on Comput.*, Vol. 42, No. 8, pp. 950-961 (1993)

[問い合わせ先]
高木 昇
〒 939-03 富山県射水郡小杉町黒河 5180
富山県立大学工学部電子情報工学科
TEL: (0766)56-7500 Ext. 461
FAX: (0766)56-8022
E-mail: takagi@pu-toyama.ac.jp

WA5-2

L-ファジィ集合によるファジィ推論について
On Fuzzy Reasoning Using L-Fuzzy Sets

川瀬 真
Shin KAWASE
帝京平成大学
Teikyo Heisei University

柳原二郎
Niro YANAGIHARA
中央大学
Chuo University

陳啓浩
Quhao CHEN
北京郵電学院
Beijing College of Posts and Telecommunications

Abstract

There are several methods in fuzzy reasoning: Zadeh's (called here the direct method), Baldwin's, (called the indirect methods) and others. It would be natural to ask their interrelations. In this note, we work with L-fuzzy sets and consider connections of direct versus indirect methods. It is proved that the direct method and indirect method give the same consequent under some conditions.

1 まえがき

次のようなファジィ推論を考える.

$$\begin{array}{ll} \text{規則} & \text{if } x \text{ is } A, \text{ then } y \text{ is } B, \\ \text{前提} & x \text{ is } A', \\ \hline \text{結論} & y \text{ is } B'. \end{array} \tag{1}$$

ここで A, A' は X の上のファジィ集合, B, B' は Y の上のファジィ集合である. 前提 x is A' から, 結論 y is B' を導くファジィ推論法はいくつかある. 直接法 [1] と間接法 [2] の二つがよく使われるが, これらの推論法による推論結果は必ずしも一致しない. 推論結果が一致するための条件についていくつかの報告があるが[3,4,5], ここでは A, A' および B, B' がL-ファジィ集合である場合に, 二つの推論法による推論結果が一致するための条件を求める. 以下では, 順序集合 Z において, $\bigvee Z$ は $\sup Z$, $\bigwedge Z$ は $\inf Z$ を意味する.

2 L-ファジィ集合

定義 1 X を空でない集合とする. $L = (L, \preceq)$ を, 最大元 I と最小元 O を持つ完備束とする. L^X の元 A, すなわち写像 $A : X \ni x \mapsto A(x) \in L$ を X におけるL-ファジィ集合という [6].

$L = [0,1]$ のとき, L-ファジィ集合は通常のファジィ集合である. $L = \mathcal{I}[0,1]$ のとき, L-ファジィ集合を X における区間値ファジィ集合という. ここで $\mathcal{I}[0,1]$ は区間値の全体を表す. $\bar{a}$ が区間値であるとは, $\bar{a}$ が $[0,1]$ に含まれる閉区間 $\bar{a} = [a^-, a^+]$ $(0 \le a^- \le a^+ \le 1)$ のことをいう [7].

$L = \mathcal{M}[0,1]$ のとき, L-ファジィ集合を X におけるファジィ値ファジィ集合という. ここで $\mathcal{M}[0,1]$ はファジィ値の全体を表す. ファジィ値は次によって定義される [8].

定義 2 $\tilde{a}$ をファジィ真理値, すなわち $\tilde{a} : [0,1] \to [0,1]$ とする. $\tilde{a}$ の α-レベル集合 $\tilde{a}_\alpha$ を

$$\begin{aligned} \tilde{a}_\alpha &= \{t \in [0,1] | \tilde{a}(t) \ge \alpha\} \text{ if } \alpha \in (0,1], \\ \tilde{a}_0 &= \overline{\{t \in [0,1] | \tilde{a}(t) > 0\}} \text{ if } \alpha = 0 \end{aligned}$$

で定義する. $\tilde{a}$ の任意の α-レベル集合が凸集合のとき. $\tilde{a}$ を凸ファジィ集合という. $\max \tilde{a}(t) = 1$ のとき $\tilde{a}$ は正規であるという. 正規なファジィ真理値であって, α-レベル集合 $\tilde{a}_\alpha$ が閉区間であるものをファジィ値という

3 T-norm 及び含意関数

ファジィ推論 (1) において, 結論 B' を計算するためには T-norm と含意関数が必要である

定義 3 L 上の二項演算 $*$ で, 次の条件を満たすものを T-norm という. $a, b \in L$ に対して $a * b$ を $T(a,b)$ とも書く.

(i) $a * b = b * a$ （可換性）

(ii) $a * (b * c) = (a * b) * c$ （結合性）

(iii) $a_1 \preceq a_2, b_1 \preceq b_2$ならば $a_1 * b_1 \preceq a_2 * b_2$ （単調性）

(iv) $a * 1 = a$ （境界条件）

T-norm は, 一般に分配法則

$$\bigvee_{\lambda \in \Lambda} (a_\lambda * b) = (\bigvee_{\lambda \in \Lambda} a_\lambda) * b \tag{2}$$

を満たさないが, 単調性により次が成り立つ.

$$\bigvee_{\lambda \in \Lambda} (a_\lambda * b) \preceq (\bigvee_{\lambda \in \Lambda} a_\lambda) * b \tag{3}$$

例 1 $L = [0,1]$ のとき, T-norm の例として次のものがある:

- $a \wedge b$（論理積），
- $a \cdot b = ab$（代数積），
- $a \odot b = 0 \vee (a + b - 1)$（限界積），
- $a \mathbin{\dot{\wedge}} b = \begin{cases} a & (b = 1) \\ b & (a = 1) \\ 0 & (a, b < 1) \end{cases}$（激烈積）．

このとき $\dot{\wedge} \leq \odot \leq \cdot \leq \wedge$ が成り立つ [6].

例 2 $T(a,b)$ を $[0,1]$ で定義された T-norm とする．このとき $\overline{a} = [a^-, a^+], \overline{b} = [b^-, b^+] \in \mathcal{I}[0,1]$ に対して

$$\overline{T}(\overline{a}, \overline{b}) = [T(a^-, b^-), T(a^+, b^+)] \tag{4}$$

とおくと，$\overline{T}$ は $\mathcal{I}[0,1]$ での T-norm であり，その $[0,1]$ への制限が T と一致する [7].

例 3 $\tilde{a}, \tilde{b} \in \mathcal{M}[0,1]$ に対して

$$\tilde{T}(\tilde{a}, \tilde{b})_\alpha = \overline{T}(\tilde{a}_\alpha, \tilde{b}_\alpha), \ \forall \alpha \in [0,1] \tag{5}$$

とおくと，$\tilde{T}$ は $\mathcal{M}[0,1]$ での T-norm であり，その $[0,1]$ への制限が T と一致する [8].

定義 4 関数 $I_{mp} : L^2 \to L$ を L における含意関数という．$a, b \in L$ に対して $I_{mp}(a,b)$ を $a \to b$ とも書く．

例 4 T-norm $*$ が与えられたとき，$a \to b$ を

$$a \to b = a * b$$

で定義する．このとき $I \to b = b$ が成り立つ．

例 5 T-norm $*$ が与えられたとき，$a \to b$ を

$$a \to b = \bigvee \{x | a * x \preceq b\}$$

で定義する．このとき $I \to b = b, a \to a = I$ が成り立つ．

4 ファジィ推論法

L-ファジィ集合についてのファジィ推論，すなわち (1) において，$A, A' \in L^X, B, B' \in L^Y$ の場合を考える．(1) において T-norm および含意関数が与えられたとき，直接法および間接法での結論 B' をそれぞれ B'_D, B'_I と書く．B'_D, B'_I は次で与えられる．

(1) 直接法

$$B'(y) = B'_D(y) = \bigvee_{x \in X} (A'(x) * (A(x) \to B(y))).$$

(2) 間接法

$$B'(y) = B'_I(y) = \tau_B(B(y)),$$

ここで

$$\begin{aligned} \tau_B(b) &= \bigvee_{a \in L} (\tau_A(a) * (a \to b)), \\ \tau_A(a) &= \bigvee_{\{x | A(x) = a\}} A'(x). \end{aligned}$$

以上の推論法を sup $-*$ 合成という．

定理 1 ファジィ推論モデル (1) において

$$B'_D(y) \preceq B'_I(y).$$

が成り立つ．とくに T-norm が分配法則を満たすならば

$$B'_D(y) = B'_I(y).$$

証明 (3) により

$$\begin{aligned} B'_D(y) &= \bigvee_{x \in X} (A'(x) * (A(x) \to B(y))) \\ &= \bigvee_{a \in L} \bigvee_{\{x | A(x) = a\}} (A'(x) * (A(x) \to B(y))) \\ &\preceq \bigvee_{a \in L} ((\bigvee_{\{x | A(x) = a\}} A'(x)) * (a \to B(y))) \\ &= \bigvee_{a \in L} (\tau_A(a) * (a \to B(y))) = B'_I(y). \end{aligned}$$

定理の後半は (2) より明らか．

5 分配法則が成り立つための必要十分条件

定理 2 次の命題は同値である．

(i) 任意の $\{a_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ に対して $\bigvee_{\lambda \in \Lambda} (a_\lambda * b) = (\bigvee_{\lambda \in \Lambda} a_\lambda) * b$.

(ii) 任意の $a, b \in L$ に対して $\{x | a * x \preceq b\}$ は最大元 を持つ．

(iii) 任意の $a, b \in L$ に対して L の元がただ一つ存在して（これを $a \supset_* b$ と書く．$*$ が明らかなときには $a \supset b$ と書く）

$$x \preceq (a \supset_* b) \Longleftrightarrow a * x \preceq b \tag{6}$$

が成り立つ．

証明 (i) $\Rightarrow$ (ii) 分配法則により

$$a * (\bigvee \{x | a * x \preceq b\}) = \bigvee_{x \in \{a * x \preceq b\}} a * x \preceq b.$$

ゆえに $\bigvee \{x | a * x \preceq b\} \in \{x | a * x \preceq b\}$. 従って $\bigvee \{x | a * x \preceq b\} = \max \{x | a * x \preceq b\}$.

(ii) $\Rightarrow$ (iii) (6) をみたす満たす元 $a \supset_* b$ が一意に決まることは明らかである．$a \supset_* b = \max \{x | a * x \preceq b\}$ とおく．

$$a * x \preceq b \Longrightarrow x \preceq (a \supset_* b)$$

は明らか．逆に $x \preceq (a \supset_* b)$ ならば，$*$ の単調性と，$a \supset_* b \in \{x | a * x \preceq b\}$ により $a * x \preceq a * (a \supset_* b) \preceq b$.

(iii) $\Rightarrow$ (i) まず $a_\lambda * b \preceq \bigvee_{\lambda \in \Lambda} (a_\lambda * b)$ であるから，(6) により $a_\lambda \preceq (b \supset_* \bigvee_{\lambda \in \Lambda} (a_\lambda * b))$. したがって $(\bigvee_{\lambda \in \Lambda} a_\lambda) \preceq (b \supset_* \bigvee_{\lambda \in \Lambda} (a_\lambda * b))$. ゆえに，(6) により $(\bigvee_{\lambda \in \Lambda} a_\lambda) * b \preceq \bigvee_{\lambda \in \Lambda} (a_\lambda * b)$ となる．これと (3) から (i) を得る．

系 1 $L = [0,1]$ のとき，分配法則が成立するための必要十分条件は，$*$ が左連続であることである．

証明 $L=[0,1]$ のとき,

$$x \preceq (a \supset_* b) \Longleftrightarrow\ *\text{が左連続である}$$

が成り立つ [9]. 従って, ただちに系が得られる.

この系から, $a \wedge b$ (論理積), $a \cdot b$ (代数積), $a \odot b$ (限界積) は分配法則を満たすことがわかる. さらに,

系 2 $T(a,b)$ を $[0,1]$ で定義された, 分配法則が成り立つ T-norm とする.

(i) (4) で定義される $\mathcal{I}[0,1]$ における T-norm は分配法則を満たす.

(ii) (5) で定義される $\mathcal{M}[0,1]$ における T-norm は分配法則を満たす.

証明 (i) $\bar{c}=[c^-,c^+]$, $\bar{b}=[b^-,b^+] \in \mathcal{I}[0,1]$ に対して,

$$\begin{aligned} y^+ &= \max\{x^+ | T(x^+,b^+) \preceq c^+\}, \\ y^- &= (\max\{x^- | T(x^-,b^-) \preceq c^-\}) \wedge y^+ \end{aligned}$$

とおき, $\bar{y}=[y^-,y^+]$ とおくと $\bar{y}=\max\{\bar{x} | \overline{T}(\bar{x},\bar{b}) \preceq \bar{c}\}$.

(ii) $\tilde{b},\tilde{c} \in \mathcal{M}[0,1]$ に対して, そのα-レベル集合を

$$\tilde{b}_\alpha=[b_\alpha^-,b_\alpha^+],\ \tilde{c}_\alpha=[c_\alpha^-,c_\alpha^+]$$

とする. $\max\{\bar{x} | \overline{T}(\bar{x},\tilde{b}_{\alpha'}) \le \tilde{c}_{\alpha'}\}=[x_{\alpha'}^-,x_{\alpha'}^+]$ に対して $\bar{y}_\alpha=[y_\alpha^-,y_\alpha^+] \in \mathcal{I}[0,1]$ を次式で定義する.

$$\begin{aligned} y_\alpha^+ &= \bigwedge_{0 \le \alpha' \le \alpha} x_{\alpha'}^+, \\ y_\alpha^- &= (\bigwedge_{\alpha \le \alpha' \le 1} x_{\alpha'}^-) \wedge y_1^+. \end{aligned}$$

このとき

$$\bigvee_{\alpha \in [0,1]} \alpha \bar{y}_\alpha = \max\{\tilde{x} | T(\tilde{x},\tilde{b}) \preceq \tilde{c}\}.$$

定理2で定義される2項演算 $(a,b) \mapsto a \supset_* b$ は含意関数と考えられる (例3参照). この含意関数を $*$ に対応する含意関数という.

$L=[0,1]$ ならば, $*=\wedge$ のとき $\supset_\wedge = Rg$, $*=\odot$ のとき $\supset_\odot = R_\triangle$, $*=\cdot$ のとき $\supset_\cdot = Ra$ となる. 次の補題は重要である.

補題 二つの t-norm $*,*'$ に対応する含意関数をそれぞれ $\supset_*, \supset_{*'}$ とする. このとき

$$* \preceq *' \Longleftrightarrow \supset_{*'} \preceq \supset_*.$$

証明 ($\Rightarrow$) $a *' x \preceq b$ ならば $a * x \preceq b$ であるから, $\{x | a *' x \preceq b\} \preceq \{x | a * x \preceq b\}$. 従って $a \supset_{*'} b = \max\{x | a *' x \preceq b\} \preceq \max\{x | a * x \preceq b\} = a \supset_* b$ が成り立つ.

($\Leftarrow$) $\supset_{*'} \preceq \supset_*$ のとき $* \not\preceq *'$ とする. このとき, $a_0 * b_0 \not\preceq a_0 *' b_0$ なる $a_0, b_0 \in L$ が存在して

$$b_0 \in \{(a_0 *' x) \preceq (a_0 *' b_0)\} = \{x \preceq (a_0 \supset_{*'} (a_0 *' b_0))\},$$

$$b_0 \notin \{(a_0 * x) \preceq (a_0 *' b_0)\} = \{x \preceq (a_0 \supset_* (a_0 *' b_0))\}$$

が成り立つ. 一方, $\supset_{*'} \preceq \supset_*$ から

$$\{x \preceq (a_0 \supset_{*'} (a_0 *' b_0))\} \subset \{x \preceq (a_0 \supset_* (a_0 *' b_0))\}.$$

故に, $b_0 \in \{x \preceq (a_0 \supset_{*'} (a_0 *' b_0))\} \subset \{x \preceq (a_0 \supset_* (a_0 *' b_0))\}$. これは矛盾であるから, $* \preceq *'$ を得る.

6 モーダス・ポーネンスが成立するための必要十分条件

以下の節では, 定理2の応用について述べる. 以下では, T-norm は分配法則を満たすとする.

ファジィ推論においてモーダス・ポーネンスが成り立つための必要十分条件を導こう. ファジィ推論モデル (1) において $A=A'$ ならば $B=B'$ が成り立つとき, すなわち

$$\bigvee_{x \in X} (A(x) * (A(x) \to B(y))) = B(y).$$

が成り立つとき, モーダス・ポーネンスが成立するという. 次の定理はモーダス・ポーネンスが成立するための必要十分条件を与える.

定理 3 含意関数 $a \to b$ は, $1 \to b = b$ を満たすとする.

$$\bigvee_{a \in L} a * (a \to b) = b \Longleftrightarrow \to \preceq \supset_*.$$

ここで $\to \preceq \supset_* \overset{\text{def}}{\Longleftrightarrow} \forall a,b \in L, (a \to b) \preceq (a \supset_* b)$.

証明 ($\Rightarrow$) $\bigvee_{a \in L} a * (a \to b) = b$ ならば, 任意の $a \in L$ に対して $a * (a \to b) \preceq b$. 従って $(a \to b) \preceq (a \supset_* b)$ が成り立つ.

($\Leftarrow$) まず

$$\bigvee_{a \in L} a * (a \to b) \succeq 1 * (1 \to b) \succeq 1 \to b = b$$

であるから $\bigvee_{a \in L} a * (a \to b) \succeq b$. 次に $\bigvee_{a \in L} a * (a \to b) \preceq b$ を示そう. $(a \to b) \preceq (a \supset_* b)$ ならば

$$\begin{aligned} a * (a \to b) &\preceq a * (a \supset_* b) \\ &= a * \sup\{x | a * x \preceq b\} \\ &= \sup_{x \in \{x | a * x \preceq b\}} (a * x) \\ &\preceq b. \end{aligned}$$

従って $a * (a \to b) \preceq b$. これより $\bigvee_{a \in L} a * (a \to b) \preceq b$. 故に定理を得る.

$L=[0,1]$ のとき, 限界積よりも小さな T-norm を使った場合, モーダス・ポーネンスが成り立つことが知られている [6]. 次の系は, このことの一般化である.

系 3 含意関数 $a \to b$ は, $1 \to b = b$ を満たすとする. $*' \preceq *$ を満たす T-norm に対して

$$\bigvee_{a \in L} a * (a \to b) = b \Longrightarrow \bigvee_{a \in L} a *' (a \to b) = b.$$

証明 定理3により, $\bigvee_{a \in L} a * (a \to b) = b$ ならば, $\to \preceq \supset_*$. 補題により $*' \preceq * \Longrightarrow \supset_* \preceq \supset_{*'}$. 従って $\to \preceq \supset_* \preceq \supset_{*'}$. 故に定理3により $\bigvee_{a \in L} a *' (a \to b) = b$ が成り立つ.

7 ファジィ三段論法が成立するための条件

次の三段論法を考える.

$$\begin{array}{ll} \text{規則 1} & A \Rightarrow B \\ \text{規則 2} & B \Rightarrow C \\ \hline \text{規則 3} & A \Rightarrow C \end{array} \tag{7}$$

ここで, もし $(A \Rightarrow B) \circ (B \Rightarrow C) = (A \Rightarrow C)$ ならば, すなわち

$$\bigvee_{b \in L} (a \to b) * (b \to c) = (a \to c)$$

が成り立つならば, 三段論法が成立するという.

$L = [0,1]$ のとき, $a \to b = a * b$ ならば, ファジィ三段論法が成立することが知られている [6]. 同様なことは L-ファジィ集合の場合にも成り立つこと, すなわち

$$a \to b = a * b \Rightarrow \bigvee_{b \in L} (a \to b) * (b \to c) = (a \to c)$$

が得られることは容易にわかる. ここでは $a \to b = a \supset b$ の場合, ファジィ三段論法が成立するための必要十分条件を述べる.

定理 4 $\supset_*$ を $*$ に対応する含意関数とする.

$$\bigvee_{b \in L} (a \supset b) * (b \supset c) = (a \supset c) \Longleftrightarrow \supset \preceq \supset_* .$$

証明 $(\Rightarrow)$ $a = 1$ とおくと, $1 \supset b = b, 1 \supset c = c$ であるから $\bigvee_{b \in L} b * (b \supset c) = c$ を得る. 従って定理 3 により $\supset \preceq \supset_*$ を得る.

$(\Leftarrow)$ まず, $(c \supset c) = 1$ であるから,

$$\bigvee_{b \in L} (a \supset b) * (b \supset c) \succeq (a \supset c) * (c \supset c) \succeq (a \supset c)$$

が成り立つ.

次に, $*'$ を $\supset$ に対応する T-norm とする. ここで $\bigvee_{b \in L} (a \supset b) * (b \supset c) = a \to b$ とおく.

$$\bigvee_{a \in L} a * (a \to b) \preceq b \tag{8}$$

がいえれば, 定理 2 より $\to \preceq \supset$ であるから, $\bigvee_{b \in L} (a \supset b) * (b \supset c) = a \to b \preceq (a \supset c)$ が得られる. (8) を示そう. 補題により, $* \preceq *'$. 定理 3 より

$$\bigvee_{a \in L} a *' (a \supset b) = b, \quad \bigvee_{b \in L} b *' (b \supset c) = c.$$

従って

$$\begin{aligned} & \bigvee_{a \in L} a * (a \to b) \\ \preceq & \bigvee_{a \in L} (a *' \bigvee_{b \in L} ((a \supset b) *' (b \supset c))) \\ = & \bigvee_{b \in L} ((\bigvee_{a \in L} a *' (a \supset b)) *' (b \supset c)) \\ = & \bigvee_{b \in L} (b *' (b \supset c)) = c. \end{aligned}$$

系 4 (i)

$$\bigvee_{b \in L} (a \supset_* b) * (b \supset_* c) = (a \supset_* c).$$

(ii) $\bigvee_{b \in L} (a \supset b) * (b \supset c) = (a \supset c)$ ならば $*' \preceq *$ なる T-norm に対して

$$\bigvee_{b \in L} (a \supset b) *' (b \supset c) = (a \supset c).$$

(iii) $\bigvee_{b \in L} (a \supset b) * (b \supset c) = (a \supset c)$ ならば $\supset' \preceq \supset$ なる $\supset'$ に対して

$$\bigvee_{b \in L} (a \supset' b) * (b \supset' c) = (a \supset' c).$$

参考文献

[1] Zadeh, L.A.: "Calculus of Fuzzy Restriction", in Zadeh, L.A. et al.(ed.) *Fuzzy Sets and Their Applications to Cognition and Decision Processes*, Academic Press (1975), pp.1-39.

[2] Baldwin, J.F.,"A new approach to approximate reasoning using a fuzzy logic," *Fuzzy Sets and Systems*, vol.2 (1979), pp.309-325.

[3] Tong, R.M. and Festathion, J.: "A critical assessment of truth function modification and its use in approximate reasoning", *Fuzzy Sets and Systems*, vol.7 (1982), pp.103-108.

[4] 向殿政男, 野島和行 : "ファジィ推論における直接法と間接法に関する考察", 日本ファジィ学会誌, vol.4, no.2 (1992), pp.325-333.

[5] 川瀬真, 柳原二郎 : "ファジィ推論における間接法について", 電子情報通信学会論文誌 *A*, vol.J77-A (1994), pp.530-537.

[6] 水本雅晴 : "ファジィ集合", 日刊工業新聞社, vol.J77-A (1994), pp.530-537.

[7] 陳啓浩, 柳原二郎, 川瀬真 : 区間値ファジィ推論についての研究, to appear.

[8] 陳啓浩, 柳原二郎, 川瀬真 : ファジィ値及びファジィ値ファジィ推論についての 研究, to appear.

[9] Fodor, J.C.: "Contrapositive symmetry of fuzzy implications", *Fuzzy Sets and Systems*, vol.69 (1995), pp.141-156.

連絡先

〒 290-01 市原市潤井戸字大谷 2289-23

帝京平成大学情報学部情報システム学科

川瀬真

TEL. 0436-74-5511

FAX. 0436-74-3659

WA5-3

ファジィルールベースが疎である場合の線形補間型推論法の適用条件
Applicable Conditions on Linear Interpolative Reasoning Method in Sparse Fuzzy Rule Bases

石岩　　水本雅晴
Yan SHI　　Masaharu MIZUMOTO

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

Abstract: By means of the linear interpolative reasoning method proposed by Koczy and Hirota, we can obtain consequences when the fuzzy rule base is sparse. However, the reasoning consequences by the reasoning method become sometimes abnormal fuzzy sets as pointed out by the authors. In this paper, we analyze the properties of the reasoning method in detail and give several applicable conditions on it, in order to make the reasoning consequences always normal and convex fuzzy sets.

1. はじめに

ファジィ制御やファジィエキスパートシステムにおいて使用されているファジィ推論法のほとんどは推論合成規則を基づくものである[1]. これらのファジィ推論においては，入力空間がすべて何らかのファジィ規則に覆われていて，与えられた観測値に対して推論結果を導くことができる[2,3]. しかしながら，ファジィ規則が疎である場合，すなわち，入力空間がどの規則の前件部にも覆われていない部分がある場合，隣どうしの前件部の間に空スペースが存在する. その空スペースに観測値が入力されるとファジィ規則が一つも発火しないことになる. このような場合，通常のファジィ推論法では推論結果を求めることができない. この問題に対して，Koczy と Hirota [4,5] はこのような疎なファジィ規則空間におけるファジィ推論法として「線形補間型推論法」を提案し，通常のファジィ推論法では解決できなかった問題を制限付きではあるが解決した. このファジィ推論法によって，観測値が空スペースに与えられても，推論結果を得ることができる. しかしながら，この「線形補間型推論法」により得られた推論結果は必ずしも理に適ったものでなく，奇妙なファジィ集合になることがあることが示された[6]. また，ある場合には，推論結果のメンバーシップ関数が凸性を失って，実際の応用に対して適用不可能になることがある.

本論文では，「線形補間型推論法」の性質を解析して，ファジィ規則 $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$ および観測値 A^* のメンバーシップ関数が三角型である場合，その補間結果 B^* のメンバーシップ関数が凸性を持つための幾つかの適用条件を与えた. すなわち，これらの適用条件の下で「線形補間型推論法」による推論結果 B^* のメンバーシップ関数が常に正規凸ファジィ集合であることが保証できる.

2. ファジィルールベースが疎である場合の線形補間型推論法

"If A_i then B_i" $(i=1,2,\ldots,n)$ のファジィ規則モデルにおいて，与えられた観測値 A^* に対して推論の合成規則[1]により，次のように推論結果 B^* が求められる.

$$B^* = A^* \circ R$$

ここで，$\circ$ は合成演算で，R はファジィ規則を表すファジィ関係である.

一般に，推論の合成規則の場合，入力空間 X が完全に前件部 A_i $(i=1,2,\ldots,n)$に覆われることが必要である. すなわち，次の式が常に成り立つ.

$$X = \bigcup_{i=1}^{n} \mathrm{supp}(A_i)$$

ここで，$\mathrm{supp}(A_i)$ は A_i の台 (support) であり，$\mathrm{supp}(A_i) = \{ x \mid \mu_{A_i}(x) > 0 \}$ と定義される. すなわち，

$$\mathrm{supp}(A^*) \subseteq \bigcup \mathrm{supp}(A_i)$$

は常に真である. このようなファジィルールベースを密ルールベースと呼ぶ[7]. この場合，与えられた観測値 A^* に対して何らかのファジィ関係を用いて推論結果 B^* を求めることができる.

しかしながら，ファジィルールベースが疎である場合，すなわち，少なくとも次のような関係を満たす X の部分集合 X' が存在し，

$$X' \subset X - \bigcup \mathrm{supp}(A_i)$$

であれば，$\mathrm{supp}(A^*) = X'$ なる観測値 A^* に対して通常のファジィ推論法では推論結果を求めることができない. すなわち，図1で示したように，観測値 A^* が互いに素な2つ前件部 A_1, A_2 の間にある場合，通常のファジィ推論法によって得た推論結果 B^* は空集合になる.

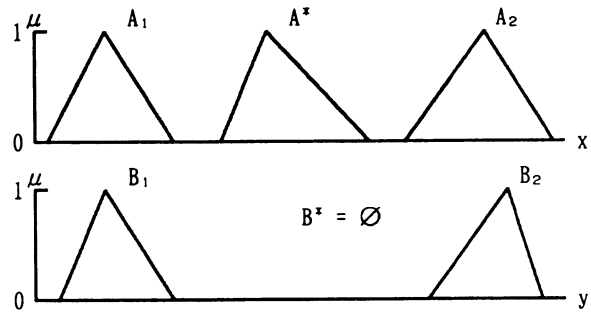


図1 疎なルールベースにおけるファジィ推論

このような問題に対して，Koczy と Hirota[4,5] は推論結果 B^* も後件部 B_1, B_2 の間にあるべきであろうことを指摘して，次のような「線形補間型推論法」という新しいファジィ推論法を提案した.

[定義1] A_1, A_2 を X における凸ファジィ集合とし，$A_1 < A_2$ とする. A_1 の α－レベル集合 $A_1\alpha$ と A_2 の α－レベル集合 $A_2\alpha$ の下限距離 d_L，上限距離 d_U をそれぞれ以下のように定義する.

$$d_L(A_1\alpha, A_2\alpha) = \inf\{A_2\alpha\} - \inf\{A_1\alpha\} \quad (1)$$
$$d_U(A_1\alpha, A_2\alpha) = \sup\{A_2\alpha\} - \sup\{A_1\alpha\} \quad (2)$$

ここで，$\inf\{A_i\alpha\}$ は $A_i\alpha$ の下限を表し，$\sup\{A_i\alpha\}$ は $A_i\alpha$ の上限を表す$(i=1,2)$.

[定義2] A_1, A_2 を X における，B_1, B_2 を Y におけるファジィ集合とする. $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$ は X×Y において互いに交わらない2つのファジィ規則とする. もし A^* が観測値でかつ，条件 $A_1 < A^* < A_2$ を満足すれば，2つのファジィ規則による推論結果 B^* は次のように与え

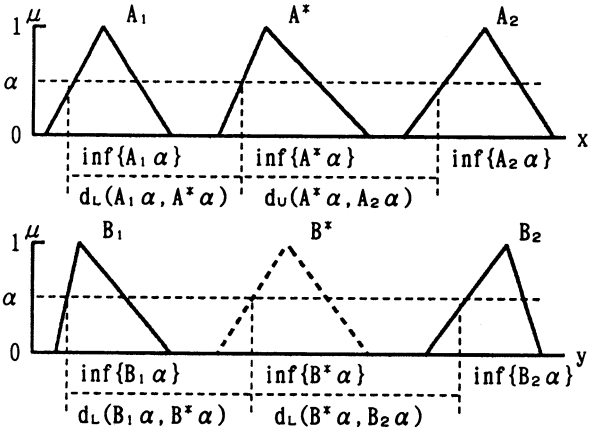


図2 線形補間型推論法

られる（図2参照）[4,5].

$$d_L(A_1\alpha, A^*\alpha) : d_L(A^*\alpha, A_2\alpha) = d_L(B_1\alpha, B^*\alpha) : d_L(B^*\alpha, B_2\alpha) \quad (3)$$

$$d_U(A_1\alpha, A^*\alpha) : d_U(A^*\alpha, A_2\alpha) = d_U(B_1\alpha, B^*\alpha) : d_U(B^*\alpha, B_2\alpha) \quad (4)$$

式(1)-(4)より，結論 $B^*\alpha$ の下限、上限は次のように与えられる．

$$\inf\{B^*\alpha\} = \frac{d_L(A_1\alpha, A^*\alpha)\inf\{B_2\alpha\} + d_L(A^*\alpha, A_2\alpha)\inf\{B_1\alpha\}}{d_L(A_1\alpha, A^*\alpha) + d_L(A^*\alpha, A_2\alpha)} \quad (5)$$

$$\sup\{B^*\alpha\} = \frac{d_U(A_1\alpha, A^*\alpha)\sup\{B_2\alpha\} + d_U(A^*\alpha, A_2\alpha)\sup\{B_1\alpha\}}{d_U(A_1\alpha, A^*\alpha) + d_U(A^*\alpha, A_2\alpha)} \quad (6)$$

分解定理[1]を用いて，式(5)(6)の $\inf\{B^*\alpha\}$, $\sup\{B^*\alpha\}$ から推論結果 B^* が求められる．特に，ファジィ規則 $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$ および観測値 A^* が三角型（或いは台型）メンバーシップ関数で表されるとすると，計算量が削減される[4,5]．この場合，式(5),(6)は簡単な形で表せる．例えば，ファジィ規則 $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$ および観測値 A^* が図3のように三角型メンバーシップ関数で定義されているものとする．A_1, A^*, A_2, B_1, B_2 に対する各メンバーシップ関数の左側の傾きをそれぞれ $1/k_1$, $1/k$, $1/k_2$, $1/h_1$, $1/h_2$ とし，$\alpha = 0$ に対し $a_1 = \inf\{A_1\alpha\}$, $a = \inf\{A^*\alpha\}$, $a_2 = \inf\{A_2\alpha\}$, $b_1 = \inf\{B_1\alpha\}$, $b_2 = \inf\{B_2\alpha\}$ とすると，式(5)は次のように置き換えることができる．

$$\inf\{B^*\alpha\} = y(\alpha) = \frac{[(k\alpha + a) - (k_1\alpha + a_1)](h_2\alpha + b_2) + [(k_2\alpha + a_2) - (k\alpha + a)](h_1\alpha + b_1)}{(k_2\alpha + a_2) - (k_1\alpha + a_1)}$$

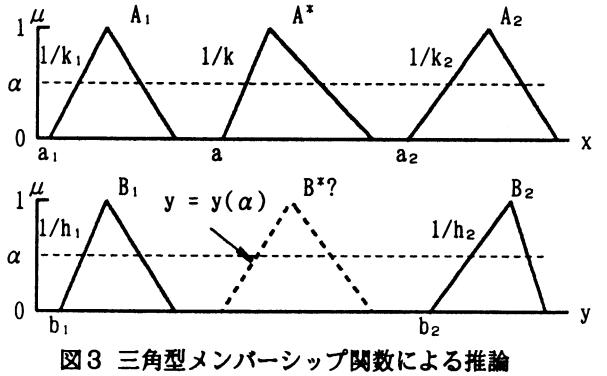


図3 三角型メンバーシップ関数による推論

$$= \frac{[h_1(k_2 - k) + h_2(k - k_1)]\alpha^2 + [b_1(k_2 - k) + b_2(k - k_1) + h_1(a_2 - a) + h_2(a - a_1)]\alpha + [b_1(a_2 - a) + b_2(a - a_1)]}{(k_2 - k_1)\alpha + (a_2 - a_1)} \quad (7)$$

式(7)から，一般に $\inf\{B^*\alpha\}$ は α の双曲線関数であることがわかる．これはファジィ規則 $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$ および観測値 A^* が三角型メンバーシップ関数で定義されていても，推論結果 B^* は必ずしも三角型メンバーシップ関数ではないことを意味している．また，ある場合には，B^* は凸性を失って，例えば，$\inf\{B^*_1\} < \inf\{B^*_0\}$（或いは $\sup\{B^*_1\} > \sup\{B^*_0\}$），更に $\inf\{B^*\alpha\} > \sup\{B^*\alpha\}$ といった異常なケースが生じ，図4に示すように推論結果 B^* は通常のファジィ集合ではなく，歪んだ形となることがある．

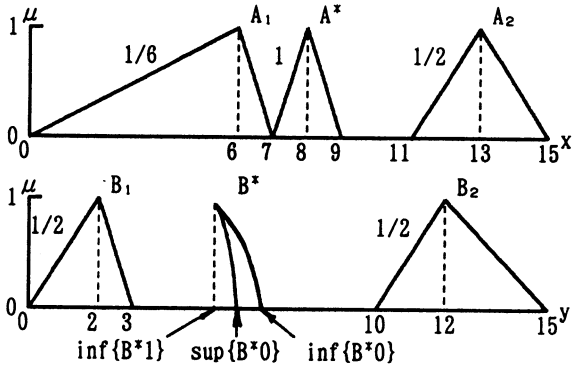


図4 線形補間推論法の例

B^* のメンバーシップ関数が三角型になるための条件として，著者ら[6]は次のような2つの推論条件を求めた．

条件(I)[6]：交わらない2つのファジィ規則 $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$ および観測値 A^* $(A_1 < A^* < A_2)$ が三角型メンバーシップ関数で定義されていて，$\inf\{A_1\alpha\} = k_1\alpha + a_1$, $\inf\{A^*\alpha\} = k\alpha + a$, $\inf\{A_2\alpha\} = k_2\alpha + a_2$, $\inf\{B_1\alpha\} = h_1\alpha + b_1$, $\inf\{B_2\alpha\} = h_2\alpha + b_2$ とすると，次の条件の下で推論結果 $\inf\{B^*\alpha\}$ は α の線形増加関数となる．

$$k = (1-\beta)k_1 + \beta k_2 \quad (8)$$

$$a = (1-\beta)a_1 + \beta a_2 \quad (9)$$

ここで，β $(\in [0,1])$ は定数である．

条件(II)[6]：ファジィ規則 $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$ および観測値 A^* が条件(I)と同様に定義されているとき，次の条件の下で推論結果 $\inf\{B^*\alpha\}$ は α の線形増加関数となる．

$$(b_2 - b_1) = \gamma(a_2 - a_1) \quad (10)$$

$$(h_2 - h_1) = \gamma(k_2 - k_1) \quad (11)$$

$$k \geq k_1 - h_1/\gamma \quad (12)$$

ここで，γ (> 0) は定数である．

3. 線形補間型推論法の適用条件について

図4でわかるように，推論法(5)(6)によって得られた補間結果 B^* は常に線形性と凸性を持つとは限らない．明らかに，条件(I)と条件(II)は非常に厳しい条件であるので，実際的な応用に対しては，適用不可能になることがわかる．実際問題としては，補間結果 B^* は少なくとも凸性を持つことが必要であろう．このため，以下ではこの推論法の適用条件を議論する．この場合，前件部、後件部および観測値のメンバーシップ関数の左側部分を議論の対象とする．このことから，推論結果 B^* 左部分の単調増加性だけを議論すれば十分であることがわかる．つまり，もし推論結果 B^* の左側が単調増加で，右側が単調減少であるならば，B^* は凸性を持つといえる．

式(7)において，$k \neq k_1 = k_2$, $h_1 \neq h_2$ とすると，$y(\alpha)$は次のように書き直される．

$$y(\alpha) = \frac{[(h_2-h_1)(k-k_1)]\alpha^2 + [(b_2-b_1)(k-k_1)+h_1(a_2-a) +h_2(a-a_1)]\alpha + [b_1(a_2-a)+b_2(a-a_1)]}{(a_2 - a_1)} \quad (13)$$

すると，$y(\alpha)$は α の２次多項式になる．これより，前件部，後件部および観測値の左部分の傾きによって，関数 $y(\alpha)$ の単調性を考えよう．まず，$y(\alpha)$の１次微分と２次微分は次のように与えられる．

$$y'(\alpha) = \frac{[2(h_2-h_1)(k-k_1)\alpha+(b_2-b_1)(k-k_1) + h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)]}{(a_2 - a_1)} \quad (14)$$

$$y''(\alpha) = 2(k-k_1)(h_2-h_1) / (a_2-a_1) \quad (15)$$

式(15)からわかるように，y" の符号 sgn(y") は sgn (y") = sgn((k-k₁)(h₂-h₁))である．以下では，sgn((k-k₁)(h₂-h₁)) の幾つかの場合に対する議論をしよう．

ケース１：$k - k_1 > 0$, $h_2 - h_1 > 0$

この場合，式(15)によって，$y''(\alpha) > 0$ となる．これは $y'(\alpha)$ は常に α の単調増加関数であることを意味している．式(14)において，$\alpha = 0$ とすると，

$y'(0)=[(b_2-b_1)(k-k_1)+h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)]/(a_2-a_1) > 0$

となる．単調性によって，$y'(\alpha) > 0$ となることがわかる．よって，以下の定理を得る．

[定理１] $\inf\{B^x\alpha\}$ は次の条件の下で α の単調増加関数である．

$$k - k_1 > 0, \quad h_2 - h_1 > 0 \quad (16)$$

図５は，条件(16)の下での補間推論の例である．但し，$k_1 = 2$, $k = 3$; $h_1 = 1$, $h_2 = 4$ である．

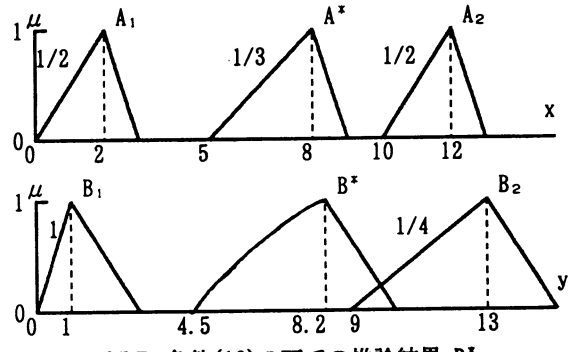


図５ 条件(16)の下での推論結果 B^x

ケース２：$k - k_1 < 0$, $h_2 - h_1 > 0$

この場合，式(15)によって，$y''(\alpha) < 0$ となる．これは $y'(\alpha)$ は常に α の単調減少関数であることを意味している．$y(\alpha)$ が区間[0,1] で単調増加関数になるための条件を考えてみよう．

まず，$y'(1) \geq 0$ とすると，$y'(\alpha)$ の単調性によって，任意の $\alpha \in [0,1]$ に対して $y'(\alpha) \geq 0$ となる．これは $y(\alpha)$ は区間 [0,1] で α の単調増加関数であることを意味する．式(14)において，$\alpha=1$ にすると，

$$y'(1) = \frac{[2(h_2-h_1)(k-k_1) + (b_2-b_1)(k-k_1) + h_1(a_2 - a) + h_2(a - a_1)]}{a_2 - a_1} \geq 0$$

となり，すなわち

$2(h_2-h_1)(k-k_1)+(b_2-b_1)(k-k_1)+h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)] \geq 0$

となる．この不等式を整理すると，

$$k - k_1 \geq \frac{-[h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)]}{[(h_2+b_2)-(h_1+b_1)]+(h_2-h_1)}$$

となる．ここで，$[h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)] > 0$, $\{[(h_2+b_2)-(h_1+b_1)]+(h_2-h_1)\} > 0$ となっていることに注意すべきである．

[定理２] $\inf\{B^x\alpha\}$ は次の条件の下で α の単調増加関数である．

$$0 \geq k - k_1 \geq \frac{-[h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)]}{[(h_2+b_2)-(h_1+b_1)]+(h_2-h_1)} \quad (17)$$

$$h_2 - h_1 > 0 \quad (18)$$

図６は，上の条件の下での補間推論の例である．但し，$k_1=2$, $k=1$, $h_1=1$, $h_2=4$; $a_1=0$, $a=7$, $a_2=10$, $b_1=0$, $b_2=9$ である．

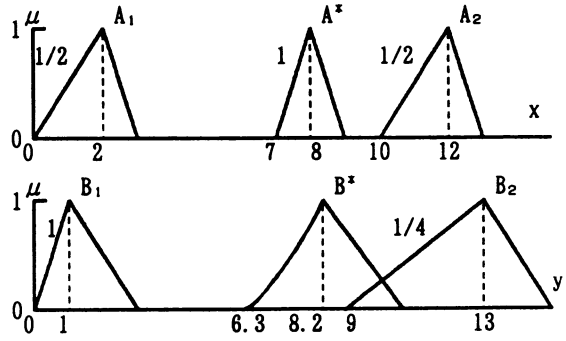


図６ 条件(17)(18)の下での推論結果 B^x

ケース３：$k - k_1 > 0$, $h_2 - h_1 < 0$

この場合，$y''(\alpha) < 0$ である．ケース２の場合と同様に，まず，次の条件が必要である．

$$k - k_1 \geq \frac{-[h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)]}{[(h_2+b_2)-(h_1+b_1)]+(h_2-h_1)}$$

また，条件 $2(h_1-h_2) \neq (b_2-b_1)$ を追加することも必要である．したがって，次の定理を得る．

[定理３] $\inf\{B^x\alpha\}$ は次の条件の下で α の単調増加関数である．

$$k - k_1 \geq \frac{h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)}{(h_1-h_2)-[(h_2+b_2)-(h_1+b_1)]} \quad (19)$$

$$h_2 - h_1 < 0 \quad (20)$$

$$2(h_1-h_2) \neq (b_2-b_1) \quad (21)$$

図７は，条件(19)-(21)の下での補間推論の例である．但し，$k_1 = 2$, $k = 3$, $h_1 = 4$, $h_2 = 1$; $a_1 = 0$, $a = 5$, $a_2 = 10$, $b_1 = 0$, $b_2 = 10$ である．

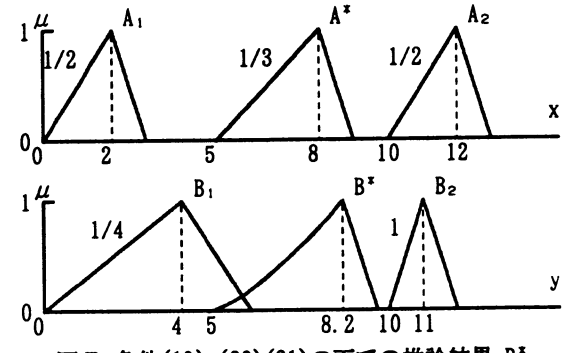


図７ 条件(19),(20)(21)の下での推論結果 B^x

ケース４：$k - k_1 < 0$, $h_2 - h_1 < 0$

この場合，式(15)によって，$y''(\alpha) > 0$ になっている．式(14)によって，

$$y'(0)=[(b_2-b_1)(k-k_1)+h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)]/(a_2-a_1)$$

となる．ケース１と違って，$k-k_1<0$ の下で，$y'(0) \geq 0$ が必ずしも成り立たないので，制約 $y'(0) \geq 0$ すなわち，

$$[(b_2-b_1)(k-k_1)+h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)]/(a_2-a_1) \geq 0$$

が必要である．この不等式を整理すると，$k-k_1 \geqq -[h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)]$ となる．したがって，以下を得る．

[定理４] $\inf\{B^* \alpha\}$ は次の条件の下で α の単調増加関数である．

$$0 > k - k_1 > -[h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)] \quad (22)$$

$$h_2 - h_1 < 0 \quad (23)$$

図８は，上の条件の下での補間推論の例である．但し，$k_1=2, k=1, h_1=4, h_2=1$; $a_1=0, a=7, a_2=10, b_1=0, b_2=9$ である．

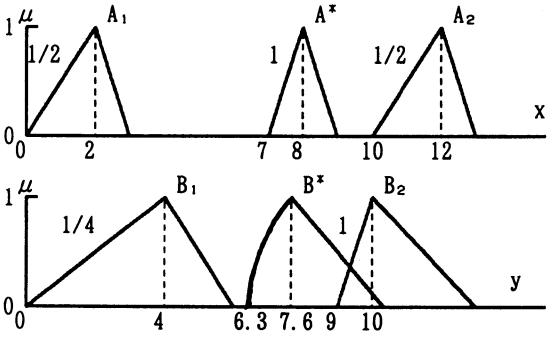


図８ 条件(22)(23)の下での推論結果 B^*

以上，２次多項式 $\inf\{B^* \alpha\}$ の単調増加性について議論し，４つの推論条件を与えたが，同じ手法で $\sup\{B^* \alpha\}$ の単調減少性に対する議論ができ，(16)-(23)と同様の推論条件を得ることができる．したがって，これらの推論条件の下で，補間結果 B^* が正規凸ファジィ集合になることがわかる．

最後に，上記とは異なる２つの特殊な推論条件を議論しよう．

4．特殊な推論条件

実際的応用において，ファジィ規則 $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$ および観測値 A^* のメンバーシップ関数が三角型（或いは台形型）であるならば，「線形補間型推論法」よって得られた補間結果 B^* のメンバーシップ関数も三角型（或いは台形型）になることが望まれる．このために，次のような２つ適用条件を示す．

ケース５：$k = k_1 = k_2$

この場合，すべての前件部の傾きと観測値の傾きが同じであることを意味している．式(14)によって，

$$y(\alpha) = \frac{[h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)]\alpha+[b_1(a_2-a)+b_2(a-a_1)]}{(a_2 - a_1)}$$

かつ

$$y'(\alpha) = [h_1(a_2-a)+h_2(a-a_1)] / (a_2-a_1) > 0$$

となる．明らかに，$y(\alpha)$は α の線形増加関数である．これは条件(I)の特殊なケースであることがわかる．条件(I)において，$k=k_1=k_2$ より，任意の $\beta \in [0,1]$ に対して $k=\beta k_2+(1-\beta)k_1$ が常に真であるので，ある β ($\in[0,1]$) が存在し，$a=\beta a_2+(1-\beta)a_1$ が成り立つことがわかる．したがって，次の定理を得る．

[定理５] 次の条件の下で $\inf\{B^* \alpha\}$ は α の線形増加関数である．

$$k = k_1 = k_2 \quad (24)$$

ケース６：$k_1 = k_2$, $h_1 = h_2$

この場合，前件部の傾きは同じで，後件部の傾きも同じであることを意味している．すなわち，ファジィ規則を制限することを意味している．式(13)によって

$$y(\alpha)=(b_2-b_1)[(k-k_1)\alpha+(a-a_1)]/(a_2-a_1)+(h_1\alpha+b_1)$$

$$y'(\alpha) = (b_2-b_1)(k-k_1)/(a_2-a_1) + h_1$$

となる．明らかに，$y(\alpha)$ は α の線形関数である．$y(\alpha)$ が単調増加関数になるためには，条件 $y'(\alpha) \geqq 0$，すなわち，$(b_2-b_1)(k-k_1)/(a_2-a_1)+h_1 \geqq 0$ が必要である．この不等式を整理すると，$k \geqq k_1 - h_1/\gamma$ となる．ここで，$\gamma=(b_2-b_1)/(a_2-a_1)>0$ は定数である．これは条件(II)の特殊なケースであることがわかる．条件(II)において，$k_1=k_2$, $h_1=h_2$ のため，任意の $\gamma(>0)$ に対して $(h_2-h_1) = \gamma(k_2-k_1)$ が常に真であるので，ある $\gamma(>0)$ が存在し，$(b_2-b_1)=\gamma(a_2-a_1)$ が成り立つことがわかる．

[定理６] 次の条件の下で $\inf\{B^* \alpha\}$ は α の線形増加関数である．

$$k_1 = k_2 \quad (25)$$

$$h_1 = h_2 \quad (26)$$

$$k \geqq k_1 - h_1/\gamma \quad (\gamma > 0) \quad (27)$$

同様に，右側の場合の線形減少性に対する議論を行うことができ，(24)-(27)のような推論条件を得ることができる．したがって，これらの推論条件の下で，補間結果 B^* が三角型（或いは台形型）メンバーシップ関数になることがわかる．

5．結論

本論文では，「線形補間型推論法」による推論結果 B^* のメンバーシップ関数が正規凸ファジィ集合になるための条件を幾つか与えた．これらの条件の下で，実際の応用に対して Koczy らの「線形補間型推論法」を使用することが可能になることがわかる．

今後の課題として，ファジィ規則 $A_1 \Rightarrow B_1$, $A_2 \Rightarrow B_2$および観測値 A^* のメンバーシップ関数が "正規凸ファジィ集合" の場合，その推論結果 B^* も"正規凸ファジィ集合" となるような新しいファジィ推論法を考えだすことが必要と思われる．

参考文献

[1]L. A. Zadeh, Calculus of fuzzy restriction, in: L. A. Zadeh et al., Eds, Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes (Academic Press, New York, 1975) 1-39.

[2]水本雅晴，ファジィ推論（１），日本ファジィ学会誌，Vol. 4, No. 2, (1992)256-264.

[3]水本雅晴，ファジィ推論（２），日本ファジィ学会誌，Vol. 4, No. 3, (1992)35-46.

[4]L. T. Koczy and K. Hirota, Interpolative reasoning with insufficient evidence in sparse fuzzy rule bases, Information Sciences, Vol. 71, No, 1 & 2, (1993)169-201.

[5]L. T. Koczy and K. Hirota, Approximate reasoning by linear rule interpolation and general approximation, International Joural of Approximate Reasoning, Vol. 9, No. 3, (1993)197-225.

[6]石 岩，水本 雅晴，疎なファジィルールベースにおける Koczy の補間推論法について，第10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，(1994), 221-224

[7]L. T. Koczy, Approximate models and reasoning, Proceedings of the 3rd International Conference on Fuzzy Logic, Neural Nets and Soft Computing, (1994) 257-258.

問い合わせ先 〒572 大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学情報工学科水本研
石　岩 (Shi Yan)
TEL: 0720-20-4569 FAX: 0720-24-0014
E-mail: shi@mzlab.osakac.ac.jp

WB1-1

ファジィ制御によるロードトレインの走行制御

Drive Control of Road Train Based on Fuzzy Control

韓 虎剛　　村上 周太　　前田 幹夫

Hugang HAN　Shuta MURAKAMI　Mikio MAEDA

九州工業大学工学部

Faculty of Engineering,Kyushu Institute of Technology

Abstract－In this paper,we propose the drive control of road train. A road rain is defined as a tractor unit plus an arbitrary number of trailer. It is too difficult to easily control the road train.So we propose a new approach to cnotrol it with a fuzzy control algorithm by using prediction model for the location of the road train on the road.This algorithm is called a fuzzy adaptive control of the road train.The computer simulation of the road train of drive control confirmed that the proposal method was effective.

1．はじめに

ロードトレインとは，駆動車両の後方に複数の車両を連結した車両のことである．このような車両を制御する場合，駆動車両の挙動だけではなく，後方の被牽引車の挙動も考慮に入れながら制御を行う必要がある．これは，後方に連結車両があるため，コーナーなどにおいて壁などへの衝突を起こす危険は，車両が一台の場合に比べて高くなると考えられるからである．

そこで，本研究では，ロードトレインの走行制御を行うために，ファジィ適応制御の手法を提案する．その有効性はロードトレイン走行のシミュレーションにより明かにする．

2．制御系の構成

本研究で提案する制御系では，まず，外部状況（例えば，コーナーが変わる場合）によって，操作目標(目標軌道）生成ルールで操作目標を自動的に大まかに生成する．つぎに，ロードトレインはコーナーの手前で予測モデルを使って，予測走行のシミュレーションを行ない，その結果を評価ルールによって評価する．そして，評価結果によって，実際のロードトレインを走行させる時に生成した操作目標をそのまま使うかどうかを判断する．その軌跡を修正する場合，修正ルールを用いて高い評価が得られるまで操作目標を繰り返し修正する．このように，外部状況やロードトレイン（制御対象）の動特性などに応じて操作目標を調整する．この制御系をここでファジィ適応制御系（図1）と呼ぶことにする．

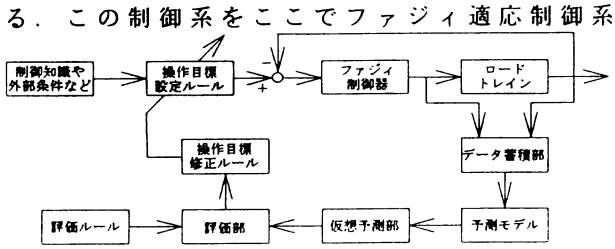


図1　ファジィ適応制御系の構成図

3．ロードトレインのファジィ適応制御

3.1　制御対象

ロードトレインのトラック（駆動車両）とトレーラ（被牽引車両）は図2 に示されている．各車両の横方向運動方程式はつぎのようになる．

$$Y_{1f} = -k_{1f}\frac{v_{l1} + X_{1f}r_1}{v_f} - u \tag{1}$$

$$Y_{1r} = -k_{1r}\frac{v_{l1} - X_{1r}r_1}{v_f} \tag{2}$$

$$Y_{ir} = -k_{ir}\frac{v_{li} - X_{ir}(r_1 + r_i)}{v_f} \tag{3}$$

$$v_{li} = v_{l1} - X_{12}r_1 - \sum_{j=2}^{i-1}(X_{j\,j-1} + X_{j\,j+1})(r_1 + r_j) - X_{i\,i+1}(r_1 + r_i) - v_i v_f \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{n} m_j(\dot{v}_{lj} + (r_1 + r_j)v_f) = Y_{1f} + \sum_{j=1}^{n} Y_{1r} \tag{5}$$

$$C_1\dot{r}_1 + X_{12}\sum_{j=1}^{n} m_j(\dot{v}_{lj} + (r_1 + r_j)v_f) = X_{1f}Y_{1f} - X_{1r}Y_{1r} + X_{12}\sum_{j=2}^{n} Y_{jr} \tag{6}$$

$$C_i(\dot{r}_1 + \dot{r}_i) = X_{i\,i-1}m_i(\dot{v}_{li} + (r_1 + r_j)v_f) - (X_{i\,i-1} + X_{ir})Y_{ir} + (X_{i\,i-1} + X_{i\,i+1})\sum_{j=i+1}^{n} m_j(\dot{v}_{lj} + (r_1 + r_j)v_f) - Y_j \tag{7}$$

ただし，

Y_{1f}：トラック前輪のコーナーリングフォース

Y_{1r}：トラック後輪のコーナーリングフォース

Y_{ir}：トレーラのコーナーリングフォース　(i=2～n)

k：比例係数

v_f：トラックの走行速度

v_{li}：i 番目車両横方向速度　(i=1～n)

r_i：i 番目車両のヨー速度　(i=1～n)

v_i：トレーラの速度　(i=2〜n)

m_i：i 番目車両の重量　(i=1〜n)

C_i：i 番目車両のヨーイング慣性モーメント (i=1〜n)

u：操舵角（操作量）

式(1)〜(7)をv_{li}，r_iとv_iについてまとめると，

$$A\dot{X}+BX=Cu \tag{8}$$

となる．ただし，

$$X^T=[v_{l1},\ r_1,\ r_2,\cdots,r_n,\ v_2,\ v_3,\cdots v_n] \tag{9}$$

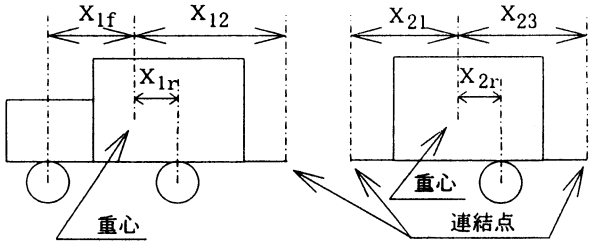


図2　トラックとトレーラ

3.2　ファジィ制御器

制御ルールにおいて，前件部変数として，時刻kにおける目標軌道から先頭車両の重心までの距離e_k，そのとき先頭車両の方向ベクトルと目標軌道の方向ベクトルのなす角θ_k及びその変化量$\Delta\theta_k$である．前件部のファジィラベルの分割数は3分割で，そのメンバシップ関数は図3に示されている．その符号については，図5に示されている．すなわち，eは先頭車両の重心が目標軌道に対して右側にあるときを正とし，左側にあるときを負とする．またθは目標に対して時計回りを正とし，その逆を負とする．出力については，進行方向に対して右を正とする．後件部変数としては，操舵角uをとっている．後件部の分割数は7分割であるが，図4に示されるようにシングルトンとした定数である．また，前件部．後件部とも台集合の空間[-1, 1]に規格化している．表1にすべての制御ルールを示す．

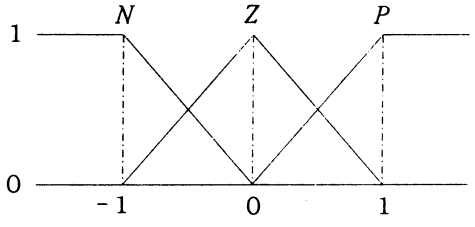


図3　前件部のメンバシップ関数

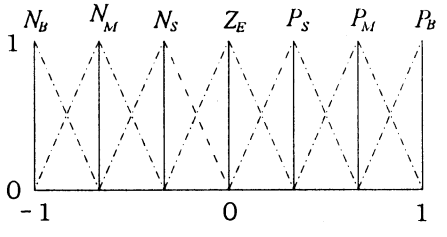


図4　後件部のメンバシップ関数

e is N

u		$\Delta\theta$		
		N	Z	P
θ	N	P_B	P_M	P_S
	Z	P_M	P_S	P_S
	P	N_S	N_M	N_M

e is Z

u		$\Delta\theta$		
		N	Z	P
θ	N	P_M	P_S	N_S
	Z	P_S	Z_E	N_S
	P	P_S	N_S	N_M

e is P

u		$\Delta\theta$		
		N	Z	P
θ	N	P_M	P_M	P_S
	Z	N_S	N_S	N_M
	P	N_S	N_M	N_B

表1　ＦＬＣの制御ルール

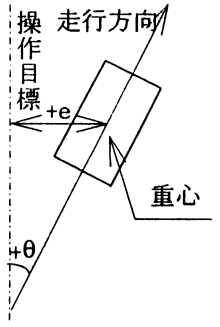


図5　入力の符号

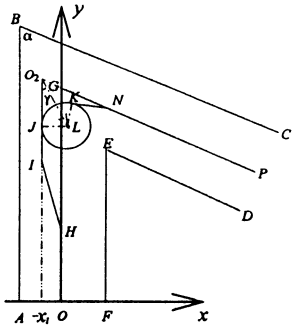


図6　目標軌道の構成

3.3　操作目標生成ルール

操作目標（目標軌道）は，道路状況に応じて大まかに決められる．道路は，直進なら道路の中心線を目標軌道とする．だが，問題となるのは様々なコーナーにおける目標軌道である．ここで，人間がロードトレインのような車両を操作する際，コーナーにおいての経験的な制御戦略を考える．それは，コーナー手前でハンドルを外側に大きく切り，またコーナーにおいては円に近い軌道を描きながら，コーナー通過後，道路の中心線に向かって進むと考えられる．したがって，目標軌道の基本的なパターンは道路方向に沿って直進と進路変更，およびコーナーにおける円軌道の三つの種類で構成する（図6）．つぎに目標軌道の構成を説明する．

点Iの横座標を$-x_I$とする．極座標系の極O_2は直線$x=-x_I$と道路の中央線PGの交点である．円Lは直線$x=-x_I$に接するもので，その円心の極座標を$(r,\ \gamma)$とする．ロードトレインがコーナーの手前Hで左側に方向を変えると，前に進みながら横方向加速度を受ける．ここで，IJの長さはロードトレインがJ時点から円軌道に乗るとき，左側への横速度が0になる十分な距離である（ここでは，8mとする）．また，ハンドルを左へ切るとき，切り角が大きすぎれば，慣性や横速度があるため，左壁に衝突する恐れがある．一方，小さすぎれば，道路の実際条件に制限される（ここでは，5°とする）．接線KNと中心線PGの角度も同じように考えられる（ここでは，10°とする）．図6から分かるように目標軌道$OHIJKNP$はx_I，r，γによって決められる．

本研究はコーナーの角度（$\alpha=\pi/3\sim\pi$）に応じてファ

ジィルールによって目標軌道を生成する．前件部変数は，コーナーの角度αである．前件部ファジィラベルの分割数は4分割で，そのメンバシップ関数は図7に示されている．後件部変数は点Iの横座標x_Iと円心Lの極座標(r, γ)で，いずれも4分割である．そのメンバシップ関数は図8に示されている．表2に全てのファジィルールを示す．

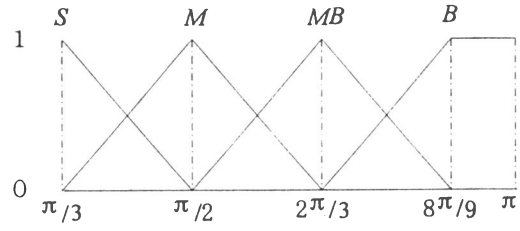
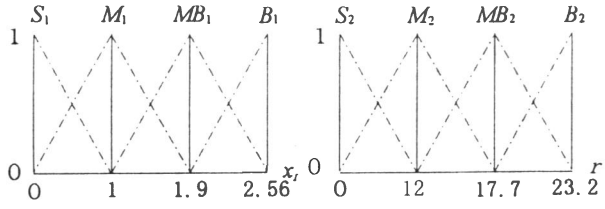


図7　前件部のメンバシップ関数（軌道生成）



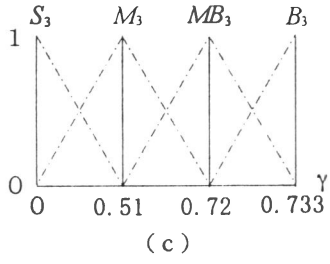


図8　後件部のメンバシップ関数（軌道生成）

		後件部		
		x_I	r	γ
前件部	S	B_1	B_2	M_3
	M	MB_1	MB_2	MB_3
	MB	M_1	M_2	B_3
	B	S_1	S_2	S_3

表2　目標軌道生成ルール

3.4　操作目標修正ルール

ファジィルールによって生成した目標軌道を操作目標としてロードトレインを走行させるとき，壁に衝突をする場合がある．衝突を起こしそうな場所は図9のC_1, C_2とC_3の領域と考えられる．また，ルールを設定したとき，ロードトレインを左壁に衝突しないように，できる限りx_Iを小さくとると配慮したので，以下，主にC_1とC_2の場合を取り上げ，衝突回避ためのパラメータx_I, r, γ の修正ルールを考える．

ロードトレインが前壁C_1に衝突する場合，目標軌道を下に下げたり，左にずらしたりしなければならない．ただし，目標軌道は曲がり角Eより下に下げてしまえば，現実不可能であるため，ここで前件部変数として，ロードトレインの走行軌跡と曲がり角との最小距離OP，及び目標軌道と曲がり角との最小距離RP（図9）をとっている．その分割数は3分割で，メンバシップ関数は図10に示されている．後件部変数として，目標軌道の上下方向への移動量Δ_1（上に正，下に負）と左右方向への移動量Δ_2（左に正，右に負）をとっている．Δ_1の分割数は3分割で，Δ_2の分割数は2分割である．そのメンバシップ関数は図11に示されている．また，Δ_1, Δ_2とx_I, r, γ との関係はつぎの通りである．

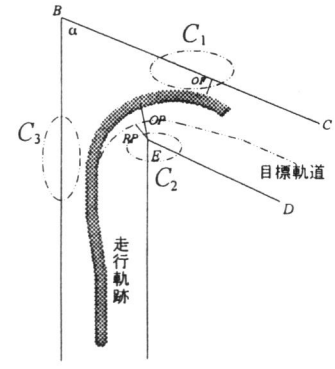


図9　衝突しそうな場所

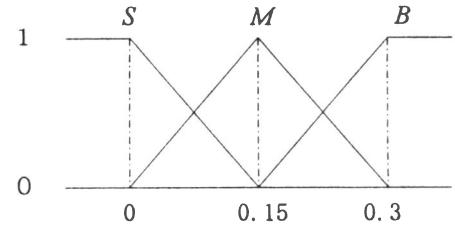


図10　前件部のメンバシップ関数（修正ルール）

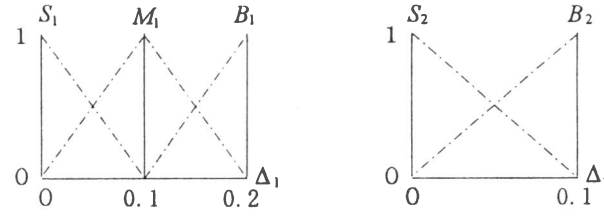


図11　後件部のメンバシップ関数（修正ルール）

$$x_{I\,NEW} = x_{I\,OLD} \pm \Delta_2 \tag{10}$$

$$\gamma_{NEW} = \tan^{-1} \frac{r_{OLD} \sin \gamma_{OLD}}{r_{OLD} \cos \gamma_{OLD} \mp \Delta_1} \tag{11}$$

$$r_{NEW} = \sqrt{\gamma_{OLD}^2 + \Delta_1^2 \mp 2\Delta_1 r_{OLD} \cos \gamma_{OLD}} \tag{12}$$

また，曲がり角E（C_2）に衝突する場合，目標軌道を上に上げたり，左にずらしたりしなければならない．修正ルールは大体上と同じであるが，ただ前件部としてロードトレインの走行軌跡と前壁との最小距離OF（図9）をとっている．C_1, C_2の場合をまとめて，目標軌道修正ルールはつぎの通りである．

R_1: *IF OP = S and OF = S*
THEN $\Delta_2 = B_2$
R_2: *IF OP = S and OF = M*
THEN $\Delta_1 = S_1$ *and* $\Delta_2 = S_2$
R_3: *IF OP = S and OF = B*
THEN $\Delta_1 = M_1$
R_4: *IF OP = M and OF = S and RP = S*
THEN $\Delta_2 = B_2$
R_5: *IF OP = M and OF = S and RP = M*
THEN $\Delta_1 = -S_1$ *and* $\Delta_2 = S_2$
R_6: *IF OP = M and OF = M and RP = S*
THEN $\Delta_2 = S_2$
R_7: *IF OP = M and OF = M and RP = M*
THEN $\Delta_1 = -S_1$ *and* $\Delta_2 = S_2$
R_8: *IF OP = M and OF = B*
THEN $\Delta_1 = S_1$ *and* $\Delta_2 = S_2$
R_9: *IF OP = B and OF = S and RP = S*
THEN $\Delta_2 = B_2$
R_{10}: *IF OP = B and OF = S and RP = M*
THEN $\Delta_1 = -S_1$
R_{11}: *IF OP = B and OF = S and RP = B*
THEN $\Delta_1 = -M_1$
R_{12}: *IF OP = B and OF = M and RP = S*
THEN $\Delta_2 = S_2$
R_{13}: *IF OP = B and OF = M and RP = M*
THEN $\Delta_1 = -S_1$
R_{14}: *IF OP = B and OF = M and RP = B*
THEN $\Delta_1 = -S_1$

以上の目標軌道修正ルールを用いて，目標軌道を何回かの修正によって，ロードトレインがコーナーを通ることができる．しかし，ぎりぎり通る場合が出てくる．従って，このような場合に目標軌道の微調整が必要となる．ここで，上の修正ルールを微調整ルールとして使うが，ただしスケーリングファクタが異なる．

また，評価部では，まずロードトレインはコーナーを通れるかどうかということを評価する．通れなければ，修正ルールを用いて目標軌道をコーナーを通れるまで修正する．つぎにコーナーを通った場合は，ロードトレインの走行軌跡と道路両側との最小距離を評価する．その評価が小さければ，また目標軌道を修正する．その距離の大きい方が高い評価を得られる．

4．シミュレーション結果

今回のロードトレインはトラックを含めて３台にする．車の幅と道路の幅をそれぞれ３ｍと10ｍにする．まず，道路の状況に応じて，目標軌道生成ルールから作成した操作目標（初期）を用いて，ロードトレインのモデルを走行させる．図12，図13はそれぞれコーナーの角度α＝85°
66°のときの走行シミュレーション結果である．α＝85°の場合は，うまく（評価部からの評価が高い）通れるので，実際のロードトレインがそのまま使って走行できるが，α＝66°の場合は，前壁に衝突したので，修正ルールを用いて操作目標を修正しなければならない．図14は修正ルールで4回修正した後のシミュレーション結果である．図15は修正前後の目標軌道である．

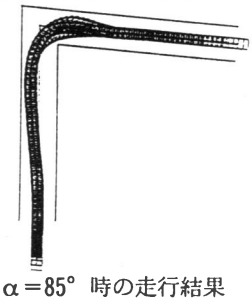


図12 α＝85° 時の走行結果
（修正なし）

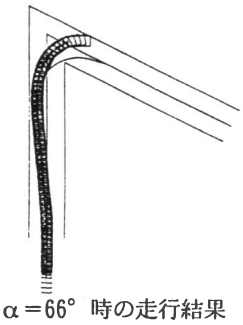


図13 α＝66° 時の走行結果
（修正前）

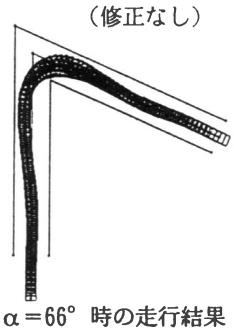


図14 α＝66° 時の走行結果
（修正後）

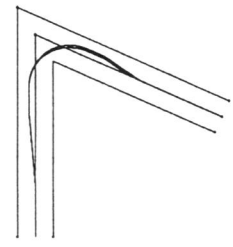


図15 修正前後の操作目標
（α＝66° ）

5．考察及び今後の課題

本研究は，ロードトレインと呼ばれる複数の車両の走行を制御したシミュレーションの結果により，提案したファジィ適応制御系の有効性を明らかにした．だが，今回の予測モデルとして，ロードトレインの力学モデルをそのまま利用し，制御対象（ロードトレイン）の動特性あるいは変化する外部環境を実時間的に反映することは言えない．今後は何らかの手法でロードトレインの動特性を反映する簡単な予測モデルを同定して，もっと実用的なシステムを研究したい．

参考文献

1）前田 幹夫，村上 周太，坪根 昌弘：ロードトレインのファジィ走行制御；第10回ファジィシステムシンポジウム，p757-760，(1994)

2）F.D.Hales：THE RIGID BODY DYNEMICS OF ROAD VEHICLE TRAINS；Proceeding of IUTAM Symposium, p131-151，(1975)

［問い合わせ］
〒８０４　北九州市戸畑区仙水町１－１
九州工業大学工学部　情報工学教室　村上 周太
ＴＥＬ　093-884-3244

WB1-2

ニューロ・ファジィ融合システムによる飛行機の自動着陸システム
Neuro-Fuzzy Control for an Aircraft Autolanding System

岡田 浩之† マティアス ケッペン‡
Hiroyuki Okada Matthias Köppen
†（株）富士通研究所
FUJITSU LABORAROLIES LTD.
‡Humboldt University,Germany

Abstract- This work describes the development of a neuro-fuzzy controller which is later used for controlling the automatic landing of an aircraft model. The software simulation includes an Instrument Landing System(ILS) helping to position the aircraft and a wind model acting as a disturbance. Fuzzy rules for the controller are developed and the membership functions of the input variables are trained using error backpropagation. The necessary training data is gained from a run employing a model of a conventional controller under almost ideal conditions. The trained neuro-fuzzy controller is then tested for different wind disturbances.

1 はじめに

近年、飛行機のハイテク化に伴い、戦闘機を始めとし旅客機にいたる広範囲の飛行機において自動着陸システムの研究が盛んになり、実用化の事例も数例みられるようになってきた。ほとんどの空港では計器誘導装置 (ILS : Instrument Landing System) が設置されるようになり ILS からの信号を利用できることが自動着陸システムの普及に欠かせないものとなっている。しかし、実用化された例は皆、風のほとんど無い時に限定して使用されており、雨の日や強い風が吹いている状況では依然としてパイロットによる操縦を必要としている。雨の日など、悪環境の時は機体の状態の監視などでパイロットにとっての作業量は普段以上に多くなり、着陸操作のみに専念するのが困難な場合がある。従って、どのような環境の下でも安心してまかせられる自動着陸システムの開発が望まれている。

Jorgensen と Schley [1] によってニューラルネットワークによる自動着陸システムの可能性が示唆されている。提案されたシステムは 3 層型のニューラルネットワークによって様々な風の状況下における PID 制御などの従来型の制御器の働きを学習によって獲得するものである。しかし、彼らの手法を用いたシミュレーションによる制御結果をみると、学習に用いた風の状況においては十分な制御結果を示しているが、学習データに無い、強い風や、非常に強い風の吹いている状況では自動着陸に失敗するであろうと思われる結果を示しており、汎化能力に問題があることが解る。また、従来の階層型ニューラルネットワークの問題点の一つに学習したネットワークの内部表象を人に理解できる形で説明できないということがあげられている。それゆえ、システムがどの様な制御ロジックを獲得したかを説明することや、学習データの存在しない予期せぬ状況においてニューラルネットワークがどのような制御を行なうかを予測するのが困難である。この、ニューラルネットワークの内部表象を説明できないということは、実用問題にニューラルネットワークを適用する際の最大の問題となっている点でもある。

ニューラルネットワークとファジイ理論の融合はファジィシステムの自動チューニングの可能性を与えるものである。我々の開発した、ニューロ・ファジィ融合システム [2] はファジィ推論におけるメンバーシップ関数やルールに対応したニューラルネットワークの構造を自動的に構築し、学習によるチューニングを可能にするものである。これにより、ニューラルネットワークがもつ学習、汎化能力とファジィ理論のもつ論理的な記述能力を併せもった適応的なシステムを構築することが可能になった。ニューロ・ファジィ融合システムは学習前のネットワークが乱数で初期化されている従来の階層型ニューラルネットワークと異なり、事前にファジィ理論に基づいて記述された専門家の知識で予め構造化されているため、学習回数の減少と、ローカルミニマムへの落ち込みの防止が期待できる。一方、学習後のニューラルネットワークをファジィ理論の形に戻すことで、内部表象を説明したり、チューニングされたメンバーシップ関数を獲得できることは、プラントの故障診断やコンサルティングなどのようにシステムの動作を説明することを要求されるような分野にとって非常に価値のあることである。

本論文では、飛行機の自動着陸にニューロ・ファジィ融合システムを適用し、従来から提案されている手法に比べ優れた制御能力を示すことを確認したので報告する。

2 モデル

ここでは、飛行機の着陸シミュレーションに用いた、飛行機、風、ILS、従来型制御器のモデルについて述べる。簡単のため、すべてのモデルは 2 次元、すなわち高度と着陸地点からの距離のみを考えることにする。

飛行機のモデルは以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
\dot{u} &= X_u(u-u_g)+X_w(w-w_g)+X_q q - g(\pi/180)\cos\gamma\Theta \\
&\quad +X_E\delta_E+X_T\delta_T \\
\dot{w} &= Z_u(u-u_g)+Z_w(w-w_g)+(Z_q-[\pi/180]U_0)q \\
&\quad +g(\pi/180)sin\gamma\Theta+Z_E\delta_E+Z_T\delta_T \\
\dot{q} &= M_u(u-u_g)+M_w(w-w_g)+M_q q+M_E\delta_E+M_T\delta_T \\
\dot{\Theta} &= q \\
\dot{h} &= -w+[\pi/180]U_0\Theta
\end{aligned}$$

ここで:

u, w = 速度の水平および垂直方向成分 (ft/sec)
u_g, w_g = 風速の水平および垂直方向成分 (ft/sec)
q, Θ = ピッチ角度の変化量 (deg/sec), ピッチ角度 (deg),
h = 高度 (ft)
δ_E, δ_T = エレベータ角度 (deg), スロットル設定値 (ft/sec)
U_0 = 巡行速度 (235 ft/sec),
γ, g = 地表に対する飛行角度 (-3 deg), 重力加速度 (32.2 ft/s^2)
$X_u, X_w, X_q, X_E, X_T, Z_u, Z_w, Z_q, Z_E, Z_T, M_u, M_w, M_q, M_E$ および

M_T は各飛行機に固有な値である。

ここで述べる、2次元モデルにおいて飛行機の制御を行なう場合、実際はスロットルの制御は必要なく着陸は、ピッチ角度の制御だけで行なうことができる。

通常、着陸操作に関して少なくとも二つのモードがある。第一のモードは十分高い高度を持ち、高度を下げつつある状態における制御であり、もう一つは、高度が下がり滑走路に近付き着陸準備に入ってからの制御である。ここで使ったモデルでは高度が 45 フィート以下になると着陸準備モードに入る。シミュレーションは高度 500 フィートから開始し、着陸に成功するか途中で墜落した時点で終了する。

制御システムの性能を調べるために風の状態を変化させる。風のモデルは高度に従って変化する定常風と予期せぬ突風からなる。これらの風のモデルに関しては文献 [3],[4] を参照されたい。

ILS は飛行機を望ましい着陸地点へ導くためのシステムであり、空港施設からの誘導電波とそれを受ける飛行機に搭載されている装置からなる。ILS からの信号はその時点での望ましい高度と降下速度を飛行機に対して与える。信号に含まれるノイズのため ILS からの信号は高度が 45 フィート以下になり着陸準備モードに入ってからは利用することができない。地表に近付いてからは最後に受信した有効な信号をもとに計算により高度および降下速度を概算する。

3 制御システム

無事、飛行機を着陸させるために制御システムにとっていくつかの課題がある。最も重要なのは着陸時における降下速度である。もし、降下速度が大きければ飛行機は簡単に破壊されてしまうだろう。もう一つの重要な点は着陸地点である。飛行機は滑走路の端よりも手前に着陸することが必要とされており、決して滑走路の端を越えて着陸することは許されない。さらに考慮すべきことは着陸時点におけるピッチ角度と水平方向の速度である。これらの値はすべて以下に示す範囲にあることが要求されている。

$$
\begin{aligned}
\text{降下速度}(\dot{h}) &: -3 \le \dot{h} \le -1(ft/sec) \\
\text{着陸地点}(x) &: -300 \le x \le 1000(ft) \\
\text{ピッチ角度}(\Theta) &: -10^\circ \le \Theta \le 5^\circ \\
\text{水平方向の速度}(V_g) &: 200 \le V_g \le 270(ft/sec)
\end{aligned}
$$

ピッチ角度と水平方向の速度はここで述べるすべての制御システムにとって要求されている。しかし、降下速度と着陸地点はトレードオフの関係になっているので、先に述べた範囲の中で、着陸準備モードに入ったら常に最適なピッチ角度を選びながら制御を行なう必要がある。たとえば、負のピッチ角度は着陸準備モードにおいてより急激に高度を下げる効果をもち、従って、望ましい着陸地点により近く着陸することができる。しかし、それは、同時に、降下速度が増加し非常に危険である。

異なる制御システムの性能を比較するために、最も重要な値と考えられる降下速度に関して、望ましい値と制御結果との誤差をシミュレーション開始から着陸までの間に渡って加えたものを性能を比較する基準とする。誤差は以下の式に従って計算する。

$$
I = \int_{t_0}^{T} (\dot{h_c} - \dot{h})^2 dt
$$

ここで、t_0、T は各々シミュレーション開始と着陸した時間であり、$\dot{h_c}$ は ILS からの降下速度 、$\dot{h}$ は 実際の降下速度である。

3.1 従来の制御システム

比較のため、Jorgensen と Schley による自動着陸システムによるシミュレーションを行った。

垂直方向の突風が $-4 \le w_g \le 4(ft/sec)$ で水平方向の突風が $|u_g| \le 24(ft/sec)$ の比較的弱い風の状況下での制御結果を図 1 および 図 2 に示す。図中 T は制御開始からの経過時間を示し、HC は h_c を H は h を各々示す。同様に、DHC は $\dot{h_c}$ を示し DH は $\dot{h}$ を示す。また、実線は ILS からの指令値であり、破線は制御結果を示す。

着陸時点における飛行機の状態は以下の通りである。

$\dot{h} = -2.87(ft/sec)$ $\quad x = 592(ft)$
$\Theta = -0.57^\circ$ $\quad V_g = 234.68(ft/sec)$
$I = \int_{t_0}^{T} (\dot{h_c} - \dot{h})^2 dt = 65.42$

これらの値はいずれも許容範囲内であり、望ましい値と制御結果との間の誤差は非常に小さい。制御システムの性能を表す指標である I は 65.42 と非常に小さい値を示した。

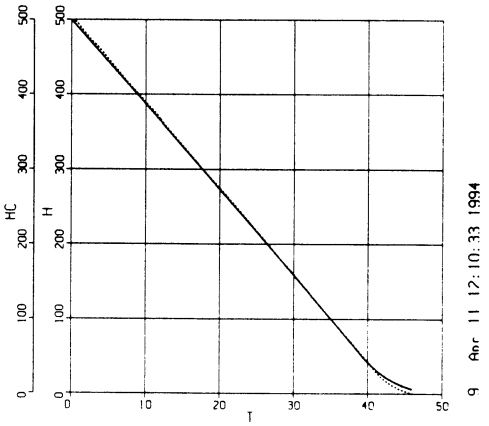


図 1: 弱い風の状況下における従来法による制御結果（高度）

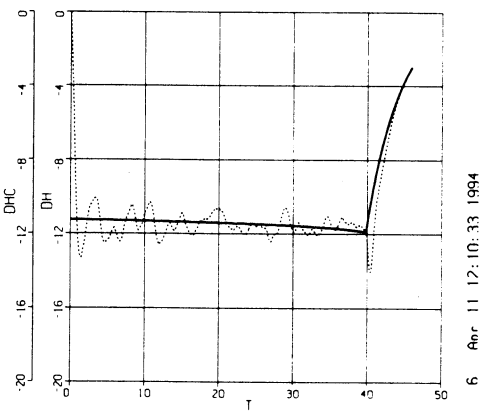


図 2: 弱い風の状況下における従来法による制御結果（降下速度）

3.2 ニューロ・ファジィ融合システムによる制御

ニューラルネットワークの学習データには飛行機が遭遇するであろうと考えられるあらゆる環境下でのデータが洩れなく含まれているのが望ましく、風の状況が刻々と変化する中で高度を徐々に下げていくような飛行行動では入力と出力のパターンは非常に膨大なものになる。

もし、一つのニューラルネットワークだけで学習データのすべてを表現しようとすればネットワークの規模は非常に大きくなり、学習時間も膨大になる。また、先のシミュレーションで述べたように、飛行機の着陸操作は高度 45 フィートを境に急変する。このように、あ

る時点を境に急激に変化するような入出力の関係を単一のニューラルネットワークで獲得するのは困難なことであると考えられる。ニューラルネットワークへの入力の一つとして高度を加えれば着陸モードによる制御方法の違いを学習できる可能性はある。しかし、この手法でも依然としてニューラルネットワークの規模が大きくなり、学習回数が増大する問題点は解決できない。

我々は、ニューラルネットワークの規模の縮小とそれに従った学習時間の短縮を実現するために、ネットワークのモジュール化を行った。着陸モードの違い、すなわち着陸準備モードに入る時点を境に二つのネットワークを用意し、常に最適なネットワークを選びながら着陸制御を行う。先に述べたように、飛行機は高度 45 フィート を境に降下モードから着陸準備モードに制御モードを変更する。

降下モードでは高度および降下速度を同じように重要視し制御する。しかし、高度が 45 フィート以下になり着陸準備モードに入ったら、墜落を防ぐために降下速度を主に制御する。したがって、着陸準備モードにおいて飛行機の制御を行うニューラルネットワークは降下速度だけを扱う小規模なネットワークとして実現される。

降下モードにおいても、突然の強風が吹いたり、ILS からの誘導経路の急変などの理由により望ましい航路と実際の航路に大きなずれを生じる場合がある。そのような時もまた、着陸準備モードと同様に降下速度を主に制御するのが望ましいことが解っている。$|\dot{h}_c - \dot{h}| > 3(ft/sec)$ になった時を緊急モードと呼び、着陸準備モードと同様な構造のニューラルネットワークで制御することにする。

3.2.1 学習前のメンバーシップ関数、ルールと制御結果

降下モードネットワーク は高度と降下速度を制御する 4 入力 1 出力ネットワークである。入力は、$(h_c - h)$, $(h_c - h)$, $(\dot{h}_c - \dot{h})$ および $(\dot{h}_c - \dot{h})$ の 4 つであり、各々の変数は negative ,zero ,positive のメンバーシップ関数によって表現される。図 3 に学習前のメンバーシップ関数の形を示す。

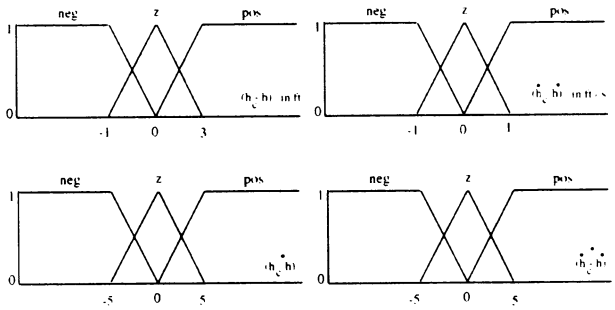


図 3: 学習前のメンバーシップ関数

緊急モードおよび着陸準備モードネットワーク は $(\dot{h}_c - \dot{h})$ と $(\dot{h}_c - \dot{h})$ を入力とする 2 入力 1 出力ネットワークである。学習前のメンバーシップの形は図 3 に示した降下モードネットワークのものと同じである。

すべてのモードにおけるネットワーク に関して Θ_c がネットワークからの出力である。Θ_c は very small, small, medium, big, very big の 5 つのメンバーシップ関数で表現されている。

降下モードネットワーク では以下に示す 9 つのルールが使われる。

Rule 1 : If $(h_c - h)$ is negative then Θ_c very small
Rule 2 : If $(h_c - h)$ is positive then Θ_c very big
Rule 3 : If $(h_c - h)$ is negative then Θ_c small
Rule 4 : If $(h_c - h)$ is positive then Θ_c big
Rule 5 : If $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is negative then Θ_c very small
Rule 6 : If $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is positive then Θ_c very big
Rule 7 : If $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is negative then Θ_c small
Rule 8 : If $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is positive then Θ_c big
Rule 9 : If all inputs are zero then Θ_c medium

緊急モードおよび着陸準備モードネットワーク では以下に示す 9 つのルールが使われる。

Rule 1 : If $(h_c - h)$ is negative and $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is negative then Θ_c very small
Rule 2 : If $(h_c - h)$ is zero and $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is negative then Θ_c small
Rule 3 : If $(h_c - h)$ is positive and $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is negative then Θ_c medium
Rule 4 : If $(h_c - h)$ is negative and $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is zero then Θ_c very small
Rule 5 : If $(h_c - h)$ is zero and $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is zero then Θ_c medium
Rule 6 : If $(h_c - h)$ is positive and $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is zero then Θ_c very big
Rule 7 : If $(h_c - h)$ is negative and $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is positive then Θ_c medium
Rule 8 : If $(h_c - h)$ is zero and $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is positive then Θ_c big
Rule 9 : If $(h_c - h)$ is positive and $(\dot{h}_c - \dot{h})$ is positive then Θ_c very big

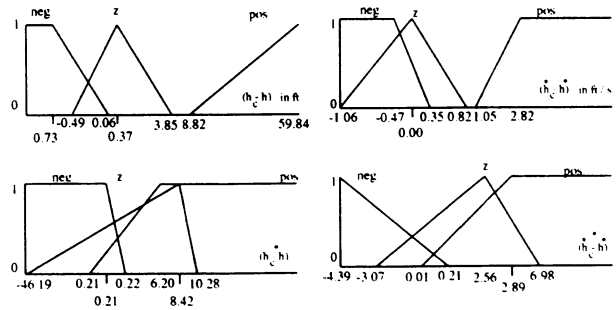


図 4: 学習後のメンバーシップ関数（降下モード）

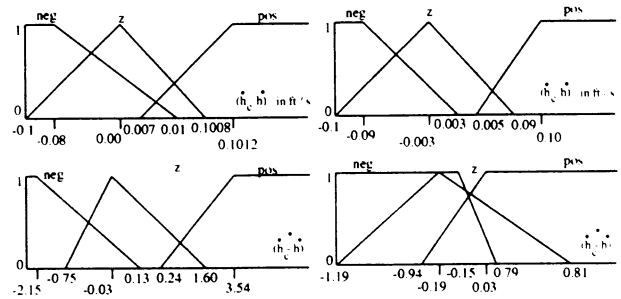


図 5: 学習後のメンバーシップ関数（緊急モード $|\dot{h}_c - \dot{h}| > 3$ ft/s）

図 6: 学習後のメンバーシップ関数（着陸準備モード $h < h_f$）

制御結果

飛行機は望ましい着陸地点から 1866.12 フィート過ぎた地点にかろうじて着陸している。着陸時点における飛行機の状態は以下の通りでありこれらの値はいずれも許容範囲内にはいっている。しかし、制御システムの性能を表すために導入した指標である I は 95.43 と従来法による制御の 65.42 と比べて非常に悪い値である。

$$\dot{h} = -2.74(ft/sec) \qquad x = 1866.12(ft)$$

$\Theta = -0.64°$ $V_g = 234.68(ft/sec)$

$I = \int_{t_0}^{T}(\dot{h_c} - \dot{h})^2 dt = 95.43$

3.2.2 学習によるメンバーシップ関数の変化

風の無い状況で、先に述べた従来法による制御結果をニューラルネットワークの学習データとした。これにより、ネットワークは従来法による制御アルゴリズムを獲得することになる。従来法による制御結果を学習データとする方法は容易に学習データが得られるという利点がある一方、従来法以上の制御性能を発揮できないのでは、という不安がある。しかし、ニューロ・ファジィ融合システムでは着陸操作に関する専門家の知識をファジィ推論の形で備えており、さらに、ニューラルネットワークのもつ非線形の汎化能力のため学習データに無いような状況においても適切な制御を行えるものと期待できる。

各々のネットワーク毎に4000パターンの学習データを用意し、誤差逆伝搬学習法により学習を行った。過剰学習に注意するため、学習に用いなかった1000パターンのデータで実際にシミュレーションを行い、最小の誤差を呈した時点で学習の終了とした。学習回数は降下モード用のニューラルネットワークが12回、緊急モード用が8回、着陸準備モード用が9回と非常に少ない回数で最小の誤差を与える結果を得た。

ニューロ・ファジィ融合システムはファジィ推論と対応しているため、前件部メンバーシップ関数、ルールの重要度、後件部メンバーシップ関数の各々を独立に、またあるいは同時に学習することができる。これにより、制御システムの中で特に注目している部分を重点的にチューニングすることが可能になる。ここでは、前件部メンバーシップ関数のみを学習する。図4、図5、図6に各々の制御モードにおける学習後のメンバーシップ関数の変化を示す。

表1: シミュレーション結果

風速 (ft/sec)	従来法	未学習	学習後
$-5 \le w_g \le 9$ $\lvert u_g \rvert \le 23$	I = 33.69	I = 71.28	I = 21.82
$-15 \le w_g \le 25$ $\lvert u_g \rvert \le 32$	I = 72.83	着陸失敗	I = 23.30
$-30 \le w_g \le 50$ $\lvert u_g \rvert \le 45$	I = 201.59	着陸失敗	I = 28.52

4 まとめ

表1にILS信号と制御結果との誤差の一覧を示す。

ニューロ・ファジィ融合システムは無風状況でのデータだけで学習したにもかかわらず、強い風の状況においてもILSからの信号に沿った着陸動作を行えた。また、従来法による制御と比べて、すべての風の状況においてニューロ・ファジィ融合システムが優れた制御性能を示した。

学習回数が非常に少ないことは、オンライン学習の可能性を示すもので、リアルタイムでデータを学習しながら制御を行うようなシステムを構築できる可能性がニューロ・ファジィ融合システムにはある。また、学習後のニューラルネットワークの内部表象を説明することで、論理的に説明しづらいベテランパイロットの経験やノウハウを獲得し、利用することが可能である。

今後の課題として、自動着陸の性能を向上させるため無風状態だけでなく、種々の風の状況におけるデータを学習させることが挙げられる。また、実際にパイロットが行った、飛行機の着陸操作を学習データとすれば、さらに優れた自動着陸制御システムになると考えられる。

参考文献

[1] C.C.Jorgensen and C.Schley (1990). A Neural Network Baseline Problem for Control of Aircraft Flare and Touchdown. in W.T.Miller, R.S.Sutton and P.J.Werbos Eds. *Neural Networks for Control*, Cambridge, MA., The MIT Press

[2] H.Okada, R.Masuoka and A.Kawamura (1993). Knowledge-Based Neural Network - Using Fuzzy Logic to Initialize a Multilayerd Neural Network and Interpret Postlearning Results. *FUJITSU Scientific and Technical Journal Vol.29, No.3* .

[3] Ch.W.Anderson and W.T.Miller (1990). Challenging Control Problems. in W.T.Miller, R.S.Sutton and P.J.Werbos Eds. *Neural Networks for Control*, Cambridge, MA., The MIT Press

[4] F.Neuman and J.D.Foster (1970). Investigation on a digital automatic aircraft landing system in turbulence. *NASA Technical Note TN D-6066*, Ames Research Centre, Moffet Field, CA.

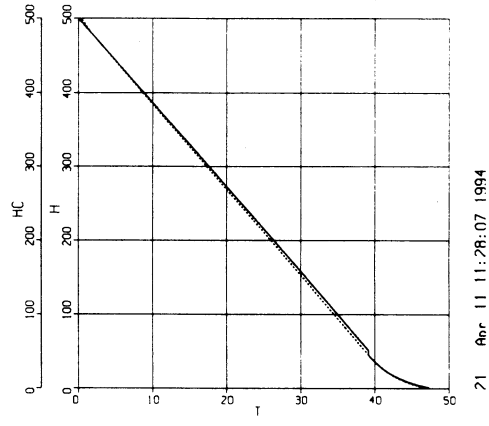


図7: 弱い風の状況下における学習ニューロ・ファジィ制御による制御結果（高度）

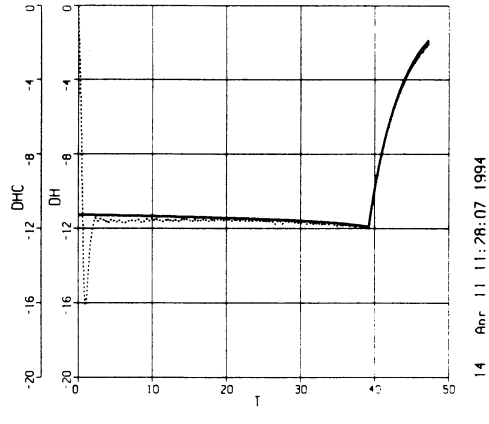


図8: 弱い風の状況下における学習ニューロ・ファジィ制御による制御結果（降下速度）

【連絡先】

〒211 川崎市中原区上小田中1015 (株) 富士通研究所 知識処理研究部

岡田 浩之 (E-Mail : okada@flab.fujitsu.co.jp)

WB1-3

2ステッピングモータによる平面上のボールの運動軌道のファジィ制御

Fuzzy Control of the Trajectory of a Ball Moving on a Plane with Two Stepping Motors

湯場崎 直義* 易 建強* 大谷 正幸* 芦田 隆次*
Naoyoshi Yubazaki Jianqiang Yi Masayuki Otani Takatsugu Ashida
畝村 暢一* 川崎 慎一* 廣田 薫**
Nobuichi Unemura Shinichi Kawasaki Kaoru Hirota
* マイコム株式会社 ** 東京工業大学
Mycom Incorporation Tokyo Institute of Technology

ABSTRACT — A fuzzy system of controlling a ball moving on a plane to follow desired trajectories is proposed. Among 4 corners of the plane, one is selected as a pivot, one of the pivot adjacency is set as free, and the other two are connected, respectively, with a cylinder which is linked with a stepping motor. Since the motion of the ball can be resolved to two independent movements, two sets of fuzzy rules are designed for each movement. One is to reduce position error, another is to suppress velocity. For each movement, fuzzy inference of usual max−min composition method is done from these two sets, respectively, and a weighted sum of the results is taken as control input at each sampling period. The system then drives the stepping motors and the cylinders to change the angles of the plane based on the control inputs. Thereby, the velocity of the ball on the plane is adjusted step by step, and the ball is controlled to move along the desired trajectories. Several simulations are also presented. The results show that the proposed system can control the ball to follow trajectories of ellipses, rectangles, triangles, and '8'−shape figures stably and precisely. More important, the system parameters are proved to be robust for different trajectories, or different sizes, or different initial conditions.

1．はじめに

任意の位置にある物体を、与えられた任意形状の目標軌道に乗せてその目標軌道に沿って追従させることがきわめて難しい問題である。例えば、卓球あるいはテニスのラケットの上にボールを乗せてラケットの角度を変えることによって、そのボールの運動軌道を制御するなどが挙げられる。

このような問題の解決が人間の経験などに大きく左右されるので、制御システムを構築するとき経験などをいかに取り入れるかは結果の良否に直接関わってくる。従来のＰＩＤ制御理論は、数値モデルをベースとしているのでこのような経験頼りの問題に不向きである。一方、ファジィ制御理論[1]は、人間の経験などをＩＦ－ＴＨＥＮ形式のルール集合にまとめこのルール集合をベースに推論を行うので、人間の経験などに強く依存する物体の軌道追従問題に適する。例えば、ファジィ制御によるヘリコプタの指定軌道の飛行シミュレーションと実験[2,3]がすでに行われている。

ここでは、平面上で運動するボールを制御対象とし、ファジィ推論で二つのステッピングモータの出力パルス数を制御して平面の角度を変えることによってボールを指定の目標軌道に追従させる制御システムを提案する。ボールが平面から落ちないようなファジィ制御システム[4]がすでに報告されているが、そのシステムは単に安定化を図るものである。また、ファジィ連想記憶によるヘリコプタの軌道制御[5]も提案されているが、システムが複雑だけではなく実際の軌道と目標軌道の差が大きいなどの欠点がある。

シミュレーションにおいては、目標位置と現在位置の差に関するファジィ推論および現在速度に関するファジィ推論を行い、重み付き総和でステッピングモータの出力パルス数を決める。ステッピングモータにつながるシリンダが上下移動して平面の角度を変えるので、ボールは加速度を変化させながら目標軌道を追従していく。シミュレーションの結果によって、本提案手法が任意位置から出発したボールを、ある範囲内の大きさの楕円（円）、長方形（正方形）、三角形、８字図形などの目標軌道に安定かつ精度良く追従させることができることを実証し、その有効性を示す。

2．制御システム

2.1 システムのモデル

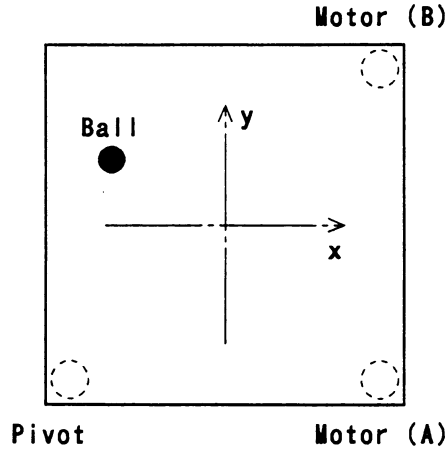


図１　システムのモデル図

図１に真上から見た本システムのモデル図を示している。正方形の平面の４つのコーナーの内、１つをフリーの状態にし、その隣の１つを支点とし、残る２つのコーナーにそれぞれシリンダを通じてステッピングモータとつなぐ。モータを回転させればシリンダーが上下方向に移動するので、平面は支点に対して回転す

る。平面上のボールはその影響を受けて運動方向と速度の大きさを変えながら軌道を描いていく。従って、適切な制御手段を取らない限り、ボールはたちまち平面から落ちてしまう。

2.2 ボールの運動モデル

図1に示されているように、原点を平面の中心に置き、x軸とy軸をそれぞれ支点から（シリンダ）モータA側へ、（シリンダ）モータA側から（シリンダ）モータB側への方向に平行するように座標系を取る。

ここで、平面と支点および平面とシリンダの間の摩擦が無視でき、平面とボールの間の摩擦が各方向で均一とする。また、モータA側とモータB側の特性がまったく同じとし、両モータの出力パルス総数をそれぞれu_A、u_Bと置く。ボールのx方向の運動がu_Aにだけ依存し、y方向の運動が$u_B - u_A$にだけ依存するので、u_Aと$u_B - u_A$に対しx方向とy方向の運動は互いに独立になっていることがわかる。従って以下では、x方向について説明していくことにする。

x軸と水平面の成す角度が小さいと仮定すると、x方向の運動方程式が近似的に次のように求められる。

$$d^2x/dt^2 = k_1 + k_2u_A \qquad (1)$$

ただし、k_2は定数であるが、k_1はボールと平面との間の摩擦係数、およびボールの速度の符号に依存する。

2.3 ファジィ制御システム

与えられた目標軌道に対してボールが安定かつ正確に追従できるかどうかは、基本的にボールの速度に左右される。一方、軌道追従制御問題は位置決め制御問題に比べて、速応性よりもむしろ追従性が要求される。すなわち、速応性と追従性が同時に達成できればもっともよいが、両者が矛盾するときには速応性を犠牲にして追従性を優先しなければならない。

そこでボールのx方向の運動について、現時刻の速度をdx／dt、次の時刻の予測位置をx_p、次の時刻の目標位置をx_rとして、以下のように位置制御用ファジィルールテーブルと速度制御用ファジィルールテーブルを作成した。NS、ZOなどはファジラベルを意味し、通常の三角形のメンバーシップ関数を持つ。

位置制御用ファジィルールの前件部変数は目標位置と予測位置との誤差で、後件部変数はモータAへの出力パルス数の変化分である。図2よりこれらのルールの前件部と後件部のラベルはちょうど反対になっていることがわかる。すなわち、負の誤差に対しモータAを正の方向（シリンダを上の方向に移動させることに対応）に、または正の誤差に対しモータAを負の方向（シリンダを下の方向に移動させることに対応）に回転させることによって、加速度を誤差とおなじ方向に変化させようとするものである。

速度制御用ファジィルールの前件部変数はボールの現時刻の速度で、後件部変数は位置制御用ファジィルールと同じモータAへの出力パルス数の変化分である。図3よりこれらのルールの前件部と後件部のラベルはすべて一致していることがわかる。すなわち、速度が正の場合は、モータAを正の方向に回転させることによってボールの加速度を負の方向に変化させようとし、逆に速度が負の場合は、モータAを負の方向に回転させることによってボールの加速度を正の方向に変化させようとするものである。これによって、ボールの速度を小さく抑えられる。

前件部変数 $x_r - x_p$	後件部変数 Δu_A
NB	PB
NS	PS
ZO	ZO
PS	NS
PB	NB

図2　位置制御用ファジィルールテーブル

前件部変数 dx／dt	後件部変数 Δu_A
NB	NB
NS	NS
ZO	ZO
PS	PS
PB	PB

図3　速度制御用ファジィルールテーブル

Max－Min合成重心法で位置制御用ファジィルールテーブルから求めた推論結果をΔu_{A1}とし、速度制御用ファジィルールテーブルから求めた推論結果をΔu_{A2}とすると、最終的にモータAへの操作量の変化分Δu_Aを次の重み付き総和で定義する。

$$\Delta u_A = 0.2\Delta u_{A1} + 0.8\Delta u_{A2} \qquad (2)$$

このように位置制御用ファジィルールテーブルに対しては小さな重み、速度制御用ファジィルールテーブルに対しては大きな重みを付けることによって、ボールの速度を小さく抑えながら目標軌道を正確に追従させることができる。

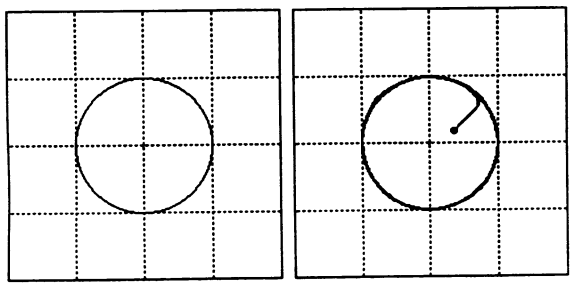
3．シミュレーション

3.1 目標軌道と目標位置

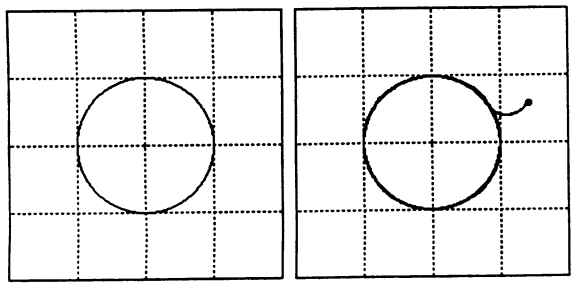
目標軌道として、楕円類、長方形類、等辺三角形、8字図形を用いている。楕円軌道と長方形軌道の中心が座標原点に置かれ、楕円の軸または長方形の辺が座

標軸に平行するとする。等辺三角形の重心が座標原点にセットされ、その底辺がｘ軸に平行するとする。８字図形の縦軸がＹ軸上に置かれ、上下部分の交差点が座標原点になるとする。これらの目標軌道の大きさがある範囲内で自由に設定できる。

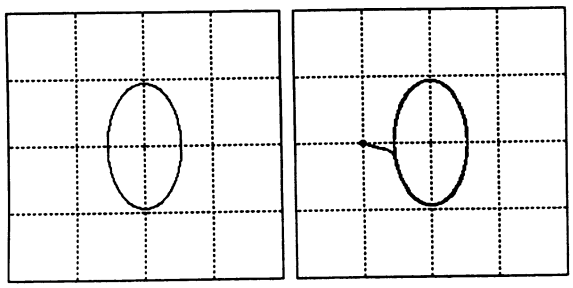
８字図形以外の目標軌道の場合は座標原点に対して、８字図形の場合は上下部分のそれぞれの中心に対して、ボールの現時刻の位置から一定の角度先の目標軌道上の点を次の時刻の目標位置とする。



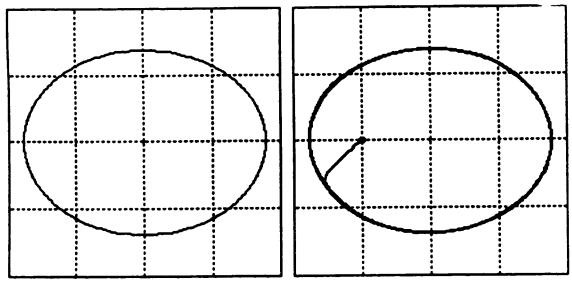
（ａ）



（ｂ）



（ｃ）



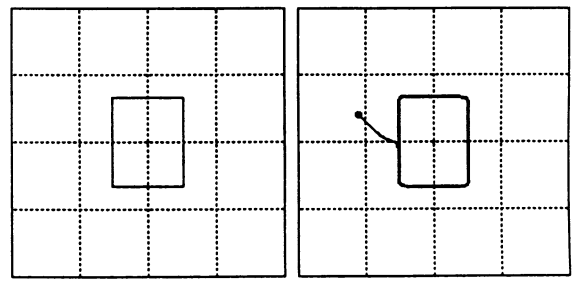
（ｄ）

図４　楕円軌道の追従結果

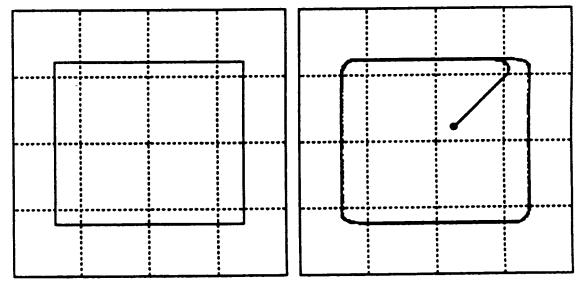
3.2 シミュレーション結果と検討

以下のシミュレーションにおいて、平面の大きさを430㎜×430㎜とし、平面の両辺と水平面の角度を共に±3°以内とした。ボールと平面の摩擦係数を0.01、サンプリング周期を0.1sとした。また、ボールの現時刻の位置および速度として運動方程式によるものを使った。さらに、モータとシリンダの動作が一瞬で終わるという理想状態を仮定した。

図４は楕円軌道についてのシミュレーション結果を示している。左側は目標軌道、右側は実際の軌道を意味する。（ａ）と（ｂ）は同一の目標軌道に対してそれぞれ内側と外側の初期位置から出発したボールの描いた軌道である。（ｃ）と（ｄ）は（ｂ）と同じ初期状態に対して大きさの異なる楕円軌道についての結果である。このように同一の目標軌道に対して、ボールは平面上のほとんどどの位置から出発しても安定かつ正確に目標軌道を追従することができた。大きさの異なる同種類の目標軌道に対しても、非常に小さな軌道を除けばボールは同様に安定して目標軌道を描くことができた。



（ａ）

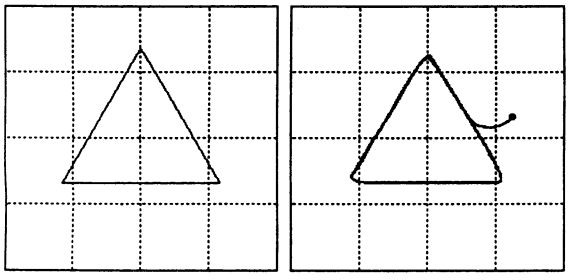


（ｂ）

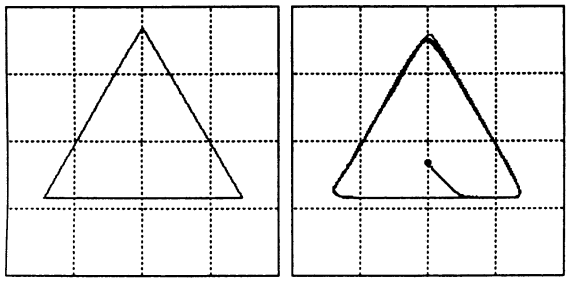
図５　長方形軌道の追従結果

図５の（ａ）と（ｂ）はそれぞれ内側と外側から長方形軌道を追従した結果を示している。また図６の（ａ）と（ｂ）は三角形軌道を追従した結果を示している。これらの図形からわかるように今回提案した制御システムは、楕円のような滑らかな軌道にしても、長方形ないし三角形のようなコーナーで方向が急変する軌道にしても、誤差を小さく抑えながらボールを安定に軌道追従させることができた。コーナーの近くでは軌道は多少丸みをおびたが、全体としては目標軌道をバランス良く追従できたといえる。

図７の（ａ）と（ｂ）では提案手法でそれぞれ内側と外側から８字図形を追従した結果が示されている。この図からわかりにくいが、我々が’８’という文字を書く場合とまったく同じように、ボールは実にきれいに上下部を順番よく正確に回ることができた。

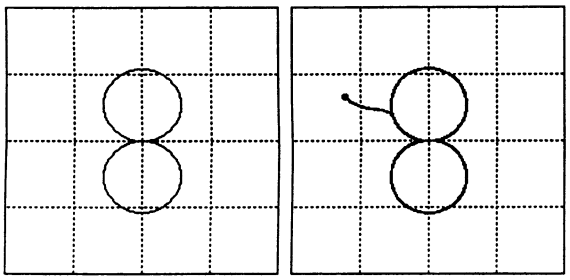


（a）

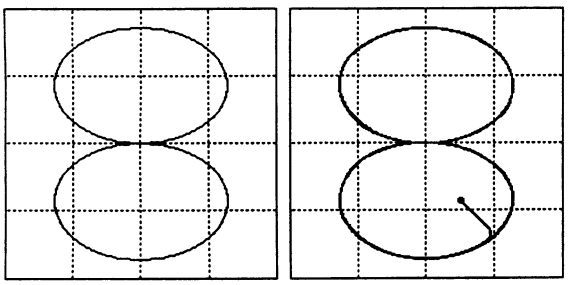


（b）

図６　三角形軌道の追従結果



（a）



（b）

図７　８字図形の追従結果

このように、従来の手法では異なる種類の目標軌道に対して制御パラメータなどを設定し直さなければならないし、時には同種類の目標軌道に対しても大きさあるいは初期状態によっては同じくパラメータを調整する必要も有り得る。しかし、今回提案したファジィ制御システムは、目標軌道の種類、大きさ、または初期状態において、パラメータなどの調整がまったく要らないという特徴を持ち、同一の制御器で広範囲の軌道制御を安定かつ精度良く実現できた。

4．まとめ

複数のファジィルールテーブルのファジィ推論の結果の重み付き総和で決めた操作量に基づいてステッピングモータを駆動し平面を回転させることによってボールを指定の目標軌道に追従させるファジィ制御システムを提案した。提案手法で楕円、長方形、三角形および８字図形の軌道追従シミュレーションを行った。シミュレーション結果からわかるように、本手法は単純でありながら、楕円、長方形、８字図形などの目標軌道に対してボールを安定かつ正確に追従させることができた。また本手法は、目標軌道の形状と大きさおよびボールの初期状態によってパラメータなどの調整をする必要がまったくなく、柔軟でロバストであることもわかった。

これからは本制御システムによる制御実験を行うつもりである。

参考文献

[1] 菅野道夫：ファジィ制御、日刊工業新聞社(1988)。

[2] M.Sugeno, I.Hirano, S.Nakamura, and S.Kotsu: "Development of an Intelligent Unmanned Helicopter",Proceedings of the International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium(Yokohama, Japan), Vol. 5, pp.33-34(1995).

[3] 百武友幸、室伏俊明、菅野道夫：シミュレータ上でのヘリコプターのファジィ制御、第７回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.35-38 (1991)。

[4] 廣田薫、倪景慈：不安定ボールのファジィ制御、法政大学工学部研究集報、No.27、pp.41-50(1991)。

[5] 山口亨：ファジィ・ニューラルネットシステム、ファジィ技術の先端的応用（国際ファジィ工学研究所編集）、第７章(1993)。

［問い合わせ先］

〒616 京都府京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町12

マイコム株式会社　中央研究部

易　建強（い　けんきょう）

TEL: 075-882-3601

FAX: 075-882-6531

WB1-4

多自由度系に対する ファジィ制御知識の表現と獲得に関する検討

A Study of Fuzzy Control Knowledge Representation for Multi-Freedom System

小倉久和　ムハマド・ロムジ　小高知宏
Hisakazu Ogura　Muchammad Romzi　Tomohiro Odaka

福井大学工学部
Faculty of Engineering, Fukui University

Abstract − A Fuzzy rule set of a Fuzzy control system generally has many parameters to be tuned, so we have to try and try many times to tune the Fuzzy rule set. We have been studying a pendulum control system using Fuzzy inference. A single pendulum system has only one degree of freedom and is quite a simple system to control. A double pendulum system has two degrees of freedom and is quite different from a single pendulum in the structure of control space. Here we reported preriminary results of the study on a double pendulum control system.

1. はじめに

ファジィ制御におけるルールの作成は、多くのパラメータを含むため、ユーザにまかされている部分が多い。そのため、経験と予見あるいは勘によるチューニングを行う必要がある。

われわれはこれまで、1自由度の不安定系を中心に、ファジィ制御知識をどのように表現し、獲得するかの研究を行なってきた。具体的には倒立振子の姿勢制御を対象に、そのようなファジィ制御ルールを作成するためのファジィ推論システムを作成し、報告してきた。また、制御ルールの獲得と最適化を遺伝的アルゴリズムにより行なってきた。本研究では、ファジィ制御推論システムの拡張と質的な向上を図るため、多自由度不安定系まで対象を広げ、制御知識の表現、知識獲得の検討を行なう。

一般に、知識の表現空間が巨大になることは大きな困難をもたらす。知識の表現空間が大きくなりがちな多自由度系に対しても、知識の表現構造を単純化することが不可欠である。適応制御は、知識表現を簡単にする一つの方法である。

本論文では、二重振子系の姿勢制御を対象モデルとして、コンピュータシミュレーションを行い、多自由度不安定系におけるファジィ制御ルールの特性を解析する。そして、ファジィ変数のレンジのダイナミックなスケーリングという極めて簡単な機構によって有効な適応制御を実現できることを示す。

2. 二重振子の倒立姿勢制御ファジィルール知識の表現

二重振子系のモデルを図1に示す。振子1は台車に、振子2は振子1に、それぞれまさつの無いジョイントで接続されており、同じ鉛直平面内で自由に回転できる。台車は水平方向の力 uを受けて左右に水平線上を自由に動ける。鉛直上方からの2つの振子の傾きをそれぞれθ_1, θ_2、それらの時間変化をω_1, ω_2とし、台車の位置と速度は x, vとする。

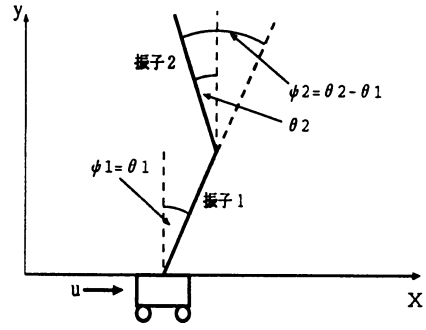


図1　2重振子のモデル

ファジィ推論システムは、この系の6個の観測量(θ_1, θ_2, ω_1, ω_2, x, v)から操作量 uを推論するが、位置制御は姿勢制御に対して独立に扱う。ファジィ制御システムの概略を図2に示す。ファジィ推論は、プロダクション型のファジィ推論ルールの集合に対し、ミニマム－加算－重心法で行う。各ファジィ・プロダクションルールの前件部は、複数の観測量の条件の連言からなり、後件部は操作量 uである。それぞれの変数は三角型のファジィ集合で表現する。

(a) 姿勢制御ルール

シミュレーションで用いた倒立姿勢制御のためのファジィルールは表1のような構成である。ただし、$\phi_1 = \theta_1$, $\phi_2 = \theta_2 - \theta_1$で、$\phi_2$は振子2の振子1に対する相対的な傾きである。表1(a)のu_1は振子1の観測量ϕ_1とω_1からのみ推論された振子1の姿勢を制御するための操作量である。これは単振子のルールと同じである。振子2に対する操作量u_2の推論規則は出力の符号を入れ換え

たものである。実際の操作量uは、u_1とu_2をそれぞれ非ファジィ化し、それを用いて表1(b)で推論する。uを推論するとき、u_1とu_2を一旦非ファジィ化するのは、u_1とu_2の推論規則とuの推論規則を独立させて扱いやすくするためである。

表1　倒立姿勢制御ルール表

$\varphi_1\backslash\omega_1$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

(a) ϕ_1, ω_1からu_1を推論するルール

$u_1\backslash u_2$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NS	PS	PM	PB	PB
NM	NB	NM	NS	PS	PM	PB	PB
NS	NB	NM	NS	PS	PM	PB	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NB	NB	NM	NS	PS	PM	PB
PM	NB	NB	NM	NS	PS	PM	PB
PB	NB	NB	NM	NS	PS	PM	PB

(b) u_1, u_2からuを推論するルール

各変数のレンジは、θ_1[-15°, 15°], θ_2[-7.5°, 7.5°], ω_1[-54°/s, 54°/s], ω_2[-30°/s, 30°/s], u_1[-30N, 30N], u_2[-15N, 15N], u[-30N, 30N]で、7つのラベルには、均等に三角ファジィ集合を割り当てた。

(b) 位置制御ルール

台車の位置制御は、2つの振子の制御目標角度を動的に操作することによって台車の位置を制御する方式とした。たとえば台車が左に偏移しているとき、2つの振子の目標角度を少し右側にしてやれば、結果として台車は右方に移動するようになる。このような位置制御方式は、われわれが実際に何かを倒立させるときに経験する方法でもある。

位置制御のための推論ルールを表2に示す。簡単のため、変更量は2つの振子で共通とした。

表2　位置制御ルール

$X\backslash V$	N	ZO	P
N	P	P	ZO
ZO	P	ZO	N
P	ZO	N	N

(c) 振り上げ制御知識と制御知識の切り換え

任意の初期角度から倒立を実現するためには、振り上げ倒立の制御ルールが必要である。鉛直下向きの状態から、振り上げによって倒立姿勢制御可能な領域に持って行くために、次のような制御ルール群を構成した。

(1)鉛直下付近でのルール群

適用条件：$|\theta_1 - 180°| < 15°$

振子に勢いを付けるルール

if ω_1=P then u=PM　など

振子が折れ曲がらないようにするルール

if ϕ_2=PS then u=PS

if ϕ_2=PM then u=PM　など

(2)水平方向付近でのルール群

適用条件：$|\theta_1 - 90°| < 30°$

折れ曲がりを防ぐルール：θ_1=60° ～120°

if ϕ_2=PS then u=NS

if ϕ_2=PM then u=NM　など

(3)倒立に失敗したときに体勢を立て直すルール

適用条件：3回転したとき

勢いを押さえるルール

if ω_1=P then u=NB　など

振子が折れ曲がらないようにするルール

これらの振り上げ制御ルール群は、適用条件によって切り換えて適用する。この適用条件は、簡単のため、クリスプな条件判断としている。また、振り上げルールと倒立姿勢制御ルールの切り換えもクリスプである

(4)姿勢制御ルールの適用

適用条件：$|\theta_1| < 80°$

かつ $|u_1 - u_2| < u_0$（=定数）

位置制御ルールは、姿勢制御や振り上げ制御のルールとは無関係に、常に適用する。

このように、姿勢制御、振り上げ制御、および位置制御のためのルール群を構成することにより、任意の初期角度から倒立した状態に移行させることができる。

3. 変数のレンジのダイナミックなスケーリングによるファジィ制御知識の適応化

ファジィ制御知識により、より広い領域の初期値で倒立可能とすることと、より真っ直ぐに倒立させることとは、相反する要請である。前者のためには広いレンジにわたる姿勢制御ルールが必要であり、後者のためには制御目標付近での細かい姿勢制御ルールが必要となる。自由度が1の場合は、中央付近で細かく、周辺で粗いファジィ集合を設定することで実現できるが、二重振子の場合には多自由度性のためにこのような方法では表現空間が大きくなり、実際には困難である。ここでは、コンピュータシミュレーションを繰り返し行った結果、変数のレンジを振子の状態に応じてダイナミックにスケーリングすることで適応させる方法を採った。

各変数のレンジを次のようにして、ダイナミックに変更する。2章で示した表1の姿勢制御ルールにおける各

変数のレンジを基本レンジとする。レンジの中心は目標値あるいは出力0である。推論ルールの前件部変数θ_1, θ_2, ω_1, ω_2, u_1, u_2の全ての変数がレンジの中央寄り1/2以内の値となると、後件部変数を含めて全ての変数のレンジを1/2倍に縮小スケーリングする。逆に、前件部変数の１つでもレンジを越えた場合は、全ての変数のレンジを2倍に拡大スケーリングする。レンジの縮小、拡大は条件を満足するまで繰り返す。たとえばθ_1の基本レンジは[-15°, 15°]であるが、１回の拡大スケーリングで[-30°, 30°]となり、２回の縮小スケーリングで[-3.75°, 3.75°]となる。このスケーリングに比例してファジィ集合の台がスケーリングされる。姿勢制御ルールは表１と同じである。このレンジの切り換え判断は、クリスプな基準で行っている。

位置制御に関しても同様に、レンジスケーリング方式を適用することができる。もちろん、拡大スケーリングを適用する場合は、倒立姿勢制御の可能な範囲でのみ行わせるような付加条件を必要とするが、ここでは詳細は省略する。

このような適応制御を行うことにより、比較的簡単な制御ルール構成で、可制御領域を広げ、かつ精密な制御を行うことができる。また、たとえば風などに起因する外力による撹乱に対しても適応することができ、ロバストな制御を実現している。

4. 二重振子系の倒立姿勢制御シミュレーション

4.1 ファジィ推論エンジンとファジィ制御シミュレーションシステム

ファジィ制御シミュレーション・システムは、図２に示したように、二重振子のモデル・シミュレータ（以下では単にシミュレータ）、それを制御するファジィ・コントローラ（以下では単にコントローラと呼ぶ）、および、制御知識を管理しファジィ推論を行うファジィ推論エンジンからなる。すべて、UNIX上のソフトウェアで、C言語を用いて作成した。シミュレータとコントローラは、対象に合せて作成するが、ファジィ推論エンジンは対象に合せて構成されるプロダクション型の制御知識を参照しながら動く汎用のファジィ推論システムである。

制御知識は、観測量から操作量を推論するプロダクション型のファジィルールで表現されており、知識ベースに記憶されている。この知識ベースは、システムの起動時にテキスト形式で記述されたファイルから読み込まれ、シミュレーションの過程でダイナミックに書き換えることができ、系の状態や状況に適応して制御知識を変更することができる。制御知識はプロダクション型で、ファジィ集合は台形型のファジィ集合である。推論はミニマム・加算法で、非ファジィ化は重心法で行なっている。

システムには、さらに、ヒューマン・インタフェースとして、シミュレーション中の振子の運動を表示したり、コマ送り・戻し、リプレイなどを行う機能や、ファジィ制御知識やファジィ集合の編集などをテキストベースで行う機能などを用意してある。

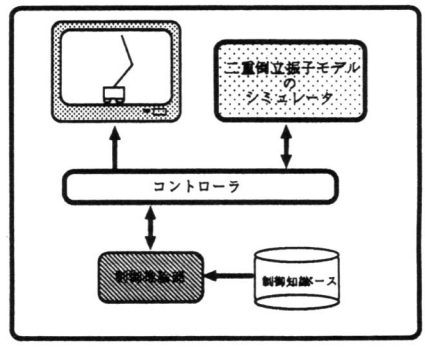


図２　ファジィ制御シミュレーションシステム

4.2 二重振子系の制御シミュレーション

図３は、変数のレンジを基本レンジに固定したときの、振子の運動の様子の例を示し、図４は、変数のレンジをスケーリングしながら適応させたときの、振子の運動の様子の例である。図３と比べると、図４では精度の高い制御が行われているのが判る。

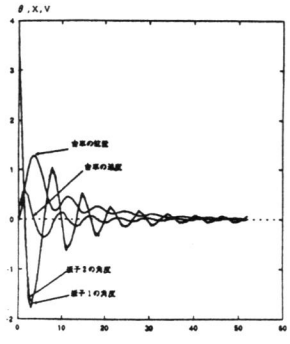


図３

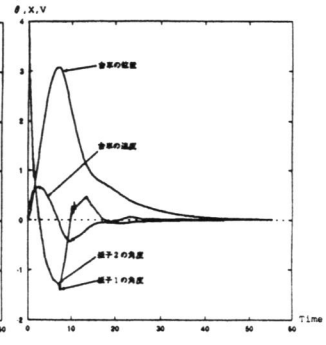


図４

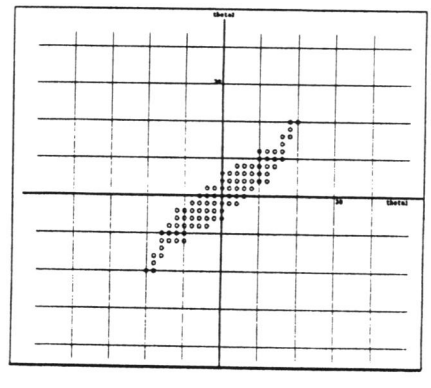


図５

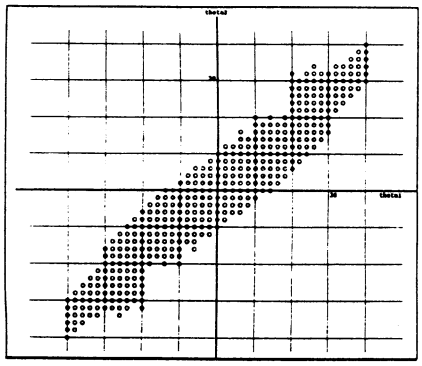


図６

図５は、初期値として、ω_1, ω_2をゼロ、θ_1, θ_2をさまざまな値にしたとき、倒立に成功した点を示す。この図から、姿勢制御ルールの前件部変数として(θ_1, θ_2)ではなく(ϕ_1, ϕ_2)とすることの妥当性が推測できる。図６は適応スケーリングの場合のものである。図５と比較して、可制御範囲が格段に改善されていることが判る。

4.3 二重振子の振り上げ倒立制御のシミュレーション

図７は、鉛直下方で静止した初期状態から振り上げて倒立姿勢まで行った時の振子の運動の例を示す。振り上げ倒立は、基本的には倒立状態の可制御な領域へ系を持っていくことによって行われるが、可制御な範囲が狭いと、実際には極めて困難である。振り上げ制御ルールは、レンジのスケーリングによる適応姿勢制御と組合わせて初めて倒立に成功することができた。

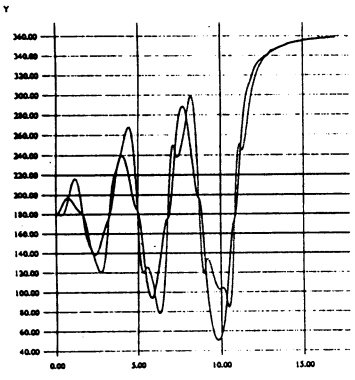


図７

さまざまな初期条件（ただし、ω_1, ω_2はゼロ、θ_1, θ_2のみ-180°～180°とする）でシミュレーションを行うことによって、現在のルール構成で、１度は振り上げ倒立に失敗しても、それを何回か繰り返すことで必ず倒立に成功するのを確認した。

5. まとめと考察

二重振子の倒立姿勢制御を対象に、比較的単純なファジィ制御ルールを構成し、その有効性を確認した。さらに、変数のレンジのダイナミックなスケーリング方法を用いた適応制御を行うことにより、制御精度の向上とロバスト性の確保という相反する要請を満足させることができた。この適応制御方法は、ファジィ制御ルールの表現に適した手法であり、かつ、その極めて簡単な手法にもかかわらず、極めて高い制御効果をもたらすことが確認できた。

倒立振子に対する姿勢制御ルールと位置制御ルールはそれぞれに適用されるが、結果的には位置制御は姿勢制御に対して摂動的な影響を与えるだけである。したがって、単振子では本質的に自由度は１であり、二重振子系では２である。多自由度系では、制御変数の張る空間は１自由度の場合とは異なって目標点へ至るルートは無数にあり、制御知識の表現はそのゆえに複雑な様相を示す。適応制御は、このような複雑な制御知識を簡単にする可能性がある。

二重振子の姿勢制御知識は、ここでは変数のレンジのスケーリングという方法を用いて適応化することにより、単純化することができた。これは、振子の状態($\phi_1, \phi_2, \omega_1, \omega_2$)に依存した姿勢制御ルールの作成を繰り返してコンピュータ・シミュレーションを行った試行錯誤の結果である。

制御規則の前件部変数と後件部変数が同じスケーリング・ファクタでスケーリングされるということは、制御器がこのことに関して線形であることを意味する。このことは、制御目標の近傍では、二重振子の運動方程式がこれらの変数について線形方程式で近似できることに対応していると思われる。したがって、ここで提案したスケーリングによる適応制御方式は、制御目標近傍における力学系のスケーリング性（スケーリング指数）に依存することになろう。

参考文献

[1] 小倉,番,小高,高濱:適応ファジィ推論システムによる二重倒立振子の試み、情報処理学会第４８回全国大会論文集６,157-158 (1994)

[2] Muchammad,番,小高,小倉：倒立二重振子における姿勢制御と台車位置制御、日本ファジィ学会北信越支部第３回ファジィミニシンポジウム講演論文集,15-21(1994)

連絡先：小倉久和
〒910 福井市文京３－９－１
福井大学工学部情報工学科
TEL　:0776-27-8582（ダイアルイン）
FAX　:0776-27-8751（学科事務）
E-MAIL:ogura@rook.fuis.fukui-u.ac.jp

WB2-1

１０台のトレーラを連結させたトラックの後退運転制御
-モデルに基づくファジイ制御（並列分散的補償）の適用-

Fuzzy Control of 10 Trailers-Truck via Parallel Distributed Compensation

田中　一男[1]　　吉岡　啓輔[2]
Kazuo TANAKA　　Keisuke YOSHIOKA

1　金沢大学 (Kanazawa University)
2　三菱電機 (Mitsubishi Electric Corp.)

Abstract - A control system for backing up a computer simulated five-trailers and truck, which is non-linear and unstable, is designed by applying a design technique of model-based fuzzy control. The simulation results show that the designed fuzzy controller effectively realize backing up control of the five-trailers and truck.

1．はじめに

トレーラ・トラックタイプのロボットの後退制御に関して様々な試み[1-7]がなされている。文献[4-6]では、制御系の安定性が解析されている。とくに、文献[5-7]では、シミュレーションではなく実際にトレーラ・トラックの模型の制御を行っている。しかし、複数台のトレーラを連結させたものについて制御を行った報告は非常に少ない。本論文では、シミュレーション実験のみであるが、5台、および、10台のトレーラを連結させたトラックの後退運転をファジイ制御で実現する。トラックとトレーラ、及び全てのトレーラ間のジャックナイフ状態を回避しながら、直線軌道に追従する必要があるため、シミュレーションでもこの制御の実現は容易ではない。本研究では、並列分散的補償[8-10]（モデルに基づくファジィ制御）という考え方により、10台（および5台）を有するトレーラを連結させたトラックの後退制御のためのファジィ制御器を設計し、その有効性を検証する。

2．並列分散的補償

非線形システムに対し制御器を設計するときには、その動作点近傍で非線形システムを線形化し線形制御理論を適用することが多い。この方法は、制御系の解析、設計が容易である等の理由により制御システム構築の主流となってきた。しかし、この方法では非線形性が強いシステムに対して、線形化を行った動作点近傍でしか満足のいく結果が得られない。一方、最近、厳密な線形化手法[5,11]が注目を集めている。この方法は座標変換によって非線形システムを線形システムで厳密に線形化する方法である。だが、非線形システムの全てのクラスを厳密に線形化できるとは限らないうえ、その方法がプラント設計者やエンジニアにとって難解であるという欠点がある。著者らは、モデルに基づくファジィ制御の一手法である並列分散的補償[8-11]によって非線形システムに対するファジィ制御器を設計した。Fig.1に並列分散的補償の概念を示す。この方法では、何らかの方法を用いて制御対象に対する高木・菅野のファジィモデル[13]を作成し、そのファジィモデルの一つの規則を補償するようにファジィ制御器の一つの規則を設計する。並列分散的補償の特徴は非線形システムに対するファジィ制御器を直感的かつ容易に設計できる点である。

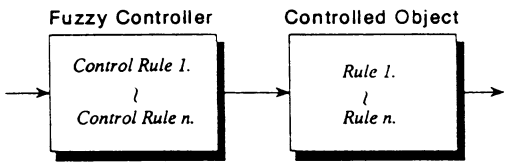


Fig. 1　並列分散的補償の概念

3．トレーラ・トラックの後退運転への適用

3.1　制御対象のモデル　Fig.2、Fig.3に制御対象のモデルとその座標系を示す。

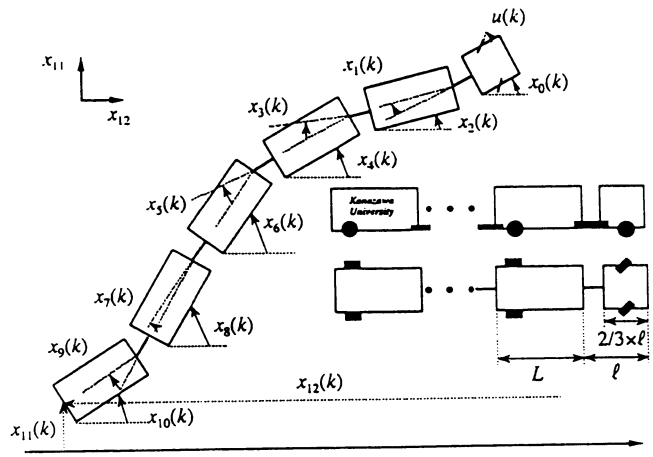


Fig. 2　5台のトレーラを有するトラックとその座標系

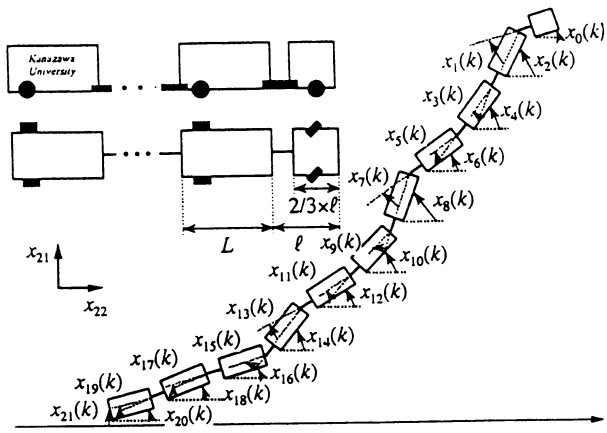


Fig.3　10台のトレーラを有するトラックとその座標系

5台のトレーラを有するトラックのモデルは次のような離散システムで表現できる。

$$x_0(k+1)=x_0(k)+\frac{v\cdot t}{\ell}\tan[u(k)] \quad (1)$$

$$x_1(k)=x_0(k)-x_2(k) \quad (2)$$

$$x_2(k+1)=x_2(k)+\frac{v\cdot t}{L}\sin[x_1(k)] \quad (3)$$

$$x_3(k)=x_2(k)-x_4(k) \quad (4)$$

$$x_4(k+1)=x_4(k)+\frac{v\cdot t}{L}\sin[x_3(k)] \quad (5)$$

$$x_5(k)=x_4(k)-x_6(k) \quad (6)$$

$$x_6(k+1)=x_6(k)+\frac{v\cdot t}{L}\sin[x_5(k)] \quad (7)$$

$$x_7(k)=x_6(k)-x_8(k) \quad (8)$$

$$x_8(k+1)=x_8(k)+\frac{v\cdot t}{L}\sin[x_7(k)] \quad (9)$$

$$x_9(k)=x_8(k)-x_{10}(k) \quad (10)$$

$$x_{10}(k+1)=x_{10}(k)+\frac{v\cdot t}{L}\sin[x_9(k)] \quad (11)$$

$$x_{11}(k+1)=x_{11}(k)+v\cdot t\cdot\cos[x_9(k)]\sin[\frac{x_{10}(k+1)+x_{10}(k)}{2.0}] \quad (12)$$

$$x_{11}(k+1)=x_{11}(k)+v\cdot t\cdot\cos[x_9(k)]\cos[\frac{x_{10}(k+1)+x_{10}(k)}{2.0}] \quad (13)$$

ここで、ℓはトラックの長さ（=2.8[m]）、Lはトレーラの長さ（=5.5[m]）、vは後退速度（=-1.0[m/s]）、tは:サンプリングタイム（=2.0[sec]）である。制御目的はステアリング角$u(k)$を制御することにより車輌を$x_{11}=0$の直線軌道に追従させることである。状態ベクトルを

$$\mathbf{x}^T(k)=[x_1(k),x_3(k),x_5(k),x_7(k),x_9(k),x_{10}(k),x_{11}(k)]$$

とすれば、これは$\mathbf{x}(k)\to 0$のレギュレータ問題と解釈できる。なお、$x_{12}(k)$は制御変数としては不要である。

10台のトレーラを有するトラックのモデルの場合もトレーラ間の接続は同じなので、同様の考え方でモデルを作成できる。ただし、v=-0.5[m/s]、t=1.0[sec]とする。

3.2 ファジィモデリング　文献[4,8]で示した方法により、(1)～(13)式で記述されている制御対象を次のようなファジィモデルで近似的に表現する。

規則1: IF $p(k)$ is "about 0[rad]"
THEN $\mathbf{x}(k+1)=\mathbf{A}_1\mathbf{x}(k)+\mathbf{b}u(k)$

規則2: IF $p(k)$ is "about $\pm\pi$ [rad]"
THEN $\mathbf{x}(k+1)=\mathbf{A}_2\mathbf{x}(k)+\mathbf{b}u(k)$

ここで、

$$\mathbf{A}_1=\begin{bmatrix} 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v\cdot t}{L} & 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{v\cdot t}{L} & 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v\cdot t}{L} & 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{v\cdot t}{L} & 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{v\cdot t}{L} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{v^2\cdot t^2}{2.0\cdot L} & v\cdot t & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}=\begin{bmatrix} \frac{v\cdot t}{\ell} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2=\begin{bmatrix} 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v\cdot t}{L} & 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{v\cdot t}{L} & 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v\cdot t}{L} & 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{v\cdot t}{L} & 1-\frac{v\cdot t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{v\cdot t}{L} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d\frac{v^2\cdot t^2}{2.0\cdot L} & d\cdot v\cdot t & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}=\begin{bmatrix} \frac{v\cdot t}{\ell} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$p(k)=x_{10}(k)+\frac{v\cdot t}{2.0\cdot L}x_9(k)$$

$$\mathbf{x}^T(k)=[x_1(k),x_3(k),x_5(k),x_7(k),x_9(k),x_{10}(k),x_{11}(k)]$$

である。なお、$d=10^{-2}/\pi$である。このモデルは-179.997 [deg.] < $p(k)$ < 179.997 [deg.]の条件の下で有効である[8]。"about 0[rad]"、"about $\pm\pi$ [rad] "はFig.4に示したファジィ集合である。ファジィモデルのダイナミクスは、

$$\mathbf{x}(k+1)=\sum_{i=1}^{2} w_i(k)\,(\mathbf{A}_i\mathbf{x}(k)+\mathbf{b}u(k))\,/\,\sum_{i=1}^{2} w_i(k) \quad (14)$$

で表現できる。$w_i(k)$はRule i におけるファジィ集合のメンバーシップ値である。なお、10台のトレーラを有するトラックモデルに対しても同様の方法でファジィモデルを作成できる。ただし$\mathbf{A}_1$、$\mathbf{A}_2\in R^{12\times 12}$、$\mathbf{b}\in R^{12}$で

$$p(k)=x_{20}(k)+\frac{v\cdot t}{2.0\cdot L}x_{19}(k)$$

となる。

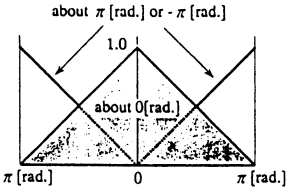


Fig. 4　メンバーシップ関数

3.3 ファジィ制御器の設計　2.で述べた並列分散的補償の考え方を用いて、ファジィ制御器の設計を行う。5台のトレーラのダイナミクスを近似したファジィモデルモデルに対しては次のようなファジィ制御器を設計できる。

制御規則1: IF $p(k)$ is "about 0[rad]" THEN $u(k)=\mathbf{f}_1\mathbf{x}(k)$

制御規則2: IF $p(k)$ is "about $\pm\pi$ [rad]" THEN $u(k)=\mathbf{f}_2\mathbf{x}(k)$

ここで、$\mathbf{f}_1$、$\mathbf{f}_2$はフィードバック係数ベクトルで、$\mathbf{f}_1$、$\mathbf{f}_2\in R^7$である。前件部ファジィ集合は、制御対象のファジィモデルと同じものを用いる。制御器設計の目的はこれらを決定することであり、対応する規則の後件部の線形システムに対してRiccati方程式を解くことによって求められる[8]。評価関数としては

$$J=\sum_{k=0}^{\infty}\mathbf{x}^T(k)\mathbf{Q}\mathbf{x}(k)+ru^2(k)$$

を用いる。10台のトレーラの場合についても同様に設計を行う。ただし、$\mathbf{f}_1$、$\mathbf{f}_2\in R^{12}$である。

3.4 シミュレーション実験　シミュレーション結果をFig.5～Fig.12に示す。ただし、Fig.5～Fig.8は5台の場合の制御結果を示す。Fig.5、Fig.7は制御対象として近似したファジィモデルを、Fig.6、Fig.8は(1)～(13)式（オリジナルモデル）を用いている。Fig.9～Fig.12は１０台の場合の制御結果を示す。Fig.9、Fig.11はファジィモデルを、Fig.10、Fig.12はファジィモデルに近似する前の非線形モデル（オリジナルモデル）を用いている。シミュレーション結果より、

1. 難しい初期位置からも、定常偏差なく目標軌道に追従しており、設計されたファジィ制御器の有効性がわかる。
2. ファジィモデルを制御対象とした場合とオリジナルモデルを制御対象とした場合の軌道が非常に似ていることから、モデル化の誤差は無視できるほど小さい

ことがわかる。

4. まとめ

本研究では、並列分散的補償という考え方により、１０台（および５台）を有するトレーラを連結させたトラックの後退制御のためのファジィ制御器を設計し、その有効性をシミュレーションにて検証した。本稿で述べた5台のトレーラをを有するトラックの後退運転制御を発展させ、ルールベースによるクランク走行、GAによる障害物回避経路選択[14]が行われている。また、５台のトレーラを有するトラックの後退運転制御系の安定性については現在解析中である。

参考文献

[1]D.Nguyen and B.Widrow, The truck backer-upper:An example of self-learning in neural networks, Proc. Int. Conf. Neural Networks (IJCNN-89), Vol.2, pp.357 - 363 (1989)

[2]S.G.Kong and B.Kosko, Adaptive Fuzzy Systems for Backing up a Truck-and-Trailer, IEEE Transaction on Neural Networks, Vol.3, No.2, pp.211-223 (1992)

[3]徳永、市橋、ニューロ・ファジィ最適制御によるトレーラ・トラックの後退運転、第８回ファジィシステムシンポジウム、pp.49-52 (1992)

[4]K. Tanaka and M. Sano, A Robust Stabilization Problem of Fuzzy Control Systems and Its Application to Backing up Control of a Truck-Trailer, IEEE Tran. on Fuzzy Systems, Vol.2, No.2, pp.119-134 (1994)

[5]M.Sampei et al.:Path Tracking Control of Trailer-Like Mobile Robot, Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.193-198 (1991)

[6]田中、佐野、モデルに基づくファジィ制御による模型トラック・トレーラの後退制御、第１０回ファジィシステムシンポジウム (1994)

[7]K. Tanaka: Model-based Fuzzy Control of a Trailer Type Mobile Robot,4th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (To appear)

[8]田中、アドバンストファジィ制御、共立出版(1994)

[9]H. Wang, K. Tanaka and M. Griffin, Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems via Takagi-Sugeno Fuzzy model, Proceedings of FUZZ-IEEE'95, To appear (1995)

[10]K.Tanaka, T. Ikeda and H. Wang, "Fuzzy Controller Design for Stabilization of a Class of Nonlinear Systems, IEEE Conf. on CDC'95 (To be submitted).

[11]石島ほか、非線形システム論、計測自動制御学会(1993)

[12]K. Tanaka and K. Yoshioka:Design of Fuzzy Controller for Bucker-Upper of a Five-Trailers and Truck,4th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (To appear)

[13]T.Takagi and M. Sugeno, Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE SMC-15, pp.116-132 (1985)

[14]田中、吉岡、多重連結型車輌の知的ハイブリッド制御、第１１回ファジィシステムシンポジウム(1995)

[問い合わせ先]

〒920　金沢市小立野2-40-20
金沢大学工学部機械システム工学科
田中　一男
Tel & Fax 0762-34-4736
Email　tanaka@kicews2.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

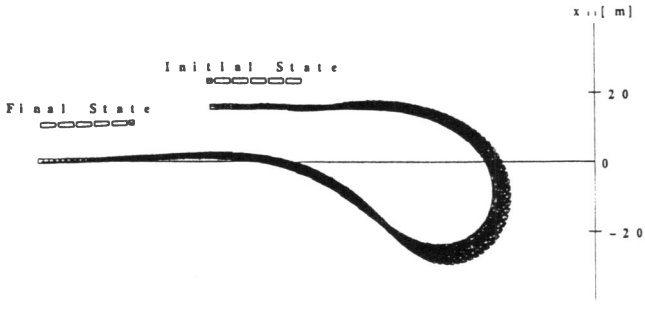


Fig. 5　5台のトレーラの場合の制御結果（ファジィモデル）

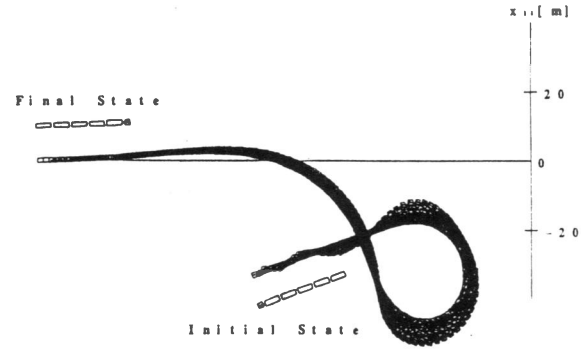


Fig. 7　5台のトレーラの場合の制御結果（ファジィモデル）

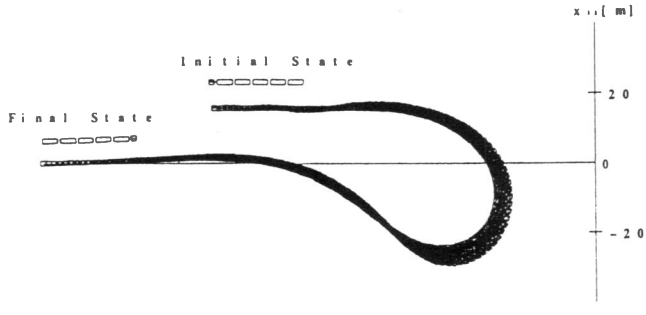


Fig. 6　5台のトレーラの場合の制御結果（オリジナルモデル）

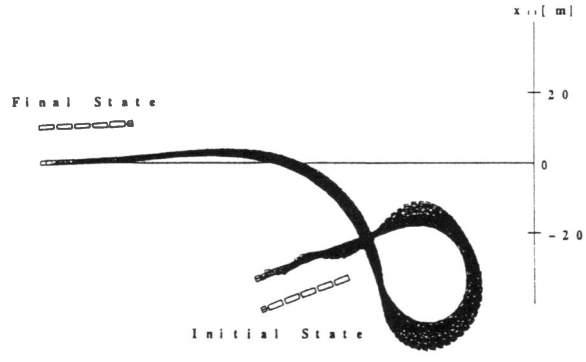


Fig. 8　5台のトレーラの場合の制御結果（オリジナルモデル）

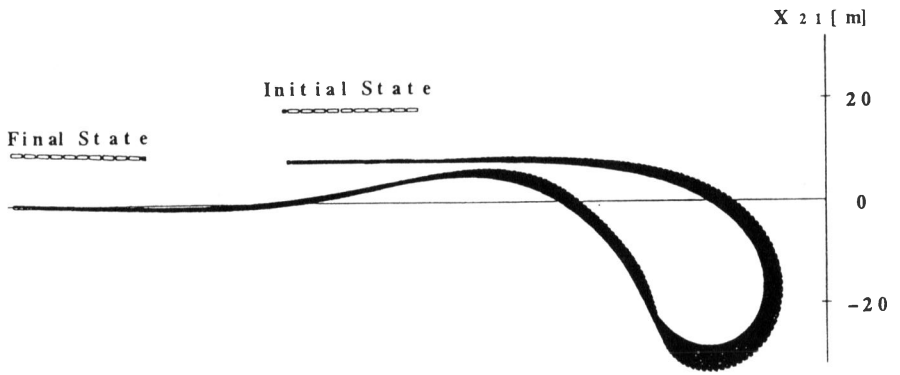


Fig. 9　10台のトレーラの場合の制御結果（ファジィモデル）

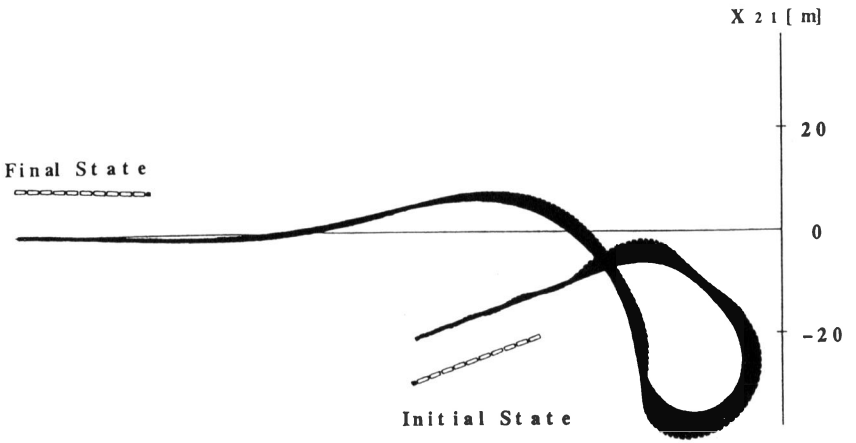


Fig. 11　10台のトレーラの場合の制御結果（ファジィモデル）

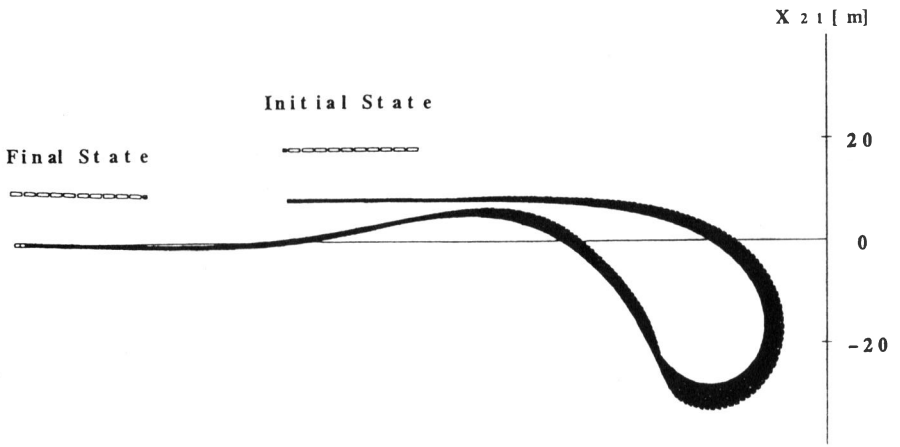


Fig. 10　10台のトレーラの場合の制御結果（オリジナルモデル）

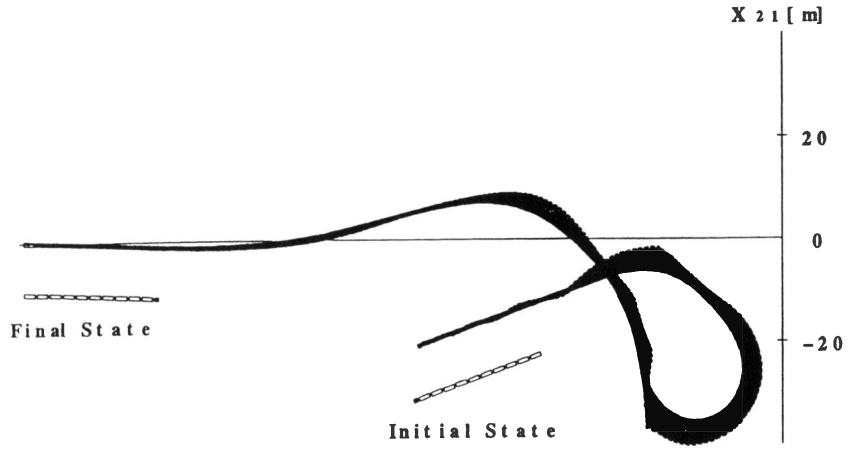


Fig. 12　10台のトレーラの場合の制御結果（オリジナルモデル）

WB2-2

ファジィ推論を用いた質点系構造物の振動制御

Vibration Control of Particles System Structure by Fuzzy Reasoning

新宮清志 伊藤 堅 入江寿弘 川村 仁 川西 利昌 三井 和男
Kiyoshi Shingu Ken Itoh Toshihiro Irie Hitoshi Kawamura Toshimasa Kawanishi Kazuo Mitsui

日 本 大 学
Nihon University

Abstract－In recent years , vibration control of structures subjected to dynamic forces is in the limelight for reducing vibration displacement. In this paper , a variable stiffness spring and damper are added to a particles system structure , and stiffness of the spring and damping of the damper are controlled. This is one of semi active control system. Characteristics of the added spring and damper are determined by fuzzy reasoning. Usefulness of vibration control of the system is verified by the analysis and the experiment.

1．序論

近年、科学技術の発展に伴い構造物の高層化が進んでいる。そのため、これらの構造物の地震、風などの外力によって生ずる振動への対策が重要な課題となってきている。 そこで、この振動対策として構造物における振動制御が注目されている。 これは地震波などの複雑な外力に対してでも適切な振動制御系の設計を行なう事により耐震性を増すことが可能なため、振動対策の問題を解決する良好な方法と考えられるためである。 今回は、「質点系構造物のファジィ振動制御に関する研究」[1]における“ファジィ推論部”、“システムの構成”“計測値の精度”の改善を図る。 本論における制御対象は、１スパンの２質点系ラーメン構造物を取り扱う。 振動制御方策としては、構造物固有の要素の他に可変バネ・ダンパーを付加させて、バネ定数、粘性係数を変化させるセミアクティブ方式によって振動の抑制を行なう。

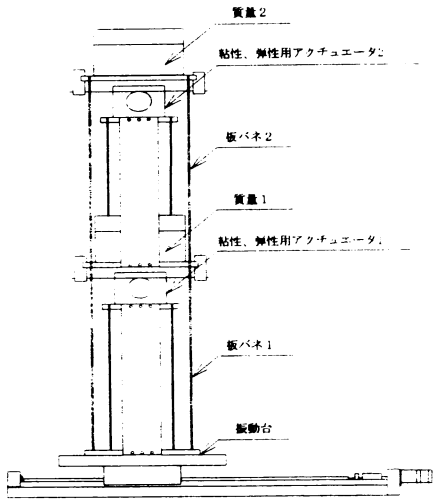


fig.1 ２質点系モデル

2．制御対象の数学モデル

制御対象の２質点系モデルをfig.1に示す。 この２質点系モデルは、外乱によって各質点が水平方向変位のみ生ずる１スパン・２質点・２自由度のラーメン構造物である。 “２質点系モデル固有要素の特性”及び“付加要素の特性”の２つの結合値を制御対象全体の特性として、ばね定数・粘性減衰係数・質量をそれぞれk_1, k_2, d_1, d_2, m_1, m_2とする。 各質点の層間変位をx_1, x_2としてLagrangeの方程式により式(1), (2), (3)の状態方程式，出力方程式，伝達関数行列を得る。

$$\frac{d}{dt}\mathbf{X} = \mathbf{A}\cdot\mathbf{X} + \mathbf{B}\cdot\mathbf{U} \tag{1}$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\,\mathbf{X} \tag{2}$$

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}\,(s\,\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\,\mathbf{B} \tag{3}$$

但し

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_1/m_1 & -d_1/m_1 & k_2/m_1 & d_2/m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_1/m_1 & d_1/m_1 & k_2/m_1 - k_2/m_2 & -d_2/m_1 - d_2/m_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/m_1 & -1/m_1 \\ 0 & 0 \\ -1/m_1 & 1/m_1 + 1/m_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \mathbf{C}_1 \text{ or } \mathbf{C}_2$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} m_1 s^2 \\ m_2 s^2 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & \dot{x}_1 & x_2 & \dot{x}_2 \end{bmatrix}^T$$

$\mathbf{Y} = x_1$ or x_2 とする。

3．制御理論

3．1　制御対象の解析

(3)式より、２質点系モデルの応答特性を吟味する。　ここで、質点系モデルにおける各質点の質量、バネ定数、粘性係数はtable1の様に測定された。　この物理定数の拘束条件における２質点系モデルのゲイン特性はfig. 2の様になる。　これより、次のような事項が明確となった。

［1］バネ定数、粘性減衰係数を構造物モデルの持つ拘束条件下で変化させることでゲイン特性を変化させることが可能である。　またこの変化により共振点も変化しピークゲインの抑制が可能となる。

［2］バネ定数、粘性減衰係数を大きくする事により、１次モードでは振幅が大きく、２次モードでは振幅が小さくなる。

［3］１次モードの共振点付近では質点１の層間変位が大きく、２次モードの共振点付近では質点２の層間変位が大きくなる。

table1　２質点系モデルの物理定数

物理定数	標準状態（～最大値）
質量1（m1）	8．88Kg
質量2（m2）	7．28Kg
粘性係数1（d1）	23．68（～76．39）N／(m／sec)
粘性係数2（d2）	21．44N／(m／sec)
バネ定数（k1）	4107（～6098）N／m
バネ定数（k2）	4107N／m

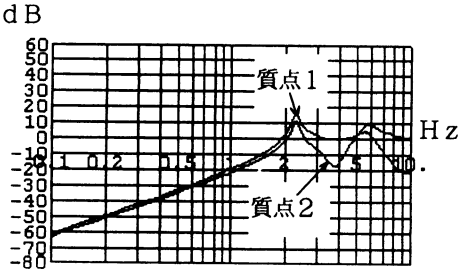


fig. 2　２質点系モデルのゲイン特性曲線

以上の事項より制御系を設計する場合に数式モデル、式(1), (2), (3)を用いて制御対象の応答を検討することが有効であることが確認できた。

3．2　制御方策

質点系構造物の一般的な振動特性として最も注目されるのは構造物において上層部、下層部とを位置付けた場合に地盤に近い下層部よりも上層部の地盤に対する相対応答加速度が大きい特性である。　この様な特性の為、上層部の地盤に対する相対変位は下層部に比べて大きな応答を示す。　そこで制御方策としては、各質点の層間変位を小さくする様に可変要素であるＤＣサーボモータの制御を行う。

$$G = \frac{G_2}{G_1} \qquad (4)$$

これは、式(4)の各質点の伝達関数の比より得られたfig. 3の様なゲイン比を小さくする応答が理想応答であると考えられる。

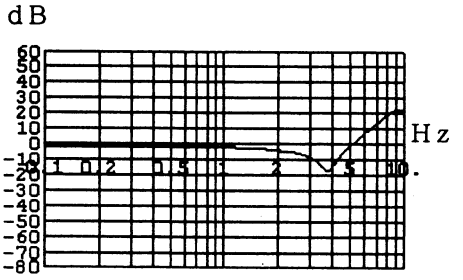


fig. 3　fig. 2におけるゲイン比

これは、式(4)の各質点の伝達関数の比より得られたfig. 3の様なゲイン比を小さくする応答が理想応答であると考えられる。　また、fig. 2のゲイン特性曲線の特性から、そのゲイン比を求める事により構造物がどの様な振動モードで揺れているのかが、凡そながら推定可能となる。　即ち、この様なゲイン比と振動モードの傾向は絶対的ではないが制御する際の十分な指針として確認することができるため２質点系モデルのボード線図と各質点のゲイン比によって１次モード、２次モードなどの判定が可能である。　この判別方法により、現在の構造物の振動状態に応じて適切な構造物の特性をゲイン比を小さくする様に数式モデルより定めて制御する。

3．3　ファジィ推論

モードの判断及び制御対象の特性を定める段階において確定的な判断は困難で、領域分けが線形理論だけでは対応不可能であると考えられる。　そこで、ゲイン比による振動モードの判断及び制御対象の特性決定の推論法としてファジィ推論法を用いる。　ファジィ推論法を用いる手段としては、領域の判断などの線形関数では与えることの不可能な補間を言語的に記述可能な事、実用面で比較的容易である事等から有効な手段と考えられる。　また、制御対象の特性は、数式モデルによる厳密な表現が可能なためにシミュレーションによる解析も有効に行なえると考えられる。　ファジィ推論による振動制御システムのブロック線図をfig. 4に示す。

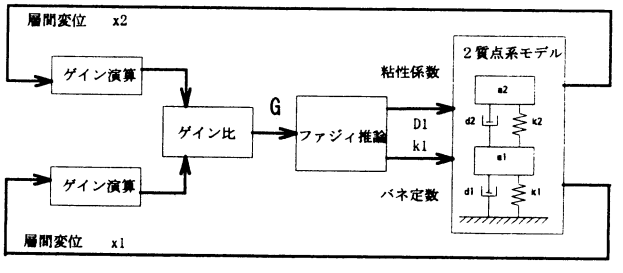


fig. 4　振動制御システムのブロック線図

今回の振動制御方法におけるファジィ推論の役割は、振幅比G、粘性減衰係数d_1、ばね定数k_1をファジィ集合で記述し、特性に顕著に影響を与えるばね定数を制御パラメータとしてパラメータ同定をファジィ推論により行なう事である。　ファジィ集合により制御信号を記述する事により複雑な構造物の性状及びコントローラへの操作量の決定を「もし振幅比がほどほどに大きく粘性減衰係数が少し大きい

場合は、ばね定数を少し大きくする。」などとなるファジィ制御規則で表現可能となる。 このファジィ制御規則に基付く多重推論を次の様な“形式”で行い結論を導き、巧妙な制御が可能となる。

規則 ： if G is PM and d_1=PS then k_1=PS

事実 ： G' is NB and d'_1=PM

結論 ： k'_1 is PB

今回、ファジィ変数は三角型を用い、推論法は直接法、非ファジィ化は、加重平均を採る事により推論結果を統合して代表点とする面積法を用いる。 このファジィ推論法の具体的な形態はfig.5の様になる。

前件部変数としては、振幅比及び粘性減衰係数を用い、後件部変数として質点１のバネ定数を用いる。

ゲイン比は、fig.3の特性によって主振動モードを判別する指標としてその大きさを考慮して記述する。

粘性減衰係数は、各質点のゲイン特性において振幅の大きさを変化させる働きを持つ。 しかし、粘性減衰係数を上げ過ぎると質点２の振動加速度が上昇してしまう為にバネ定数との兼ね合いによる決定が必要となる。 そこで、粘性減衰係数はゲイン比と同様に、推論の為の指標として記述する。

バネ定数は、受動的要素である板バネとＤＣサーボモータによる可変要素の結合値のため、受動的要素のみの場合のバネ定数をZ0として、ＤＣサーボモータの出力値に比例ゲインを掛けた値をバネ定数として記述する。 ゲイン特性曲線において、各質点の共振周波数は、質量・ばね定数により決定される。 その為、 k_1を小さくする事によって質点１の共振周波数は低くなり、高周波数の外力に対しての共振を抑えることができる。

本論では、振動による構造物の共振の回避を目的とする為、質点１のゲイン共振周波数の値に大きく影響を与える質点１のバネ定数k_1を可変させて振動の抑制を図る。

制御規則は、２質点系モデルのゲイン特性曲線及び振幅比より次のように定めた。

制御規則） if D=PB and G=Z0 then C=PS

このような規則にもとずいて推論を行なった結果Table2のような制御規則表を得る。

table.2 制御規則

減衰係数 D ＼ ゲイン比 G	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
Z0	PB	PS	Z0	Z0	Z0	PS	PB
PS	PB	PM	PS	Z0	PS	PM	PB
PM	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB
PB	PB	PB	PM	PS	PM	PB	PB

x軸、y軸をそれぞれゲイン比、粘性減衰係数、Z軸を質点１のバネ定数を物理定数の拘束条件に従う様に採り３Ｄ等高面に表した推論結果は、fig.5における面を形成する。

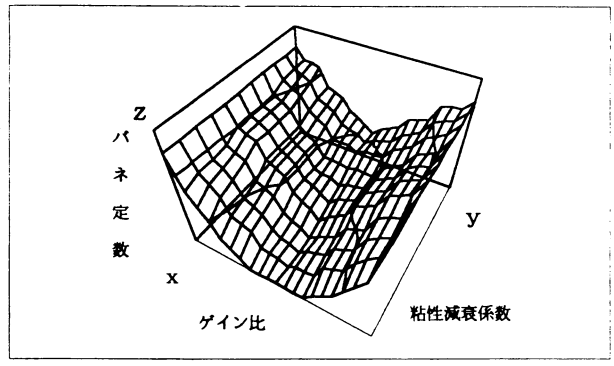


fig.5 ファジィ推論マップ

4. 実験装置

実験装置の構成としては、制御対象となる２質点系モデル、制御器となる質点形駆動装置・振動台駆動装置、推論・実行部となる計算機によってfig.6の様に構成される。

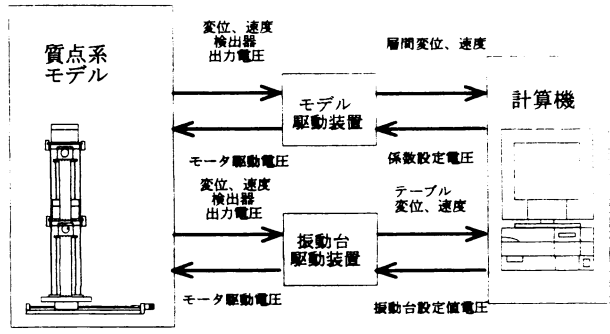


fig.6 システム構成図

制御対象である２質点系モデルは、fig.1の様に２つの質量が縦に配置され、各質量は４枚の板バネにより連結されており水平方向に自由に振動できる様な機構となっている。 また、中央部には剛性の十分ある台の上に構造物の減衰力、弾性力を実現させるＤＣサーボモータを取り付けてある。 実際の構造物においては油圧ダンパーや電気粘性流体などによって減衰力や弾性力を実現する事となるが、今回の実験装置においては仮想的にＤＣサーボモータを制御する事により実現している。

振動台は、計算機上で計算した任意波形で振動可能である。 本実験では、最大加速度1000.0(mm/sec^2)、振動数1.0～10.0(Hz)の正弦波を時間で掃引させる外力を入力する。 外力の入力により各質点はせん断型振動系として振動を始め、質点の変位、速度はポテンショメータ、タコジェネレータにより検出されA／Dコンバータボードにより数値変換して計算機上で相対変位、速度の換算が行われる。

振動台の変位、速度についても同様に、取り込む事ができるようになっている。

構造物の剛性・減衰特性は、アナログ回路で構成した可変ゲインのＰＤコントローラーにより実現している。 計算機は、ファジィ推論により決定した剛性・減衰特性になるようにこの制御系のフィードバックゲインを調整する事により制御を行う。

5．実験

今回の実験を行う際の幾つかの仮定と条件を次の様に定めた。

（仮定１）地震波の発生地点や深さ地盤の状態により地震波の波形は変化する。

（仮定２）外力の基本周波数は時間と共に変化する。

（仮定３）外力の基本周波数の変化は時間に対してゆっくりとした変化である。

（条件１）与えられる外力は未知で測定結果をもとに推定する。

構造物を評価する場合、構造物に関して最も注意を払わなければならない点は構造物の共振点付近の周波数成分を持つ外力（外乱）の入力である。そこでこのような仮定と条件のもとで振動制御の設計、実験を行った。　また、振動台、質点１、質点２の相対応答変位を0.005秒毎に、4000個のデータを測定し、実験時間は20秒とする。振動の周波数は0秒の時0Hz、20秒のとき7Hzとなるように設定する。　今回は質点１の部分のみをファジィ制御させた時のデータと非制御時の質点１、質点２の相対応答変位を測定した。　ここで、入力地震波のとなる振動台の目標入力振幅を３．６ｍｍとした時の各質点の応答をfig.7,8,9に示す。

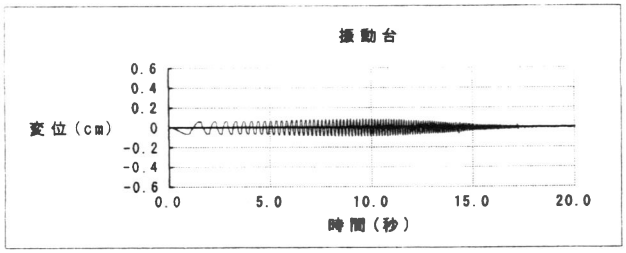
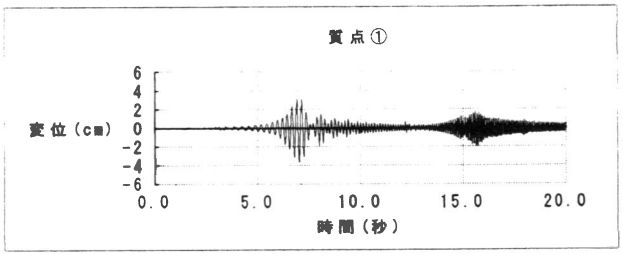
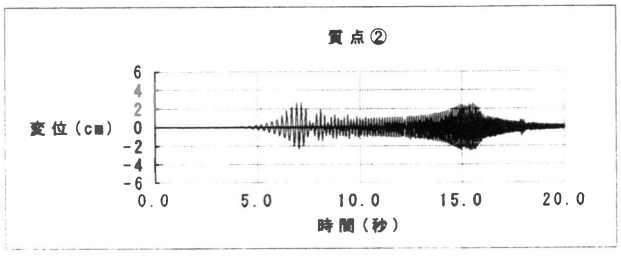


fig.7　振動台変位

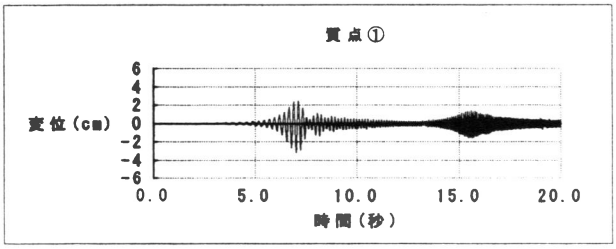


（ａ）非制御時、質点１の層間変位

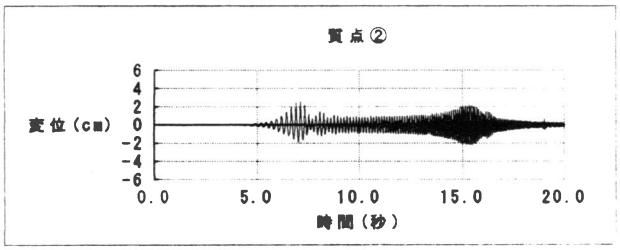


（ｂ）非制御時、質点２の層間変位

fig.8　非制御時変位



（ａ）制御時、質点１の層間変位



（ｂ）制御時、質点２の層間変位

fig.9　ファジィ制御時変位

6．結論

今回の実験結果より、ファジィ推論に基付く制御により、それぞれの主振動モードにおいて最大振幅の状態で１０%程の変位の抑制と質点２における共振の回避が見られた。　この結果は、従来のシミュレーション結果[2]とほぼ一致する事が判った。

7．考察及び今後の課題

今回は、質点１のバネ定数のみを可変させたが、物理定数の拘束条件の範囲が限られる為、振動抑制に限界が存在した。　そのため、今後、質点２のバネ定数の可変を行い、質点１，２の相互のトレードオフによる振動抑制を行なう必要があると考えられる。　更に、改良により、新たなファジィ推論部と各質点のコントローラーを含めた制御系について解析を進め、実験機によりその有用性を図る。

尚、本研究は、日本大学学術研究助成金（総合研究、代表：新宮清志）により行われた。

参考文献

１）新宮清志，伊藤堅，入江寿弘他：「質点系構造物のファジィ振動制御に関する研究」，第１０回ファジィシンポジウム講演論文集，日本ファジィ学会，ｐｐ２８７－２９０、１９９４年６月

２）新宮清志，福島欣哉：「上下動地震を受けるシェル構造物の免震およびファジィ振動制御」，日本機械学会論文集（Ｃ編），６０巻５７７号ｐｐ１０７－１１３，１９９４年９月

連絡先

〒２７４　千葉県船橋市習志野台７－２４－１

日本大学理工学部　新宮研究室

川村　　仁

ＴＥＬ&ＦＡＸ　０４７４（６９）５４２６（直通）

WB2-3

ペレット造粒プラントのためのファジィ制御システムについて

Study on a Fuzzy Control System for a Granulating Plant

中村　誠* 堺　敏明** 田中恭治*
Makoto Nakamura* Toshiaki Sakai** Kyoji Tanaka*

白上貞三* 小泉達也** 酒井義郎***
Teizoh Shiragami* Tatsuya Koizumi** Yoshiro Sakai***

* 山口県工業技術センター
* Industrial Technology Institute, Yamaguchi Prefectural Government
** 三新化学工業株式会社
** Sanshin Chemical Industry Co., Ltd.
*** 山口大学工学部
*** Dept. of Mechanical Engineering, Yamaguchi University

Abstract − In automatiog a system by using a human experts' knowledge, it is hard to deduce a valid knowledge base. And hence, it often leads to low consistency of the expert system built with the original manned system. Here in this paper, knowing this fact, a methodology for automating a granulating plant is proposed based on close communication with experts and observation of their activities. Employing satistical analysis, an interpretation of human experts' knowledge is made and the deduced knowledge is evaluated. Thus, the validity of the present methodology is confirmed.

1　はじめに

有機ゴムペレット造粒プラントでは作業者の熟練による作業が多く，プラントの運転には熟練者の介在が欠かせないものとなっている．特に，工程における練合，造粒，乾燥では原料への各種溶剤の添加，造粒状態の確認と制御および製品の乾燥具合の判断などの重要なものは，熟練者に大きく依存している．ペレット造粒プラントは長期間連続的に稼働され，運転管理は日々交代勤務の体制で少人数の作業者でこれにあたる．したがって作業者個人にかかる負担も大きく，工程に係わるこれらの判断を誤ると，ブリッジやフラッシングなどの現象が起こり，製品の歩留まりのみならず環境上の問題も生じる．よって，製造現場ではプラントの自動化・省力化の進展が課題となっている．

一般に自動化を行うにはモデルが必要であるが，数理的モデル化が難しい場合が多い．ペレット造粒プロセスにおいても同様である．このような場合には，作業者の熟練を取り込むことが有効である．しかし，自動化に向けて熟練者から知見とその根拠を引き出すことを試みた場合，その知識は断片的な言葉による定性的な表現でしか引き出せず，モデル化のための有用な指標を見定めることは容易でない．

そこで本稿では，熟練者のペレット製造の手続きに相当する処理を取り入れることで新しい造粒制御システムの開発を目指した．まず熟練者の専門的技術・知識の組立を観察と対話で整理し，統計的手法で工程の自動化に有用となる指標を検索した結果について述べる．つぎに，上記の検索した指標を用いて構築する制御系の基本構成について述べる．

2　熟練者の専門的技術・知識

2．1　有機ゴムペレット造粒工程

有機ゴムペレット製造工程の流れは，貯蔵，仕込み，混合，解砕，練合，造粒，乾燥，篩過，小分け包装に大きく別れるが，ペレットへの成形上で最も重要なものは練合から乾燥までである[1]．造粒の機械設備としては連続ニーダまたはバッチニーダが通常用いられ，造粒には押し出し型の造粒機が多用される．また，乾燥には造粒が連続なため流動層乾燥機が用いられるが，篩過の機能を合わせ持つものもある．

本稿で対象としたペレット造粒プラントの概略を図1に示す．このプラントは生原料（Cケーキとよぶ）に2種類の溶剤（E溶剤，PN溶剤とよぶ）を添加した後，連続ニーダで練合したものを押し出し型の造粒機で造粒してペレットを成形する．造粒したペレットは，後工程で団粒ができないよう篩過機能付きの乾燥機で予備乾燥を行い，つぎに流動層乾燥機に通して製品に仕上げて小分け包装に送る．工程では熟練者により2種類の溶剤の流量と流動層乾燥機内の乾燥温度が調整又は制御される．

2．2　作業手順

熟練者は使用するCケーキと製造したペレットの化学・物理的な検査結果，プラントの稼働状態の情報などを基に，主につぎのStep1,2の作業を繰り返す．

Step1
- 管理室のモニター画面で造粒具合（ペレットの出方），計器類で造粒機のモータ電流，造粒機出口のペレット品温及び流動層乾燥機内の乾燥温度などを監視する．
- 現場で造粒具合を確認・評価する．

Step2
- 各種溶剤の流量を調整する．
- 流動層乾燥機内の乾燥空気の温度を調整する．

2．3　知識の組立（言葉のレベルによる整理）

- Cケーキは貯蔵のロットごとに化学・物理的特性が異なる．また，目指す製品の品種によっても要求される化学・物理的特性が異なる．したがって，これらの条件をふまえて溶剤の流量などのプラントの操作条件を設定し，主に造粒具

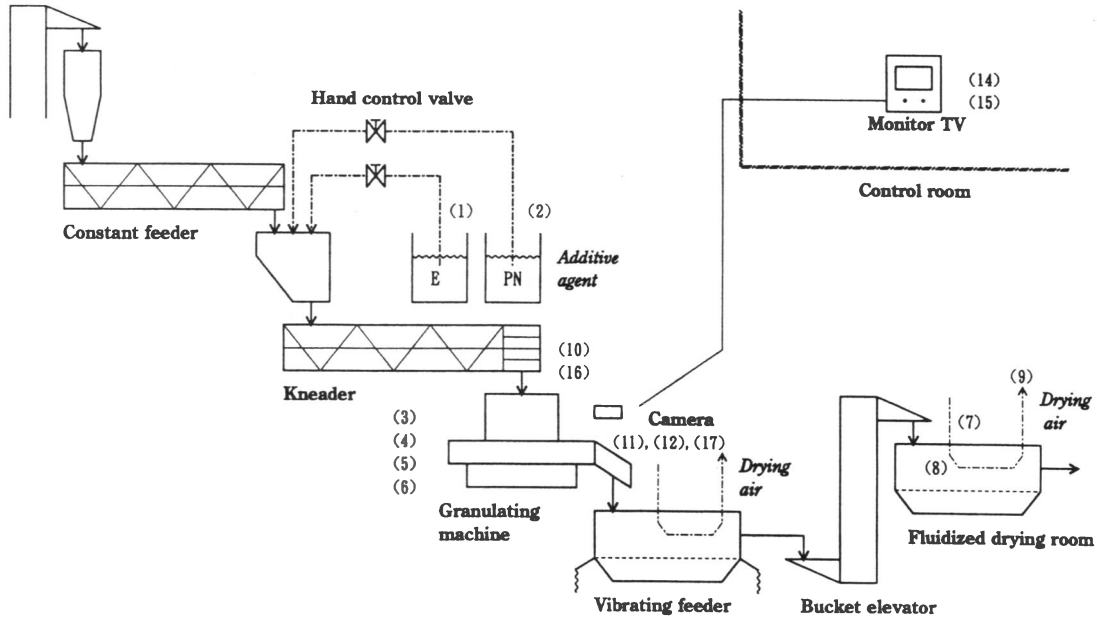
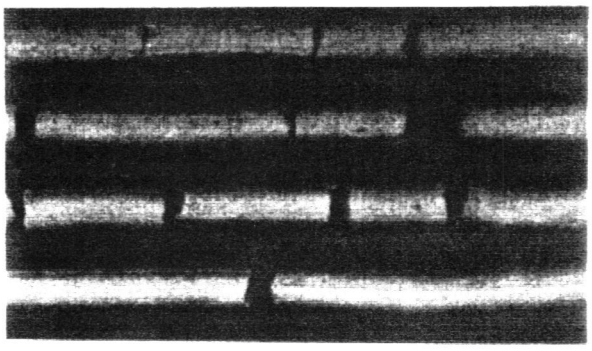


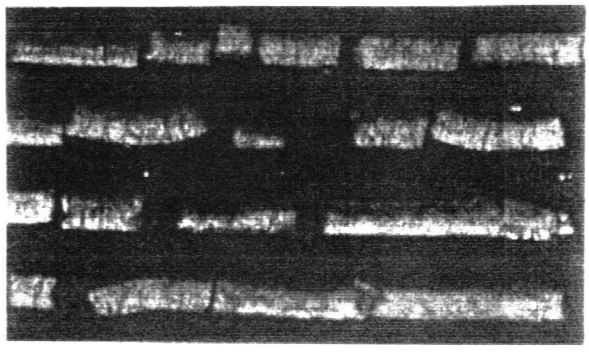
図1　対象としたプラントの工程の概略

合と機械設備の稼働状況を確認しながら操作条件を調整をする．

- 造粒具合は原料に添加する各種溶剤の流量で調整できる．また，その効果は造粒機出口のペレットの形状，かたさ，色合い，品温，造粒機のモータ電流で確認できる（図2）．
- 製品のかたさは流動層乾燥機内の乾燥温度で調整できる．
- ブリッジやフラッシングなどの現象が現れる場合は，主に添加する2種類の溶剤の流量が不適切である．



(a)造粒具合の良いペレット



(b)造粒具合の悪いペレット

図2　ペレットの形状の例

3　指標の検索

工程の自動化に有用となる指標を検索する．

3．1　方法

①表1に掲げる(1)から(17)の指標についての実験データ（試料数82）を用いて，各指標間の相関分析を行う．

表1　検討した指標の一覧

区　分	指　標　［単位］	
プラント状態量	(1)E溶剤の流量	[ml/min]
	(2)PN溶剤の流量	[ml/min]
	(3)造粒機の回転数	[rpm]
	(4)造粒機のモータの電流	[A]
	(5)造粒機の周辺の雰囲気温度	[℃]
	(6)造粒機出口のペレット品温	[℃]
	(7)流動層乾燥機の入気温度	[℃]
	(8)流動層乾燥機のペレット品温	[℃]
	(9)流動層乾燥機の排気温度	[℃]
化学・物理検査	(10)造粒前のCケーキの水分	[%]
	(11)造粒機出口のペレット水分	[%]
	(12)造粒機出口のペレット硬度	[N]
	(13)乾燥後のペレット硬度	[N]
官能検査	(14)造粒機出口の造粒具合の評価（熟練者1）	
	(15)造粒機出口の造粒具合の評価（熟練者2）	
	(16)Cケーキの脱水状態の評価	
	(17)造粒機出口のペレット色合いの評価	

②分析結果の有意検定を行い，検定結果から有意水準の高い（1%水準）指標を抽出する．

③判別分析法で(14)から(17)の官能検査の構造を調べるとともに，正答率をみて有用な指標を検索する．判別分析にあたっては，まず目的変量に(14)から(17)についての各カ

テゴリーを，説明変量には②で抽出した全指標を用いる．
つぎに，分析で得た正答率をみながら説明変量を順次減じて指標を絞り込む．

ここで，(10)，(11)の水分については，JIS K 6220-1977 ゴム用配合剤の試験方法[2]に定める方法に準じ，恒温乾燥機（㈱いすず製作所CS-11S）で測定する．同様に，(12)，(13)の硬度についてはJIS K 6221-1982 ゴム用カーボンブラック試験方法[3]に定める方法に則り，上皿直指はかり（㈱宝計器 Ben-Har）を用いて測定する．また，(14)，(15)の造粒具合については，熟練者2名により管理室のモニター画面から"非常に悪い，悪い，普通，良い，非常に良い"の5つのカテゴリーに分類して評価する．(16)のCケーキの脱水状態は熟練者が触手で，(17)の造粒機出口のペレットの色合いは目視で，それぞれ"悪い，普通，良い"の3つのカテゴリーに分類して評価する．

3．2　結果とその解釈

各指標間の相関の度合いは表2に示す目安で判断する．

表2　相関の度合いの目安

相関係数		目安の表現
1.00≧r＞0.70	-1.00≦r＜-0.70	かなり強い関連がある
0.70≧r＞0.40	-0.70≦r＜-0.40	かなり関連がある
0.40≧r＞0.20	-0.40≦r＜-0.20	やや関連がある
0.20≧r＞0	-0.20≦r＜0	ほとんど関連がない

相関分析の結果，造粒前のCケーキの水分は他の指標とほとんど関連がないことが明らかとなった．よって，対象としたプラントは練合までの前工程での処理が安定していることが示唆される．E溶剤の流量は造粒機出口のペレット硬度，乾燥後のペレット硬度とかなり関連（正）があり，造粒機のモータの電流，造粒機出口のペレット品温とやや関連（正）がある．PN溶剤の流量は造粒機出口のペレット硬度，乾燥後のペレット硬度とかなり強い関連（負）があり，造粒機のモータの電流，造粒機出口のペレット品温とかなり関連（負）がある．また，E溶剤の流量とPNの溶剤流量にはかなり関連（負）がある．したがって，E溶剤はペレットに対して増粘効果を持ち，逆にPN溶剤は軟粘効果を持つと推測する．このことは，造粒機のモータの電流と造粒機出口のペレット品温，造粒機出口のペレット硬度がかなり強い関連（正）があることからも説明される．流動層乾燥機の入気温度，ペレット品温，排気温度は供に乾燥後のペレット硬度とやや関連（正）がある．

判別分析の結果，熟練者1，熟練者2の造粒機出口の造粒具合の評価については，ともに判別関数fの構造が（1）式の形をとることで正答率が約70%と高くなる．

$$f = a_0 + a_1 \times \text{E溶剤の流量} + a_2 \times \text{PN溶剤の流量} + a_3 \times \text{造粒機出口のペレット品温} \quad (1)$$

ここに，a_0は定数，a_1，a_2，a_3は各説明変量が持つ値に乗ぜられる係数である．このように，複数の熟練者がほぼ同じ傾向で造粒具合を評価していることから，熟練者の造粒具合の評価には一定の基準があると推察する．

造粒機出口のペレットの色合いの評価には，熟練者1，熟練者2の造粒機出口の造粒具合の評価結果が強く反映している．すなわち，造粒具合の評価が高いものは，ペレットの色合いの評価も相対的に高くなる．

以上から，熟練者はE溶剤の流量を上げることで造粒具合とペレットの硬度を高める操作をする．この操作により造粒機のモータの電流を高める結果になることから，流量の上げ過ぎは造粒機の過負荷を招く恐れがある．PN溶剤の流量を上げるとペレットの硬度は低下するが，この操作はモータに要求される電流を下げることになるので，熟練者はこのことを承知していて，造粒機が過負荷にならないようPN溶剤の流量を調整するものと推察する．また，製品としてのペレットの硬度は流動層乾燥機内の乾燥温度で調整するものと推察する．

4　制御システムの基本構成

制御システムのモデリングにあたっては，次の点に留意する．

まず，E溶剤は増粘効果を持つ．一方，PN溶剤は軟粘効果を持つ．造粒具合をかためにしたい場合は，造粒機が過負荷に成らないことを前提としてE溶剤の流量を増やす．その意味で，E溶剤の流量制御は造粒具合に重きを置くモデルとする．しかしこの場合，造粒機内のスクリーンの磨耗が早まることから造粒機の保守期間を短縮させる．一方，造粒機の稼働状態を円滑にしたい場合には，ペレットの硬度が低くなることを前提としてPN溶剤の流量を増やす．その意味で，PN溶剤の流量制御は造粒機の保守に重きを置くモデルとなる．したがって，両者の制御は互いにトレード・オフの関係にある．つぎに，製品（ペレット）の硬さは造粒後の流動層乾燥機内の乾燥温度で微調整できる．しかし，調整範囲はペレットの融点から限られており，また造粒の後工程にあたることから，緊急避難的な扱いのものとしてとらえてモデルを構成する．

E溶剤の流量制御モデルは造粒具合の評価を基につぎのように構成する．造粒具合は造粒機出口のペレットの色合い，形状，しわの入りかた，ペレットの押し出し角度などに反映される．よって，カメラで造粒中のペレットについてのこれらの特徴を抽出し，造粒具合をいくつかの階級で識別評価する．但し，製品によってこれらの特徴を一律に扱えないことから，希望する造粒具合（目標値）は作業者が設定するものとする．流量調整のためのファジィ制御規則の基本形を（2）式に，メンバーシップ関数の構成を図3に，制御規則の一覧を表3に示す．

$$\text{If 造粒具合の偏差 is } A_i \ \&\ \text{偏差の一階差分 is } B_i \ \text{then E溶剤の調整流量 is } C_i \quad (2)$$

ここに，A_i，B_i，C_iはファジィラベルである．

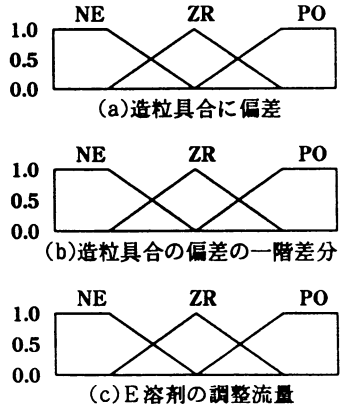


図3　乾燥率を推定するMFの構成

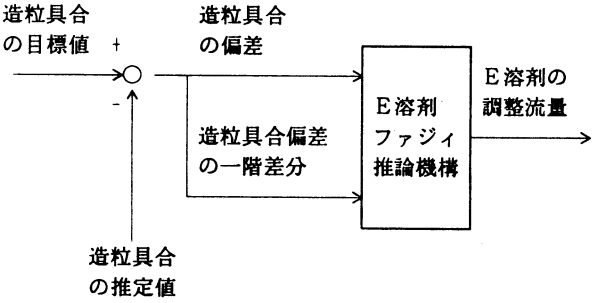
表３　Ｅ溶剤の制御規則の一覧

	造粒具合の偏差 NE	ZR	PO
造粒具合 NE	ZR	PO	PO
の偏差の ZR	NE	ZR	PO
一階差分 PO	NE	NE	ZR

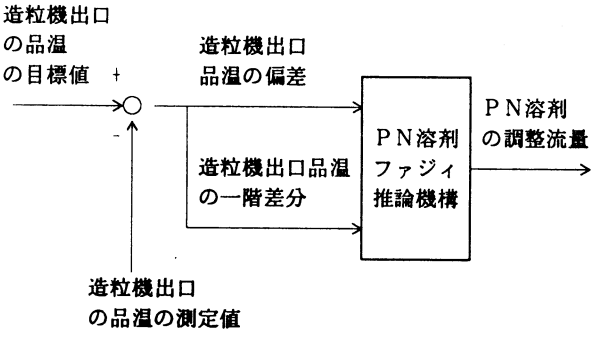
同様に，ＰＮ溶剤の流量制御モデルは，造粒機出口のペレット品温をもとに（３）式に示す速度型のファジィ制御規則で構成する．

If 造粒機出口品温の偏差 is A_i & 偏差の一階差分 is B_i
then ＰＮ溶剤の調整流量 is C_i　　（３）

図４に溶剤の制御の基本形を示す．



(a)Ｅ溶剤



(b)ＰＮ溶剤

図４　溶剤の流量制御の基本形

5　むすび

熟練者のペレット製造の手続きを，まず観察と対話で，つぎに統計的手法で検討した結果について述べた．２章における対話で得た熟練者の言葉による定性的なレベルでの表現は，３章での統計的手法を基にした分析からも素直に解釈できる．したがって，熟練者のこつをうまくモデル化できれば，新しい造粒制御システムの開発は可能と考える．

なお，Ｅ溶剤の流量制御系では造粒中に造粒具合を識別判断し，その結果をファジィモデルに渡す構成としている．このような構成についてはいくつかの有用な文献[4],[5]が報告されていることから，システムを実際に構築するうえで今後の課題として検討したい．

参考文献

[１] 布重　徹：アグロ製剤の製造に関する現状と問題点，化学装置，Vol.35，No.7，pp.140-145　(1993)

[２] 日本工業標準調査会：JIS K 6220-1977 ゴム用配合剤の試験方法

[３] 日本工業標準調査会：JIS K 6221-1982 ゴム用カーボンブラック試験方法

[４] 高橋　宏：ファジィ・ニューラルネットワーク複合システムの特徴と適用例，日本ファジィ学会誌，Vol.5，No.2，pp.233-244　(1993)

[５] 古橋　武：ニューラルネットワークによるファジィ制御，システム／制御／情報，Vol.38，No.11，pp.607-612　(1994)

連絡先

〒753　山口市朝田湯垣585-1
山口県工業技術センター電子応用室
中村　誠
TEL 0839-22-6810(内)75
FAX 0839-22-6813

WB2-4

熟練者の手法を取り入れた魚類乾燥制御システム

A Fish-Drying Control System Based on Human Expertise

中村　誠*　藤本正克*　北澤雅之**　酒井義郎**
Makoto Nakamura*　Masakatsu Fujimoto*　Masayuki Kitazawa**　Yoshiro Sakai**

*山口県工業技術センター
*Industrial Technology Institute, Yamaguchi Prefectural Government
**山口大学工学部
**Dept. of Mechanical Engineering, Yamaguchi University

Abstract − In the present paper, a fish-drying control system based on skilled worker's performance is proposed for reducing human power in the process and for higher quality of products. The function of the system is largely broken down into two procedures: 1)The procedure before drying. 2)The one during drying. The procedure 1) is for setting drying conditions and the prediction of required drying time. A fuzzy linguistic model is built for predicting proper dryness to be provided to a particular raw materials before drying. The procedure 2) is for more accurate estimation about the drying progress utilizing the observation during drying. Drying temperature is regulated by using fuzzy inf erence. Simulations and experimental results showed the usefulness and the applicability of the present system.

1　はじめに

水産物の乾燥は，被乾燥体から水分を減少させることで微生物の繁殖を遅らせ，保存性を高めることを目的とする．乾燥方法は天日乾燥と人工乾燥に大きく分かれる．天日乾燥は天日の輻射熱による水分の蒸発の促進と風力による水蒸気の除去を原理とする．よって，自然のエネルギーを活用することで乾燥に要する経費がかからないという利点を有するが，生産が気象条件に支配される．一方，人工乾燥は乾燥設備で乾燥環境をつくり乾燥を履行するもので，設備と運転経費を要するものの計画的な生産が可能となる．また，人件費の節減も手伝って現在の盛況に至っている[1]．

人工乾燥には，熱源で加熱した空気を被乾燥体にあてて乾燥させる熱風乾燥方式と，乾燥した冷風をあてて被乾燥体の表面から水分を蒸発させる冷風乾燥方式があり，乾燥設備にはそれぞれ通風方式の箱形熱風乾燥機と密閉循環方式の冷風乾燥機が用いられる．しかし，これらの乾燥設備を活用する上で，適用する乾燥条件の設定と調整，乾燥終了（仕上げ）の判断は作業者に依存しており，これらを誤ると良品は得られない．すなわち，長時間の高温多湿の乾燥に起因する被乾燥体の自己消化の進行や腐敗による品質の低下を呈する肉むれ，急速な乾燥による上乾き，脂質の多い被乾燥体の油焼けなどの現象が現れ，品質のみならず見栄えも劣り商品価値が大きく低落する．加えて，原料魚の魚種の豊富さと成熟度の個体差，魚体処理と製品の品種の多様性が有る．よって，乾燥の履行には，乾燥設備の操作の前提に原料魚，乾燥方法，製品などの多岐にわたる知識と手法，すなわち，長年の経験とそれにより培われた勘どころを要するものとなっている．

著者らは魚類乾燥プロセスの実験的解析を行い，熟練者の乾燥の手続きに相当する処理を組み込んだ乾燥制御システムの基本構成を提案し[2]～[5]，乾燥機[6]を試作して有用性を確認した[7]．その後さらに対象とする原料魚と製品の品種を拡張してシステムを構成するモデルを改良するとともに，熟練者の専門的知識に基づき乾燥前から乾燥終了までの一連の処理系の構成を検討した．その結果，実用に供するシステムを開発することができたので，本報ではこのシステムについて評価結果とともに報告する．

2　熟練者の手法と解釈

工程における熟練者の挙動の観察と対話から，熟練者の乾燥の手法は図1のように整理できる．

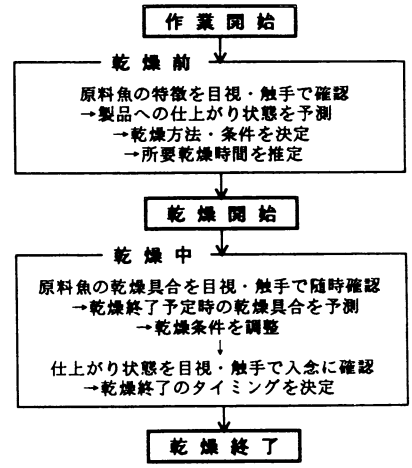


図1　熟練者の乾燥の手法

2．1　乾燥前の手法の解釈

水産乾製品に用いる原料魚の魚種は豊富であるが，魚種により肉質，すなわち魚肉の一般成分の水分と脂質含量の構成に特徴が表れる．また，同一の魚種では年齢と漁期，漁場により魚体の成熟度に差異が生じ，これも魚肉の水分と脂質含量に反映される．魚肉の水分と脂質含量には負の相関関係が認められ，一般に成熟度が増すにつれて脂質含量も増し，水分含量の割合が減少する[5]．[8]．さらに，水分と脂質含量はそれらの和において魚肉重量の約70～80%を保ち[9]，両者の比率は脱水速度に影響を与える．このように，脱水速度は成熟度に依存し，製品は成熟度に応じた乾燥度が要求される．

製品の商品価値は乾燥度と見栄えで評価される．乾燥度は製品の基本的な評価指標である．見栄えは主に乾燥前の原料魚の鮮度や冷蔵条件に左右され，原料魚の品質が大きく反映される[6]．[10]．すなわち，冷凍魚は鮮魚より脂質の酸化に

よる変色，冷蔵中の魚体表面の乾燥による冷凍焼け，冷凍や解凍の際の原料魚の表皮の剥離など，官能的に品質の劣化が判るものが多い[11]．

以上により，熟練者は乾燥前の原料魚の特徴を，先ず魚種と成熟度，品質としてとらえ，これらを目視と触手で官能的に把握する．次に成熟度から魚肉の水分と脂質含量の構成を大まかに見積もり，成熟度に応じた乾燥度を想定して適用する乾燥条件と所要乾燥時間を量る．ならびに品質から製品への見栄えの程度を予測する．

2．2　乾燥中の手法の解釈

魚肉の物理的強度は原料魚の乾燥率（後述）に良好に反映され，熟練者はそれを触手で受ける触感で官能的に把握する[5]．原料魚の乾燥は乾燥の進行とともに脱水速度が減少を続ける減率乾燥期に行われる．減率乾燥期には脱水速度が急激な減少傾向を呈する期間と，その後の緩慢な減少傾向の期間（以下，それぞれ第1段，第2段という）があり，脱水速度は時々刻々と変化する．脱水速度は乾燥温度，湿度，風速，乾燥機内の原料魚の設置場所に支配され，加えて外乱の影響も受ける．よって，乾燥開始後この状態を放置すると目指す乾燥予定時に製品が得られないばかりか，肉むれ，上乾き，油焼けなどの視覚的にも把握できる現象が起こり，品質と見栄えも劣化して商品価値が大きく低落する．

以上により，熟練者は乾燥中に乾燥の進行状態を目視と触手で確認することで，乾燥前に見積もった乾燥終了予定時での仕上がり具合と現状との差を官能的に測る．もし乾燥度に相違が生じると見込んだ場合は，品質が保証できる範囲で乾燥条件を調整し，乾燥終了予定時に製品への仕上げを目指す．また，乾燥予定終了時が近づくと仕上げのタイミングを頻繁に測る．

3　モデリングとシステム構成

文献[5]で提案した基本的なシステムは乾燥前と乾燥中の2つの処理系で構成される．

3．1　乾燥前の処理系

乾燥前の処理系は原料魚の成熟度（全長LE_0，体重WE_0，肥満度FA_0）にみあった製品の乾燥率の推定値$RW_{\cdot 0}$，乾燥条件の初期値（乾燥温度TE_0，湿度HU_0，風速FL_0）および所要乾燥時間の予測値Timeを求めて制御系に出力する．ここに，乾燥率RW_tは時刻tにおける原料魚の重量W_tを乾燥前の重量W_0で除した値で定義する．

原料魚の成熟度の特徴は全長LE，体重WE，肥満度FAを指標として，次のようにモデル化する．魚類の成熟度は生息環境の影響を受けるが，体重WEは魚種によらず全長LEに対して指数関数的に増加する．これは魚類の成長に伴う体格の変化の一般的な特性を示すものであり，全長LEと体重WEの間には標準的な関係として（1）式が成り立つ．

$$WE = a_0 LE^{a_1},\ a_1 > 0 \qquad (1)$$

また，脂質含量の多い魚種の魚肉の水分と脂質含量の構成の特徴は，体長BLと体重WEから（2）式で定義する肥満度FAで表現でき[2],[5]，さらに肥満度FAと全長LEには（1）式に準じる関係がある．

$$FA = 1000 \cdot WE/BL^3 \qquad (2)$$

個々の原料魚の体重WE_0又は肥満度FA_0は，（1）式で得るその全長LE_0における標準的な体重WE又は肥満度FAを中心として正規分布する．したがって，（1）式の魚類の全長LEと体重WE又は肥満度FAの標準的な関係を求め，標準的な体重WE又は肥満度FAと使用する原料魚の体重WE_0又は肥満度FA_0との偏差について着目することで，成熟度の個体差が表現できる．

乾燥前の処理系は上に述べた観点から2つのモデルで構成する．先ず第1は，使用する原料魚の体格Materialと希望する製品のかたさの程度Expectancyから製品にみあった乾燥率Product($RW_{\cdot 0}$)を推定するファジィモデルである．ファジィ規則を（3）式に，メンバーシップ関数の構成を図2に示す．

If **Material** is A_i and **Expectancy** is B_i
then **Product** is C_i　$(i = 1,2,\cdots,n)$　（3）

ここに，A_i,B_i,C_iはファジィラベルである．

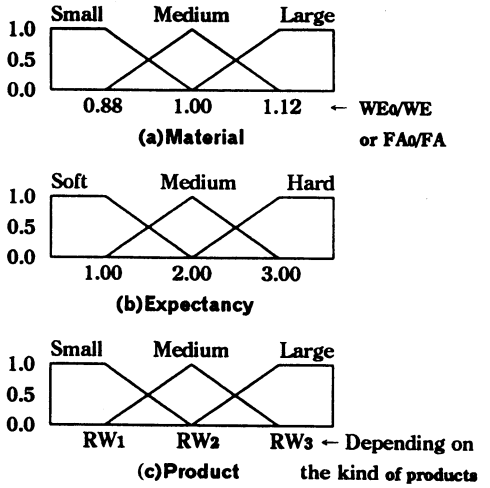


図2　乾燥率を推定するMFの構成

次に第2としては，所要乾燥時間Timeを予測する（4）式に示す定量的な構造の重回帰モデルである．モデルを構成する説明変量には，原料魚の体格Material，（3）式の推定で得る乾燥率Product，および乾燥温度，湿度，風速から成る乾燥条件Conditionを用いる．

$$\begin{aligned} \mathrm{Time} = a_0 &+ a_{m1}\cdots \times \mathrm{Material} \\ &+ a_{p1}\cdots \times \mathrm{Product} \\ &+ a_{c1}\cdots \times \mathrm{Condition} \end{aligned} \qquad (4)$$

ここに，a_0は定数，$a_{m1}\cdots$，$a_{p1}\cdots$，$a_{c1}\cdots$は偏回帰係数である．

3．2　乾燥中の処理系

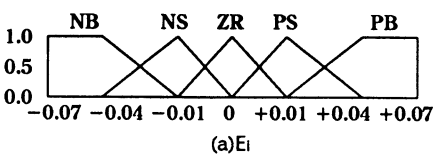
乾燥中の処理系は，乾燥前の（3）式で得た乾燥率$RW_{\cdot 0}$と乾燥中に予測する乾燥終了予定時刻における乾燥率$RW_{\cdot i}$の偏差に応じて乾燥条件（乾燥温度TE_i）を調整し，（4）式で得た所要乾燥時間Timeで製品への仕上げを目指す．乾燥中の乾燥率$RW_{\cdot i}$は（5）式で予測する．

$$RW_{\cdot i} = 1 - u(1 - e^{-\beta t})/\beta - v(1 - e^{-\alpha t})/\alpha \qquad (5)$$

ここで，パラメータuは一定速度の脱水速度成分，vは過渡的な脱水速度成分，α，βはそれぞれ減衰係数を表し，これらの値は$\alpha-\beta$解法[3],[4]で順次推定する．乾燥温度TE_iの調整には速度型のファジィモデルを用いる．ファジィ規則を（6）式に，メンバーシップ関数の構成を図3に示す．

If E_i is A_i and ΔE_i is B_i then ΔTE_i is C_i
$(i = 1,2,\cdots,n)$　（6）

ここで，$E_i = RW_{\cdot 0} - RW_{\cdot i}$，$\Delta E_i = E_i - E_{i-1}$，$\Delta TE_i = TE_i - TE_{i-1}$であり，$TE_i$は調整時刻iにおける乾燥温度の目標値を示す．$A_i$,$B_i$,$C_i$はファジィラベルである．



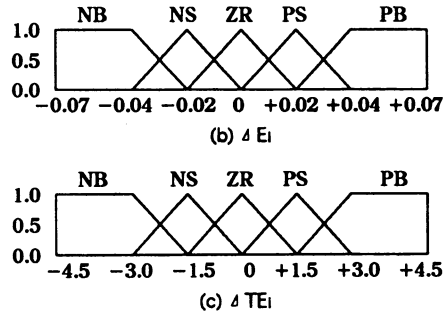


図３　乾燥温度を調整するＭＦの構成

３．３　システム全体の処理

システムのフローの概要を図4に示す.

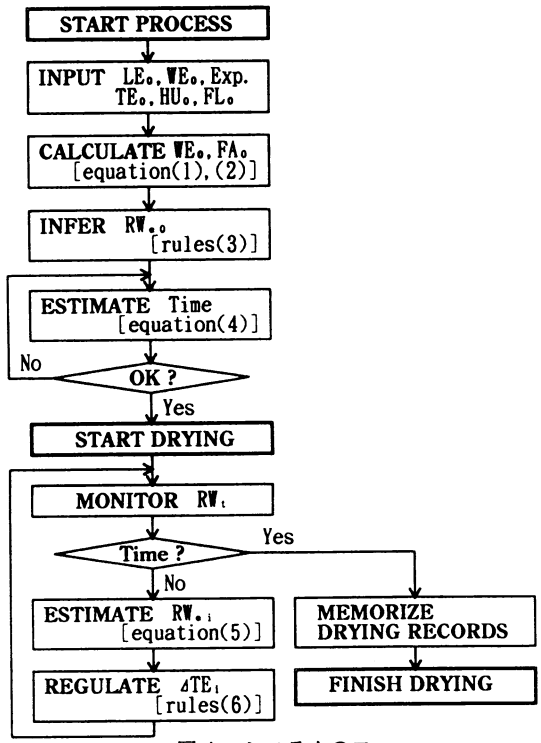


図４　システムのフロー

乾燥前に使用する原料魚のロットを代表する全長LE0，体重WE0，希望する製品のかたさの程度Expectancy，乾燥条件の初期値（TE0,HU0,FL0）を入力する．乾燥前の処理系では（１），（２）式により標準的な体重WEおよび肥満度FAを求めて，これらの値と原料魚の値との比を算出する．次に，（３）式のファジィモデルで製品にみあった乾燥率RW..を推定し，（４）式の重回帰モデルで所要乾燥時間Timeを予測する．予測した所要乾燥時間Timeが満足できない場合は，乾燥温度TE0，風速FL0を調整して収束させる．

乾燥中の処理系は乾燥前の処理系から乾燥率RW..，所要乾燥時間Time，乾燥条件の初期値を受けて乾燥を開始する．乾燥条件は初期値を先ず第1段の乾燥に適用する．次に，所要乾燥時間Timeの長いものは第1段と第2段との遷移期および第2段進行中において乾燥温度TEiを調整する．乾燥温度TEiの調整は以下の方法で行う．

Step1　調整時刻までの乾燥時間を9分割し，ロードセルで端点を含む計10点の時刻で原料魚の重量Wtを測定して，それらの時刻の乾燥率RWtを計算する．

Step2　（５）式で乾燥終了予定時刻における乾燥率RW.iを予測する．（６）式のファジィモデルで乾燥率RW..と乾燥率RW.iの偏差に応じて乾燥温度の調整値ΔTEiを推定して制御系に出力する．

4　評価

構築したシステムの性能を，以下3点について評価する．

a)（３）式のモデルでの乾燥率RW..の推定

b)（４）式のモデルでの所要乾燥時間Timeの予測

c)（５）式と（６）式のモデルでの乾燥制御

4．1　方法

丸干し製品の試料魚はウルメイワシ，カタクチイワシを，開き干し製品にはサヨリ（有頭品），マアジ（無頭品）を用い，生干しの塩干品（各々，製品1～4とよぶ）を乾燥機[6]で冷風乾燥法により製造する（表1，表2）．

乾燥前の処理系での乾燥率RW..の推定の評価には，（３）式の希望する製品のかたさの程度Expectancyに，乾燥実験後の製品について熟練者が触手で"柔らかい:1，通常のかたさ:2，硬い:3"に分類したものの平均値を用い，乾燥率RWtの実験値と比較する．所要乾燥時間Timeは，各製品への試料魚の成熟度の平均値，乾燥率RW..，乾燥条件（乾燥温度TE，湿度HU，風速FL）を用いて次式で予測し，実験値と比較する．

製品1：Time = 61.61+0.1426LE0+0.9449WE0-91.37RW..
-0.9273TE0-0.1035HU0-0.5053FL0

製品2：Time = 56.49+0.0620LE0+4.4803FA0-89.02RW..
-1.4154TE0+0.0049HU0-0.6152FL0

製品3：Time = 113.8+0.0071LE0+0.0305WE0-6.378RW..
-5.068TE0-0.0513HU0-0.5934FL0

製品4：Time = 26.90+0.0184LE0+0.1027FA0-17.82RW..
-0.1218TE0-0.0402HU0-3.259FL0

乾燥中の処理系は製品2のプロセスについて評価するものとする．なお，乾燥中の乾燥温度TEiの調整は乾燥開始後5時間，10時間，24時間経過時に行う．

表１　試料魚と製品

製品 No.	全長 [mm]	体重 [g]	肥満度 [1000g/cm³]	試料数 [尾]	かたさの程度
1	106.8	8.50	-	220	1.42
2	126.1	-	10.29	250	1.90
3	290.5	49.3	-	120	1.59
4	258.7	-	22.89	50	2.93

表２　乾燥条件

製品 No.	温度 [℃]	湿度 [%]	風速 [m/sec]
1	20.9	54.8	3.13
2	21.0	30.0	3.00
3	20.2	48.9	3.11
4	17.6	41.5	2.90

4．2　結果

乾燥実験後の乾燥率RWtと乾燥前の処理系で推定した乾燥率RW..を比較したもの，ならびに実験での乾燥時間と予測した所要乾燥時間Timeを比較した結果を表3に示す．乾燥率の誤差

はいずれの製品も約2%以内に納まっており，乾燥率$RW_{.o}$は精度良く推定されている．各製品の乾燥率$RW_{.o}$の推定のうち製品4での誤差が比較的大きい理由としては，試料魚の除頭や内臓の除去などの魚体処理の影響が現れたものと考える．また，乾燥時間の誤差も約15min以内であり所要乾燥時間Timeは精度良く予測されている．

表3　乾燥前の処理系の結果

製品	乾燥率			乾燥時間[h]		
No.	実験値	推定値	誤差	実験値	推定値	誤差
1	0.457	0.458	-0.001	16.0	15.94	0.06
2	0.455	0.459	-0.004	38.0	38.0	0.0
3	0.658	0.667	-0.009	6.33	6.38	-0.05
4	0.768	0.784	-0.016	7.00	6.78	0.22

乾燥中の処理系で乾燥条件の調整時刻に乾燥率$RW_{.i}$を推定し，乾燥温度TE_iを調整した結果を表4に示す．表4から第2段の調整時刻10hでの$RW_{.o}$と$RW_{.i}$の差が約7%と大きい．これは遷移期5hにおける調整後に，試料魚の乾燥を促進する何らかの外乱の影響を受けたためである．よって，処理系では乾燥を延引するため，乾燥温度TE_iを21.0℃から18.8℃に調整している．その効果は，乾燥率$RW_{.o}$と調整時刻24hで推定した乾燥率$RW_{.i}$の差が2%程度に縮小していること，さらに所要乾燥時間Timeでの乾燥率RW_tと乾燥率$RW_{.o}$の差が約1%以内に納まっていることから確認される．

表4　乾燥中の処理系の結果

経過	乾燥率			乾燥温度TE_i
時間	$RW_{.o}$	$RW_{.i}$	誤差	[℃]
5h	0.459	0.454	0.005	21.0
10h	0.459	0.393	0.066	18.8
24h	0.459	0.439	0.020	18.3

5　むすび

魚類乾燥プロセスの省力化を目指して，工程における熟練者の手法を取り入れた実用的なシステムの構成を提案した．本システムは乾燥前と乾燥中の2つの処理系から構成され，乾燥前の処理系は与えられた原料魚から製品のかたさにみあった乾燥率を推定し，その乾燥率に至るまでの所要乾燥時間を予測する．また，乾燥中の処理系は乾燥終了予定時の乾燥率を推定し，乾燥条件を調整することで所要乾燥時間で製品に仕上げるものである．本システムを構成する各モデルについては，常用される原料魚とその魚体処理を対象として，シミュレーションと乾燥実験で精度を評価した．その結果，確度の高い処理ができていることから，ほぼ実用に供するシステムは構築できたものと考える．

本研究において熟練者として実験に多大な協力を頂いた国近商店㈱國近一行会長，ならびに國近忠雄社長，多くのご示唆を頂いた水産大学校製造学科國本正彦助教授と学科の各氏に謝意を表する．また，本研究に対して終始懇切なご指導とご鞭撻を賜ったTogai InfraLogic, Inc. 戸貝正喜会長，岩手大学工学部高浪五男教授ならびに山口大学工学部栗林勝利教授に衷心より感謝する．

参考文献

[1] 木村　進（編）：乾燥食品辞典，朝倉書店，pp.368-374 (1984)

[2] Y.Sakai, M.Nakamura, T.Shiragami and M.Kochi : An Experimental Analysis and Expertise for a Fish-Drying Process Control, Proc. of the '92 Korean Automatic Control Conference, October 19-21, Seoul, pp.118-123 (1992)

[3] Y.Sakai, K.Wada and H.Nakamura : Modeling and Parameter Estimation of a Fish-Drying Control System, Proc. of the '92 Korean Automatic Control Conference, October 19-21, Seoul, pp.440-445 (1992)

[4] M.Nakamura, T.Shiragami and Y.Sakai : A Study on Intelligent Fish-Drying Process Control System, Proc. of the '93 Korean Automatic Control Conference, October 20-22, Seoul, pp.132-137 (1993)

[5] 中村　誠，国本正彦，白上貞三，酒井義郎：魚類乾燥プロセスの実験的解析と乾燥制御システム構成のための基礎的検討，計測自動制御学会論文集，Vol.30, No.7, pp.861-870 (1994)

[6] M.Nakamura, M.Fujimoto and Y.Sakai : An Automated Drying Room for Industrial Use Equipped with Inference and Prediction System, Proc. of the 10th ISPE/IFAC International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, August 21-24, Ottawa, pp.559-564 (1994)

[7] M.Nakamura, M.Fujimoto and Y.Sakai: A Fish-Drying Control Method Based on Skilled Worker's Performance, Proc. of the '94 Korean Automatic Control Conference, October 17-20, Taejeon, pp.379-384 (1994)

[8] 日本水産学会監修：魚肉の栄養成分とその利用，恒星社厚生閣，pp.16-31 (1990)

[9] 科学技術庁資源調査会：四訂日本食品標準成分表，pp.104-137，大蔵省印刷局 (1982)

[10] Y.Sakai, M.Kitazawa and M.Nakamura : Human Expert's Visual Inspection in Fish-Drying, Proc. of the FUZZ-IEEE/IFES '95, March 20-24, Yokohama, pp.401-408 (1995)

[11] 日本水産学会編：水産食品の鑑定，恒星社厚生閣，pp.93-112 (1979)

連絡先

〒753　山口市朝田湯垣585-1
山口県工業技術センター電子応用室
中村　誠
TEL 0839-22-6810(内)75
FAX 0839-22-6813

WB3-1

自己調整ファジィコントローラを用いた高速多軸同期システム

High Speed Synchronization of Multiple Axes under Self-Tuning Fuzzy control

福見淳二　鎌野琢也　鈴木茂行　原田寛信　片岡　雄
Junji Fukumi　Takuya Kamano　Takayuki Suzuki　Hironobu Harada　Yu Kataoka
徳島大学工学部　片岡機械製作所
Faculty of Engineering, University of Tokushima　Kataoka Machine Co.,LTD

Abstract

In this paper, high speed synchronization of nonlinear multiple positioning axes under self-tuning fuzzy control is considered. The proposed system consists of nonlinear multiple positioning axes with fixed gain feedback contrtoller , self-tuning fuzzy feedforward controllers(STFFC) and a synchronizing controller. The fuzzy rules of the STFFC are adjusted by a learning algorithm so that the tracking error and the synchronizing error are minimized. This result implies that the actual outputs can follow the desired output in a synchronized manner. Experimental results demonstrated the effectiveness of the proposed system for high speed synchronization and excellent tracking performance.

1. まえがき

動特性が大幅に異なる複数の駆動軸間の高速な同期化手法が近年いくつか提案されている[1)~3)]。そのうち各軸にアダプティブフィードフォワードコントローラを，軸間に同期化コントローラを設けたシステムは，過渡状態における駆動軸間の高速な同期化を図りつつ各軸の追従特性を著しく改善できる[2),3)]。しかしながら，同システムは制御対象の線形性を前提としており，非線形システムに適用するには限界がある。そこで，本稿では，自己調整ファジィフィードフォワードコントローラ(STFFC)と同期化コントローラを組み合わせた同期システムを提案し，非線形性を有する4軸位置決めシステムに適用している。その結果，提案した同期システムの優れた追従特性および高速な同期化特性が確認されたので，以下に報告する。

2. システム構成

提案する同期システムの構成を図1に示す。各軸の制御対象はそれぞれパラメータの異なる線形ブロックと不感帯要素および飽和要素からなる非線形ブロックの直列接続として表され，固定ゲインコントローラを用いたフィードバックループを構成している。STFFCは各軸のフィードフォワードコントローラとして付加され，また，各軸間には同期化コントローラ[2)]が設けられている。同期化コントローラは図2に示すように，各軸出力の差をゲインβ倍した同期化誤差信号e_{pk}(k:軸番号に相当)を出力する。固定ゲインPIコントローラは主として外乱抑圧特性に着目して設計され，STFFCの制御ルールの後件部変数は各軸の追従誤差信号e_{fk}と同期化誤差信号e_{pk}の和として求められる合成誤差信号e_{qk}を零収束させるようにチューニングされる。この結果，各軸の追従特性の改善と高速な同期が実現される。

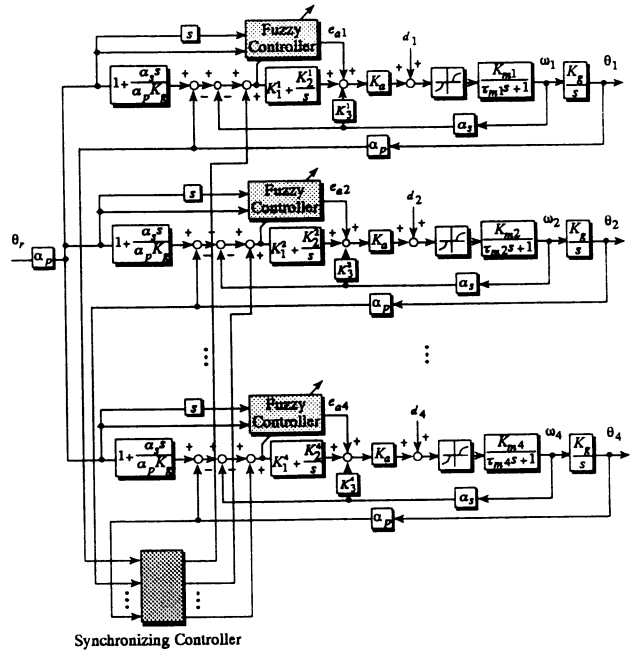


図1　システム構成図

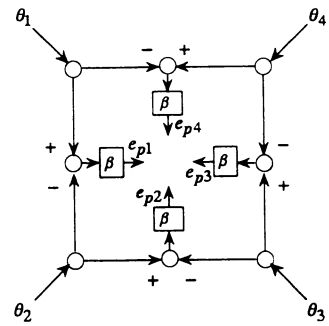


図2　同期化コントローラ

3. 制御アルゴリズム

STFFCの入力信号は規範速度信号ω_r，規範加速度信号α_rを用い，それらは7つのラベルを持つ三角形のメンバシップ関数によりファジィ化される。制御ルールの後件部変数は，初期値零のシングルトンの変数W_{ij}^kとし，次の学習則によりチューニングされる。

$$\frac{dW_{ij}^k}{dt}=\gamma e_{qk}\mu_{ij}^k \qquad (1)$$

ここで，γ >0は学習ゲイン，μ_{ij}^kは後件部変数のグレードであり，各入力信号に対するグレードをμ_i^k, μ_j^kとすると次式で表される。

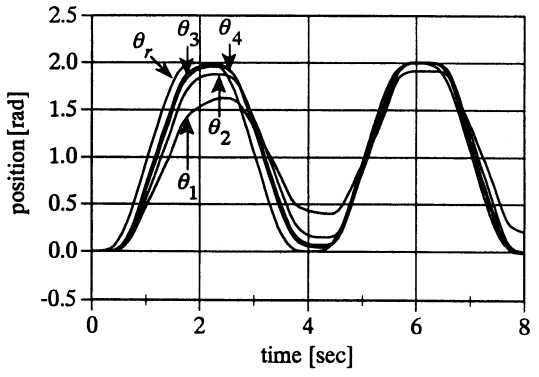
$$\mu_{ij}^k = \mu_i^k \mu_j^k \tag{2}$$

チューニングされた後件部変数W_{ij}^kを用いて，STFFCの出力e_{ak}は簡略法により次式で求められる。

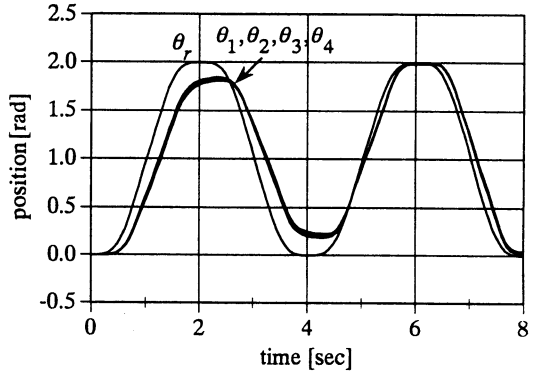
$$e_{ak} = \frac{\sum \mu_{ij}^k W_{ij}^k}{\sum \mu_{ij}^k} \tag{3}$$

4. 実測結果

提案するシステムの有用性を確認するため，定格23 [W]，24 [V]，1.9 [A]，3000 [rpm] の直流サーボモータを用いた4軸位置決めシステムを試作した。各軸の時定数の比は$\tau_{m1}:\tau_{m2}:\tau_{m3}:\tau_{m4}$=1 : 2 : 3 : 4 となるような慣性負荷を装着するとともに，各軸には1 [V] の不感帯と各軸で異なる飽和特性を模擬した非線形要素を挿入している。また，実測においては，学習ゲインγを0.2に設定している。図3 (a) (b) は周期4 [sec]，振幅2.0 [rad] の台形波状規範入力に対するβ =0.0 とβ =1.6 の場合のチューニング初期段階の応答特性である。β =0.0 と設定した場合，各軸は独立に制御されることとなり，動特性の違いから異なる応答を示しながら規範位置入力に漸近している。一方，β =1.6 とした場合，各軸動特性が大幅に異なるにもかかわらず，各軸出力はほぼ一致したまま規範位置入力に漸近している。図4 (a) (b) は台形波状規範位置入力でチューニング後，規範位置入力を2 [rad] 一定に変更し，第1軸のみに外乱0.05 [Nm] を加えた場合の応答特性である。β =0.0の場合は各軸が独立しているため，外乱が加えられた1軸出力のみが規範入力よりはずれ，他の軸の出力は規範入力に留まっている。それゆえ，1軸の後件部変数の再チューニングにより1軸出力が規範入力に復帰するまでの間，各軸は非同期状態にある。一方，β =1.6 とした場合には，外乱が加えられた1軸のみならず他の軸の出力も規範入力からはずれることにより高速な同期化が実現されている。以上の結果，提案した同期システムは非線形性を有する複数の駆動軸の追従特性の改善と高速な同期化に有用であることが確かめられた。

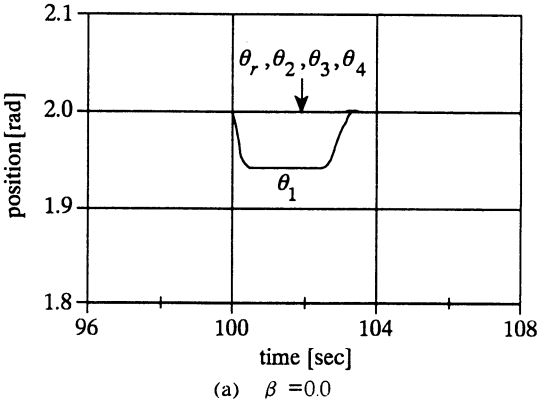


(a) β =0.0

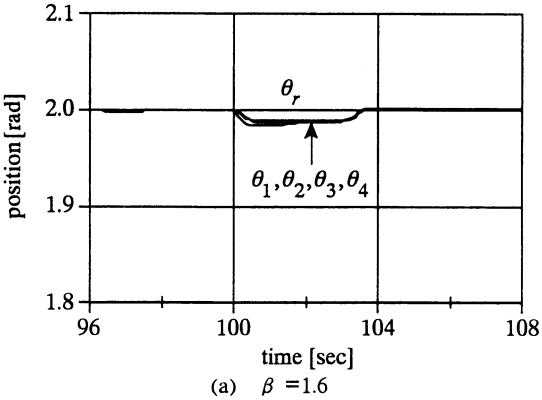


(a) β =1.6

図3 チューニング初期段階の応答特性



(a) β =0.0



(a) β =1.6

図4 チューニング後の応答特性

参考文献

1) 後藤他：複数サーボ系における従軸ダイナミクスを用いた主軸位置同期制御法，計測自動制御学会論文集，Vol.30，No.6，pp.669/676，1994

2) 鎌野他：アダプティブフィードフォワード制御を用いた多軸速度同期システム，システム制御情報学会論文誌，Vol.6，No.11，pp.488/497，1993

3) 福見他：自己調整ファジィフィードフォワードコントローラを用いた二軸位置同期システム，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.145/146，1994

連絡先

〒770 徳島市南常三島町2-1
徳島大学工学部電気電子工学科
鎌野琢也
TEL 0886-56-7455
FAX 0886-56-7455

WB3-2

フォークリフトの油圧回生ファジイ制御システム

Hydraulic Regenerative Fuzzy Contorl System of Forklift Truck

戸田正章、　遠藤真一郎、　林義人
Masaaki Toda　Shinichirou Endo　Yoshito Hayasi

神鋼電機株式会社
SHINKO ELECTRIC CO.,LTD.

Abstract—A forklift truck is used for taking up and down a heavy load. When the forklift truck take down a hevy load, a big potential energy is generated. But the big potential energy is not good use. In this paper, we have proposed a fuzzy control for hydraulic regenerative which is non linear, and the effctive of the proposed method is shown by some experimental result.

1．はじめに

バッテリ式のフォークリフトはエンジン式のものに比べて排ガスを出さないため、特に屋内作業では需要が多い．しかしバッテリ式のフォークリフトの欠点として充電に時間がかかることである．したがって、1回の充電当たりの作業時間を延ばすことはユーザにとって大きなメリットになる．一般にフォークリフトによる作業は、重量物を上げたり降ろしたりする作業（以下リフトアップ・ダウンと呼ぶ）が中心である．このリフトダウン時エネルギーをバッテリに回生して作業時間を延ばすことが考えられるが、本システムは非線形性が強く従来制御方式では良好な結果が得られなかった．今回この制御にファジイ制御を導入し、実機によりその効果を検証したので報告する．

2．フォークリフトの荷役作業について

フォークリフトの荷役作業は油圧回路を用いるのが一般的である．その方式を図1に示す．
リフトアップの場合には、運転者がリフトレバーを上昇側に倒したことをCPUが検知してモータを起動して油圧ポンプを回まわし、油タンクから油を吸い上げ、マニアルバルブを通してリフトシリンダを押し上げる．
リフトダウンの場合には、モータを停止させた状態で（したがって油圧ポンプも停止状態）、リフトシリンダ内の油をマニアルバルブを通して油タンクに返す．
運転者によるリフトレバーの倒し角度（リフトアップダウンの速度指令）はそのままマニアルバルブの開度となるように設計されており、その倒し角度の操作で荷物に急激な衝撃が加わらないようにしている［2］［3］．
このようにリフトダウン時の位置エネルギーは油をタンクに返すだけで、有効利用されていない．

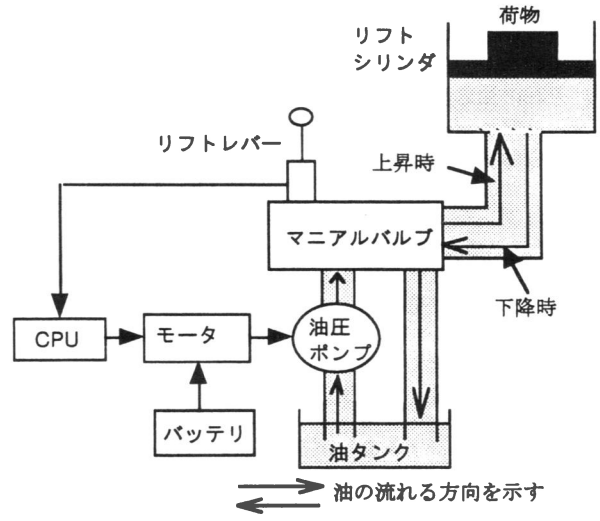


図1　フォークリフトの荷役作業の方式

3．制御方式

3．1　油圧回路の構成

図2に回生制御を導入した荷役作業における油圧回路の構成を示す．ただし、説明を分かりやすくするために回生制御時つまりリフトダウンの場合についてのみ示してある．リフトダウン時、油の流れは油圧ポンプを経てタンクに返るもの（以下ポンプ側と呼ぶ）と油圧ポンプを

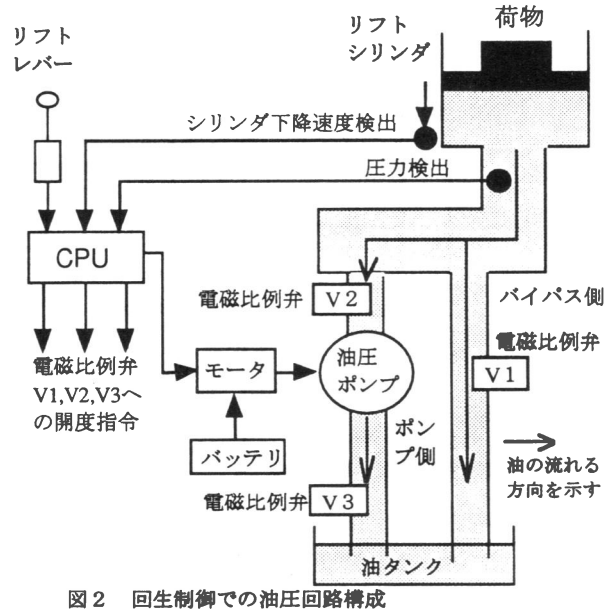


図2　回生制御での油圧回路構成
（ただし、荷物を下降させる場合についてのみ示す）

経ないで直接タンクへ返るもの（以下バイパス側と呼ぶ）とがある．このポンプ側に流れる油が持つエネルギーによってモータを発電機として動作させバッテリに充電するのである．バイパス側の流量制御はV1で行い、ポンプ側はV3にて行っている．V2はON/OFF弁である．

３．２　油圧回路の制御方式

回生制御での課題は、次の２点である．

（１）リフトダウン時に出来るだけ多くのエネルギーをバッテリに回生する

（２）運転者に、回生中であっても違和感のない滑らかな荷役動作を実現する

（１）だけを考慮すると、油をすべてポンプ側に流して回生制御を行えば良いのであるが、油圧ポンプの圧力損失により軽負荷の場合下降速度が遅くなり課題（２）を達成させるために、リフトレバーからの開度指示によってはバイパス側にも油を流す必要がある．このため、荷物の重さ（以下荷重と呼ぶ）とリフトレバーの開度指示の組み合わせによる操作パターンにもとずいてバイパス側とポンプ側のいずれに油を流すかを制御するモード切り換え処理を設けた．またバイパス側あるいはポンプ側それぞれの油の流量制御（リフトアップ・ダウンの速度制御）はファジイ制御を用いた．図３に全体の制御ブロックを示す．

３．２．１　モード切り換え処理

リフトレバーの開度指令を零、小、大に、荷重を小、大にそれぞれ分けると、操作のパターンとして図４の(a)～(e)の５つの部分に分けられる．

(a)：リフトレバースイッチがOFFで停止のパターン
(b)：荷重が軽くて微速のパターン
(c)：荷重が重くて微速のパターン
(d)：荷重が軽くて高速のパターン
(e)：荷重が重くて高速のパターン

このうち、(e)の時だけポンプ側に油を流して回生制御を行う．ただし、リフトレバーの開度は運転者が自由に操作することができるため、下降中に小から大、あるいは大から小に切り換えることがある．この場合、制御はそれぞれバイパス側からポンプ側、ポンプ側からバイパス側へと移行しなければならない．これらを考慮して、制御モードを以下の５つに分けた．

（１）リフト動作を停止するモード（モード０）

比例弁Ｖ１とＶ３をパターン制御で閉める．Ｖ１とＶ３が閉められてからＶ２を閉める．

（２）バイパス側のみ油を流すモード（モード１）

リフトレバーの開度指令が小かまたは荷重が小で、かつ比例弁Ｖ３が閉じている時に入るモード．バイパス側だけに油を流す．ファジイ制御によりＶ１の開度を制御する．

（３）ポンプ側→バイパス側の移行モード（モード２）

リフトレバーの開度指令が小かまたは荷重が小で、かつＶ３が開いて時に入るモード．リフトレバーの開度指令が大から小に切り換えられた場合である．油の流れはポンプ側からバイパス側に移行する．ファジイ制御によりＶ１の開度を制御する．Ｖ３はパターン制御により閉じられる．

（４）ポンプ側のみ油を流すモード（モード３）

リフトレバーの開度指令と荷重が大、かつＶ１が閉じている時に入るモード．ポンプ側だけ油を流す．ファジイ制御によりＶ３の開度を制御する．

（５）バイパス側→ポンプ側の移行モード（モード４）

リフトレバーの開度指令と荷重が大で、かつＶ１が開いている時に入るモード．リフトレバーの開度指令が小から大に切り換えられた場合である．油の流れはバイパス側からポンプ側に移行する．ファジイ制御によりＶ３の開度を制御する．Ｖ１はパターン制御により閉じられる．

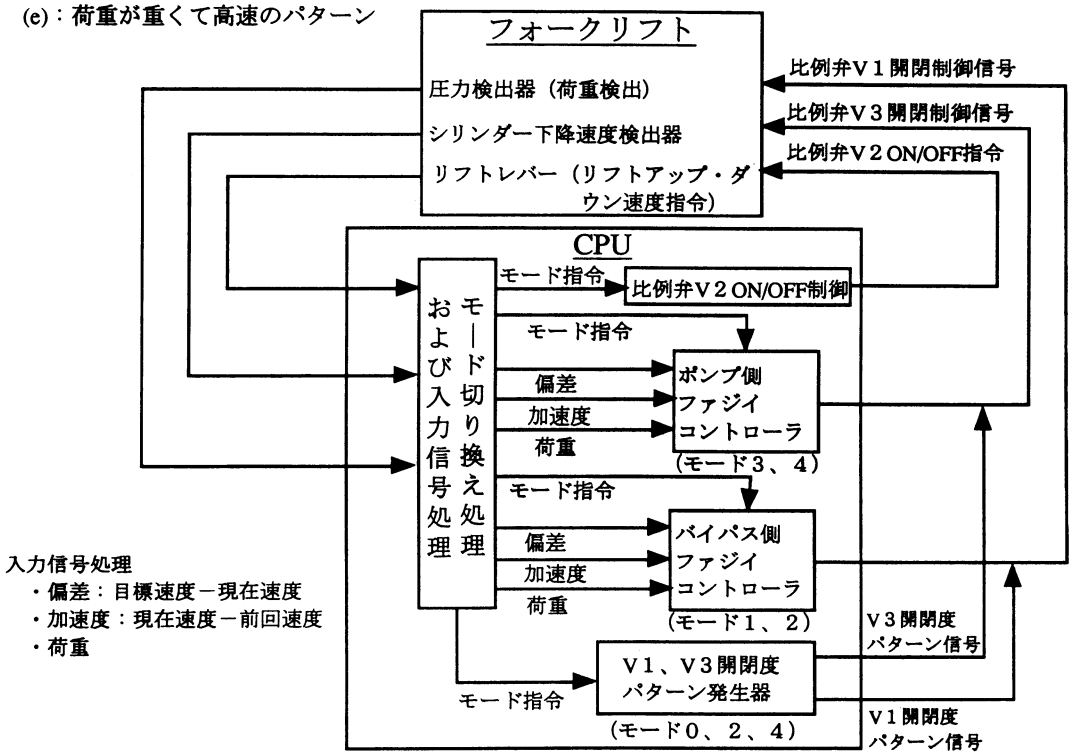


図３　制御ブロック図

		荷重	
		軽	重い
リフトレバー開度指令	零	(a)	
	小	(b)	(c)
	大	(d)	(e)

モード０：(a)
モード１：(b),(c),(d)
モード２：(d)→(b),(e)→(c)
モード３：(e)
モード４：(b)→(d),(c)→(e)

図４　制御モードの切り換え処理

３．２．２　バイパス側ファジイ制御

バイパス側ファジイコントローラは、モード１、２時に働き、偏差、加速度、加重（圧力）を入力としてファジイ推論を行い比例弁Ｖ１の開度の制御を行う．
制御ルールは、リフトレバーの開度指令に応じた下降速度が得られるように、また荷揺れが少ない滑らかな速度カーブとなるように調整した．ルールの一例を下記に示す．なお紙面の都合上メンバーシップ関数は省略する．
推論方式はバイパス側、ポンプ側のいずれも代数積ー加算ー高さ法（簡略化推論法）［１］を用いた．

ルール１：　IF　偏差が負
　　加速度が零
　　荷重が小
　THEN　比例弁Ｖ１を大きく閉めよ
ルール２：　IF　偏差が零
　　加速度が負
　　荷重が大
　THEN　比例弁Ｖ１を少し開け
　　⋮
　　⋮

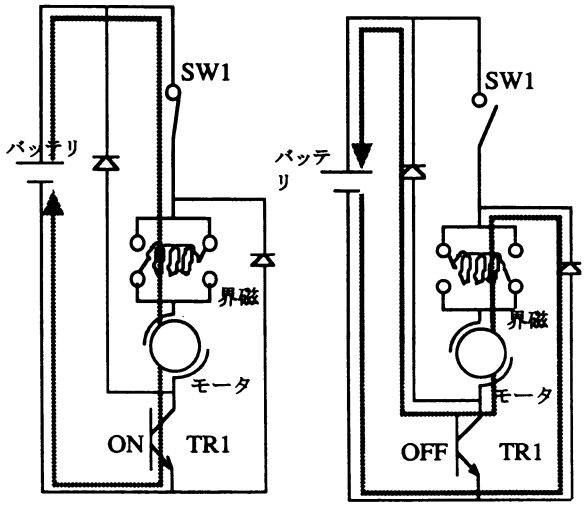
３．２．３　ポンプ側ファジイ制御

モード３、４で働き、バイパス側と同じ入力によって比例弁Ｖ３の開閉度を制御する．制御ルールはリフトレバーの開度指令に応じた下降速度が得られ、かつ荷揺れを抑えて、回生効率が最も良くなるように調整した．以下ルールの一例を示す．

ルール１：　IF　偏差が正
　　加速度が負
　　荷重が小
　THEN　比例弁Ｖ３を大きく開け
ルール２：　IF　偏差が零
　　加速度が正
　　荷重が大
　THEN　比例弁Ｖ３の開度はそのまま
　　⋮
　　⋮

３．３　回生用電気回路

回生用に用いた電気回路を図５(a)、(b)に示す．(a)がリフトアップ時、(b)がリフトダウン時つまり回生動作時である．(a)の状態では、SW1がONされてモータは電動機として働き、電流は図中の点線で示した流れになる．(b)の状態では、SW1がOFFされて界磁が切り換えられ、モータは発電機となる．この時トランジスタTR1をOFFすると電流が図中の波線のように流れてバッテリを充電することになる．



(a)リフトアップ時　　(b)リフトダウン充電動作時

図５　回生用電気回路

４．実機運転結果

今回の実験で用いたフォークリフトはフロントタイプの車で、２．５トンの荷物をリフトアップ・ダウンできる．
図６に荷重が２トンで、リフトレバー開度指令を２４０mm/secから２５０mm/secにステップ状に与えた場合の結果を示す．
目標速度が２４０mm/secの場合はモード１に入るため（この実験ではモード切り換え速度を２５０mm/secに設定したので、最初にモード１（操作パターンが(c)の状態）に入る）．このため、バイパス側の比例弁Ｖ１についてはファジイ制御による速度制御が行われ、ポンプ側比例弁Ｖ２は一定パターンで開かれる．目標速度が２５０mm/sec変化するとモード４（操作パターン(c)→(e)）に移り、バイパス側比例弁Ｖ１をパターンで閉め、ファジイ制御によりポンプ側比例弁Ｖ３の開度を調節して速度制御を行う．その後モード３（操作パターン(e)）に移り回生動作状態になる．バイパス側からポンプ側への移り変わりが滑らかに行われており、オバーシュートもなく運転者にとって違和感のない操作ができている．図７は荷重が２トンで、リフトレバー開度指令を２５０mm/secから２４０mm/secにステップ状に変化させた場合である．これは図６の場合と逆でモード３→モード２→モード１と変化する．このケースもリフトレバー開度指令の変化時に若干のアンダーシュートがあるものの運転者にはほとんど感じない程度のものであり良好な結果が得られた．

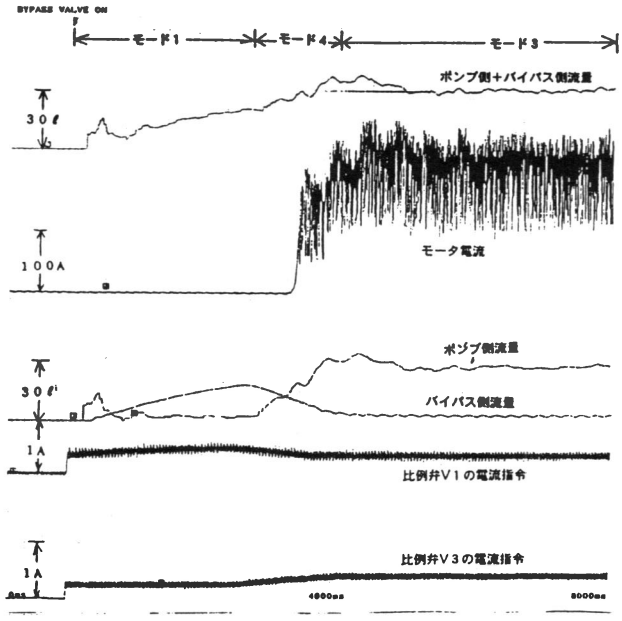


図６　実験結果

荷重が２トンでリフトダウン速度240mm/secから250mm/secにステップ状変更

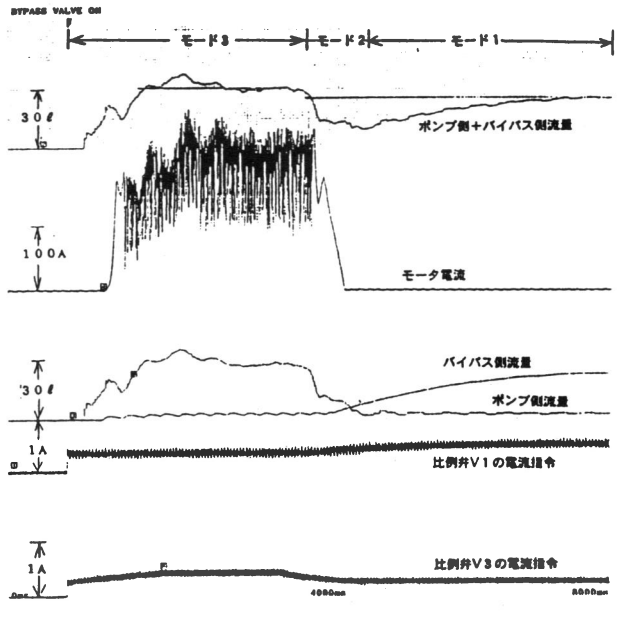


図７　実験結果

荷重が２トンでリフトダウン速度250mm/secから240mm/secにステップ状変更

５．回生効率

リフトアップ時に消費した電気量に対して、実際にバッテリに回生された電気量の割合を回生効率と定義して次式により計算した．ただし、リフトダウン時に比例弁の開閉に必要なパイロット圧を供給するためのパイロットモータを回す電流として平均２５アンペア消費しているものとしている．

Wk＝－（Wd－Wp）　Wk：回生した電気量（A・sec）
Wd：リフトダウン時の電気量（A・sec）
Wp：パイロットモータで消費された電気量（A・sec）
Wp＝２５×T　T：所要時間（sec）
Kef=Wk/Wu×100　Wu：リフトアップ時の消費電気量（A・sec）
Kef：回生効率（%）

各荷重とリフトダウン速度についての回生効率を表１に示す．

No.	荷重（トン）	リフトダウン速度(mm/sec)	リフトダウン時間(sec)	回生効率（%）
1	2	３００	５．６	８．９
2	2	４００	４．３	８．８
3	2	５００	３．７	８．１
4	１．５	３００	５．３	８．２
5	１．５	４００	４．２	７．８

表１　回生効率

６．おわりに

リフトダウン時のエネルギーをバッテリに回生する制御にファジイ制御を用いた方式を提案し、実機での検証結果について報告した．回生制御を行った場合でも、従来とほとんど変わらない滑らかな荷役動作を実現することができた．また回生効率として最大約９％を得た．これは１回の充電で５時間作業できるとすると、約３０分の作業が余分にできることになる．今後の課題としてはより回生効率を上げるために、リフトアップ時に消費されている電気量の削減（例えば、配管の最適配置など）、比例弁の応答特性の改善など行っていく予定である．

参考文献

［１］菅野道夫、“ファジイ制御”、日刊工業新聞社
［２］戸田正章、他、“ファジイ制御によるフォークリフトの荷役作業”、第９回「ファジイシステムシンポジウム」講演論文集、pp.41-44
［３］戸田正章、他、“フォークリフト荷役作業における圧力フィードバックのハイブリッド制御”、第３回インテリジェント・シンポジウム、1993.9.20

連絡先

〒５１６　三重県伊勢市竹ヶ鼻町１００
神鋼電機株式会社　研究部
戸田　正章
TEL：(0596)36-3180
FAX：(0596)36-4921

WB3-3

ファジィ推論により目標の設定と操作量の補正を行うファジィPID制御系による石油プラントの非定常状態制御

Design of Fuzzy-PID Controller with Fuzzy Reference Input and Its Application to Petroleum Plant

谷　哲次 *1　小林弘明 *2　歌代　誠 *3　馬野元秀 *4　田中一男 *5
Tetsuji Tani　Hiroaki Kobayashi　Makoto Utashiro　Motohide Umano　Kazuo Tanaka

＊1出光興産株式会社　製造部　Manufacturing Department, Idemitsu Kosan Co., Ltd.
＊2出光興産株式会社　北海道製油所　Hokkaido Refinery, Idemitsu Kosan Co., Ltd.
＊3出光興産株式会社　情報システム部　Information Systems Department, Idemitsu Kosan Co., Ltd.
＊4大阪大学　基礎工学部　Faculty of Engineering Science, Osaka University
＊5金沢大学　工学部　Faculty of Engineering, Kanazawa University

Abstract : We propose a practical Fuzzy Fuzzy-PID control system (1) setting target value of Fuzzy-PID controller by fuzzy reasoning, (2) compensating output value of PID controller by fuzzy reasoning (i.e. Fuzzy-PID controller). The proposed system can control the temperature of the stripper overhead effectively in not only steady state but also transient state such as switching of feed oil and also changing of quality specification of products.

1. はじめに

PID 制御は適用が容易で信頼性の高いフィードバック制御法として、化学プラントの制御に広く用いられている。しかしながら、大きな時間遅れや非線形性を有するプロセスでは十分な制御性能が得られないため、PID 制御とファジィ制御を組合わせた手法がいくつか提案されている[1)~5)]。我々は、PID 制御の出力をファジィ推論で補正する方法(以下ファジィ補正型PID制御)を提案した[3),5)]。この方法は、設定した目標値に対しプロセスを安定化させると言う範囲では十分な制御性能が得られた。しかし、実プラントでは、原料切換えにより原料の性状が大きく変化したり、生産する製品の規格を変更するために、原料が同じでもプラントの運転条件を変更する必要がある。

このような過度的な状態(以下非定常状態)において、熟練運転員は状況に応じて適切に制御の目標値を変更している。そこで、この判断をファジィ推論で行い、ファジィ補正型PID 制御に目標値を与えると言う制御方法を開発した。

そして、本制御方法をナフサ脱硫装置の塔頂温度制御に適用し、原料切換え時や製品規格変更時などの非定常状態においても良好な制御性能を得ることができた。

2. 装置の概要と問題点

ナフサ脱硫装置は未洗浄のナフサとLPG(液化石油ガス、Liquified Petroleum Gas)から硫黄分やその他の不純物を取り除き、製品ナフサと製品LPGを生産する装置である(図１)。

原料ナフサとLPGは水素と混合され、加熱された後、反応塔(リアクタ)に入り脱硫処理(硫黄分や不純物を取り除く処理)が行われ、セパレータにおいて硫化水素とナフサ・LPGの混合物とに分けられ、ストリッパに送られる。ストリッパでは、製品LPGと製品ナフサとに分離され、製品LPGは塔頂から取り出され、製品ナフサは塔底から取り出される。製品ナフサには蒸気圧により２種類の製品規格がある。

生産計画に基づき原料切替えが行われるが、原料切替え時には原料ナフサとLPGの混合比率が大きく変更される。さらに、生産計画に基づき製品規格の変更が行われる。

この装置では、製品の規格を維持するためにはストリッパの塔頂温度をある適切な温度に保つ必要があり、そのための操作量は還流量(図１のＡ点)かリボイラ温度(図１のＢ点)である。しかし、この２つの操作は干渉している。しかも、省エネルギーの観点から還流量は最小化することが望ましい。

前に、製品規格が一定の場合、熟練運転員の適切な塔頂温度と還流量の設定に基づき、原料処理量の変化や原料切替えなどの外乱に対応できる制御方法として、リボイラ温度を操作量としたファジィ補正型PID制御を提案し、良好な制御結果が得られることを報告した[5)]。

今回は、熟練運転員が行っていた塔頂温度と還流量の設定を自動化し、さらに製品規格を変更する場合にも対応できる制御方法を提案する(図２)。

このような制御方法を開発するにあたり、以下のような点を考慮する必要がある。

- 原料であるナフサやLPGの処理量は、上流の装置の生産量に依存し一定ではない。したがって、処理量や原料性状が刻々と変化し、その予測ができない。さらに、原料切替え時にはその混合比率が大きく変更されるので、その原料性状が大きく変化し、その性状変化は予測できない。

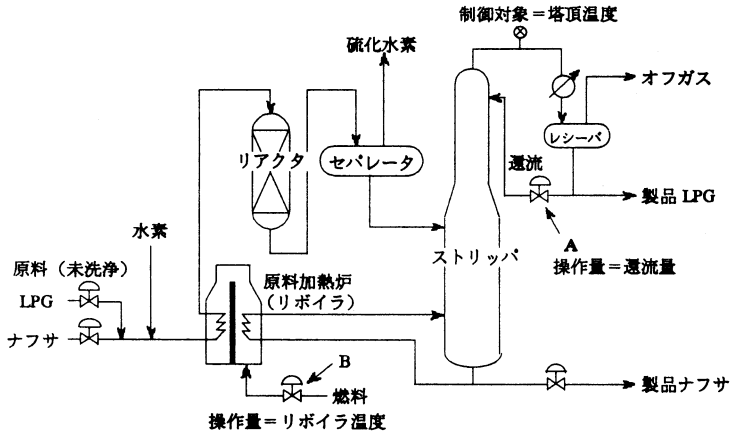


図１ 装置概要

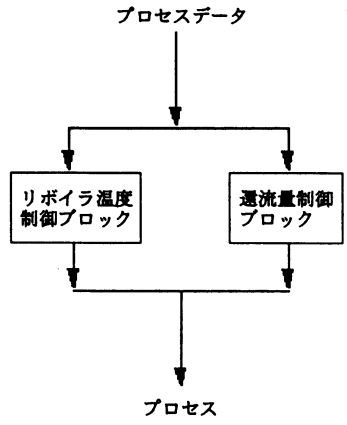


図３　本制御方法のブロック図

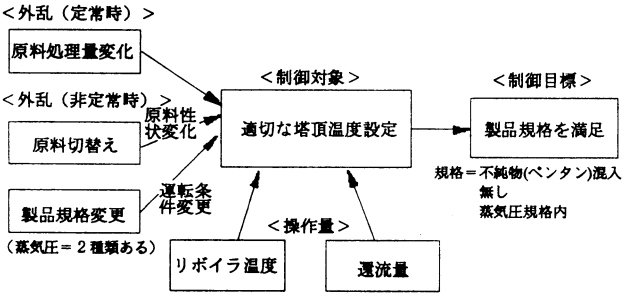


図２　制御目標と外乱の関係

・塔頂温度を高く設定しすぎると製品LPG中へ不純物であるペンタンが混入する。さらに、ペンタンの混入は突如として発生し、その予測が困難である。また、塔頂温度を低くしすぎると製品ナフサの蒸気圧が高くなり規格から外れる。従って装置の運転の状況を常時監視しながら塔頂温度を微妙に操作する必要がある。
・しかし、塔頂温度を調整するリボイラ温度と還流量とは干渉するため、一方の目標値を変更した場合は他方の目標値も変更しなくてはならない。さらに、省エネルギーの観点から還流量は最小化することが望ましい。
・さらに、リボイラ温度の調整に対する塔頂温度のダイナミクスは非線形で大きな時間遅れがある。

3.　制御システムの構築

本制御方法は、図３のようなリボイラ温度制御ブロックと還流量制御ブロックからなる。リボイラ温度制御ブロックは、適切な塔頂温度を設定し、リボイラ温度を調整する(図１中のB点)。還流量制御ブロックは、還流量を調整する(図１中のA点)。

各ブロックは、制御対象の長期的な動向から平均的な操作量(基準値)を算出する基準器と、現在の制御対象の状況を評価して適切に基準値を補正する補正器からなる。

3.1　リボイラ温度制御ブロック

リボイラ温度制御ブロックは、基準器には PID 制御、補正器にはファジィ推論を使用したファジィ補正型PID 制御に対し、ファジィ推論を使用して制御の目標値を適切に変更する目標設定器を設けた形である(図４)。図５に補正器のファジィ制御ルールを示す。PID制御の出力を補正することにより、原料処理量の変化や原料切替えなどの外乱に対応する。図６に目標設定器のファジィ制御ルールを示す。現在の塔頂温度や製品ナフサの蒸気圧などを参照して、適切な塔頂温度を設定する。推論方法としては後件部が実数値である簡略化法を用いた[6),7)]。

3.2　還流量制御ブロック

還流量制御ブロックは、基準器には統計的手法、補正器にはファジィ推論を使用した(図７)。この基準器では、前もって製品ナフサの蒸気圧とその時に熟練運転員が行った還流量操作の関係を重回帰分析により求めておく。そして、現在の製品ナフサの蒸気圧を観測し、その値から重回帰分析の結果を利用して平均的な還流量を基準値に設定する(図８)。

補正器は平均的な還流量に対し、塔頂温度や製品LPG中のペンタン混入量などから、還流量を最小化するための補正値を算出する。その時のファジィ制御ルールを図９に示す。推論方法は簡略化法を用いている。

3.3　本制御方法の特長

この制御方法のには次のような特長がある。

1)平均的な操作量を算出する基準器とそれを補正する補正器を組み合わせることにより、
- 基準器にはPID 制御などの既存の制御方法を採用するので従来の資産を活用できる。
- 補正器には熟練運転員のノウハウを活用できるようにファジィ制御を採用しているが、ファジィ制御が不得意とする積分(Ｉ)動作や統計的処理を基準器に任せているので、ファジィ制御ルールが簡単になる。

2)基準器と補正器に対し目標設定器を設けることにより、状況に応じて目標値を適切に変更できる。

3)各手法が簡単で、全体の構成も簡単なため、現場に馴染みやすい。

4.　制御結果

この制御システムを出光興産北海道製油所のナフサ脱硫装置の塔頂温度制御に適用し、原料切替え時およ

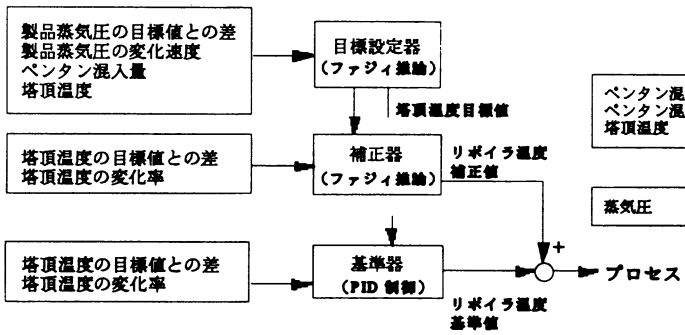


図４　リボイラ温度の制御ブロック図

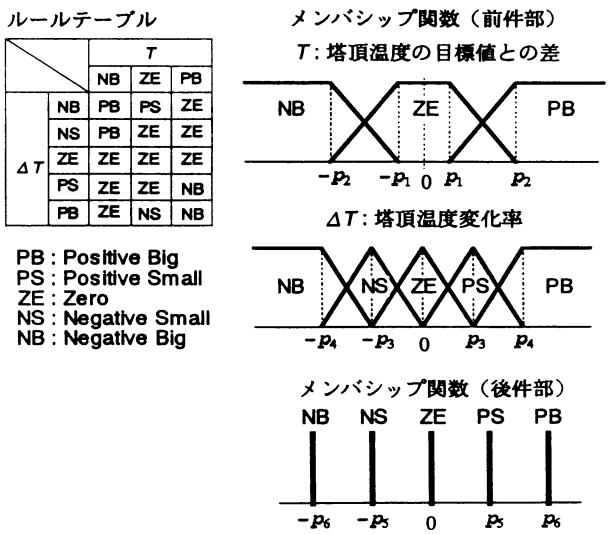


図５　リボイラ温度制御の補正器のファジィ制御ルール

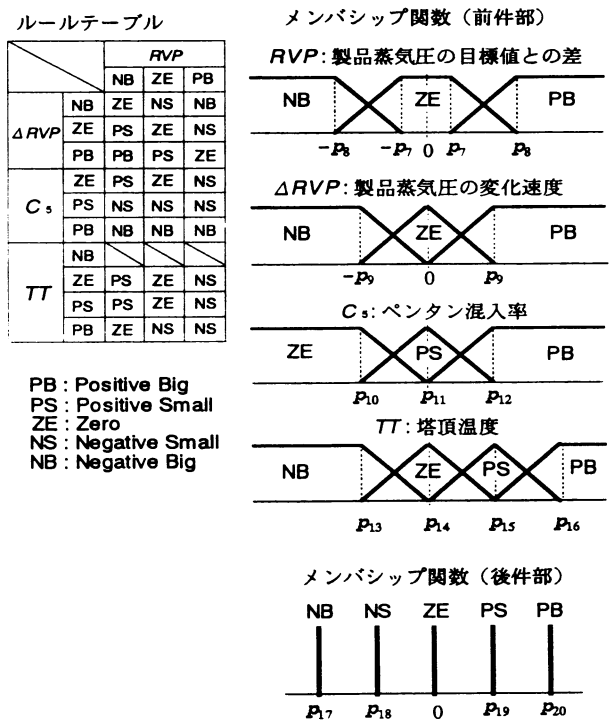


図６　目標設定器のファジィ制御ルール

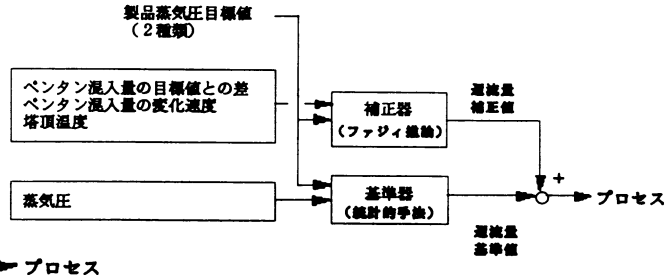


図７　還流量の制御ブロック図

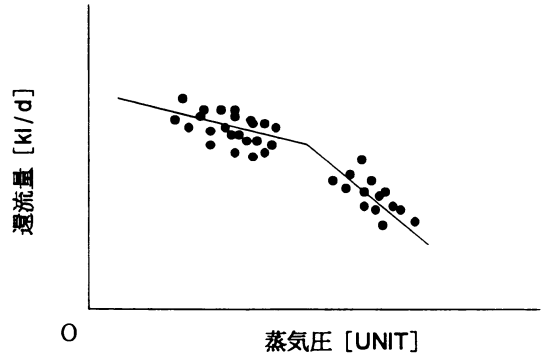


図８　還流量と蒸気圧の関係

び製品規格変更時までの広い範囲において良好な制御性能を得ることができた。

非定常状態のうち、製品規格変更時の運転状況を図10および図11に示す。図10は手動運転によるもので、運転モードA(製品蒸気圧が低いモード)から運転モードB(製品蒸気圧が高いモード)への切替え操作を示しており、６時間に約34回の運転員によるリボイラ温度変更操作を必要としていた。一方、図11は本制御方法による運転モードAから運転モードBへの切替え操作を示しており、運転員の介入なしで運転モードを切替えることができた。

運転モード切替え前後で、手動運転と本制御方法との制御状況を比較すると図12のようになった。図中のA点から本制御方法をオンラインし、B点で再び手動運転にもどした例である。手動運転の場合には、運転モードAにおいて製品蒸気圧の振れ幅は8.5[unit]であり、運転モードBでは12.5[unit]であった。これに対し本制御方法では、製品の目標値を変更するだけで塔頂温度や還流量を自動調整し、さらに運転モードA、運転モードBいずれの場合も製品蒸気圧の振れ幅3.0[unit]で制御することができた。

また、還流量の制御性能を比較すると、運転モードAでは、本制御方法は手動運転に比べて0～400[kl/d]の低減効果があり、運転モードBでは、本制御方法は手動運転に比べて140[kl/d]の低減効果があった。これらの制御結果をまとめると表１のようになる。

5．結論

PID 制御の出力に、ファジィ推論で直接補正を加えるファジィ補正型PID制御に対して、制御の目標値をファジィ推論によって適切に変更するファジィ目標設定ファジィ補正型PID 制御系を提案した。

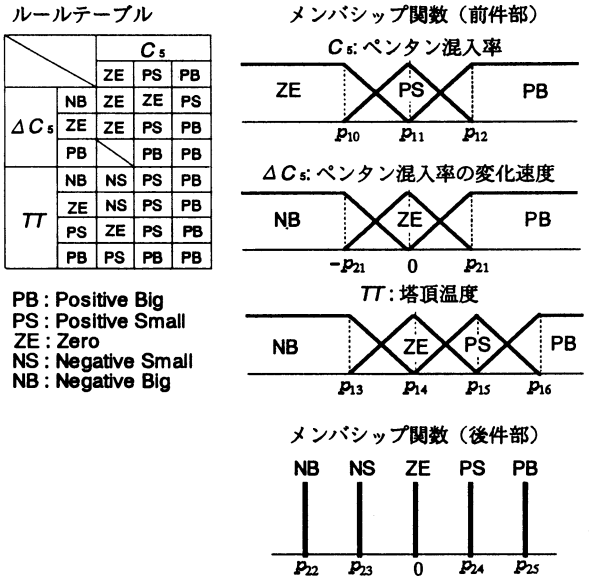


図 9　還流量の補正器のファジィ制御ルール

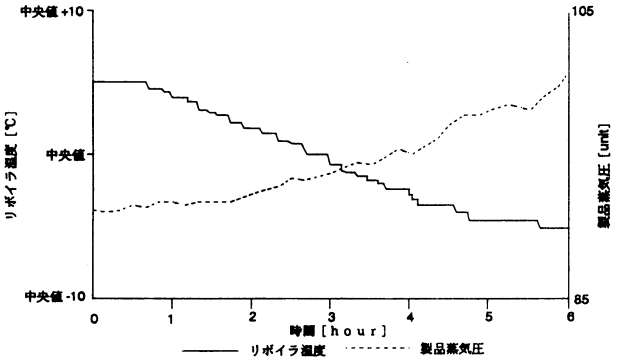


図 10 手動運転によるモード切替え

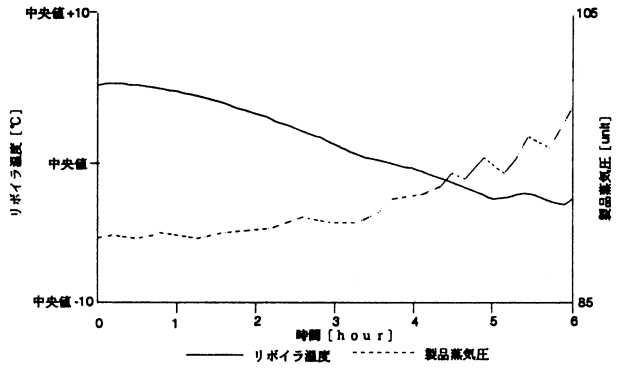


図 11 本制御方法によるモード切替え

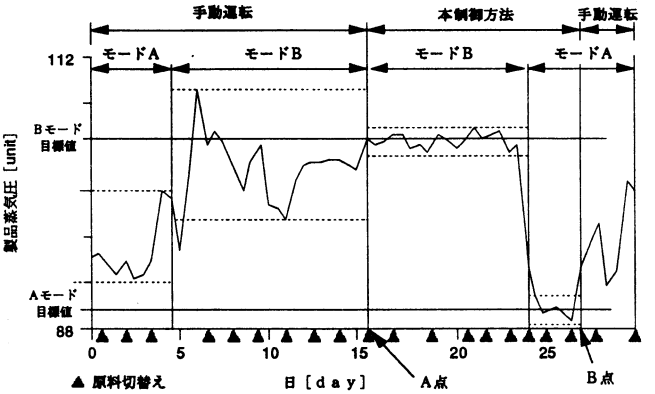


図 12　手動運転と本制御方法との制御状況比較

表 1　制御結果

	運転モードA	運転モードB
＜手動運転＞ 蒸気圧振れ幅	8.5 [unit]	12.5 [unit]
還流量平均値	ベースA	ベースB
＜本制御方法＞ 蒸気圧振れ幅	3.0 [unit]	3.0 [unit]
還流量平均値	ベースA－(0～400)[kl/d]	ベースB－140[kl/d]

この制御方法をナフサ脱硫装置の塔頂温度制御に適用し、原料切替えや製品規格変更などの非定常状態においても良好な制御性能を発揮することを実証した。今後は、他装置での適用を試みたい。

参考文献

[1]市橋、田中：PID とファジィのハイブリッド型コントローラ、第 4 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、97/102 (1988)

[2]松永、川路：DCモータのファジィハイブリッド制御、電気　学会論文集D、Vol.111、No.3、195/200 (1991)

[3]谷、田中：ファジィ制御とPID 制御の複合系の構成とその加熱炉温度制御への適用、計測自動制御学会論文集、Vol. 27、No.11、1274/1280 (1991)

[4]安信、Thomson：PID 制御＆ファジィ推論による階層型ファジィ制御方法と実験評価、第10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、435/436 (1994)

[5]谷、小林、歌代、馬野、田中：2自由度的PID 制御系の構成と石油プラントにおける非定常制御への適用、第10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、585/588 (1994)

[6]水本：ファジィ制御に対する改善法(5,6,7)、第 3 回、第 4 回、第 5 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、153/158(1987)、91/96(1988)、499/504 (1989)

[7]前田、村上：自己調整ファジィコントローラ、計測自動制御学会論文集、Vol27、No2、191/197 (1988)

連絡先

〒299　千葉県市原市姉崎海岸 2－1、出光興産(株)
製造部システム技術センター　谷 哲次
TEL 0436-61-6965　FAX 0436-61-0885

WB4-1

予見ファジィ制御方式に基づく知的駐車制御システムの模型自動車による評価

Performance Assessment of Intelligent Parking System Based on Predictive Fuzzy Control by Model Car

安信誠二　村井　泰仁　山本　幸一
Seiji Yasunobu　Yasuhito Murai　Koichi Yamamoto

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

Abstract - Fuzzy control method can make an algorithm from control know-how of a skilled human operator or control engineer by fuzzy sets. The drive of the car is operated by the drive knowledge of the driver who knows the dynamic characteristic of the car well. To achieve the control based on this drive knowledge, a car operation system was constructed of fuzzy control scheme that consisted of predictive fuzzy control. The computer simulation of the parking control was executed by using this system. It was confirmed that the proposed method is effective.

1．はじめに

列車やクレーン等の移動体の運転・制御に熟練者の知識を組み込む手法として予見ファジィ制御方式の有効性が実証されている[1]．一般的な移動手段である四輪自動車の運転操作は，その動特性を理解した運転者（熟練者）によって実行される．我々は，この熟練者の経験・知識に基づく知的駐車制御システムの実現を進めている[2]．本論文では，熟練者の駐車戦略を見直し，制御コントローラとして予見ファジィ制御方式に基づく階層型ファジィコントローラ[1]を用いた知的駐車制御システム[3]を提案し，定位置制御のコンピュータシミュレーションおよび1/10スケールの模型自動車の走行実験を行い，提案した知的駐車制御システムの有効性を評価する．

2．四輪自動車の動特性

前輪操舵の四輪自動車が，遠心力の発生を無視できるような低速度で旋回を行う場合，各車輪は横滑りせずに路面と点接触して転がっていると考えることができる．このとき，車輪それぞれの回転中心軸の延長上に旋回中心Oがあり，これを中心に車体は円旋回運動をする（図1）．

車両が円旋回運動をするとき，その運動方程式は式(1)のようになる[4]．

$$\frac{dx}{dt} = v\cos\varphi\cos\theta$$
$$\frac{dy}{dt} = v\cos\varphi\sin\theta \qquad (1)$$
$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v}{L}\sin\varphi$$

ただし，（x, y）：後二輪の中間の絶対座標（以下自動車の位置と呼ぶ），θ：x軸と自動車の進行方向とのなす角度（以下車体の方向と呼ぶ），ϕ：左右の前輪操舵角ϕLとϕRの平均（以下自動車の舵角と呼ぶ），L：ホイールベース，B：トレッド幅，v：前輪の平均速度（以下自動車の速度と呼ぶ），とする．

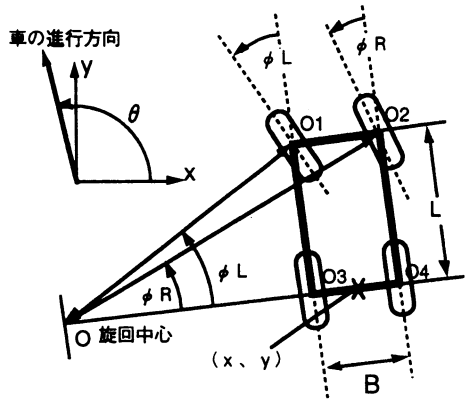


図1 四輪自動車の円旋回運動

3．熟練者の知的駐車戦略

熟練者は四輪自動車の動特性を大まかに理解しているとはいえ，実際に式(1)の方程式を解きながら運転しているわけではない．彼はT字路やクランクなど，いろいろな場所を運転したときに，「行き先と，今の自動車の状態，周囲の状況などがだいたい～ならば，ハンドル操作とアクセル操作を～にする」などの経験則（知識）を習得している．この知識を用いて，うまく目的に駐車させている．熟練者が駐車時に考える戦略は，次の戦略(1)～(5)のように記述できる．

戦略(1)：最終的にどこにたどり着きたいのかという最終目標を決定

戦略(2)：周囲の状況，自動車の現在状態を把握

戦略(3)：自動車の現在状態と最終目標との関係から適切な途

中目標を設定

戦略(4)：途中目標と自動車の現在状態，そして自動車の動特性から，途中目標に到達することを目的として，現在の実行すべきハンドル操作とアクセル操作を決定

戦略(5)：目標に達しているかどうかを判断（達していれば戦略(2)を，達していなければ戦略(4)を実行）

このように，戦略(2)と(5)から「制御状況の監視」，戦略(3)から「途中目標の設定」，戦略(4)から「ハンドル操作の決定」，と大きく3つの階層的な役割を考えることができる．

4．知的駐車制御システムの開発

3章で示した熟練者の経験・知識に基づく知的駐車制御の実現を目指すため，制御コントローラとして予見ファジィ制御方式[1]に基づく階層型ファジィコントローラを用いた知的駐車制御システムを開発する．この階層型ファジィコントローラは，図2のように(1)状況監視部，(2)目標設定部，(3)ハンドル操作部からなる．それぞれの階層に対し制御状況の監視，目標設定，ハンドル操作（目的評価）の三つの役割を分担させる．

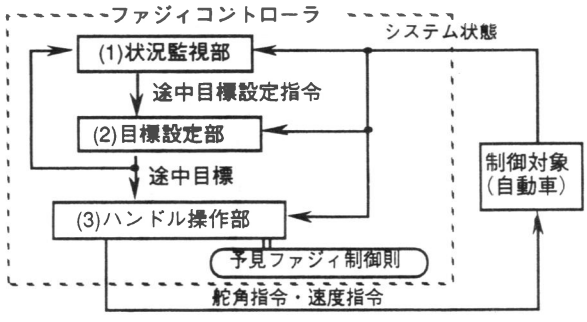


図2 階層型ファジィコントローラ

（1）状況監視部

目標設定部では，設定された途中目標に向って進みつつあるかを常に監視する．達していなければ現在の途中目標を維持する．達しているか，または自動車が停止していれば，次の途中目標を設定する指令を目標設定部へ与える．

（2）目標設定部

四輪自動車の最小旋回半径Rを考慮すると，現在の自動車の状態（位置・向き）と最終目標(0.0, 0.0, 90.0)との関係から到達すべき途中目標（位置・向き）と進行方向（前進または後進）を計算で決定することができる．その決定は「自動車の現在位置が～で，方向が～ならば，途中目標を～にし，前進（または後進）する」というルールをもとに実行する．以下，具体的な途中目標の決定法を述べる．

【途中目標決定法】

次の8つのルールから，途中目標と進行方向を決定する．このとき，自動車の動きはx座標を表すxと，車体が最終目標の方向（θ=90°）との誤差e，の2つを考慮し，図3のようなx-e領域を考える．また，ここではx≧0の場合を示すが，x≦0のときは図3をe軸に関して対称的に考えればよい．

ルール1：現在，x座標が小さく，方向が内側を向いているならば，図4の幾何学的関係から，ハンドルを左と右に最大に切って(0.0, y, 90.0)（ただしyは任意の値）に達するように式(2)を用いて途中目標(x1, y1, e1)を決定し，前進指令を出す（図3で(1)の領域）．

ルール2：現在，x座標が小さく，方向が外側を向いているならば，図4の幾何学的関係から，ハンドルを左と右に最大に切って(0.0, y, 90.0)に達するように式(2)を用いて途中目標(x1, y1, e1)を決定し，後進指令を出す（図3で(2)の領域）．

ルール3：現在，方向が大きく内側を向いているならば，ハンドルを右に最大に切り(x, y, 180.0)に達するように途中目標を決定し，後進指令を出す（図3で(3)の領域）．

ルール4：現在，方向が大きく外側を向いているならば，ハンドルを左に最大に切って(x, y, 180.0)に達するように途中目標を決定し，後進指令を出す（図3で(4)の領域）．

ルール5：現在，x座標が非常に大きく，方向が内側を向いているならば，ハンドルを左に最大に切り(R, y, 180.0)に達するように途中目標を決定し，前進指令を出す（図3で(5)の領域）．

ルール6：現在，x座標が大きく，方向が約90°内側を向いているならば，ハンドルをまっすぐにし(R, y, 90.0)に達するように途中目標を決定し，前進指令を出す（図3で(6)の領域）．

ルール7：現在，y座標が大きく，方向が約90°外側を向いているならば，ハンドルをまっすぐにし(R, y, -90.0)に達するように途中目標を決定し，後進指令を出す（図3で(7)の領域）．

ルール8：現在，y座標が非常に小さく，方向が正面を向いているならば，最終目標へ前進（後進）指令を出す（図3で(8)の領域）．

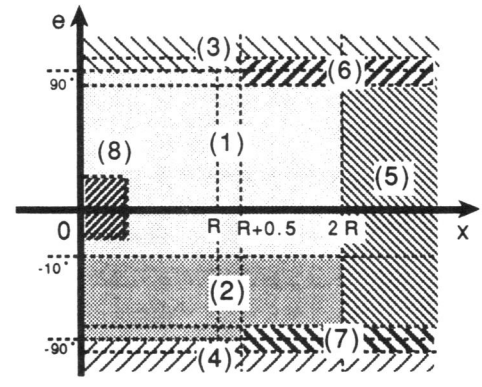


図3 x座標-方向誤差（x-e）

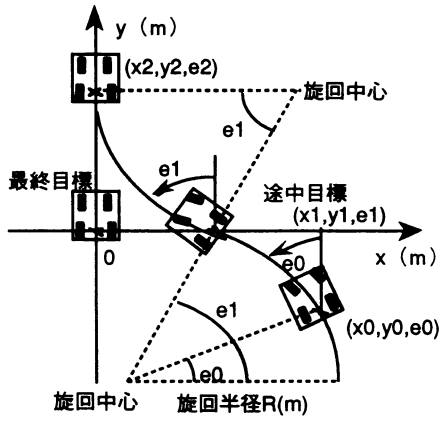


図4 途中目標の計算法

$$x_1 = \frac{1-\cos(e_0)}{2}\cdot R + \frac{x_0}{2}$$
$$y_1 = y_0 + R\left(\sin(e_1) - \sin(e_0)\right) \qquad (2)$$
$$e_1 = \cos^{-1}\left(\frac{1+\cos(e_0)}{2} - \frac{x_0}{2R}\right)$$

（3）ハンドル操作部

予見ファジィ制御により，現在最も適切なハンドル操作（舵角指令）を決定する．まず現在状態から目標設定部で設定された途中目標に到達するまでの時間tを求め，実行可能な舵角候補に対して，それぞれtの時間実行させたときの制御結果，dp（目標位置と現在位置との距離）とdθ（目標位置と現在位置でのθの差）を式(1)を使った数値積分で予見する．そして，これらの目的値をGoodやvery Goodのメンバシップ関数を用いたファジィ集合を用いて評価する．この評価が一番高い舵角指令を制御指令ϕoutとする（図5）．

予見ファジィ制御のルール形式を次に示す．

IF（$\phi=\phi$i→dp is very Good, dθ is very Good）

THEN（$\phi=\phi$i）(i=1,n)

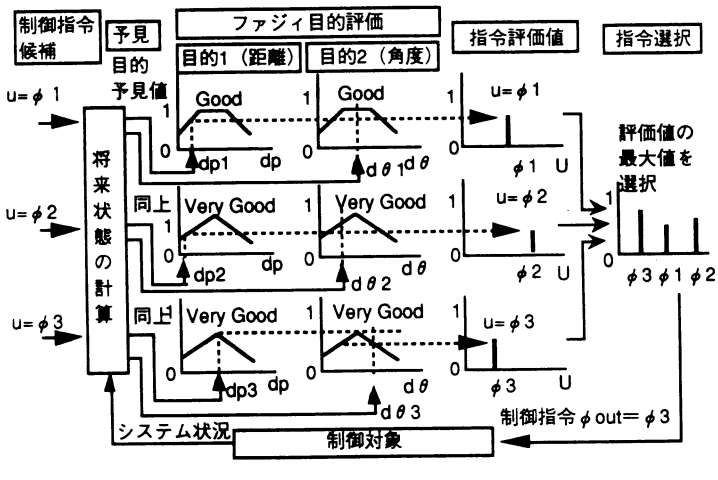


図5 出力舵角の推論過程

また，舵角候補に対して，自動車が障害物に衝突しそうならば指令候補から除外する．どの舵角を実行しても車体が障害物に衝突しそうなら自動車を一旦停止させ，状況監視部で新たな途中目標の設定を指令することになる．

5．定位置制御における性能の評価

5.1 シミュレーション

周囲に障害物が存在しない駐車場での駐車を想定した定位置制御を行い，開発した知的駐車制御システムの性能を評価する．駐車場をx-y平面で考え，最終目標を(x,y)=(0,0)(m)，θ=90°とし，初期状態が(x,y)=(4,-12)，θ=90°とした縦列駐車，(x,y)=(4,0)，θ=90°とした横移動，および，(x,y)=(12,0)，θ=-90°としたUターン駐車のシミュレーションを行った．3秒おきに描いた自動車の走行軌跡を図6，図7，図8に示す．走行結果より，縦列駐車，横移動のどちらもルールに従って途中目標を決定し，自律走行しながら，熟練者が駐車させるような動きにより，うまく最終目標付近に到達できた．このほか，様々な場所からの定位置制御もうまく実行できる．

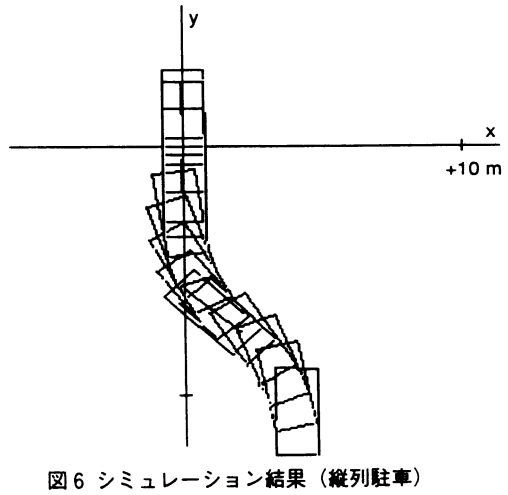


図6 シミュレーション結果（縦列駐車）

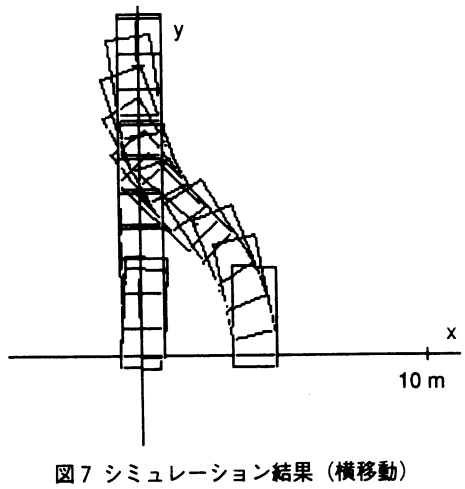


図7 シミュレーション結果（横移動）

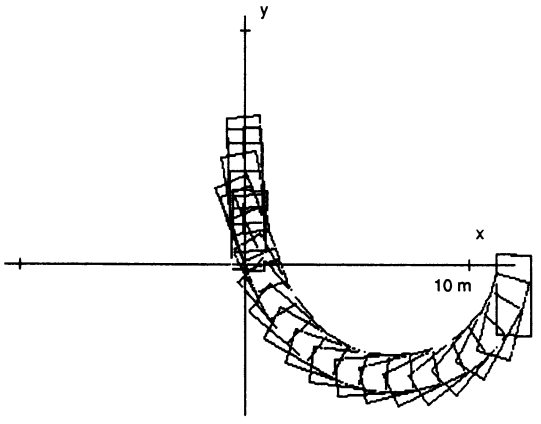


図8 シミュレーション結果（Uターン駐車）

5.2 模型自動車走行実験

1/10スケールの模型自動車へ搭載したシングルボード・コンピュータを用いたファジィコントローラを使って，その走行状況を確認する．図9に模型自動車走行システムの概略を示す．駆動系，センサ部，そしてＣＰＵボードと大きく分けられる．ＣＰＵにV25（8MHz）を使用し，提案したファジィ制御方式をＣ言語により記述し組み込む．車体の絶対角度θはセンサ部の磁気方位センサにより得られる．後二輪にそれぞれ取り付けられたロータリーエンコーダにより，車体の速度，現在位置を計測する．位置と方向はファジィコントローラへ入力され，求めた蛇角指令ϕ outと速度指令Voutは，前輪に接続された操舵用のサーボモータ，走行用のＤＣモータにそれぞれ伝達される．

図6に示したシミュレーションと同じ条件の下で，縦列駐車と横移動の走行を行った結果を図１０に示す．操舵動作が精密とは言えない，模型自動車でも，シミュレーションと同様に熟練者が駐車させるような動きをしながら，うまく最終目標付近に停止できた．提案したファジィコントローラを，実際の模型自動車に適用し，その有効性を実証できた．

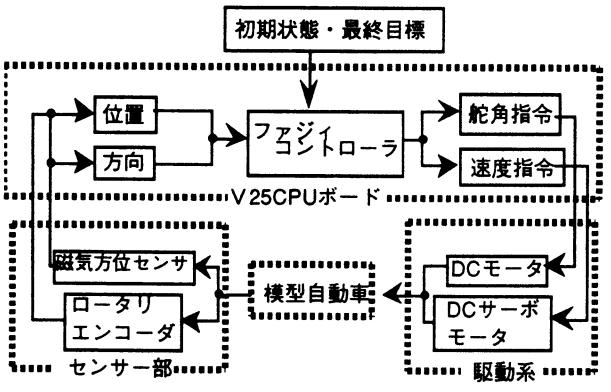


図9 模型自動車走行システムの概略

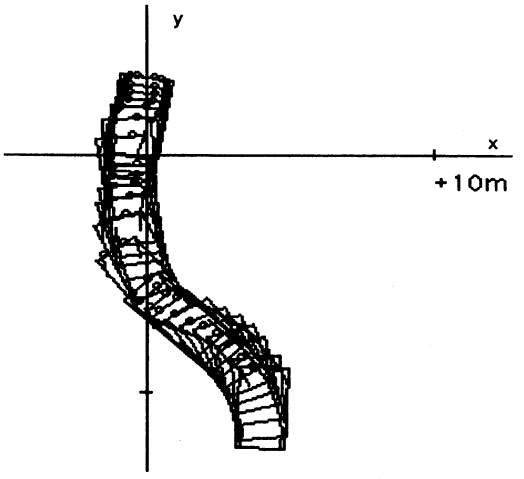


図１０　模型自動車の走行状況（縦列駐車）

6．おわりに

本論文では，ファジィ制御に基づく階層型ファジィコントローラを提案し，熟練者の知的駐車戦略を組み込んだ知的駐車制御システムを開発した．この制御システムを用いて定位置制御に対してシミュレーションを行い，四輪自動車の自律駐車が可能となることを示し，1/10スケールの模型自動車で，その動きを確認した．このシステムでは，初期状態が変わっても，同一知識で周囲の状況や，に柔軟に対応した自律駐車を実現できた．これらの結果より，提案した階層型ファジィコントローラを用いた四輪自動車の知的駐車制御システムの有効性を実証できた．

参考文献

[1] 安信，”ファジィ工学”，昭晃堂 (1991)

[2] 村井，安信，”予見ファジィ制御による模型自動車の運転操作”，第１０回ファジィシステムシンポジュウム,761/764, (1994)

[3] 村井，安信，”予見ファジィ制御による自動車の駐車制御”，第19回知能システムシンポジウム資料，57/60 (1994)

[4] 高野，”自律移動ロボットの機構と移動制御技術”，日本ロボット学会誌５巻５号，52/58 (1987)

連絡先

〒３０５　つくば市天王台１－１－１

筑波大学　構造工学系／工学システム学類

安信誠二・山本幸一

TEL ：0298-53-5019

Internet : yasunobu@.kz.tsukuba.ac.jp

WB4-2

ファジィとＧＡによる三重倒立振子における マン・マシンシステム

Man-Machine System for Triple Inverted Pendulum by Fuzzy Logic and Genetic Algorithm

増井重弘　寺野寿郎　井田博哉
Shigehiro Masui　Toshiro Terano　Hiroya Ida

法政大学工学部
Faculty of Engineering, Hosei University

Abstract: We have studied a man-machine system by the co-operation with the man and the fuzzy controller in the very unstable control object. To decrease human operation, the design of the more excellent fuzzy controller is made necessary. However, its membership function is so sensitive that its designis not easy. In this paper, the tuning of controller is performed by Genetic Algorithm (GA).The membership functions are made to evolve the controller gradually based on the evaluation standard such as the control error minimum. Then, this method verifies its effectiveness as the man-machine system.

１．はじめに

ファジィコントローラは人間（熟練者）の行動に基づいて設計されている。従って人間が制御不可能な非常に不安定な系の制御などを対象としたファジィコントローラの設計は大変困難である。熟練者のもつその定性的なルールを言葉や記号により表現する場合、表現可能な要素は非常に制限されたものとなってしまうからである。

そこで、三重倒立振子のような非常に不安定な制御対象の場合は、全自動ファジィコントローラをめざさないで、人間と簡単なファジィコントローラとの共同操作によるマン・マシンシステムを構築することを目的とした。そしてこれまでに、三重倒立振子の制御を人間の手動のみでは制御限界が、仮想空間（重力加速度ｇ／５、振子長１００[m]）であるのに対し、人間とコントローラの共同操作で現実の重力加速度でも可能とした。しかし、振子長を短くしたり、人間の操作負担を減らすためには、さらに優れたファジィコントローラが必要とされる。

そこで、制御規則やメンバーシップ関数を修正してコントローラを最適なものに改良してゆくのであるが、このようなチューニングを試行錯誤で行うことはかなり困難である。メンバーシップ関数をどのように選択するかだけでも、大変自由度の大きいものとなるからである。

本研究では、ファジィコントローラのチューニングを自動的に行うために、最適化問題に優れた遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm : GA）を利用したシステムを提案する。今回は制御規則はこれまでの研究で得られたものが最適であるとし、メンバーシップ関数の選択をＧＡにより行う。実際シミュレーションを行い、その結果でコントローラの評価をする。評価は制御誤差最小、人間操作介入時間最短で行う。これが優れたファジィコントローラとなるだけでなく、人間の操作をＧＡによる進化の評価に加えることで、優れたマン・マシンシステムともなる有効性を示す。

２．制御対象

制御対象は図１に示すような三重倒立振子である。

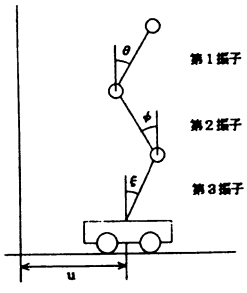


図１．制御対象

この図においてｕ[m]は操作端である台車の水平位置を示す。ξ[rad]、φ[rad]、θ[rad] はそれぞれ第１、第２、第３振子の傾斜角度である。また次のように仮定を設ける。

(1) ３つの振子は同形で、質量はそれぞれ頭部に集中しており腕と台車の質量は無視できる。
(2) 軸受部の摩擦はない。
(3) 垂直方向からの角度変位は微小である。
(4) 操作部に遅れはない。

θを制御量に、ü を操作量に選ぶと、対象の動特性は式に示すような微分方程式によって近似される。

$$\theta^{(6)} - 9A\theta^{(4)} + 18A^2\ddot{\theta} - 6A^2\theta = -6A^2\ddot{u}/L \quad (1)$$

ただし、Ｌ：各振子の長さ[m]
ｇ：重力加速度[m/s²]　Ａ：ｇ／Ｌ[1/s²]である。

制御対象はパソコン上のシミュレーションにより、その動きを表現し、振子長Ｌ[m] を変化させることで実験を行った。実験は第３振子のみわずかに傾けた状態(0.001[rad])から始めて、ディスプレイ上に表現される情報を見ながら、キーボードを操作してシステムを安定に保つように要求される。キーボードは数段階のステップ関数を発生するもので、ここではｕを操作することによりシステムを制御する。一方、表示情報としては振子の動きをそのまま実態表示しても人間は操作をどのようにするべきかを判断できないので、振子の傾斜角度、角速度、角加速度を時間軸に対して表示した。

３．ファジィコントローラ

手動制御結果から、熟練者はθ、$\dot{\theta}$、$\ddot{\theta}$、$\dddot{\varphi}$の４情報

のみ利用してこれら4変数の偏差が正か負を見て、状態が安定な方に向かっているか否かを判断して操作量を決め、制御ルールを切り替えている。従って図2に示すようなファジィコントローラの構造を決定した。

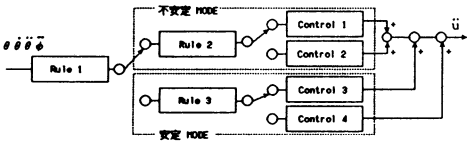


図2．ファジィコントローラの構造

上位ルールが状態の正、負による大まかな判断をするもので下位ルールが操作量を決めるものである。Rule 1 は全体を大まかに不安定モードと安定モードに分ける。θ と $\dot{\theta}$ が同符号なら不安定モード内 Rule 2 へ異符号なら安定モード内 Rule 3 へ移る。Rule 2 では $\dot{\theta}$ と $\ddot{\theta}$ の関係について判断する。Control 1 と Control 2 は $\ddot{\theta}$ と $\ddot{\phi}$ の関係から θ をコントロールするために必要なファジィルールである。安定モード内における Rule 3 は θ、$\dot{\theta}$、$\ddot{\theta}$、$\ddot{\phi}$ がある一定の値に収まるときは、系をあまり乱さないようなコントロールへの切り替えである。Control 3 と Control 4 は θ と $\dot{\theta}$ が異符号の時で θ の偏差は比較的減少しやすい。ここでは3振子を垂直に維持するために必要なファジィルールである。各コントロールルールを表に示す。それらルールのメンバーシップ関数を図3に示す。図において、前件部は熟練者が定性的に正負を判断して操作していることと、コントローラの簡略化を計るため正負のみのメンバーシップ関数とした。また θ、$\dot{\theta}$ と $\ddot{\theta}$、$\ddot{\phi}$ の形を変えてあるのは、$\ddot{\theta}$、$\ddot{\phi}$ の重視度を θ、$\dot{\theta}$ に比べ大きくするためである。　これまで、このようなファジィコントローラで現実の重力加速度における三重倒立振子の制御を、人間とコントローラの共同操作により成功させた。ここでのメンバーシップ関数等の設定、修正によるコントローラチューニングは試行錯誤に行いかなりの時間を費やした。しかし、少しでも振子長を短くした場合、このコントローラでは制御不可能となってしまう。ロバスト性に優れたファジィ制御とは言え、人間では全く制御不可能な、きわめて不安定な系には適応できない。この三重倒立振子におけるファジィコントローラをより優れたものにするには、上位ルールにおいてより複雑な切り替え、さらに下位ルールにおいてメンバーシップ関数の設定の見直しが必要とされる。

表1．ファジィルールの一例 (Control 3 の時)

ルール No.	前件部 If θ	$\dot{\theta}$	$\ddot{\theta}$	$\ddot{\phi}$	後件部 Then $\ddot{U}$
3-1	P	N	P	P	NS
3-2	P	N	N	N	PM
3-3	N	P	P	P	NM
3-4	N	P	P	P	PS
3-5	P	N	P	N	PM
3-6	P	N	N	P	NM
3-7	N	P	P	N	PM
3-8	N	P	N	P	NM

P:Positive
N:Negative
PB:Positive Big
PM:Positive Medium
PS:Positive Small
ZE:Zero
NS:Negative Small
NM:Negative Medium
NB:Negative Big

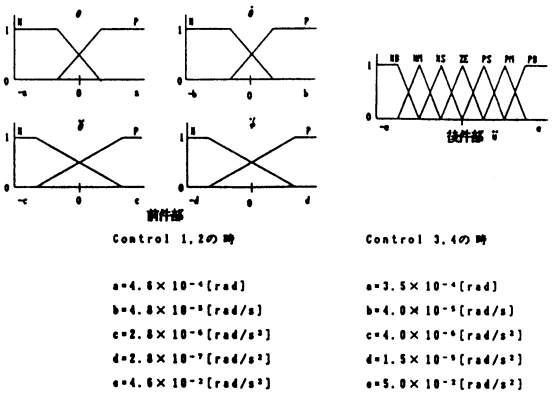


図3．メンバーシップ関数

4．遺伝的アルゴリズム

ＧＡは生物の進化を模倣しようとするものであり、対象とするシステムを遺伝子情報の集まり（染色体）で表現し、これに自然淘汰を行うことにより、より良いシステムへ進化させようとするものである。本研究では、メンバーシップ関数の設定にＧＡを適用し、ファジィコントローラチューニングを行う。前件部 θ、$\dot{\theta}$、$\ddot{\theta}$、$\ddot{\phi}$ の4つのメンバーシップ関数をまとめて1染色体とし、それぞれのメンバーシップ関数を遺伝子とすれば、ファジィコントローラの下位ルールにおける Control 1 ～ 4 は以下図4．のようになる。また、これは上位ルールでコントローラを切り替えた上に、さらに複雑にコントローラの切り替えをを行っているとも言える。今回は、ファジィルール（表．1）についてはＧＡを適用していない。

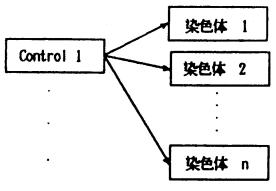


図4．ＧＡの適用

5．ＧＡによるチューニングの流れとその適用

(1) 初期生物集団として、いくつかの染色体をファジィコントローラに与える。今回はランダム発生ではなく、これまで試行錯誤に実験を行ってきて、比較的に良い制御結果が得られたものを初期生物集団とした。
(2) ファジィコントローラを用いてシミュレーションを行い、評価基準に基づく適合度を求める。
(3) 適合度に基づいて淘汰を行う。
(4) 生き残った個体を増殖する。交差、突然変異を行うことにより新しい個体を生成する。
(5) 満足する結果が得られるまで、(2)～(4)を繰り返す。

次に実際ＧＡをどのように適用していくか述べる。

(1) 遺伝子の表現
上記で述べたように、前件部4つを合わせて1染色体とするわけであるが、次の図5のようにメンバーシップ

関数の端点を実数値で表し、それを遺伝子情報とする。

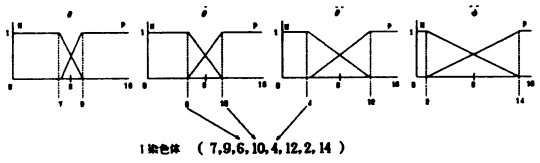


図５．遺伝子の表現

(2) 適合度

以下のような２種類の評価基準とする。なお式は最大値が１となるように正規化してある。

(2.1) 角度評価

第３振子が直立状態、これが最大の目標である。従って、第３振子の角度偏差合計を振子の制御限界に対する割合で表す。式は次のようである。

$$1 - \frac{\text{角度偏差合計}}{\text{制御限界角度} \times \text{サンプリング数}} \qquad (2)$$

これによりファジィコントローラのみのシミュレーションで、３００秒間までの評価を行う。

(2.2) 人間操作介入時間評価

ある程度ファジィコントローラが完成したところで、今度は人間とコントローラの共同操作によるマン・マシンシステムとしてシミュレーションを行う。この際、人間の操作負担は当然少ない方が良いわけである。したがって人間操作介入時間をコントローラ操作時間に対する割合で表す。式は次のようである。

$$1 - \frac{\text{人間操作時間}}{\text{コントローラ操作時間}} \qquad (3)$$

これによりマン・マシンシステムとしてシミュレーションを行う際、１０秒毎に評価を行う。

(3) 淘汰および増殖

適合度に基づいて、最下位の個体を淘汰し、最上位の個体をコピーすることで増殖をする。

(4) 交差および突然変異

交差は対象とされる２組の染色体間で行う。交差方法は２点交差とする。交差位置はランダムに決める。

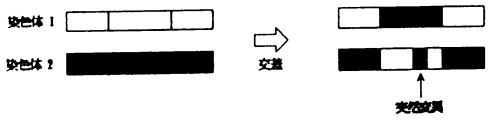


図６．交差方法および突然変異

突然変異は染色体のある要素を一定の割合でランダムに変更する。ここまでで一世代交代終了とする。

６．ＧＡによるコントローラチューニング結果

様々な性質の染色体（メンバーシップ関数）をもつコントローラでシミュレーションを行った結果を図７に示す。実験は、現実の重力加速度、振子長７０[m] で行った。結果を見ての通り、３００秒付近まではよい制御結果である。これまで試行錯誤に行ってきたメンバーシップ関数設定にＧＡを適用することで、能率的により優れたコントローラの設計ができたといえる。またＧＡによる進化は、コントローラの上位ルールでは表現しきれなかった熟練者の無意識的な判断を代行し、より複雑にコントローラの切り替えを行った結果ともいえる。安定を維持するとまではいかなかったが、人間の能力をはるかに越えるコントローラが完成したので、次は、人間とコントローラの共同操作で制御を行う。このマン・マシンシステムは、人間の長所である総合的認識判断や過去の経験に基づく推論などを活かし、コントローラの長所である計算力、迅速性、正確さを相互に活かしたシステムである。制御結果を図８に示す。条件はさらに難しく、現実の重力加速度、振子長５０[m] である。ここでは４で示したように人間の操作介入時間を評価関数として、ＧＡを適用する。人間の操作が多いほど、ＧＡによる進化が行われより環境に適したメンバーシップ関数を生成し、人間の操作負担を減らそうとするものである。振子長５０[m] ともなると振子長７０[m] とは違い、最初から人間の操作介入が必要とされるが、ＧＡによる進化が進みコントローラが環境に適してくると、途中人間が全く操作をしなくても良い部分があった。もともとこのシステムは、ファジィコントローラを使用しているため人間の操作介入はしやすく、また操作負担を大幅に減らすものであるから、熟練者でなくともある程度の制御はできるものであった。それがＧＡの適用により、さらに人間の操作負担の軽減が可能となった。

７．むすび

これまで試行錯誤で行っていたファジィコントローラのメンバーシップ関数設定にあたり、遺伝的アルゴリズムの適用は有効であると確認できた。また本システムのように、ファジィコントローラによる全自動のシステムではなく、人間とコントローラの共同操作によるマン・マシンシステムにおける遺伝的アルゴリズムの適用は、ファジィコントローラの設計を容易にし、より人間に優しいシステムの構築を可能とした。

参考文献

[1] 寺野,増井,大島「ファジィルールを用いた半自動制御」第７回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 287-290(1991)

[2] 安居院,長尾「ジェネティックアルゴリズム」昭晃堂, (1993)

[3] 深田「遺伝的アルゴリズムによる二重倒立振子のファジィ制御ルールの作成」法政大学卒業論文, (1993)

【連絡先】〒184 東京都小金井市梶野町3-7-2
法政大学工学部システム制御工学科
増井重弘
Tel:0423-87-6384(内線 6249)

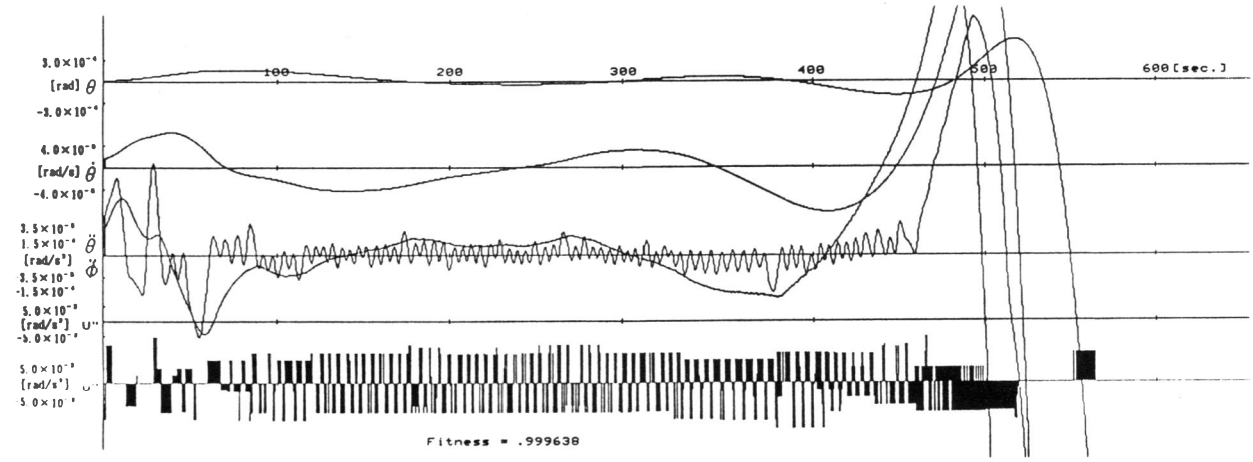


図７．コントローラ制御結果（振子長７０[m]）

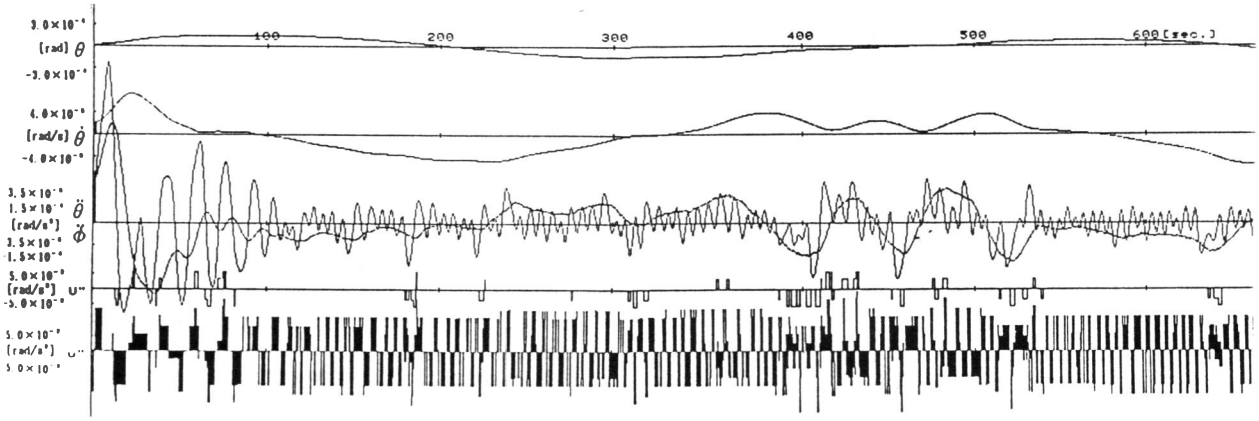


図８．マン・マシンシステム制御結果（振子長５０[m]）

WB4-3

自律分散系における柔らかい協調機構について
Soft Cooperation by Distributed Autonomous Systems

江澤 義典, 森戸 健一, 植村 知正
Yoshinori Ezawa, Ken'ichi Morito, Tomomasa Uemura
関西大学
Kansai University

Abstract: In the distributed artificial intelligence area, many research papers concerning the cooperations by several autonomous agents have been reported. Without any communications or negotiations, autonomous systems are shown to be able to achieve certain cooperations.

In this paper, a soft cooperation among several autonomous agents is formulated by the Fuzzy algorithms. And it is shown that a soft cooperation by Fuzzy algorithms is superior in the solvability of pursuit problems to a hard cooperation by crisp algorithms.

1 はじめに

分散人工知能においては複数の自律エージェントによる協調問題解決モデルが様々な応用分野から注目を集めている [7]。とくに、自律エージェント間に特別な制御関係とか通信機能がなくても協調動作が可能であるケースが興味深い。本報告では、不確実な状況をファジィ数で表現したとき複数自律エージェント間の柔らかい協調が可能となることを示す。具体的には追跡問題を解く "柔らかい協調機構" について検討し、クリスプなアルゴリズムよりもファジィアルゴリズムが "目的を遂行する可能性" という意味で優れていることをシミュレーション実験を通して明らかにする。

2 自律分散系における協調

分散人工知能の典型的な小問題である "追跡問題" を考える事にする [5]。まず、無限に広がる 2 次元格子状のセル空間を想定する。エージェントには青と赤の 2 種類があり、青エージェントが赤エージェントを追跡し赤エージェントは逃避行動をとるが赤のエージェントが占めているセルに青エージェントが到達すると追跡は達成されたことになる。各エージェントは 1 ステップに 1 動作 (近傍セルへの移動が可能) を行なうが一時停止する場合もある。同色エージェントの動作は同期的に一斉に生起する (並列動作) が青と赤は逐次的に移動すると考える。

各エージェントは '現在の自己の位置情報' と '視野内に存在する他のエージェントの位置情報' だけから、自己の動作を決定する。このとき、他のエージェントがどのような戦略を取るかの情報は使わないという意味で自律的である。とくに、近傍セルが左右上下の 4 方向に限られているときに赤と青のエージェントがそれぞれ 1 個と 4 個の場合には、終盤の問題解決において「4 個のエージェントがターゲットを中心とした 4 分割領域を分担する Gasser モデルの Lieb コンフィギュレーションを保ちながらターゲットと各エージェントの距離を狭めることができるならば、必ずターゲットを捕らえることができる」ということが分かっている [5, 6]。しかし、本研究ではより自然なエージェントの視覚的動きを実現する為に 8 近傍セル (斜め上下左右を含む) モデルを採用したので、4 個のエージェントで 1 個のターゲットを追跡する戦略は 4 近傍の場合の Lieb コンフィギュレーションを 45 度回転補正すれば良い。

また、青エージェントの視野は制限せず、赤エージェントの視野限界のみ制限を設けた。追跡戦略の前半として、赤エージェントの視野限界の外側では、各青エージェントが協調的にターゲットを包囲する戦略を考え、包囲が完了した後は、協調的に追い詰める戦略を採用する。いずれの場合にも青のエージェントは赤のエージェント (ターゲット) を囲むように移動するが、赤のエージェントは視野内の青のエージェントからの距離ベクトルに逆比例する逃避ベクトルを想定しその総和ベクトルに最も近い近傍セルに移動する逃避戦略を採用している。

3 クリスプな協調アルゴリズムの欠点

追跡シミュレーション実験としてはクリスプなケースをランダムな 100 種類のシナリオで実施した。そこでは 12 ケースで捕獲に失敗し、成功したケースの平均ステップ数は 383 であった。これらの失敗した事例では、赤

エージェントの視野限界の外側での囲い込み戦略でデッドロック状態が発生し、回避できなかったのが原因である。追い詰め段階では確実に包囲網が狭まっていくのでデッドロック状態になることは無い。

クリスプな概念を基に設計された協調機構の欠点は、協調の目的にも関わらず、相互に手をこまねいているような一種のデッドロック（袋小路）に入ってしまって抜け出せない状況になり得る点である。このようなデッドロックを解除する方法としては2つの対策を容易に想起できる。

1. 周期状態に入っているか否かを常に監視しておき、周期状態であると判断されたときには周期状態から脱出する行動を強制的に行なう。しかし、この回避策を有効にする為には原理的には膨大な記憶機構が各エージェントに要求され、各エージェントは他のエージェントも含めた完全な記憶を常に保有しておく必要がある。

2. もう一つの対策は、決定的なアルゴリズムを離れて、"あいまいアルゴリズム" を前提とする方法である。実際、現実の世界では様々な不確実性が観測されるのであるから不確実性を明に取り込む手法は魅力的である。すなわち、ファジィアルゴリズムの有用性が注目されることになる。

4 ファジィアルゴリズムによる柔らかい協調

決定性アルゴリズムとか非決定性アルゴリズムは通常のクリスプな概念を表現する言葉を用いて定義されていた。そして、ファジィ集合で表現される言葉を使ったアルゴリズムがファジィアルゴリズムとして定式化された[1]。また、ファジィアルゴリズムの具体的なインプリメントの方法として 'Max 法' とか '閾値法'・'確率的実行法' などの比較検討が報告されている[2]。ここでは、最も自然な手法である確率的実行法を取り上げる。すなわち、起こり得る事象 x のメンバーシップ値が $\mu(x)$ であるとき、x は $\mu(x)$ に比例した確率で選択されるものと仮定する。

追跡問題においては、近くのエージェントまでの距離よりも遠くのエージェントまでの距離は不確実性が大きいという事実をファジィ集合で表現する。すなわち、エージェント間の相対距離を三角ファジィ数$\tilde{r} = \tilde{N}(p, r, q)$ で定義する[4]。そして、三角ファジィ数の幅 $q - p$ がエージェント間の相対中心距離 d に比例すると考えその比例因子 k_f の値によってファジィ数の調整をした。ファジィ戦略としてはファジィ因子 $k_f = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ の7通りについて各々20種類のシナリオをランダムに発生し、追跡シミュレーションを実施した。クリスプなケースである $k_f = 0.0$ の場合には2個のシナリオで追跡に失敗したが、その他の各ファジィ因子では失敗例は高だか1個であった。クリスプなケースの平均ステップ数は420であったが、ファジィの場合の平均ステップ数は592であった。

5 おわりに

制御エージェントが含まれない自律分散系であってもクリスプ戦略しか考えない場合には堅い協調しか実現できないので結果としてデッドロック状態に入ってしまって抜け出せないケースが10％以上であったが、ファジィ戦略を導入することで柔らかい協調機構が実現できデッドロックを半数以上のケースで回避できることが分かった。今後の課題としては、相異なるエージェントが少しずつ異なるファジィ戦略を用いるときの協調アルゴリズムの特性を調べる事も興味深い。

参考文献

[1] L. A. Zadeh: Fuzzy Algorithms, Information and Control, Vol. 12, (1968).

[2] K. Tanaka and M. Mizumoto: Fuzzy Programs and Their Execution, in Zadeh et al. eds, Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision-Processes, Academic Press, (1974).

[3] J. Pearl: Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference, Morgan Kaufmann Pub. (1988).

[4] 村上周太: ファジィシステム演習問題集, 工業調査会, (1992).

[5] 大沢英一・沼岡千里・石田亨: 分散人工知能における標準的小問題, コンピュータソフトウェア, Vol. 10, No. 3, pp. 3 — 19, 日本ソフトウェア科学会, (1993).

[6] 大沢英一: 協調プランニングにおける動的組織再編とメタレベル整合戦略, コンピュータソフトウェア, Vol. 12, No. 1, pp. 43 — 52, 日本ソフトウェア科学会, (1995).

[7] 所真理雄: マルチエージェントシステム研究の目指すもの, コンピュータソフトウェア, Vol. 12, No. 1, pp. 78 — 84, 日本ソフトウェア科学会, (1995).

連絡先
〒 569 高槻市霊仙寺町 2 - 1 - 1
関西大学総合情報学部
江澤義典
Tel + Fax: 0726(90)2450
Email: ezawa@kansai-u.ac.jp

WC1-1

ファジィデータモデルにおけるタプルのメンバーシップ値の解釈の曖昧さの考慮
Considering Semantic Ambiguity for Membership Attributes in Fuzzy Data Models

中田　典規　Michinori Nakata
千葉経済大学短期大学部　Chiba-Keizai College

ABSTRACT

A fuzzy relational model is proposed considering semantic ambiguity for values of membership attribute and then its extended relational algebra is shown for eight operations. In order to remove the semantic ambiguity, the concept of membership is introduced into each attribute in our model. What the value of membership means depends on the property of attributes. In the attribute of the primary key the value of membership means what extent that that attribute can take its value. When we focus on an attribute except the primary key in a tuple, the membership value of an attribute value means what extent the value of the primary key can have that attribute value. There is no semantic ambiguity for the values of membership attributes in our extended relational model.
Keywords: Semantic ambiguity, Membership attribute, Fuzzy Databases, Fuzzy relational model.

1　序論

曖昧なデータを扱うためにファジィ論理を用いて関係データモデルを拡張した幾つかのファジィ関係データモデルが提案されている[1, 6, 10, 11, 15, 16, 20]。基本関係においてすでにメンバシップ属性を持っているデータモデルもあるが[1, 16]、全てのデータモデルにおいて、導出関係は質問処理の結果として重みの属性が付いたファジィ関係の形で得られる。曖昧なデータを扱うために関係モデルの拡張したことが新たな曖昧さを産み出すことがあってはならない。故に、ここで、田中等[13]によって指摘されたファジィ関係データモデルにおけるメンバシップ属性の解釈の曖昧さを取り上げる。例えば、主キー *SUPPLIER*を持つ関係 *SUPPLIES* (*SUPPLIER*, *STATUS*, *CITY*, μ) のタプル t を取り上げてみよう。

$$t = (Johnson, 20, London, 0.8)$$

このタプルの解釈は以下のいずれかであると思われる。
納入業者が Johnson である度合が 0.8。
納入業者 Johnson の状態が 20 である度合が 0.8。
納入業者 Johnson の所在都市が London である度合が 0.8。
このようなメンバシップ属性値の解釈の曖昧さはメンバシップ属性の値がどの属性の値から得られたのかを明確にしないところから生じている。従って、このような曖昧さのないファジィ関係データモデルを提案するのが本論の目的である。このデータモデルではデータベーススキーマが属性とそのメンバシップ属性の組の集合となる*。第2節で、メンバシップ値の意味を考慮したファジィ関係モデルが定義され、メンバシップ値の解釈が示される。第3節では、このモデルにおける関係代数が述べられる。最後の節では結びが述べられる。

2　メンバシップ値の解釈を考慮したファジィ関係モデル

ファジィデータベースに関するほとんどの研究は[11, 12, 15, 20]関係データベース[3]の枠組みの中で成されている。ファジィ関係データベースは、Zadeh によって提案された可能性理論[19]を使って従来の関係データベースを拡張したものと考えられる。これらのファジィ関係データベースにおいてメンバシップ属性の値の解釈の曖昧さを考慮するために、タプルのメンバシップ属性の代わりに、属性に付随したメンバシップ属性を導入する。

定義 2.1
ファジィ関係スキーマ $R((A_1, \mu_{A_1}), (A_2, \mu_{A_2}), \ldots, (A_n, \mu_{A_n}))$ は属性 A_i とそのメンバシップ属性 μ_{A_i} の組の集合である。

定義 2.2
タプル t における属性 A_j の値 $t[A_j]$ は正規な可能性分布 $\pi_{t[A_j]}$ で表される。

$$t[A_j] = \sum_{u \in D_j} \pi_{t[A_j]}(u)/u, \quad \sup_{u \in D_j} \pi_{t[A_j]}(u) = 1,$$

ここで、ドメインはクリスプ集合で、値が適用できないという特別な値を含むものとする。

定義 2.3
タプル t の属性 A_j のメンバシップ属性 μ_{A_j} の値 $t[\mu_{A_j}]$ は $(t[\mu_{A_j,N}], t[\mu_{A_j,\Pi}])$ で表される。ここで、$t[\mu_{A_j,N}]$ と $t[\mu_{A_j,\Pi}]$ は必然性測度と可能性測度によって計算された値である。
タプルのメンバシップ属性を持つファジィ関係モデルにおいて、メンバシップ属性の値はタプル値と一貫性制約との整合性の度合いである[9]。本モデルでは次のように考えられる。

*最近、Medina et al. が別の視点から属性に付随したメンバシップ属性を導入している[7]。

定義 2.4
関係のタプルにおける属性のメンバシップ属性の値はその関係に課せられた一貫性制約とその属性値との整合性の度合いである。

n 個の制約 c の集合から成る一貫性制約 C が関係 r に課せられているとき、一貫性制約は、$C = c_1 \wedge c_2 \wedge \cdots \wedge c_n$ となる。さらに、各制約は $c_p = c_{p1} \wedge c_{p2} \wedge \cdots \wedge c_{pn}$ という連言標準形で表すことができる。従って、一貫性制約 C は制約要素 c_{qj} の連言で表される。

C において属性 A_l を含む部分を $C_{A_l} = c_{l_1} \wedge c_{l_2} \wedge \cdots \wedge c_{l_m}$ とする。属性 A_l のメンバシップ属性の値は、

$$t_r[\mu_{A_l,N}] = N(C_{A_l} \mid t_r[\mathcal{A}]),\ t_r[\mu_{A_l,\Pi}] = \Pi(C_{A_l} \mid t_r[\mathcal{A}]),$$

ここで、

$$\begin{aligned} N(C_{A_l} \mid t_r[\mathcal{A}]) &= \inf_{l_j} N(c_{l_j} \mid t_r[\mathcal{A}]), \\ \Pi(C_{A_l} \mid t_r[\mathcal{A}]) &\leq \inf_{l_j} \Pi(c_{l_j} \mid t_r[\mathcal{A}]), \end{aligned}$$

ここで、$\mathcal{A} = (A_1, \ldots, A_n)$ で、$N(c_{l_j}|t_r[\mathcal{A}])(\Pi(c_{l_j}|t_r[\mathcal{A}])$ はタプル値 $t_i[\mathcal{A}]$ と制約要素 c_{l_j} との必然性測度（可能性測度）による整合性の度合い[10, 11]である。

例 2.5
関係 *scs*1 に一つの制約 : "*If SUPPLIER is* $1/a + 1/b$, *then STATUS is about* 20 *and CITY is* $1/x + 1/y$"のみが課せられているものとする。この制約は次ぎのように書き換えられる。

$$\begin{aligned} C &= \neg(S\# = 1/a + 1/b) \vee ((ST = about\ 20) \wedge (CT = 1/x + 1/y)), \\ &= (\neg(S\# = 1/a + 1/b) \vee (ST = about\ 20)) \wedge \\ &\quad (\neg(S\# = 1/a + 1/b) \vee (CT = 1/x + 1/y)), \end{aligned}$$

ここで、$S\#$、ST、CT はそれぞれ *SUPPLIER*、*STATUS*、*CITY* の短縮形である。各属性毎に関係している部分を取り出せば、

$$\begin{aligned} C_{S\#} &= C, \\ C_{CT} &= \neg(S\# = 1/a + 1/b) \vee (CT = 1/x + 1/y), \\ C_{ST} &= \neg(S\# = 1/a + 1/b) \vee (ST = about\ 20), \end{aligned}$$

about x を $0.3/(x-3) + 0.8/(x-2) + 1/(x-1) + 1/x + 1/(x+1) + 0.8/(x+2) + 0.3/(x+3)$ とすれば、各属性に付随したメンバシップ属性の値は以下のようになる。

*scs*1

$S\#$	$\mu_{S\#}$	CT	μ_{CT}	ST	μ_{ST}
1/a	0.0,0.3	1/x	1.0,1.0	1/16+1/17	0.0,0.3
1/b	0.2,1.0	0.8/z+1/y	0.2,1.0	1/21+1/22	0.8,1.0
1/c	1.0,1.0	1/x	1.0,1.0	1/23	1.0,1.0

関係データベースでは、課せられた一貫性制約を満足するタプルのみが基本関係に受け入れられる。ファジィ関係データベースでは曖昧な値が属性値に許されるし、曖昧な制約も許される。受け入れられるタプルの基準は以下のように拡張される。

定義 2.6
あるタプルの全ての属性について、属性値が一貫性制約と整合する必然性と可能性の度合が整合しない度合よりも等しいか高ければ、そのタプルは関係に受け入れられる。
この基準は $\forall i\ t[\mu_{A_i,N}] + t[\mu_{A_i,\Pi}] \geq 1$ で表される。当然、この基準をタプルが満足しなくなった時、そのタプルは関係から除去される。

例 2.7
定義 2.6 によって、関係 *scs*1 の 1 番目のタプルは受け入れることができないタプルである。従って、関係から取り除かれる。

さて、ここで、メンバシップ属性の値の解釈を述べる。一般的に、関係というのはタプルの集合である。従って、タプルが一意的に区別できる主キーに相当する属性集合 X を関係は持っている。この時、X に含まれない全ての属性の集まりを Y とすれば、関数従属性 $X \rightarrow Y$ がその関係で成り立つ。このことを考慮すれば、X に含まれる属性のメンバシップ属性の性質と Y に含まれる属性のメンバシップ属性の性質とは異なっているのは明らかである。

定義 2.8
タプル t において属性 A_i の値が v であるとする。この属性が主キー X に含まれている時、そのメンバシップ属性の値 $t[\mu_{A_i}]$ は属性 A_i の値が v を取れる度合であり、そうでなければ、主キーの値 $t[X]$ が属性 A_i の値が v であるという性質を持っている度合である。

例 2.9
関係 $scs1$ において属性 $S\#$ が主キーであるとする。この時、例 2.7 の１番目のタプルのメンバシップ属性の値の解釈は以下のようになる。納入業者が b である度合は必然性で 0.2、可能性で 1.0 である。納入業者 b の状態が 1/21 + 1/22、つまり 21 か 22 である度合は必然性で 0.8、可能性で 1.0 である。納入業者 b の所在している都市がが $0.8/z + 1.0/y$ である度合は必然性で 0.2、可能性で 1.0 である。

3 関係代数の拡張

Codd[3]によって関係データベースで定義された関係代数は２つのグループからなる。１つは従来の集合演算で、併合、共通、差、直積である。残りは特別な関係演算で、射影、結合、選択、割り算である。幾人かの研究者がこの関係代数を可能性理論を受け入れる形に拡張している[6, 11, 15, 20]。第２節で述べたファジィ関係モデルの枠組みでこれらの８個の演算を定式化する。

3.1 併合 ($r \cup s$)

和両立である関係 r と s の併合 $r \cup s$ は関係 r か関係 s の少なくともいずれか一方に受け入れられているタプルからなる関係である。

定義 3.1.1
関係 r と s に受け入れられているそれぞれのタプルの属性値 $t_r[A_k]$ と $t_s[A_k]$ が全ての k に対して記号的に等しければ、t_r と t_s から生み出されたタプル $t_{r \cup s}$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned} t_{r\cup s}[A_k] &= t_r[A_k], \\ t_{r\cup s}[\mu_{A_k,N}] &= \max(t_r[\mu_{A_k,N}], t_s[\mu_{A_k,N}]), \\ t_{r\cup s}[\mu_{A_k,\Pi}] &= \max(t_r[\mu_{A_k,\Pi}], t_s[\mu_{A_k,\Pi}]), \end{aligned}$$

記号的に等しくなければ、二つのタプル t_r と t_s は関係 $r \cup s$ に受け入れられるタプルである。

例 3.1.2
次の関係を $scs2$ とする。

$scs2$

$S\#$	$\mu_{S\#}$	CT	μ_{CT}	ST	μ_{ST}
1/a	1.0,1.0	1/x	0.7,1.0	1/23	0.9,0.9
1/b	0.8,0.8	0.8/z+1/y	0.6,1.0	1/21+1/22	0.0,1.0

併合 $scs1 \cup scs2$ は以下の導出関係を生み出す。

$scs1 \cup scs2$

$S\#$	$\mu_{S\#}$	CT	μ_{CT}	ST	μ_{ST}
1/a	1.0,1.0	1/x	0.7,1.0	1/23	0.9,0.9
1/b	0.8,1.0	0.8/z+1/y	0.6,1.0	1/21+1/22	0.8,1.0
1/c	1.0,1.0	1/x	1.0,1.0	1/23	1.0,1.0

3.2 共通 ($r \cap s$)

和両立である関係 r と s の共通 $r \cup s$ は関係 r と関係 s の両方に受け入れられているタプルから生成される関係である。

定義 3.2.1
関係 r と s に受け入れられているそれぞれのタプルの属性値 $t_r[A_k]$ と $t_s[A_k]$ が全ての k に対して記号的に等しければ、t_r と t_s から生み出されたタプル $t_{r \cap s}$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned} t_{r\cap s}[A_k] &= t_r[A_k], \\ t_{r\cap s}[\mu_{A_k,N}] &= \min(t_r[\mu_{A_k,N}], t_s[\mu_{A_k,N}]), \\ t_{r\cup s}[\mu_{A_k,\Pi}] &= \min(t_r[\mu_{A_k,\Pi}], t_s[\mu_{A_k,\Pi}]). \end{aligned}$$

関係 r と関係 s の両方に受け入れられているとしても、必ずしも $r \cap s$ に受け入れられるとはかぎらないので、生成されたタプルについて定義 2.6 が調べられなければならない。

例 3.2.2
併合 $scs1 \cap scs2$ は以下の導出関係を生み出す。

$scs1 \cap scs2$

$S\#$	$\mu_{S\#}$	CT	μ_{CT}	ST	μ_{ST}
1/b	0.2,0.8	0.8/z+1/y	0.2,1.0	1/21+1/22	0.0,1.0

3.3 差 ($r - s$)

和両立である関係 r と s の差 $r - s$ は関係 r には受け入れられているが、関係 s には受け入れられていないタプルから生成される関係である。

定義 3.3.1
関係 r と s に受け入れられているそれぞれのタプルの属性値 $t_r[A_k]$ と $t_s[A_k]$ が全ての k に対して記号的に等しければ、t_r と t_s から生み出されたタプル t_{r-s} は以下のように表される。

$$\begin{aligned} t_{r\cap s}[A_k] &= t_r[A_k], \\ t_{r\cap s}[\mu_{A_k,N}] &= \min(t_r[\mu_{A_k,N}], 1 - t_s[\mu_{A_k,\Pi}]), \\ t_{r\cup s}[\mu_{A_k,\Pi}] &= \min(t_r[\mu_{A_k,\Pi}], 1 - t_s[\mu_{A_k,N}]), \end{aligned}$$

t_r の全ての属性値に記号的に等しいタプルが関係 s に受け入れられていなければ、t_r は関係 $r - s$ に受け入れられるタプルである。

$t_{r\cap s}[A_k] = t_r[A_k]$, $t_{r\cap s}[\mu_{A_k,N}] = t_r[\mu_{A_k,N}]$, $t_{r\cup s}[\mu_{A_k,\Pi}] = t_r[\mu_{A_k,\Pi}]$.

生成されたタプルについて定義 2.6 が調べられなければならない。

例 3.3.2
差 $scs1 - scs2$ は次の導出関係を生み出す。

$scs1 - scs2$

$S\#$	$\mu_{S\#}$	CT	μ_{CT}	ST	μ_{ST}
1/c	1.0,1.0	1/x	1.0,1.0	1/23	1.0,1.0

3.4 直積 ($r \times s$)

二つの関係 r と s の直積 $r \times s$ は二つの関係のそれぞれからの二つのタプルを連結した全てのタプルから成る関係である。

定義 3.4.1
関係 r と s をファジィ関係スキーマ R と S のそれぞれのインスタンスとし、関係 $r \times s$ のタプル $t_{r\times s}$ が関係 r のタプル t_r と関係 s のタプル t_s から生成されるとする。
$A_k \in R$ ならば、

$t_{r\times s}[A_k] = t_r[A_k]$, $t_{r\times s}[\mu_{A_k,N}] = t_r[\mu_{A_k,N}]$, $t_{r\times s}[\mu_{A_k,\Pi}] = t_r[\mu_{A_k,\Pi}]$,

それ以外の時、すなわち、$A_k \in S$ ならば、

$t_{r\times s}[A_k] = t_s[A_k]$, $t_{r\times s}[\mu_{A_k,N}] = t_s[\mu_{A_k,N}]$, $t_{r\times s}[\mu_{A_k,\Pi}] = t_s[\mu_{A_k,\Pi}]$.

例 3.4.2
関係 $sp1$ と $p1$ を以下のものとする。

$sp1$

$S\#$	$\mu_{S\#}$	$P\#$	$\mu_{P\#}$
1/a	1.0,1.0	1/x+0.7/y	0.3,1.0
1/b	1.0,1.0	1/x+1/y	0.0,1.0

$p1$

$P\#$	$\mu_{P\#}$
1/x+1/y	0.6,1.0
1/z	1.0,1.0

直積 $sp1 \times p1$ は以下の導出関係を生み出す。

$sp1 \times p1$

$S\#$	$\mu_{S\#}$	$P\#_{sp1}$	$\mu_{P\#_{sp1}}$	$P\#_{p1}$	$\mu_{P\#_{p1}}$
1/a	1.0,1.0	1/x+0.7/y	0.3,1.0	1/x+1/y	0.6,1.0
1/a	1.0,1.0	1/x+0.7/y	0.3,1.0	1/z	1.0,1.0
1/b	1.0,1.0	1/x+1/y	0.0,1.0	1/x+1/y	0.6,1.0
1/b	1.0,1.0	1/x+1/y	0.0,1.0	1/z	1.0,1.0

3.5 射影 ($P_X(r)$)

関係の射影は元の関係から抜き出された属性から成る関係である。

定義 3.5.1
$P_X(r)$ を関係 r から属性集合 X を射影した関係とする。ある属性が X に含まれる時、ファジィ関係モデルでは、属性とそのメンバシップ属性の組みが射影される。

$$\begin{aligned} t_{P_X(r)}[A_k] &= t'_r[A_k], \quad for\ all\ k\ of\ A_k \in X, \\ t_{P_X(r)}[\mu_{A_k,N}] &= \sup_{t\subseteq C} t[\mu_{A_k,N}],\ t_{P_X(r)}[\mu_{A_k,\Pi}] = \sup_{t\subseteq C} t[\mu_{A_k,\Pi}], \\ C = \{t \mid t[A_k] &= t'_r[A_k], \quad for\ all\ k\ of\ A_k \in X\}. \end{aligned}$$

例 3.5.2
例 3.1.2 の関係 $scs1 \cup scs2$ から (ST, CT) の射影は以下の関係を生み出す。

$P_{ST,CT}(scs1 \cup scs2)$

CT	μ_{CT}	ST	μ_{ST}
1/x	1.0,1.0	1/23	1.0,1.0
0.8/z+1/y	0.6,1.0	1/21+1/22	0.8,1.0

3.6 Join

関係モデルにおいて、自然結合は θ 結合と射影で表すことができるが、以下に示すようにファジィ関係モデルではそうではない。よって、θ 結合と自然結合を別々に述べる。

3.6.1 θ 結合 ($r \bowtie_{X\theta Y} s$)

ファジィ関係データベースにおいて、幾人かの研究者が θ 結合を表現している[6, 11, 15, 20]。二つの関係 r と s の θ 結合 $r \bowtie_{X\theta Y} s$ は二つの関係のそれぞれからの二つのタプルを連結した全てのタプルの中で条件 $X\theta Y$ を満たすものから成る関係である。ここで、θ とは算術比較演算子（=、>等）である。もし θ が = であれば、θ 結合は等結合と呼ばれる。

定義 3.6.1.1
$t_{r\bowtie_{X\theta Y}s}$ が二つの関係 r と s にそれぞれ受け入れられているタプル t_r と t_s から生み出されるとする。但し、X と Y はそれぞれの関係スキーマ R と S に含まれている属性集合である。
$A_k \in R - Y$ ならば、

$$t_{r\times s}[A_k] = t_r[A_k],\ t_{r\times s}[\mu_{A_k,N}] = t_r[\mu_{A_k,N}],\ t_{r\times s}[\mu_{A_k,\Pi}] = t_r[\mu_{A_k,\Pi}],$$

$A_k \in S - X$ ならば、

$$t_{r\times s}[A_k] = t_s[A_k],\ t_{r\times s}[\mu_{A_k,N}] = t_s[\mu_{A_k,N}],\ t_{r\times s}[\mu_{A_k,\Pi}] = t_s[\mu_{A_k,\Pi}],$$

$A_k \in X$ ならば、

$$\begin{aligned} t_{r\times s}[A_k] &= t_r[A_k], \\ t_{r\times s}[\mu_{A_k,N}] &= \min(N(\theta \mid t_r[A_k], t_s[A_l]), t_r[\mu_{A_k,N}]), \\ t_{r\times s}[\mu_{A_k,\Pi}] &= \min(\Pi(\theta \mid t_r[A_k], t_s[A_l]), t_r[\mu_{A_k,\Pi}]), \end{aligned}$$

ここで、Y に含まれる属性 A_l は $X\theta Y$ の X に含まれる A_k に対応するものである。
$A_k \in Y$ ならば、

$$\begin{aligned} t_{r\times s}[A_k] &= t_s[A_k], \\ t_{r\times s}[\mu_{A_k,N}] &= \min(N(\theta \mid t_s[A_k], t_r[A_l]), t_s[\mu_{A_k,N}]), \\ t_{r\times s}[\mu_{A_k,\Pi}] &= \min(\Pi(\theta \mid t_s[A_k], t_r[A_l]), t_s[\mu_{A_k,\Pi}]), \end{aligned}$$

ここで、X に含まれる属性 A_l は $X\theta Y$ の Y に含まれる A_k に対応するものであり、$N(\theta \mid t_s[A_k], t_r[A_l])$ と $\Pi(\theta \mid t_s[A_k], t_r[A_l])$ は Prade and Testemale[11] に従って計算される。

例 3.6.1.2
等結合 $sp1 \bowtie_{P\#_{sp1}=P\#_{p1}} p1$ は以下の導出関係を生み出す。

$sp1 \bowtie_{P\#_{sp1}=P\#_{p1}} p1$

$S\#$	$\mu_{S\#}$	$P\#_{sp1}$	$\mu_{P\#_{sp1}}$	$P\#_{p1}$	$\mu_{P\#_{p1}}$
1/a	1.0,1.0	1/x+0.7/y	0.0,1.0	1/x+1/y	0.0,1.0
1/b	1.0,1.0	1/x+1/y	0.0,1.0	1/x+1/y	0.0,1.0

3.6.2 自然結合 ($r \bowtie s$)

自然結合 $r \bowtie s$ は二つの関係 r と s が同じ名前の属性を持っている時にのみ可能であるとする。自然結合はあるファジィ関係モデルにおいて Raju と Majumdar[12] によって定式化されている。彼らに従って関係の円筒的拡張を用いて我々のモデルで自然結合を定義する。

定義 3.6.2.1
関係 r_i を $R_i \subseteq R$ であるファジィ関係スキーム R_i のインスタンスとする。r_i の R 上の円筒的拡張 $C_R(r_i)$ は r_i に受けいられているタプル $t[\mathcal{A}]$ について、

$$t[\mu_{A_k,C_R(r_i)}] = \begin{cases} t[\mu_{A_k,r_i}] & if\ A_k \in R_i, \\ (1,1) & otherwise. \end{cases}$$

射影の定義 3.5.1 と円筒的拡張の定義 3.6.2.1 から $R_i \subseteq R$ であるファジィ関係スキーム R のインスタンス r において、$t[\mu_{A_k,\hat{r}_i}] \geq t[\mu_{A_k,r}]$ である。ここで、$\hat{r}_i = C_R(P_{R_i}(r))$ で、$t[\mathcal{A}]$ は r に受け入れられているタプルである。故に、$r \subseteq C_R(P_{R_i}(r))$. また、$R_i \subseteq R$ である R_i のインスタンス r_i について、$r_i = P_{R_i}(C_R(r_i))$ である。

定義 3.6.2.2
関係 r と s をファジィ関係スキーム R と S のそれぞれのインスタンスとする。これらの関係の自然結合 $r \bowtie s$ はファジィ関係スキーム $R \cup S$ のインスタンスで、$r \bowtie s = C_{R\cup S}(r) \cap C_{R\cup S}(s)$
この定義は、$t_{r\bowtie s}$ が t_r と t_s から生み出される時、$R \cap S$ に含まれる全ての A_k について $t_r[A_k]$ と $t_s[A_k]$ が記号的に等しいことを意味している。故に、$A_k \in R - S$ ならば、

$$t_{r\bowtie s}[A_k] = t_r[A_k],\ t_{r\bowtie s}[\mu_{A_k,N}] = t_r[\mu_{A_k,N}],\ t_{r\bowtie s}[\mu_{A_k,\Pi}] = t_r[\mu_{A_k,\Pi}],$$

$A_k \in S - R$ ならば、

$$t_{r\bowtie s}[A_k] = t_s[A_k],\ t_{r\bowtie s}[\mu_{A_k,N}] = t_s[\mu_{A_k,N}],\ t_{r\bowtie s}[\mu_{A_k,\Pi}] = t_s[\mu_{A_k,\Pi}],$$

それ以外の場合、すなわち、$A_k \in S \cap R$ ならば、

$$\begin{aligned} t_{r\bowtie s}[A_k] &= t_r[A_k], \\ t_{r\bowtie s}[\mu_{A_k,N}] &= \min(t_r[\mu_{A_k,N}], t_s[\mu_{A_k,N}]), \\ t_{r\bowtie s}[\mu_{A_k,\Pi}] &= \min(t_r[\mu_{A_k,\Pi}], t_s[\mu_{A_k,\Pi}]), \end{aligned}$$

結果的に、自然結合は記号的な等価性の下での結合であるが、他方、θ 結合は θ 制約の下での結合であるということができる。

例 3.6.2.3
自然結合 $sp1 \bowtie p1$ は以下の導出関係を生み出す。

$sp1 \bowtie p1$

$S\#$	$\mu_{S\#}$	$P\#$	$\mu_{P\#}$
1/b	1.0,1.0	1/x+1/y	0.0,1.0

3.7 選択 ($\sigma_F(r)$)

ある関係からの選択は元の関係に課した選択条件 F を満足するタプルから成る関係である。F は連言標準形 $F = f_1 \wedge f_2 \wedge \cdots \wedge f_n$ に直すことができる。

定義 3.7.1
$\sigma_F(r)$ を関係 r に選択条件 F を課すことによって導かれた関係であるとする。

$$\begin{aligned} t_{\sigma_F(r)}[A_k] &= t_r[A_k], \\ t_{\sigma_F(r)}[\mu_{A_k,N}] &= \min(N(F_{A_k} \mid t_r[\mathcal{A}]), t_r[\mu_{A_k,N}]), \\ t_{\sigma_F(r)}[\mu_{A_k,\Pi}] &= \min(\Pi(F_{A_k} \mid t_r[\mathcal{A}]), t_r[\mu_{A_k,\Pi}]), \end{aligned}$$

ここで、$F_{A_k} = f_{k_1} \wedge f_{k_2} \wedge \cdots \wedge f_{k_m}$ で f_{k_p} は f_q の中で A_k を含む式である。

$$\begin{aligned} N(F_{A_k} \mid t_r[\mathcal{A}]) &= \inf_{k_p} N(f_{k_p} \mid t_r[\mathcal{A}]), \\ \Pi(F_{A_k} \mid t_r[\mathcal{A}]) &\leq \inf_{k_p} \Pi(f_{k_p} \mid t_r[\mathcal{A}]). \end{aligned}$$

例 3.7.2
"*Select from relation scs1 ∪ scs2 where (S# = 1/b + 1/c and CT = 1/y) or (S# = 1/a and ST = about 21)*" を行うとする。この選択条件 F は以下のようになる。

$$\begin{aligned} F &= (S\# = 1/b + 1/c \wedge CT = 1/y) \vee (S\# = 1/a \wedge ST = about21) \\ &= (S\# = 1/b + 1/c \vee S\# = 1/a) \wedge \\ &\quad (S\# = 1/b + 1/c \vee ST = about21) \wedge \\ &\quad (CT = 1/y \vee S\# = 1/a) \wedge (CT = 1/y \vee ST = about21), \\ F_{S\#} &= (S\# = 1/b + 1/c \vee S\# = 1/a) \wedge \\ &\quad (S\# = 1/b + 1/c \vee ST = about21) \wedge (CT = 1/y \vee S\# = 1/a), \\ F_{CT} &= (CT = 1/y \vee S\# = 1/a) \wedge (CT = 1/y \vee ST = about21), \\ F_{ST} &= (S\# = 1/b + 1/c \vee ST = about21) \wedge \\ &\quad (CT = 1/y \vee ST = about21). \end{aligned}$$

次の導出関係が生み出される。

$\sigma_F(scs1 \cup scs2)$

$S\#$	$\mu_{S\#}$	CT	μ_{CT}	ST	μ_{ST}
1/a	0.8,0.8	1/x	0.7,1.0	1/23	0.8,0.8
1/b	0.2,1.0	0.8/z+1/y	0.2,1.0	1/21+1/22	0.8,1.0

3.8 割り算 ($r \div s$)

割り算は関係代数で最も複雑な演算である。最近、割り算がファジィ関係データベースで幾人かの研究者によって定義されている[2, 4, 8, 17, 18]。関係モデルでは割り算が以下のように定義される[14]。

定義 3.8.1
割り算 $r \div s$ は、s に存在する全てのタプル t_s に対して、関係 r にタプル $\langle t, t_s \rangle$ が存在すれば、タプル t を含む関係である。

$$r \div s = \{t \mid \forall t_s \in s,\ \langle t, t_s \rangle \in r\}.$$

先ず、タプルのメンバシップ値を持つファジィ関係モデル[9]で割り算を議論し、それから第2節で述べた我々のモデルで割り算を定義する。

タプルのメンバシップ属性を持ち、クリスプな属性値を持つモデルでは、定義 3.8.1 は以下のように拡張される[4]。

定義 3.8.2

$$t_{r\div s}[\mu] = \inf_{t_s} t_s[\mu] \rightarrow \langle t, t_s \rangle_r[\mu].$$

ここで、$\rightarrow$ はファジィ含意である。
ファジィ含意の評価方法はメンバシップ属性の値の性質に依存している[2]。我々のモデルではメンバシップ属性の値は与えられるのではなく、可能性測度と必然性測度によって計算される。さらに、その必然性測度は Dienes の含意に基づいている[5]。従って、Dienes の含意を用いることにする。

$$\begin{aligned} t_{r\div s}[\mu_N] &= \inf_{t_s} \max(1 - t_s[\mu_\Pi], \langle t, t_s \rangle_r[\mu_N]), \\ t_{r\div s}[\mu_\Pi] &= \inf_{t_s} \max(1 - t_s[\mu_N], \langle t, t_s \rangle_r[\mu_\Pi]), \end{aligned}$$

ファジィ関係データベースでは属性値が可能性分布で表されることが普通である。この点をMouaddib[8]に従って考慮すれば、上の定義は次のように書き換えられる。

定義 3.8.3

$$t_{r\div s}[\mu_N] = \inf_{t_s} \max(1 - t_s[\mu_\Pi], \sup_{t'} \min(N(=|\ t_s, t'), \langle t, t'\rangle_r[\mu_N])),$$

$$t_{r\div s}[\mu_\Pi] = \inf_{t_s} \max(1 - t_s[\mu_N], \sup_{t'} \min(\Pi(=|\ t_s, t'), \langle t, t'\rangle_r[\mu_\Pi])).$$

例 3.8.4
関係 $sp2$ と $p2$、割り算 $sp3 \div s3$ は以下の通りである。

$sp2$

S#	P#	μ
1/a	1/x	1.0,1.0
1/a	1/y	1.0,1.0
1/a	1/z	1.0,1.0
1/b	1/y	1.0,1.0

$p2$

P#	μ
1/x+0.3/y	0.8,0.8
1/z	1.0,1.0

$sp2 \div s2$

S#	μ
1/a	0.7,1.0

上の定義はまだ十分ではない。というのは、関係 $p2$ の1番目のタプルの属性 $P\#$ の値は x か y のいずれかであり、これらに対応するタプル値 $\langle a, x\rangle$ と $\langle a, y\rangle$ が共にメンバシップ値 (1,1) で関係 $sp2$ に存在しているからである。故に、上の結果のメンバシップ値は (1.0,1.0) のはずである。この点を考慮するために、上の定義は次のように書き換えられる。

定義 3.8.5

$$t_{r\div s}[\mu_N] = \inf_{d\in D_S, t_s} \max(\min(1 - t_s[\mu_\Pi], 1 - \Pi(=|\ d, t_s)), \sup_{t'} \min(N(=|\ d, t'), \langle t, t'\rangle_r[\mu_N])),$$

$$t_{r\div s}[\mu_\Pi] = \inf_{d\in D_S, t_s} \max(\min(1 - t_s[\mu_N], 1 - N(=|\ d, t_s)), \sup_{t'} \min(\Pi(=|\ d, t'), \langle t, t'\rangle_r[\mu_\Pi])),$$

ここで、ファジィ関係スキーマ $S((A_1, \mu_{A_1}), (A_2, \mu_{A_2}), \ldots, (A_m, \mu_{A_m}))$ 上で $D_S = dom(A_1) \times dom(A_2) \times \cdots \times dom(A_m)$ である。
最後に、この定義を拡張することによって、我々のモデルで割り算を定義する。

定義 3.8.7

$$t_{r\div s}[A_k] = t_r[A_k] \ with\ A_k \in R - S,$$

$$t_{r\div s}[\mu_{A_k,N}] = \inf_{d\in D_S, t_s} \max(\min(\inf_{A_l\in S}(1 - t_s[\mu_{A_l,\Pi}]), 1 - \Pi(=|\ d, t_s[\mathcal{A}_s])), \sup_{t'} \min(N(=|\ d, t'), \inf_{A_h\in\{S\cup A_k\}} \langle t, t'\rangle_r[\mu_{A_h,N}])),$$

$$t_{r\div s}[\mu_{A_k,\Pi}] = \inf_{d\in D_S, t_s} \max(\min(\inf_{A_l\in S}(1 - t_s[\mu_{A_l,N}]), 1 - N(=|\ d, t_s[\mathcal{A}_s])), \sup_{t'} \min(\Pi(=|\ d, t'), \inf_{A_h\in\{S\cup A_k\}} \langle t, t'\rangle_r[\mu_{A_h,\Pi}])),$$

ここで、$\mathcal{A}_s = (A_1, A_2, \ldots, A_m)$.

例 3.8.8
関係 $sp3$ と $p3$ を次のものとする。

$sp3$

S#	$\mu_{S\#}$	P#	$\mu_{P\#}$
1/a	0.8,1.0	1/x	1.0,1.0
1/a	1.0,1.0	1/y+0.6/w	1.0,1.0
1/a	1.0,1.0	1/z	1.0,1.0
1/b	1.0,1.0	1/y	1.0,1.0

$p3$

P#	$\mu_{P\#}$
1/x+0.3/y	0.1,1.0
1/z	0.9,0.9

割り算 $sp3 \div s3$ は以下の導出関係を生み出す。

$sp3 \div s3$

S#	μ
1/a	0.4,1.0

4 結語

タプルのメンバーシップ値の解釈の曖昧さの考慮したファジィデータモデルを定義し、拡張された関係代数を示した。このモデルでは各属性はそのメンバシップ属性を伴っている。メンバシップ属性値は関係に課せられた一貫性制約と属性値との整合性によって決められ、可能性測度と必然性測度によって計算される。

メンバシップ属性値の意味はその属性が主キーに含まれているかどうかに依存する。属性が主キーに含まれる場合、メンバシップ属性値はその属性値が属性と整合する度合である。他方、属性が主キーに含まれない場合、メンバシップ属性値は主キーの値がその属性値を持つ度合である。このように、我々のモデルでは、メンバシップ属性値の解釈の曖昧さは存在しない。

謝辞 本研究に多大な援助と助言を戴いた和田茂穂教授に感謝致します。尚、本研究は一部千葉経済大学短期大学部共同研究助成金の補助を受けた。

References

1. Baldwin, J. F. [1983] A Fuzzy Relational Inference Language for Expert Systems, *in Proceedings of the 13th IEEE Inter. Symp. on Multiple-Valued Logic* (Kyoto, Japan), pp. 416-421.
2. Bosc, P., Dubois, D., Pivert, O., and Prade, H. [1995] Fuzzy Division for Regular Relational Databases, in Proceedings of FUZZ-IEEE/IFES '95, (Yokohama, Japan), pp. 729-734.
3. Codd, E. F. [1970] A Relational Model of Data for Large Shared Banks, Communications of ACM **13** 377-387.
4. Dubois, D., and Prade, H. [1994] Quotient Operators in Fuzzy Relational Databases, in Proceedings of EUFIT '94, pp. 357-360.
5. Inuiguchi, M. and Kume, Y. [1994] Necessity Measures Defined by Level Set Inclusions: Nine Kinds of Necessity Measures and Their Properties, International Journal of General Systems, **22**, 245-275.
6. Li, D. and Liu, D. [1990] A Fuzzy Prolog Database System, Research Studies Press, 1990.
7. Medina, J. M., Pons, O., and Vila, M. A. [1994] GEFRED: A Generalized Model of Fuzzy Relational Databases, Information Sciences, **76** 87-109.
8. Mouaddib, N. [1994] Fuzzy Identification in Fuzzy Databases: The Nuanced Relational Division, International Journal Intelligent Systems, **9**, 461-473.
9. Nakata, M. [1993] Integrity Constraints in Fuzzy Databases, *in Proceedings of the first Asian Fuzzy System Symposium*, (Singapore, November 23-26, 1993).
10. Prade, H. [1984] Lipski's Approach to Incomplete Information Data Bases Restated and Generalized in the Setting of Zadeh's Possibility Theory, Information Systems **9**:1, 27-42.
11. Prade, H. and Testemale, C. [1984] Generalizing Database Relational Algebra for the Treatment of Incomplete or Uncertain Information and Vague Queries, Information Science, **34**, 115-143.
12. Raju, K. V. S. V. N. and Majumdar, A. K. [1988] Fuzzy Functional Dependencies and Lossless Join Decomposition of Fuzzy Relational Database Systems, ACM Trans. on Database Systems, **13**:2, 129-166.
13. Tanaka, K., Kobayashi, S., and Sakanoue, T. [1991]Uncertainty Management in Object-Oriented Database Systems. in Proceedings of Database and Expert Systems Applications, DEXA '91, D. Karagiannis, Ed., Springer-Verlag, pp. 251-256.
14. Ullman, J. [1982] Principles of Database Systems, 2nd edition, Computer Science Press 1982.
15. Umano, M. [1982] FREEDOM-O: A Fuzzy Database System, *in Fuzzy Information and Decision Processes*, M. M. Gupta and E. Sanchez, eds., North-Holland, Amsterdam, pp. 339-347.
16. Umano, M. [1983] Retrieval from Fuzzy Database by Fuzzy Relational Algebra, *in Proc. IFAC Symposium, Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis*, E. Sanchez, ed., (Marseille, July 19-21), Pergamon Press, pp. 1-6.
17. Umano, M. and Fukami, S. [1994] Fuzzy Relational Algebra for Possibility-Distribution-Fuzzy-Relational Model of Fuzzy Data, Journal of Intelligent Information Systems, **3**, 7-27.
18. Yager, R. R. [1994] Interpreting Linguistically Qualified Propositions, International Journal Intelligent Systems, **9**, 541-569.
19. Zadeh, L. A. [1978] Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility, Fuzzy Sets and Systems **1** 3-28.
20. Zemankova, M. and Kandel, A. [1984] Fuzzy Relational Databases–A Key to Expert Systems, Verlag TÜV Rheinland, Cologne, 1984.

問い合わせ先：
263 千葉市稲毛区轟町 4 丁目 3-30 千葉経済大学短期大学部
経営情報学科　中田 典規　TEL 043-255-3451 FAX 043-252-6050

WC1-2

情報検索のキーワードとしての印象語の類似および反意なファジィ関係に関する定量的考察

On Quantitative Synonymic or Antonymous Fuzzy Relation
among Impression words for keywords of Information Retrieval

磯本征雄 Yukuo ISOMOTO 名古屋市立大学 Nnagoya City Univ.
長谷川聖美 Satomi HASEGAWA 名古屋工業大学 Nagoya Institute of Technology
石井直宏 Naohiro ISHII 南山大学 Nanzan Univ.
吉根勝美 Katsumi YOSHINE 南山大学 Nanzan Univ.
横山清子 Kiyoko YOKOYAMA 名古屋市立女子短期大学 Nagoya Municipal Women's College

Abstract— A database storing fine arts such as paintings should provides its users with the information retrieval by impression words. The authors have formulated the fuzzy information retrieval and designed the data structure for the bibliographic and allocation data. Moreover in this paper, in order to edit the thesaurus of the keyword retrieval by impression words, the authors discuss an experimental method to analyze the quantitative relation among impression words. Then the synonymic and antonymous fuzzy relations are analyzed by the experimental data.

1．はじめに

絵画など美術作品データベースの特徴は，絵画鑑賞に伴う情報検索において，楽しさや華やかさなど喜怒哀楽や情緒に関わる印象語のキーワードが頻繁に使われることである。筆者らは，作家や制作年や所蔵美術館などの書誌情報，絵画の構図を示す場景情報について，既にファジィ・データベースの観点からデータ構造と情報検索を議論してきた[1,2]。本論文では，感性情報に基づく情報検索のキーワードとなる印象語の類似・反意関係を考察する。

本研究の目的は，図１の様な絵画鑑賞を目的とする情報検索でキーワードとして使われる印象語間の関係を定量的に知ることにある。関係を定量的に明かにすることによって，印象語によるキーワード検索の信頼性を高めることができ，絵画データベースのコンピュータ処理も容易になるからである。

印象語“愉快な”，“楽しい”，“ほのぼの”は，喜怒哀楽，快不快，寒暖，好みなど人間の生理・心理を表象し，感性情報に基づくキーワード検索に有用である。しかし，感性情報は人の内面的心理の問題であるため，そのキーワードとして有用である印象語の示す内容も非常に多様で曖昧であり，そのためそれらの類似・反意関係も不明瞭である。本論文では，図形や色彩と印象語の関係を計測し，これらの解析を通して印象語の類似・反意関係を数理的に解析する。



図１　本稿で扱う美術作品の一例

本稿では，情報検索のキーワードに使うシソーラスの中で，印象語の類似・反意関係の強弱を定量的に計測する実験手法を議論する。以下に本文では，形状と色彩を媒介とした印象語に関する反応データの計測方法とその解析方法を述べ，印象語間の類似や反意の関係をファジィ理論を背景に解析を試みる。

2．印象語に関する基本的考え方

印象語は，様々な刺激に対する共通感覚の表象であり，それら刺激と印象語には密接な関連がある。本研究は，絵画を対象にしているので，ここでは刺激事象を図形や色彩とした。表１は，以下に述べる実験で得た，印象語間の類似傾向（S; Synonymic），反意傾向（A; Antonymous），関連無し（N; Neither）の特性をまとめた。こうした印象語間の関連の強弱を定量的に知るために，刺激と反応データの関係を分析する。

事象集合 $\{e_k \mid k=1,2,\ldots,K\}$ が共通に持つ“属性（楽しさや素朴さ）”を印象語 w_i，w_i

表１　印象語の相互関係

表の数値は本実験で得た相関係数を表す

	素朴な	とげとげしい	清々しい	派手な
素朴な		A -.751	S .667	A -.726
とげとげしい	A -.751		A -.651	S .701
清々しい	S .667	A -.651		N -.366
派手な	A -.726	S .701	N -.366	

A:Antonymous　　S:Synonymic　　N:Neither

へのe_kの帰属度をm_{ik}とする。図２は，事象集合$\{e_k \mid k=1,2,\ldots,K\}$を台集合として，印象語$w_i$への$\{e_k \mid k=1,2,\ldots,K\}$の帰属度をメンバーシップ関数で描いた概念図である。横軸に帰属度の小から大に左から右へ事象を並べ，縦軸にe_kのw_iへの帰属度を示す。w_iのメンバーシップ関数を太い実線で，w_iの反意語のメンバーシップ関数を太い破線で，類似語のメンバーシップ関数を細い実線や破線で示す。これらグラフの重なり具合から，ファジィ集合間の類似性や補集合の関係が分かるであろう。

本研究のねらいは，実験に基づいて，こうしたメンバーシップ関数や印象語の関係を定量的に導き出すことである。

３．反応データ計測の実験方法

本実験では，被験者に印象語を１つ提示し，連続して提示される一連の線図形（または色彩）と印象語の連想関係の有無を，被験者に正の連想“はい”，負の連想“いいえ”，連想関係無し“どちらでもない”で回答させる。こうして複数被験者から得た反応データの統計処理を経

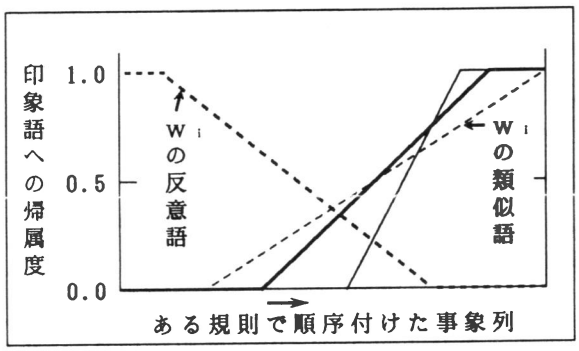


図２　印象語間の類似関係と反意関係

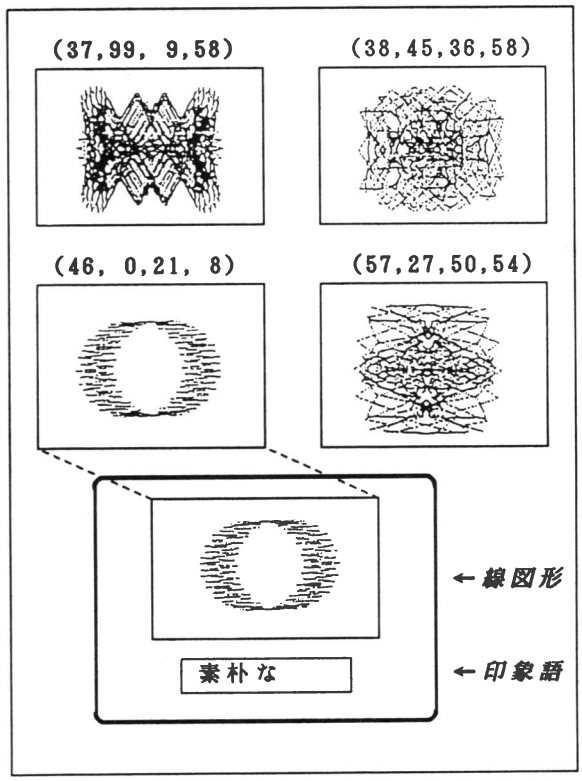


図３　実験に使われた線図形とそれらのディスプレイ画面上の提示例。数値は（A,B,F_x,F_y）である。

て帰属度を解析する。箇々の線図形や色彩の意味や被験者の生理的・心理的情動に立入らず，反応データのみに基づいて印象語間の関連を調べる。線図形に関しては，色彩による影響を受けないように均等に七色を用いた。

図３は，提示図形を４例と，実験時の印象語と線図形を提示するディスプレイ画面を示す。提示図形は系統的にするために，周期関数を使った一筆書きにし，次式で計算される座標点(X,Y)を結ぶことによって生成する：

$$x=X_0+A\cdot\cos(\Theta)+B\cdot\cos(F_x\cdot\Theta)$$
$$y=Y_0-A\cdot\sin(\Theta)-B\cdot\sin(F_y\cdot\Theta) \qquad (1)$$

ただし，　$0\leqq\Theta\leqq 2\pi$，

$1\leqq A\leqq 100$，　$1\leqq B\leqq 100$，

$1\leqq F_x\leqq 100$，　$1\leqq F_y\leqq 100$.

Θを０から2πまで$\Delta\pi$ずつ増やしながら順次座標点(x,y)を式(1)で計算し，これらを次々に線で結ぶことで，係数（A,B,F_x,F_y）に固有の線図形が得られる。定数（X_0,Y_0）は，図形の位置を決める定数である。A と B は図形の大きさを決め，F_x とF_y は図形変化の周期を与える。

これら係数を整数値に限定することによって，組み合わせ総数で100,000,000(=100×100×100×100) 個の線図形を用意でき，４係数の組合わせた図形番号によって線図形を一義的に指定できる。本実験では，一様乱数で係数(A,B,F_x,F_y)を生成し，式(1)によって一連の線図形を描いていく。

色彩提示の場合は，青赤緑の３原色と黒の４色を比率 Blue:Red:Green:Black で図３の矩型の左上から最下端へ隙間なくドットで埋め尽くし，再びその右隣の最上端から下へ隙間なく埋めて，これを矩型の右端まで繰り返す。比率は，$0 \leqq R_1 \leqq R_2 \leqq R_3 \leqq 1$ なる３つの実数値を一様乱数で確保し，次のように定める：

$$\begin{aligned} &Blue = R_1 \times 100, \quad Red = (R_2 - R_1) \times 100, \\ &Green = (R_3 - R_2) \times 100, \quad Black = (1 - R_3) \times 100. \end{aligned} \tag{2}$$

実際の色彩配分では，彩色を無作為にするために一様乱数 r_n を発生させ，R_1，R_2，R_3 を使って各ドット d_n の色を次の規則で決める：

$$\begin{aligned} &c = r_n \times 100, \quad n = 1,2,3,\ldots,N_{max}. \\ &\text{if} \quad c < R_1 \quad \text{then color=blue} \\ &\text{else if } c < R_2 \quad \text{then color=red} \\ &\text{else if } c < R_3 \quad \text{then color=green} \\ &\qquad\qquad \text{else color=black.} \end{aligned} \tag{3}$$

この方法で，ほぼ式(2)の比率で彩色される。また，色彩比率を整数値に限定することによって，組合わせ総数で 100,000,000(=100×100×100×100)種を用意できる。また，比率の数値を組合わせて色彩番号として配色を一義的に与えることができる。

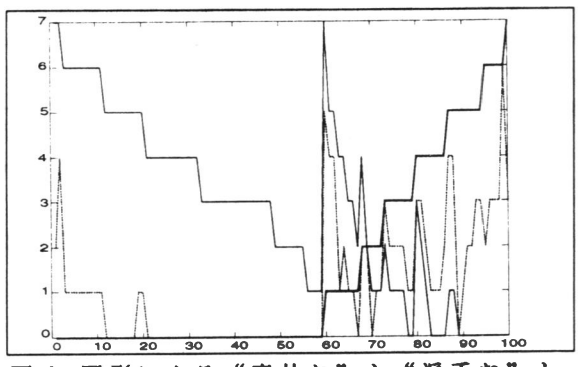


図４ 図形による“素朴な”と“派手な”と“清々しい”の反応データ

——— “素朴な”の反応データ
——— “派手な”の反応データ
-------- “清々しい”の反応データ

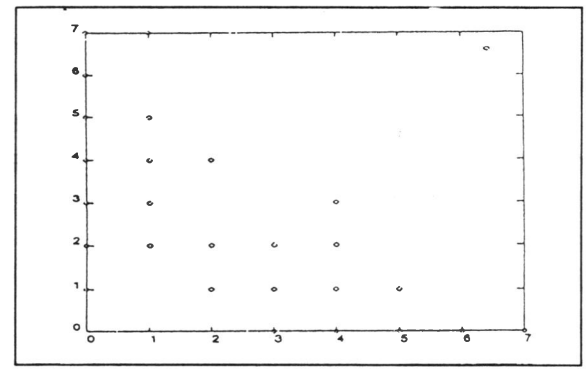


図５ 図形による「素朴な－派手な」の散布図

なお，今回の実験では，被験者の忍耐の限界を考えデータの信頼性を落とさないように，多数の線図形（ないしは色彩）の母集団の中から，無作為に予め乱数で 100 組みの線図形（ないしは色彩）を選び，１回につき 100 件の反応データを収集した。データ解析を容易にするために，相互の関係を調査する一組の印象語に対しては，同じ一連の線図形を繰り返し用いた。

４．データ解析

被験者８人から得た一連の反応データを基に印象語相互の関係を数理的に解析する。

(1) 図形による反応データの解析

線図形には何ら特別な意味はないので，一人の被験者の反応データのみでは何の情報も得られない。本実験の目的は，多数の被験者から得た反応データを統計処理して，その中から一般的な情報を得ることである。よって，線図形に対する反応データの共通性あるいは非共通性を解析することで印象語の特徴を見る。

図４は，“素朴な”と“派手な”と“清々しい”に肯定的な回答の人数を縦軸に示し，横軸に，図形番号を人数でソートして並べたグラフである。この方法で，一連の線図形に対する印象語への反応データを見ることができる。“清々しい”と“素朴な”が比較的よく似た傾向を示しており、”派手な”と”素朴な”はかなり異なる傾向を示している。こうした関係は、我々の日常的な感覚に合っているが，これを定量的に計測するところに本研究の特色がある。

図５は，「素朴な－派手な」の肯定的回答に

関する人数の散布図である。この図によって，「素朴な－派手な」には負の相関があることがわかる。しかし，この図ではいくつも点が重なっていても一点しか示されていないので，厳密なことはいえない。よって印象語の関係を定量的に見るために，この散布図を基に相関係数を計算する。その計算した数値を表１に示した。表１の他の相関係数も，同様の方法で計算した。図５のタイプを類似傾向（S:Synonymic）とし，さらに反意傾向（A:Antonymous），いずれでもない（N:Neither）を表１に記入した。この表では、記号で表されてているものは，頻度の少ないデータを意識的に無視した筆者らの判断に基づく評価結果であり、数値で表されているものは、反応データをすべて均等に扱っているため，相関係数がすこし小さくなっている。表１の相関係数から，類似語や反意語の対応を定量的に知ることが可能であろう。

（2）色彩による反応データの解析

色彩による反応データの解析についても，データの質を揃えるために，出来る限り図形の場合と同じデータ収集と解析の方法をとる。

（3）反応データに関する考察

これらの解析結果から、本実験はすべてのデータに対して明快な結論を出すには多少無理があるが，印象語間に存在するであろうと思われる関連を定量的に導き出す有力な方法であることが示された。実験成功の是非は，反応データに明確な傾向が現れることであるが，図形や色彩のみから全て印象語の相互関係を引き出すには無理がある。本実験で使用した印象語は，図形や色彩のみから判断するのに適しているかどうかは一切評価していない。したがって，この実験で明快な結論を出せない印象語については，他の実験方法を考える必要がある。

５．まとめ

本論文では，８人の被験者の協力によって，線図形を媒介とした印象語間の関連を引き出す実験とその反応データの解析結果を報告した。少数の例ながら印象語間の類似・反意関係が定量的に分かり，本実験が有効であることを示した。また，印象語のシソーラス作成の基礎データ収集が可能であることが分かった。印象語のむずかしい点は，“楽しい”と“嬉しい”など意味は異なるが状況のよく似た用語の多いこと，また，ある用語の反対語が一義的ではないことである。というのは，筆者らはある印象語の否定は，複数の印象語に複合的に対応しているので一義的には決まらないと考えているからである。よって，このような印象語は，文章の中では文脈によって解釈されるが，情報検索のキーワードとしては，図形や色彩から判断せざるを得ない。今後こうした実験によって，印象語間の関係の議論に必要な情報を確保できるであろう。

本稿に述べた実験は，印象語に対する人間の意識を知る一手段である。また本実験によって，色彩や形状のみから判断するには適さない印象語があることがわかった。この実験に適さない印象語間の関連を定量的にするためには，ほかの観点からの実験方法を考えていかなければならない。こうした実験を積み重ねることで，ファジィ理論に基づくキーワード検索技法を感性情報の分野にも適用可能になると期待している。

最後に，本研究は，文部省科学研究費補助金（試験研究(B)(1)課題番号 06558021）の援助を受けて行っていることを感謝をもって付記しておきます。

参考文献

1)磯本，吉根：美術作品のための画像データベースのデータ構造と情報検索技法のファジィ・モデル，教育工学関連学協会連合第４回全国大会講演論文集（第一分冊），pp.419-422 (1994)

2)磯本，吉根：画像データベースのためのデータ構造と情報検索技法，第１０回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.627-630 (1994)

3)加藤，栗田：画像の内容検索 — 電子美術館への応用 —，情報処理，Vol.33，No.5，pp.466-477 (1992).

［連絡先］

〒467 名古屋市瑞穂区瑞穂町山の畑１
名古屋市立大学計算センター
磯本征雄
TEL 052-872-5790　FAX 052-872-5781

WC1-3

射影追跡ＩＤ３によるファジィルールの削減

Curtailing Fuzzy Rules by Projection Pursuit ID3

島内正裕　○市橋秀友　三好哲也　吉本富士市

Masahiro Shimauchi* Hidetomo Ichihashi* Tetsuya Miyoshi* Fujiichi Yoshimoto**

大阪府立大学　和歌山大学

University of Osaka Prefecture* Wakayama University**

Abstract : In representing human-knowledge by fuzzy rules, the number of fuzzy rules increases exponentially with the number of attributes. In this paper, we propose a curtailing method of fuzzy rules by the projection pursuit and the fuzzy ID3.

1. はじめに

Friedman らにより始められた射影追跡[1]の目的は，高次元空間におけるデータ点を低次元空間に射影することによってデータの興味深い構造を発見することである．そのためにある目的関数，すなわち射影指標を最大化する線形射影をコンピュータを用いて自動探索する．射影指標は，通常多くの極値を持つ関数であるのでランダムな探索と勾配法が用いられている．本研究では固有値法による射影追跡回帰により高次元空間における特徴的な写像を見つけだし，木構造に再表現する方法を提案する．Quinlan[3]によるＩＤ３は簡単で強力な決定木作成法であり，人工知能研究における機械学習[4]の代表的手法の一つである．ＩＤ３は本来数値属性を取り扱うことができないが，属性値に実数のファジィ集合 (ファジィ数) を用いるファジィＩＤ３が提案されている[5]．ファジィＩＤ３での決定木はファジィ推論ルールに相当している．

本研究では射影追跡により，多次元データを一次元の回帰曲線で近似する．次に，ファジィ集合によって射影データを分割し，情報測度に基づいて，決定木の枝を生成する．本提案法の一つの応用として，ファジィ制御における制御ルール数の削減が考えられる．田中・佐野[6]は座標変換によってルール数を削減できる場合があり，そのときにむだ時間に対する補償が容易になることを示している．また制御ルールのパラメータ調整公式も導出している．田中らの方法は，ルールテーブルにおいてルール後件部を表す PB(Positive Big),ZO(Zero) などのラベルが対角方向に規則正しく並んでおれば，その方向に座標を回転するもので，回転角度は人が決定する．この方法はルールテーブルを表す２変数関数を射影によって低次元化することに相当しており，本研究における提案法は多次元のルールテーブルを低次元化する方法である．

多次元データ点を適当な非線形関数で近似しようとしたときに，多くのパラメータが必要となる問題は次元の呪いと呼ばれている．射影追跡回帰[2]は次元の呪いを解決する一つの方法と言われているが，射影追跡のみではうまく低次元非線形写像を発見できず精度よく近似できない場合もある．本提案法はさらに木構造表現も用いることによって近似精度を高めようとするものである．

近似関数にはスプライン関数を用いて，その節点の決定には吉本[8]のファジィ概念に基づく方法を採用する．文献[8]の方法は説明変量が１次元である場合のものであるが，本提案法により多次元の場合に拡張される．

2. B-スプラインを用いるファジィＩＤ３

決定木は獲得した知識がわかりやすく，ルールの抽出が容易であることから有効な知識表現の一つとされている．しかし，どの属性でデータ (オブジェクト，学習サンプル) を分類するかにより得られる決定木が異なるため，属性の選択基準が問題となる．ＩＤ３は分類のための評価基準として情報測度を採用しており，属性値にファジィ集合を取り入れたファジィＩＤ３において各属性は以下に示す獲得情報量 G で評価される．

$$G = H - E \tag{1}$$

$$H = -\sum_{k=1}^{K} t_k^b \log t_k^b \tag{2}$$

$$t_k^b = \frac{|D_k^b|}{|D^b|} \tag{3}$$

$$|D^b| = \sum_{x \in D} \{ \prod_{(m,i) \in Q_b} B_{mi}(y_m) \} \tag{4}$$

$$|D_k^b| = \sum_{x \in D_k} \{ \prod_{(m,i) \in Q_b} B_{mi}(y_m) \} \tag{5}$$

ここで，Hは分類前の情報量，Eは分類後の Hの各属性値毎の相対頻度による期待情報量を表している．情報量とは各クラスの相対頻度から計算されるシャノン・エントロピーである．また，B_{mi}は属性 m の第 i メンバシップ関数，(m,i) は属性 m とその属性値のファジィ集合の添字 i との対を表しており，Q_bはノード b に至るまでに選択された (m,i) の集合である．ただし，y_mは与えられたデータの説明変量 x を３章で述べる射影ベクトルにより直線に射影した値である．したがって本研究での属性 m は，通常の属性ではなく m 回目の射影であることを意味している．D_kはクリスプな第 kクラスに属するデータ集合であり，本研究では以下の (7) 式の応答変量 zの値を大中小の３つに分け K=3 とする．またメンバシップ関数 B_{mi}として端点において節点を３個重ねた２次の B-スプラインを用いる．２次の B-スプラインは，ドブァ・コックスの算法[7]より

$$B_i(y) = \begin{cases} \dfrac{(y-q_i)^2}{(q_{i+2}-q_i)(q_{i+1}-q_i)} & (q_i \le y < q_{i+1}) \\ \dfrac{(y-q_i)(q_{i+2}-y)}{(q_{i+2}-q_i)(q_{i+2}-q_{i+1})} + \dfrac{(q_{i+3}-y)(y-q_{i+1})}{(q_{i+3}-q_{i+1})(q_{i+2}-q_{i+1})} & (q_{i+1} \le y < q_{i+2}) \\ \dfrac{(q_{i+3}-y)^2}{(q_{i+3}-q_{i+1})(q_{i+3}-q_{i+2})} & (q_{i+2} \le y < q_{i+3}) \\ 0 & (y < q_i, q_{i+3} \le y) \end{cases} \tag{6}$$

となる．ただし，添字 m は省略している．

スプライン関数をうまく使う鍵は節点の決定にある．そこで，吉本[8]はスプライン関数の節点をファジィ概念を用いることにより決定する方法を提案している．いま，あてはめを行うべきデータは，y軸上の区間 $[a,b]$ 内で与えられ

$$z_j = f(y_j) \qquad (j = 1, \cdots, J) \tag{7}$$

と表されるものとする．ここで，$f(y)$はデータのもとにある関数であり，y軸上で考えるのは次節での射影ベクトルによって決まる直線がy軸であるからである．また，必要な節点を$q_i(i=-2,-1,\cdots,n+3)$と書くことにする．ここで，nは区間$[a,b]$の内部に配置する節点$q_i(i=1,\cdots,n)$の数である．スプライン関数を用いて$f(y)$の近似関数$\hat{z}(y)$を表す．両端の3個の節点はそれぞれ端点a,bに重ね

$$\begin{cases} a = q_{-2} = \cdots = q_0 \\ b = q_{n+1} = \cdots = q_{n+3} \end{cases} \tag{8}$$

とする．このとき近似関数$\hat{z}(y)$は

$$\hat{z}(y) = \sum_{i=1}^{n+3} w_i B_i(y) \tag{9}$$

と表すことができる．ここで，w_iはB-スプライン係数である．

最小2乗法を用いて(9)式を与えられたデータ(7)にあてはめるとき，残差の2乗和Eは

$$E = \sum_{j=1}^{J} \{\hat{z}(y_j) - z_j\}^2 \tag{10}$$

となり，(10)式を最小にするB-スプライン係数$w_i(i=1,\cdots,n+3)$を求めることができる．ただし，よい近似を得るためには内部の節点の数と位置を適切に決める必要がある．このため，データのもとにある関数の形が大きく変化しているところには節点を密にいれ，緩やかに変化しているところには節点を疎にいれる．そのため，内部の節点の位置は$f(y)$の形状の変化度合を表す折れ線をファジィ概念から主観に基づいて描きその積分を等面積に分ける点とする[8]．いま，全体の区間$[a,b]$での積分値をTとし，内部の節点の数はnであるから，Tを

$$U = \frac{T}{n+1} \tag{11}$$

で等分割する点を求める．ただし，節点の数はＡＩＣ[9]などの計算によって決められる．ＡＩＣとはいくつかのモデルの候補が存在する場合に，モデルの最大対数尤度とパラメータ数から最良のモデルを決定する規準である．すなわち

$$AIC = -2 \times \text{最大対数尤度} + 2 \times \text{パラメータ数} \tag{12}$$

によって計算される値の中で最小値をもつモデルを選択する．

以上では，一次元のスプライン関数について述べたが提案のファジィＩＤ３で得られる決定木は，多次元のスプライン関数であり，B-スプラインをメンバシップ関数とするファジィ推論ルールに対応付けることができる．クラスはルールの結論部に相当するもので，クラス情報に代わって実数値のデータz_jが与えられている場合は，ファジィルールの結論部(B-スプライン係数)を実数値としてニューラルネットの学習則(ＬＭＳ)によってその値を決定することもできる．まず，ファジィモデル(スプライン関数)を以下のように表す．

$$\hat{z} = \sum_{r=1}^{R} \{ \prod_{(m,i)\in Q_r} B_{mi}(y_m) \} w_r \tag{13}$$

ここで，$\prod_{(m,i)\in Q_r} B_{mi}(y_m)$は第$r$ルールの条件部に対応し，決定木ではルートから第$r$リーフに至るまでの一次元の$B$-スプラインメンバシップ関数$B_{mi},(m,i)\in Q_r$の積で定義されている．$w_r$は第$r$ルールにおける結論部実数値である．学習則は

$$w_r^{NEW} = w_r^{OLD} + \tau\,\delta\,(\prod_{(m,i)\in Q_r} B_{mi}(y_m)) \tag{14}$$

となる．ただし，$\delta = z - \hat{z}$でzは理想出力(教師データ)である．

3. 固有値法による射影追跡

いま，データ集合B_iの要素$\boldsymbol{x}_j(j=1,\cdots,J)$それぞれについてメンバシップ関数$B_i(\boldsymbol{x}_j)$が与えられているとする．$\boldsymbol{x}_j$は$n$次元ベクトルで，$\boldsymbol{x}_j$に対応する応答変量$z_j$がさらに大小二つのファジィクラスに分けられているとする．ファジィ集合(クラス)をCと$\overline{C}$の2つとし，それぞれ$\{(\boldsymbol{x}_j,\mu(z_j))\,;\,j=1,\cdots,J\}$,$\{(\boldsymbol{x}_j,1-\mu(z_j))\,;\,j=1,\cdots,J\}$とする．ただし，$\mu(z_j)$は応答変量$z_j$の値を区間[0,1]に基準化したものである．クラスCは値の大きいデータのファジィ集合であり$\overline{C}$は大きくないデータのファジィ集合である．

本提案法は以下の手順を反復する．ここでは簡単化のために第2回目の反復について説明する．y_{2j}を単位ベクトル$\boldsymbol{p} = (p_1,\cdots,p_n)^T$により定まる直線への$\boldsymbol{x}_j$の正射影とすると

$$y_{2j} = \boldsymbol{p}^T \boldsymbol{x}_j \tag{15}$$

となる．ただし，Tは転置を意味する．

ファジィ集合B_iに含まれるデータ$\boldsymbol{x}_j$に対応するメンバシップ関数を$B_i(y_{1j})$と表す．ただし，$B_i(y_{1j})$はすべてのデータを対象とした1回目の(15)式による射影で定まるy_1軸上の第i番目のB-スプラインである．y_{2j}はファジィ集合B_iのデータのみを対象とした(15)式による2回目の射影である．(y_{1j},z_j)を用いてファジィクラスC内におけるy_{2j}の標本分散は

$$\begin{aligned} \sigma_{Ci}^2 &= \frac{1}{J_{Ci}} \sum_{j=1}^{J} B_i(y_{1j})\mu(z_j)(y_{2j} - \overline{y_2})^2 \\ &= \boldsymbol{p}^T \sum\nolimits_{Ci} \boldsymbol{p} \end{aligned} \tag{16}$$

となる．ただし，

$$J_{Ci} = \sum_{j=1}^{J} B_i(y_{1j})\mu(z_j) \tag{17}$$

$$\overline{y_i} = \frac{\sum_{j=1}^{J} B_i(y_{1j})\mu(z_j)\cdot y_{2j}}{J_{Ci}} \tag{18}$$

$$\sum\nolimits_{Ci} = \frac{1}{J_{Ci}} \sum_{j=1}^{J} B_i(y_{1j})\mu(z_j)(\boldsymbol{x}_j - \overline{\boldsymbol{x}})(\boldsymbol{x}_j - \overline{\boldsymbol{x}})^T \tag{19}$$

$$\overline{\boldsymbol{x}} = \frac{\sum_{j=1}^{J} B_i(y_{1j})\mu(z_j)\cdot \boldsymbol{x}_j}{J_{Ci}} \tag{20}$$

である．一方，ファジィクラス$\overline{C}$の$\overline{y_2}$(クラスC内の平均)からの変動を

$$\begin{aligned} \sigma_{\overline{C}i}^2 &= \frac{1}{J - J_{Ci}} \sum_{j=1}^{J} B_i(y_{1j})(1-\mu(z_j))(y_{2j} - \overline{y_2})^2 \\ &= \boldsymbol{p}^T \sum\nolimits_{\overline{C}i} \boldsymbol{p} \end{aligned} \tag{21}$$

とする．ただし，

$$\begin{aligned} \sum\nolimits_{\overline{C}i} &= \frac{1}{J - J_{Ci}} \sum_{j=1}^{J} B_i(y_{1j})(1-\mu(z_j))\cdot \\ &\quad (\boldsymbol{x}_j - \overline{\boldsymbol{x}})(\boldsymbol{x}_j - \overline{\boldsymbol{x}})^T \end{aligned} \tag{22}$$

である．ファジィ集合B_iにおけるクラスC内の分散(σ_{Ci}^2)を小さくし，一方でクラス$\overline{C}$のy_{2j}ができるだけ$\overline{y_2}$(クラスC内の平均)から離れるような$\boldsymbol{p}$を求める．ただし，射影後の関数は大まかには単峰形，単調増加，または単調減少であると仮定する．評価関数を次式で与える．

$$F(\boldsymbol{p}) = \frac{\boldsymbol{p}^T \sum\nolimits_{\overline{C}i} \boldsymbol{p}}{\boldsymbol{p}^T \sum\nolimits_{Ci} \boldsymbol{p}} \tag{23}$$

$F(\boldsymbol{p})$の最大化問題は

$$\sum\nolimits_{\overline{C}i} \boldsymbol{p} = \lambda \sum\nolimits_{Ci} \boldsymbol{p} \tag{24}$$

の固有値問題に帰着される．この最大固有値に対応する固有ベクトルが求めるべき方向ベクトル$\boldsymbol{p}$である．

以上の手順をまとめると以下のようになる．

1. すべてのデータ$(\boldsymbol{x}_j,z_j)$を対象に($\forall i,j$について$B_i(\boldsymbol{x}_j)=1$として)固有値法による射影y_{1j}を求める．

2. (y_{1j},z_j)に対して(13)式のスプライン関数(ただし1変数で

ある) と (14) 式の学習則により近似する.

3. (2)〜(5) 式より (1) 式の獲得情報量が最大となる B-スプライン $B_{1i}(y_1)$ を決定する.

4. $B_{1i}(y_1)$ を用いて固有値法により射影 y_{2j} を求める (ファジィ集合 B_{1i} のデータのみを対象とし射影 y_{2j} を求める).

5. (y_{2j}, z_j) に対して (13) 式の 2 変数スプライン関数と (14) 式の学習則により近似する.

6. さらに高次元のスプライン関数で近似する場合は 3.〜5. を繰り返す.

通常のスプライン関数による関数近似法ではすべての変数を考慮し, 各々の座標軸上に節点を定めるので, 入力変数の数が増えるとパラメータ数が膨大となる. 提案法では射影された低次元空間のデータに対してスプライン関数で近似を行うので, パラメータ数が少なくなる. B-スプラインをメンバシップ関数として考えるとスプライン関数はファジィ推論ルールの集合に対応しているので, パラメータ数の削減はファジィ制御においては, ルール数を削減することになる.

4. 数値計算例

4.1 数値例 1

一様乱数 ([0,1]) によりデータ x_j $(n = 4, j = 1, \cdots, 200)$ を作成し, 人工的に作成した応答変量 z_j の 200 個のデータ (図 1) に対する近似関数を求める. まず, 説明変量 x_j を射影追跡 (固有値法) によって, 1 次元の直線に射影し得られた射影 y_{1j} を 2 次の B-スプラインをメンバシップ関数として用いてファジィ集合に分割した. 計算結果を表 1 に示す. p =(0.492,0.509,0.506,0.491) となった.

表 1 パラメータ数 (B-スプライン係数の数) に対するＡＩＣの値

パラメータ数	7	8	9	10
ＡＩＣ	-504.69	-613.59	-660.28	-642.59

表 1 に示すようにパラメータ数 9 のとき AIC が最小となっている. 図 1は説明変量 (x_1, x_2) と応答変量 z を示す. どの説明変量をとっても同様であった. 図 2の結果は, (14) 式の学習則を適用するときに (15) 式の方向ベクトル p も同時に学習した結果である. ただし, 節点 (○) を左端点, 右端点それぞれ 3 個ずつ重ねていて, その他の節点は前述の文献[8]による面積法で決められている. p =(0.492,0.510,0.506,0.491) と得られた. また, 横軸には固有ベクトルにより得られた射影 y をとり, 縦軸は出力 z をとっている.

4.2 数値例 2

ここでも, 人工的に作成した 100 件の二次元データ $(n = 2, j = 1, \cdots, 100)$ を用いた. 入力変数は x_1, x_2, 出力変数は z である. この二次元データを射影追跡 (固有値法) により, 一次元に射影する. 得られた射影を B-スプライン関数をメンバシップ関数として, ファジィ集合に分割する. その中で獲得情報量が一番大きいファジィ集合のデータのみに対する射影ベクトルを求め, B-スプラインでさらにファジィ分割を行う. 得られた B-スプラインを用いて (14) 式の学習則を適用した. 1 回目の射影データに対する計算結果を表 2 に示す.

表 2 パラメータ数 (B-スプライン係数の数) に対するＡＩＣの値

パラメータ数	8	9	10	11
ＡＩＣ	-178.58	-182.30	-184.98	-170.34

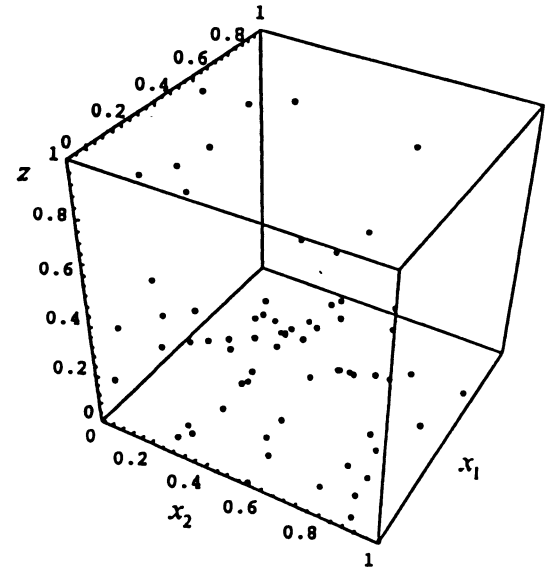


図 1 説明変量 (x_1, x_2) と応答変量 z のプロット

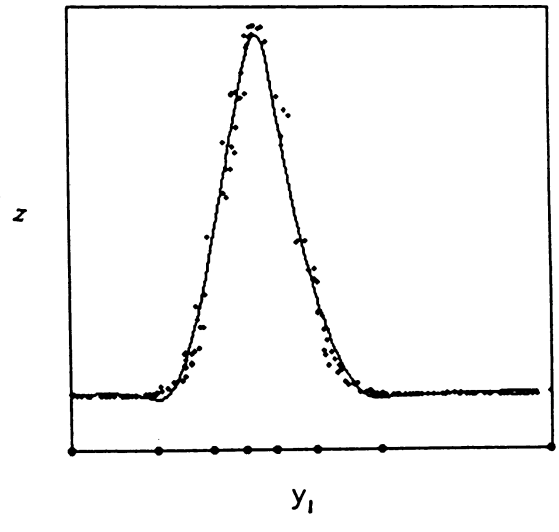


図 2 指定した折れ線の面積比により節点を配置したスプライン関数 (学習後)

表 2 に示すようにパラメータ数 10 のとき AIC が最小となっている. 一回目の射影に用いた固有ベクトルは p_1=(0.696,0.718) で二回目の射影に用いた固有ベクトルは p_2=(-0.152,0.861) である. 得られた射影後のデータを図 3と図 4に示している. 図 3は全データを用いて固有値法により求めた射影 y_1 を横軸にとり, 縦軸に出力 z をとっている. 図 3の中央部分が十分近似できていない. 図 4では射影 y_1 をファジィ集合で分割し, 獲得情報量 G が一番大きい図 3の中央部分のファジィ集合 B_{15} に対して固有値法を適用した結果である. 求めた固有ベクトルによる射影 y_2 を横軸にとり縦軸にデータの出力 z をとっている. この数値例から得られたファジィルールの概略を図 5に示す.

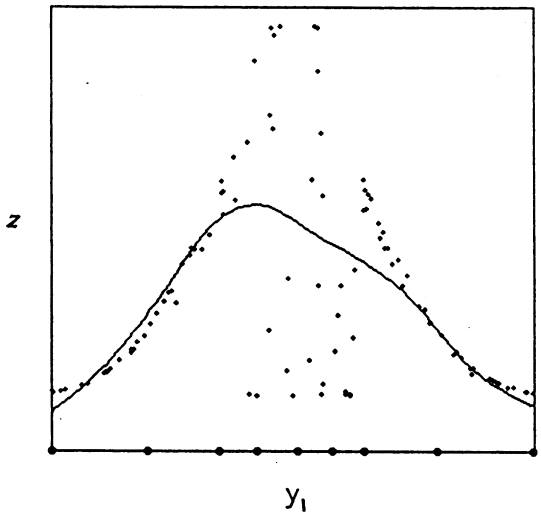


図 3 全データに対する 1 回目の射影

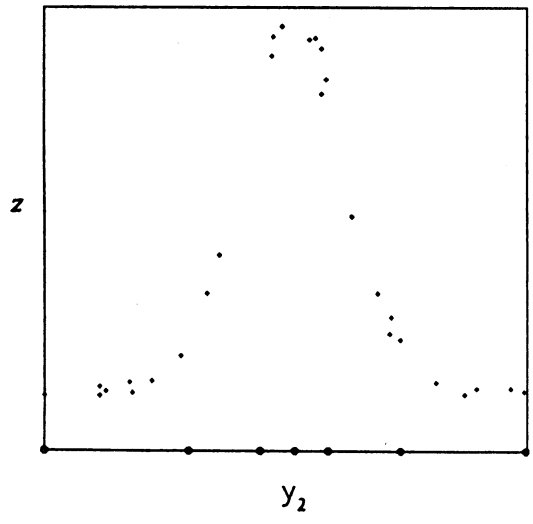


図 4 獲得情報量が最大のファジィ集合内のデータに対する射影

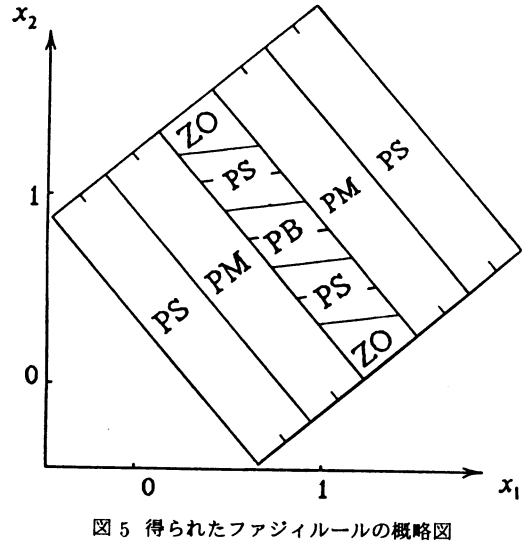


図 5 得られたファジィルールの概略図

5. おわりに

本研究では, ファジィＩＤ３と固有値法による射影追跡回帰を用いて多次元データのもとにある関数をできるだけ簡単な木構造に表現する方法を提案した.Friedman らによる射影追跡回帰[2]はデータおよび残差に対する一次元的な直線への射影を繰り返す方法であるのに対して, 本提案法は射影データのファジィ部分集合に対する射影を繰り返すものである. 得られた決定木はファジィルールに対応しているので, 多次元のルールテーブルを低次元化しルール数を削減するのに用いることができる. 射影と決定木からわかりやすいファジィルール (言語的表現) を得るためには, 射影軸に対する主成分分析のような解釈も必要と思われる. また実用的な現実問題に本手法を応用してその有効性を確認することが今後の課題である.

参考文献

1) J.H.Friedman and J.W.Tukey : A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis ; IEEE Trans.Comput, Vol.C-23, pp.881-889(1974)

2) J.H.Friedman and W.Stuetzle :Projection pursuit regression ; J.Amer.Statist.Assoc., Vol.76, No.376, pp.817-823(1981)

3) J.R.Quinlan :Induction of decision tree, Machine Learning, Vol.1, pp.81-106(1986)

4) R.Forsyth, R.Rada : Machine Learning, Applications in Expert Systems and Information Retrieval, Ellis Horwood Limited(1991)

5) 馬野他 : ＩＤ３に基づくファジィ決定木の油中ガス分析診断への適用について, Proceedings of the Fourth Intelligent FA Symposium, pp.201-204(1993)

6) 田中, 佐野 :一次遅れ+むだ時間系におけるファジィコントローラのパラメータ調整公式, 日本ファジィ学会誌, Vol.3, No.3, pp.583-591(1991)

7) 市田, 吉本 : スプライン関数とその応用, 教育出版 (1979)

8) 吉本 :ファジィ概念を用いたスプライン関数の節点の決定, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.9, pp.1682-1690(1994)

9) 坂本, 石黒, 北川 : 情報量統計学, 共立出版 (1983)

[連絡先]
〒593 大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学工学部経営工学科
市橋　秀友
TEL : 0722-52-1161
FAX : 0722-59-3340

WC1-4

オブジェクト指向に基づく自然言語問い合わせによる印象検索システム

An Object-Oriented Retrieval System by Natural Language Query Including Impression Words.

城田暁伸* 前田 博**
Akinobu Shirota Hiroshi Maeda

*（株）東芝 TOSHIBA
**九州工業大学 Kyushu Institute of Technology

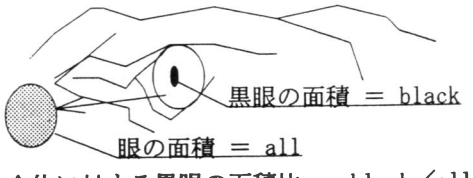
Abstract— This paper relates to a database retrieval system which is able to use natural language query. In order to deal with a query including impression words, we propose "impression-factor" which are characterized by some attributes, and then give relation between impression-factor and some attributes by using examples given by an user. This retrieval system is composed of three parts, "natural language interface part", "retrieval processing part" and "relation making part". The retrieval processing part is designed on the basis of object-oriented approach.

1．はじめに

人間に対して柔軟なインタフェースが必要とされるコンピュータ関連技術として，データベース検索システムが挙げられる．データベース内に記録された各種データを人間が参照したいと考えた時，人間とシステムとの間でコミュニケーションを持たねばならない．従来はどちらかというと人間側がコンピュータのことを理解し，歩み寄っていったといえるであろう．その結果，システムの使い易さに問題があった。

人間が使いやすい知的データベース検索システムでは，円滑に人間とコミュニケーションを行うために，人間が日常生活において用いる印象語等を解釈できる自然言語インタフェースが望ましいと考えられる．

そこで本稿では，印象語を含んだ問い合わせにも対応可能な，自然言語問い合わせ検索システム（印象検索システム）をオブジェクト指向アップローチによって開発する．



全体に対する黒眼の面積比 ＝ black／all

特徴づけ

印象語：白眼がち

図１．物理的特徴量例

本システムでは，恐竜データベースを想定し，ユーザによる例示によって属性と印象語を含む言葉との関係づけを行う．図１では，印象語「白目がち」に関係づけられた属性「眼全体に対する黒目の面積比」を表している．

この後，２章でシステムの概略を示し，３章では本システムが印象情報を取り扱うために定義した機能等を示す．４章では Sun spark statin 10 上で行った，本システムプロトタイプの動作実例を示す．

2．システム概要

本システムは，自然言語形式の問い合わせ文からデータベース検索に必要な情報を抽出する「自然言語インタフェース部」，そこで得られた情報を元に実際の検索処理を実行する「検索処理部」，印象語を含んだ問い合わせに対応するための「印象素－データ関係作成部」によって構成されている（図２）

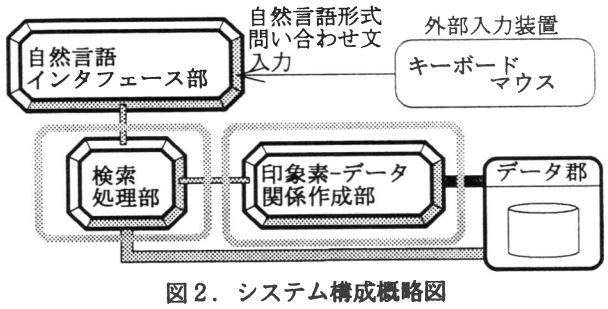


図２．システム構成概略図

さらに「検索処理部」は，検索作業を行う際に必要となるデータを読み込む「データ読み込み部」，それらのデータと検索要求とのマッチング度を算出する「適合度算出部」，そして検索結果を出力する「出力部」によって構成される．この「検索処理部」は，以下のような考えに基づいて設計した．

一般に，入力される問い合わせ文に対して，次のⅠ～Ⅲの処理が必要である．

Ⅰ．「自然言語インタフェース部」で得られた検索情報に対応する対象の属性を決定し，属性値（データ）を収集する．
Ⅱ．収集したデータに対する検索条件を表すメンバシップ関数の適合度を算出する．
Ⅲ．Ⅱで得られた結果と検索条件から，検索結果として要求されているものをユーザに提示する．

以上Ⅰ～Ⅲの処理を行う「検索処理部」をオブジェクト指向を用いて設計した．

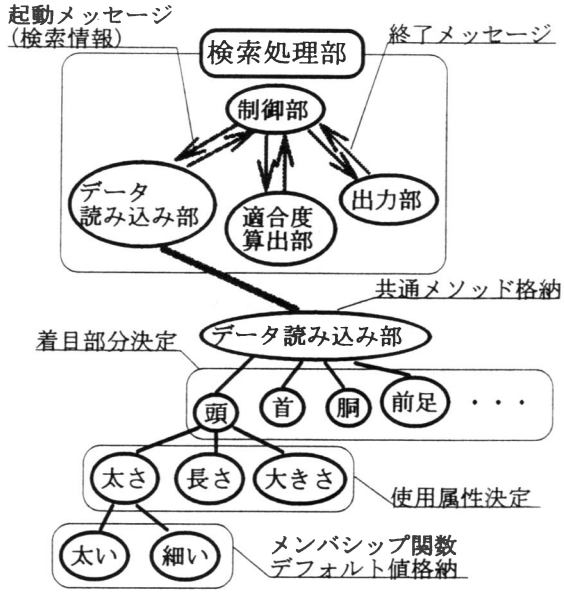


図３．検索処理部の構造例

上の図３のように，「検索処理部」内の各処理部は，ⅠからⅢのいずれかの処理を行うオブジェクトが集合することで構成されている．例えば，Ⅰの処理内容に対応する「データ読み込み部」では，検索属性情報Ｔ：［文字列］によって，検索処理を実行するオブジェクトの大まかな絞り込みすなわち着目部分決定を行い，ファジィ集合情報Ｆ：［文字列］をもとに，使用する属性の決定を行う．このように「データ読み込み部」では，オブジェクト指向を用い，恐竜の体の部分的特徴を表す言葉によって，処理を階層構造化している．

３．印象情報処理

3.1. 印象素，印象語の定義

本システムでは，問い合わせ文中の印象語に対応するために，印象素と呼ぶものを定義した．

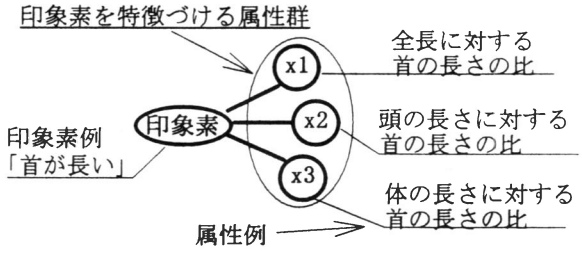


図４．印象素と属性

印象素は，物理的特徴量をはじめとする対象の属性と，直接関係を持つ言葉（印象語を含む）である．図４は，印象素「首が長い」と属性との関係を示したものである．印象素「首が長い」は，「全長に対する首の長さの割合」等の属性によって特徴づけられている．さらに，幾つかの印象その上位概念として印象後が定義される．

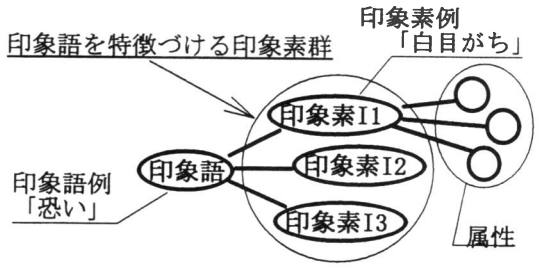


図５．印象語と印象素の関係

図５は印象語「恐い」を特徴づける印象素（「白目がち」などの身体的特徴を表す言葉）との関係を示している．従って，印象素は抽象的表現の言葉を特徴づける働きも担う．つまり，印象素と関係を持つ印象語は，印象素を特徴づける属性によって，間接的に特徴づけられる（図６）．このような設定によって，印象語に対するユーザ各個人の認識の異なりかた（ユーザ視点という）を，印象素と属性，印象素と印象語といった各要素間の組合せ変更によって実現できる．

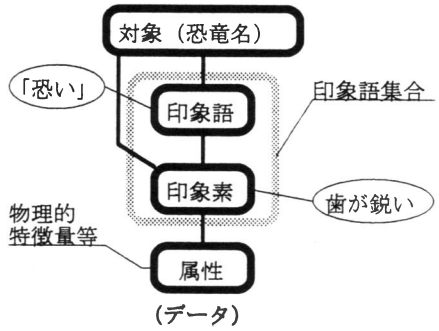


図６．属性，印象素，印象語，対象の関係

3.2. 検索処理のためのオブジェクト化

本システムでは，印象素，そして印象語をオブジェクトと考える．それらの言葉で特徴づけられる対象（恐竜）もオブジェクトと考える．ただし，オブジェクトとなる対象は，学術的分類上でそれの属するグループを代表することが可能で，一般的に認知度が高いと思われる恐竜である．このような対象を代表対象と呼び，それに対応するものが代表対象オブジェクトである．これらのオブジェクトが，互いに数種類のリンクによってつながりを持つことで，人間の思考パターンを模す．

3.3. 各オブジェクト間のリンク設定とその意味

印象素（または印象語）オブジェクトから代表対象オブジェクトに向かうリンクを知名度リンクと呼ぶ．このリンクによって「首が長い」なら「ブラキオサウルス」といった，ある言葉から一つの対象が連想される人間の思考パターンを実現する．

逆に代表対象オブジェクトから印象素オブジェクトに向かうリンクを特徴リンクと呼ぶ．「ブラキオサウルス」ならば「頭が小さい」「首が長い」といったある対象からその特徴点が連想される人間の思考パターンを，このリンクによって実現する．

印象素オブジェクトと印象語オブジェクトとをつなぐリンクを連想リンクと呼び，「歯がとがっている」，「眼が鋭い」ならば「恐い」という連想を，このリンクで実現する．

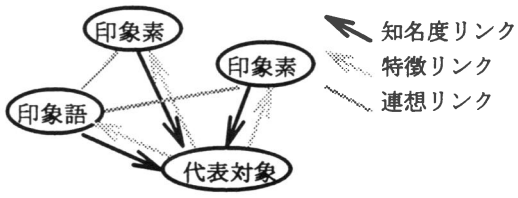


図７．オブジェクト間の各種リンク

3.4. 印象素－属性関係作成

将来的に本システムは，システム視点（＝ユーザ視点）の自動変更を目指している．本システムではその一環として，「印象素－属性関係作成部」を用意した．

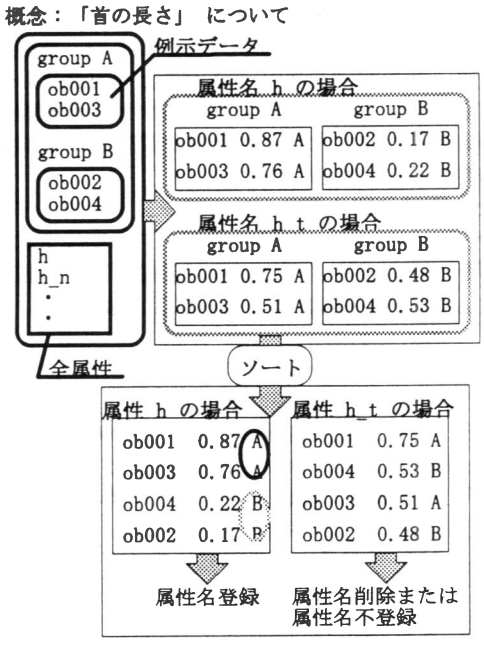


図８．印象素－属性関係作成例

ある対象同士の外観が似ているならば，それらに共通する特徴があると考えられる．するとそれらの物理的特徴量においても近似値をとるか，値的にグループを形成することが予想される．そこで，「印象素－属性関係作成部」で，ユーザ（システム作成者など）入力による例示をもとに，各属性での対象間の関係より，印象素と属性との関係を自動作成する．

例えば「首の長さ」について，「首が長い」恐竜と，「首が短い」恐竜とを双方複数個，グループ別に入力する（例示入力）．その後，各属性において属性値（物理的特徴量）の大小関係を利用し，対象を昇順（降順）に並べかえる．この時，対象がグループごとに分割されていれば，その属性は例示された印象素を特徴づける可能性が高いと考える（図８．属性hの場合）．

「印象素－データ関係作成部」で得られた結果として，例えば印象素「頭が大きい」に関係づけられた属性は，「頭部の長さと全長の比」や「頭部の長さと首部の長さとの比」などである．

印象素オブジェクトは，「検索処理部」の「データ読み込み部」に属する．システムに問い合わせ文が入力されれば，その中の検索条件に対応する印象素オブジェクトが，処理に必要な属性値を収集する．

4．動作例

印象情報検索システムのプロトタイプを，「Sun spark station 10」上で「GUNU C++」を用いて作成した．その動作例を以下に示す．

問い合わせ文「頭が大きい恐竜」を例に，検索処理の説明を行っていく．

「自然言語インタフェース部」において，問い合わせ文は「Ｔ：頭」「Ｆ：大きい」「Ｅ：恐竜」といった検索情報に変換され，「検索処理部」に送られる．

「Ｔ：頭」と「Ｆ：大きい」の二つの情報によって，まず「データ読み込み部」に属するオブジェクトが検索処理に必要なデータを用意する．この場合，「頭が大きい」オブジェクトが，属性登録ファイル及び代表対象識別子，全対象名登録ファイルなどを参考に「必要データファイル」と「必要データファイル名登録ファイル」を作成する．

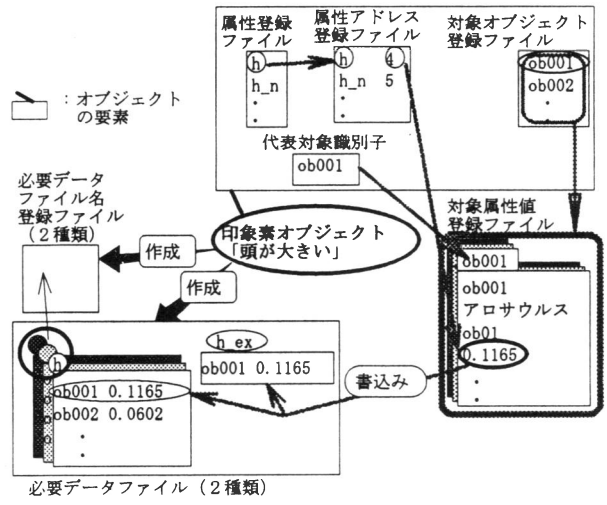


図９．印象素オブジェクトの働き

次に「適合度算出部」では，各属性ごとに作成された「必要データファイル」内のデータが，ユーザの要求に

どれほど適合しているかを調べるため，例えば次のような計算を行って，適合度（または類似度）を算出する．

この場合，代表対象の属性値を基準値として，属性ごとに基準値と他の恐竜の属性値との距離を算出している（式(3.1)）．すなわち，対基準属性値間距離をファジィ類似度と考えている．

属性 i において，基準値となる代表対象の属性値 ex_i と，対象 n の属性値 $x_{n,i}$ との距離を$dis_{n,i}$とし，この時の類似度を $mat_{n,i}$ とすると，

$$\begin{cases} dis_{n,i} = ex_i - x_{n,i} \\ mat_{n,i} = 1.0 - dis_{n,i} \end{cases} \qquad (3.1)$$

i $(i = 1,2,...,m)$: 属性，

n $(n = 1,2,...)$: 対象数

なお，各属性における最大属性値を用い，各属性値を正規化している（図１０の①，②）．得られた各々の結果は対象の識別子とともに「結果ファイル」内に書き込まれる．また，複数作成される「結果ファイル」の名前を記録した「結果ファイル名登録ファイル」もここで作成される．

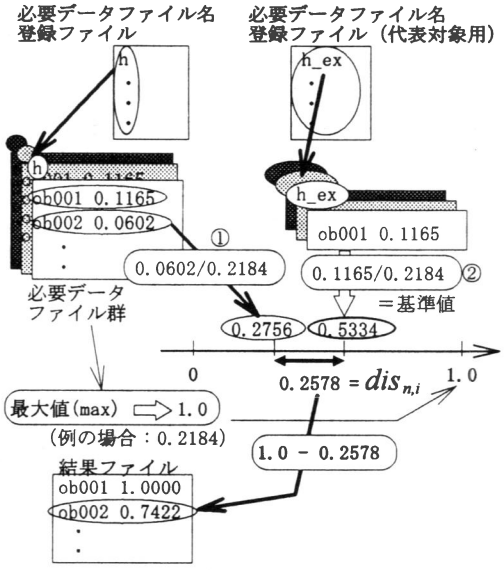


図１０．「適合度算出部」の動作

「出力部」では，複数の「結果ファイル」内のデータを各恐竜ごとに統合して，最終類似度（適合度）を算出する．今回は全ての属性を対等な関係とし，統合する際の重みw_iは全て＂1＂とした（式(3.2)）．

$$mat_n = \sum_{i=1}^{m} mat_{n,i} \cdot w_i \qquad (3.2)$$

システムが出力した検索結果を図１１に示す．結果から，基準値となった代表対象の恐竜が一番類似度が高く，その後に例示で同じグループとされた恐竜が続いている．

後に続くのは，代表対象より頭が大きい，小さいに関わらず，物理的特徴量値的に近い値をとる恐竜である．この結果から，身体的特徴が見た目に似ているもの同士が，物理的特徴量値においても近似値をとっていることが確認できたと考えてよいであろう．

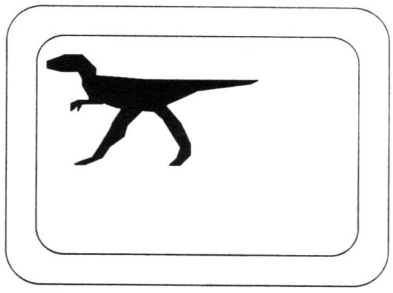


図１１．システム動作結果例

各属性を統合した結果より，一番類似度が高い恐竜，つまり代表対象にあたる恐竜を検索結果として出力するが，これはあくまでもサンプル結果表示である．「こんな感じの恐竜ですか？」と確認をとった後に，ユーザとの対話で微調整を行うことを考えている．

5．おわりに

今回提案した印象検索システムは，例示を用いた印象素－属性関係作成方法を取り入れることで，積極的かつ柔軟にユーザの視点を取り入れることを可能にした．しかし，現在用いている方法では，多次元物理的特徴量を扱う際に疑問が残るため，クラスタリングの面からの改良が必要であると考えられる．

また，今回は印象素など各オブジェクト間にリンク設定を行うことで，人間の思考パターンの実現を試みたが，これらリンクの設定変更により，現段階より整理されたオブジェクト間関係設定が可能となると思われる．

参考文献

[1] 日本ファジィ学会編，講座ファジィ９ ファジィ・データベースと情報検索，日刊工業新聞社

[2] Kamran Parsaye 他共著，知的データベース －オブジェクト指向・演繹・ハイパーメディアー，オーム社

[3] 井口征士 他共著，感性情報処理，オーム社

[4] ATR国際電気通信基礎技術研究所 編，視聴覚情報科学，オーム社

[5] 中山万希志 他，＂ファジィ理論を用いた印象言語による顔画像検索システム＂，日本ファジィ学会誌，Vol.6，No5，974－983，1994

問い合わせ先

北九州市戸畑区仙水町１－１

九州工業大学工学部情報工学教室

前田博

TEL ：(093)884-3248

Fax：(093)871-5835

WC2-1

多入力システムのファジィルール自動生成法

An Automatic Generation Method of Fuzzy Reasoning Rules for Multi-Input System

木村哲也　清水　正　加藤信之　牧野　弘
Tetsuya KIMURA　Tadashi SHIMIZU　Nobuyuki KATO　Hiroshi MAKINO
富士ゼロックス株式会社
FUJI XEROX Co., Ltd.

Abstract － **The number of fuzzy rules generated by a conventional automatic fuzzy rule generation method increases exponentially according to the number of inputs of a system. In this paper, we propose a useful method to generate fuzzy rules for a multi-input system automatically. The proposed method consists of three basic procedures: 1) Inputs and outputs are grouped in purposes, and fuzzy reasoning rules are generated in each group. 2) The reasoning values in groups are unified. 3) The ineffective rules are removed in view of the grade in premise and the value in consequence.**

1　はじめに

ファジィルールの自動生成法[1-3]では、対象の入力を全て組み合せて生成するため、入力数の増加に伴ってルール数が指数関数的に増加する。例えば、後述する14入力2出力の場合は$2^{14}\times2=32,768$のルールが必要となり、自動生成が極めて困難である。本報告では、1)システムの入出力項目をそれぞれ物理的に関連する複数のグループに分割し、グループ毎にルールを生成、2)グループ毎の推論値を統合、3)ルールの適合度の和と後件部の値からルールを削除、の手順でルール数を抑える手法を提案する。カラー複写機用原稿読取装置の光学ユニットに内蔵されているCharge Coupled Device(以下CCD)センサの位置調整[4]用ファジィルールの自動生成を例に、本手法の有効性を検証する。

2　ファジィルールの自動生成法

2.1　グルーピングとルールの自動生成

対象システムの入出力関係が各々分かっている場合、全入出力項目をそれぞれ物理的に関連するグループに分けることが出来る。分割したグループ毎にルールを自動生成することにより、ファジィルール数を少なくすることができる。例えば、14入力を6グループに分けた場合、1つのグループの入力数は3程度となり、全体のルール数は$2^3\times6=48$程度に減少する。

2.2　各グループの統合法

ファジィ推論は簡略化法[1]を用い、隣り合う前件部メンバシップ関数のグレードの和を常に1とすると、グループの推論値は式(1)、(2)、(3)で表される。ここで、R_iはi番目のルール($i=1,\cdots,r$)、x_pは入力変数($p=1,\cdots,s$)、y_qは出力変数($q=1,\cdots,t$)、A_{ip}はメンバシップ関数、ω_{iq}は後件部実数値、μ_iはR_iの前件部適合度、$\bullet$は代数積、mはグループ番号($m=1,\cdots,u_q$)、v_{qm}はグループにおけるルール数である。式(3)より、各グループの推論値y_{qm}の和は、y_qに統合されるグループ数u_qで除算されていることから、グループの推論値が均等に出力y_qへ反映されている。

$$R_i: \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and...and } x_s \text{ is } A_{is} \text{ then } y_1=\omega_{i1} \text{ and...and } y_t=\omega_{it} \quad (i=1,2,\cdots,r) \tag{1}$$

$$\mu_i=A_{i1}(x_1)\bullet A_{i2}(x_2)\bullet\cdots\bullet A_{is}(x_s) \tag{2}$$

$$y_q=\frac{\sum_{i=1}^{r}\mu_i\omega_{iq}}{\sum_{i=1}^{r}\mu_i}=\frac{\sum_{m=1}^{u_q}\sum_{n=1}^{v_{qm}}\mu_n\omega_{nq}}{\sum_{m=1}^{u_q}\sum_{n=1}^{v_{qm}}\mu_n}=\frac{\sum_{m=1}^{u_q}y_{qm}}{u_q} \tag{3}$$

2.3　出力に与える影響が少ないルールの削除

式(3)により、入力に対する適合度μが小さく、さらに後件部実数値ωが小さなルールほど出力へ寄与する度合いが少ない。従って、以下の手順でルールを削除する。まず、全入力空間に渡る入力に対する各ルールのμの和を求める。次に、μの和が小さな値を示すルールを選択し、推論結果があらかじめ設定した推論誤差などの評価基準内であれば、選択した中からμの和とωの積が小さなルールを順に削除する。

3　検証実験

カラー複写機の原稿読取装置用光学ユニットに内蔵されているCCDセンサの位置調整を例に、本生成法の手順を説明する。図1に示すカラーCCDセンサの位置調整は、セ

ンサの左右を光軸方向に移動させ、左右のRed、Green、Blue(以下RGBと略す)3色のピントと、左右のR-G、G-B、B-R間の各ピント差と、左右の倍率誤差の計14の調整項目を目標値に合わせる、14入力2出力のシステムである。従って、単純に入力を全て組み合せる生成法では、最低で$2^{14}\times 2$の32,768ルールが必要となる。

[1-1):グルーピング]

14入力2出力を物理的に関連のある以下の六つのグループに分割する。CCDセンサ左側の①ピント調整、②ピント差調整、③倍率誤差調整と、CCDセンサ右側の④ピント調整、⑤ピント差調整、⑥倍率誤差調整。

[1-2):グループ毎のルール自動生成]

基準データセットを作成するために、CCDセンサを光軸方向へ移動したときの調整項目の実測値を求め、目標とするCCDセンサの位置を決める。次に、CCDセンサの任意の位置と目標までの差を出力、その位置での調整項目の値を入力として、基準データセットを作成する。基準データセットをもとに後件部実数値をチューニングし、誤差が目標を満たさない場合は前件部メンバシップ関数の分割数をはじめの2分割から逐次増やしていく。今回、後件部のチューニングにはファジィ-ニューラルネットワーク[5]を用い、前件部メンバシップ関数は2分割で十分であった。

[2):グループ毎の推論値の統合]

図2のようにグループ①②③を出力y_1に、同様にグループ④⑤⑥を出力y_2に統合した。式(3)における$v_{11}=v_{21}=2$、$v_{12}=v_{13}=v_{22}=v_{23}=8$の計36ルールを生成した。

[3):ルールの削除]

調整項目測定、推論、CCDセンサ移動の一連の動作を調整1回と定義する。CCDセンサの全移動範囲の入力に対する各ルールのμの和を求め、削除前と同等の調整回数で目標値に入っている間、μの和とωの積が小さな8ルールを順に削除した。

4 実験結果

本手法で生成された28ルール、削除前の36ルール、熟練者の知識をもとに試行錯誤で生成した108ルール[4]による各々の調整回数を比較して図3に示す。本手法で生成したルールによる調整回数は、文献[4]と比較して少なく、削除前と同等であり、有効性が検証された。

5 まとめ

多入力システムのファジィルール自動生成法として、入出力項目のグルーピング、グループ毎のルール自動生成、統合、出力へ寄与する度合いが少ないルールの削除方法を提案し、14入力2出力のシステムで有効性を検証した。

参考文献

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

[2] 荒木、野村、林、若見:ファジィルールを逐次的に生成するファジィモデリングの一提案、日本ファジィ学会誌、Vol.4、No.4、pp.722-732(1992)

[3] 増田、夜久:ユニット生成機能を持つニューラルネットワークによるファジィ推論ファジィルールの獲得手法、日本ファジィ学会誌、Vol.5、No.2、pp.348-357(1993)

[4] 加藤、清水、山田、牧野:光学自動調整へのファジィ理論の応用、第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.461-464(1992)

[5] 堀川、古橋、大熊、内川:ニューラルネットワークによる学習型ファジィ制御器、計測自動制御学会論文集、Vol.27、No.2、pp.208-215(1991)

連絡先

〒259-01 神奈川県足柄上郡中井町境430
グリーンテクなかい
富士ゼロックス(株) 総合研究所
生産技術研究所
木村哲也 TEL 0465-80-2390
FAX 0465-81-8967
E-mail kimura@rme.crl.fujixerox.co.jp

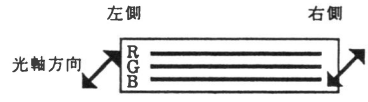


図1 カラーCCDセンサ

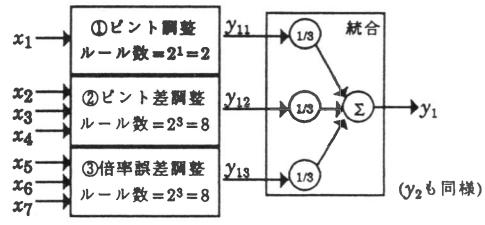


図2 生成したルールとグループの統合(出力1)

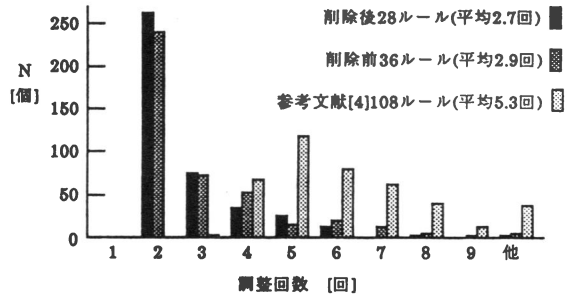


図3 カラーCCDセンサの調整回数分布(サンプル数441)

WC2-2

状況データベース構築のための一考察
A study on construction of situation database

藤本太郎 FUJIMOTO Taro
菅野道夫 SUGENO Michio

東京工業大学 システム科学専攻
Department of Systems science Tokyo Institute of Technology

Abstract : Man can supply the shotege of information from another people to make up by situation(context). We attention this process and propose construction **Situation Database** and implement it in*natural language understanding system.* Situation Database contains *genre data, 5W1H data.* We also propose **genre** and **5W1H model**as a context information.
We try to use this Situation Database on *Newspaper Article Recognizing System*and evaluate the effect of using Situation Database. We can show an advantage of using situation database which compencetes a lack of 5W1H information and which correct defective summary.

1 はじめに

人間は外界から言語情報を受けとる際に、今までの経験や知識、社会の制度・文化などの情報や文脈からの情報を加えることによって情報発信者からの不十分な情報から必要とする情報を得ることができる。本稿ではこのプロセスに着目し、計算機上に実装するために「状況データベース」を構築することを最終目的として、その可能性について考察する。

2 状況データベースとは

本稿では従来の人間可読辞書・機械可読辞書 (2.1節) の情報に加えて状況データ (2.3節) を付加したものを「状況データベース」と定義する。

提案する状況データベースは従来 Chomsky 的統語論によって切り捨てられてきた「言語が使用される状況においての意味」を理解するために、Haliiday が提唱する機能文法 [1] を用いる。

2.1 従来の辞書

本論文で提案する状況データベースの特徴を示すために、従来の辞書との比較をする。

人間可読辞書 人間が可読な辞書は情報量が限られており、機械に処理させる上で意味がほとんどない場合が多い。また、状況の判断は読者の経験に依存しているため省かれている。

機械可読辞書 現在、機械可読な辞書として、人間可読辞書の CD-ROM 版や、(株) 日本電子化辞書研究所の EDR 辞書 [2] のような機械で使用することを前提としたものがある。

(株) 日本電子化辞書研究所の EDR 辞書 [2] は人間可読辞書に比べると、表層的な情報と意味的な情報を分離し、概念と単語の対応関係をつけてあるなど、機械で言語処理をする上での工夫がなされている。

しかし、一つの単語に多くの意味や概念が振ってあるだけであり、それだけでは意味を特定することはできない。そこで、状況によって意味を特定することを考え、意味特定に用いる状況に関するデータで構成されるデータベースを提案する。

2.2 状況データベースの概要

本節では提案する状況データベースの概要について述べる。状況データベースをシステムとしてみた時、入力がテクスト、出力がコンテクストを付加したテクストになることが望ましい (図 1)。

文に付加すべきコンテクスト情報とは以下のものを指す。

- 文脈において暗黙に了解されている知識
- 文章を理解するために必要な情報 [1]
  - フィールド、モード、テナー
  - ジャンル

文章中から文脈情報を取り出すテンプレートとして広く用いられている 5W1H を用いる。Haliiday によってフィールド、モード、テナー、ジャンルがコンテクスト

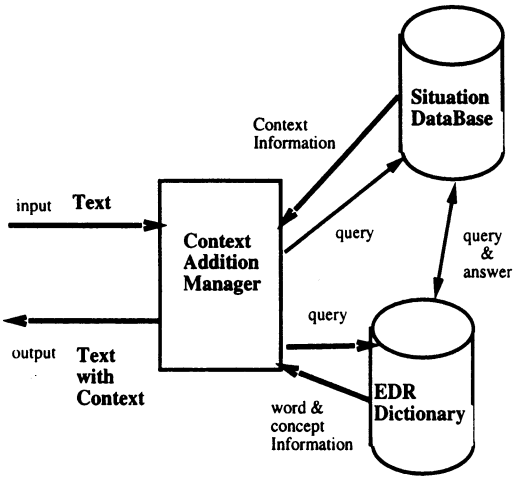


図 1: システムの概要: システムの入力：テクスト、出力：コンテクストを付加したテクストとなる。単語、概念の情報は EDR 辞書に問い合わせ、状況の情報を状況データベースに問い合わせる。

になり得ることが示され [1]、竹田 [4] によってジャンル選択可能性が指摘されている。

2.3 状況データベースの内容

状況データベースの内容として、以下に挙げるものを考えている。

- ジャンルデータ
  - 5W1H データ
    - 5W1H テンプレート
    - 要約形式
    - 5W1H 同定規則
  - ジャンルを特定できるキーワード

2.4 5W1H モデル

状況データベースのの概念的枠組として 5W1H モデルを提案する。5W1H モデルは機能文法でいう「非文」においても、構造的な間違いがあっても概念的な部分では発話者は間違っていない (テクストの統一性 [1]) という仮定を用いている。

また、この 5W1H が次に入力される文の理解の手助けになるコンテクストになると期待できる。本稿では EDR 辞書の概念関係表現 [2] から文章中の単語間の概念の関係 (概念チャンク) を抽出し、5W1H テンプレートにマッチさせることにより同定する。

2.5 ファジィ理論の状況データベースへの適用

状況データベースのさまざまなレベルの情報を統合する手法としてファジィを用いる。ファジィを用いる利点として、

- 言語や数値などの異なる情報を統合することが可能。
- 不適合性の原理と呼ばれるシステムが複雑になると詳細な記述をしてもあまり意味がない [3]。
- 人間はすべての言語を知り、使う訳ではないので、言語の捉え方はあくまでも主観的にならざるを得ない。
- 言語には出現確率は存在するが、言語を確率で表されるかどうかは疑問であるため、ファジィによる主観確率を用いる。

ということが挙げられる。

3 例題：新聞記事理解システム

状況データベースを用いる例題として本稿では新聞記事理解システムを考える。新聞記事理解システムを例題に用いた理由として、新聞は比較的型にはまった自然言語表現を用いているためである。

本章でとり上げる新聞記事理解システムは、図 2 に示すように、表層格情報と概念情報より、ジャンルを同定し、要約文を作っていくものである。まず、ジャンルの特定を行なうことを考える。

3.1 状況データ

3.1.1 新聞記事理解のための 5W1H テンプレート

新聞の記事の多くは報道である。本稿でとり上げている新聞記事理解において用いる 5W1H のテンプレートの例を以下に挙げる。

天災報道

5W1H データ Who null

Where place で導かれた地名の概念を持つ名詞

When time、time-from、time-to で導かれる名詞、時詞

What 天災の概念を持つ名詞

Why null

How null

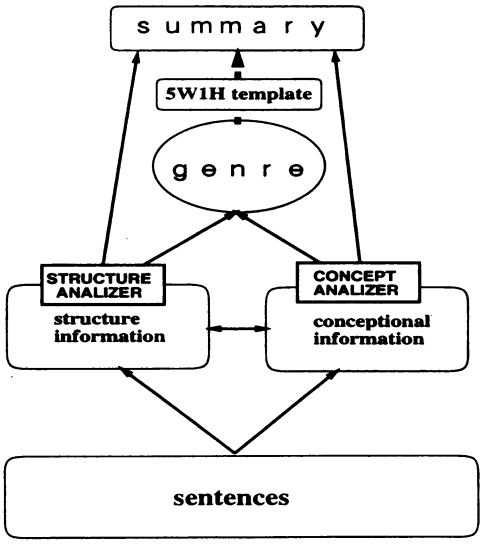


図 2: 新聞記事理解システムの概要: 文章中の形態素情報 (structual information) と概念情報 (conceptional information) からジャンルを特定し、そのジャンルというコンテクストを基に、文章中の言葉の意味を理解（この図では要約）する流れを示す

要約する時のテンプレート 「何時 (When)」に、「何処 (Where)」で「何 (What)」があった。

ジャンルを特定するキーワード 「天災」を上位概念に持つ単語

4 例題のシミュレーション

4.1 手順

処理の流れは以下のようにした。

1. 文を形態素解析する。
2. 表層格解析システムにより
   (a) 相決定
   (b) 文間接続構造決定
3. 概念関係解析システムにより
   (a) 形態素解析の結果から、体言、用言と見做されたものは概念を検索する。
   (b) ジャンル同定
   (c) 概念チャンク作成
   (d) 概念チャンクから 5W1H 同定
4. 2 文間の概念チャンク作成
5. 欠落する 5W1H のスロットを前の文の情報より補完
6. 5W1H モデルから要約文作成

4.2 例文

例文として平成６年１２月２９日（木曜日）朝日新聞東京版１３版 一面のトップの以下の記事をとり上げる。なお、例文１と例文２は連続した文章である。

> **例文１**：二十八日午後九時十九分ごろ、東北、北海道を中心に、三陸沖を震源とする強い地震があった。
>
> **例文２**：気象庁の観測によると、青森県の八戸で震度６ (烈震) を記録したのをはじめ、むつ、青森、盛岡で震度５ (強震)、宮古、大船渡、帯広などで震度４ (中震) を記録した。

4.3 シミュレーション結果

4.3.1 ジャンル決定

例文１内に**地震**という語があり、その概念体系より「天災報道」というジャンルを導き出された。

4.3.2 概念チャンク作成

例文中の体言、用言の概念を基に、概念チャンクを作成する。すべての概念の組について概念関係を調べる。表 1はその抜粋である。

4.3.3 例文１の 5W1H 同定

「天災報道」ジャンルにおいて抽出すべき 5W1H は、Where,When,What である。これらの値は概念チャンクより以下のように導かれる。

Where 概念記述で導かれた単語は「東北」、「北海道」、「中心」、「三陸」、「沖」、「震源」の６つである。ここで、「震源」は上位概念として「～した地点」を持ち、「中心」「沖」の上位概念は「場所」である。そこで、天災報道における Where は「東北」、「北海道」、「三陸」が望ましい。

When 概念記述で導かれた単語は「八日」、「午後」の２つであり、これら２つは上位概念として「時間」を持つため望ましい単語である。

What 「地震」

概念	関係の向き	概念	含まれる概念
時［ジ］	→	八日［ヨウカ］	†1 †2 †3
地震［ジシン］	→	八日［ヨウカ］	†1 †2 †3
時［ジ］	→	午後［ゴゴ］	†1 †2 †3
地震［ジシン］	→	午後［ゴゴ］	†1 †2 †3
強い［ツヨ・イ］	↔	時［ジ］	†2 †3
地震［ジシン］	→	時［ジ］	†2 †3
強い［ツヨ・イ］	↔	地震［ジシン］	†2 †3

表 1: 例文 1 内の時間に関する概念関係 抜粋: ただし、†1 :time(事象の起こる時間)、†2 :time-from(事象の始まる時間)、†3 :time-to(事象の終る時間)、‡1 :cooccurrence(事象・事実の同時関係)、‡2 :sequence(事象・事実の時間的前後関係) をそれぞれ表す。

4.3.4 例文 1 から得られた要約文

3.1.1節の要約文テンプレートにしたがって作った例文 1 の要約文は以下のようになる。

> 「八日」「午後」に「東北」「北海道」「三陸」で「地震」があった。

4.3.5 例文 2 から得られた要約文

例文 2 に関しても 5W1H を求め、テンプレートにしたがって作った要約文は

> ???(when) に「青森」「八戸」「むつ」「青森」「盛岡」「宮古」で「烈震」があった。

となり、when 情報が抜けた望ましくない要約文である。

4.3.6 例文 1 をコンテクストとした例文 2 の要約文

例文 1 に例文 2 が続いており、テクストの統一性が成り立っているならば、例文 1 は例文 2 のコンテクストになり得る。

例文 2 において欠けている When の情報について考えると、例文 1 がコンテクストになると仮定すれば、例文 2 の When は例文 1 の「八日」「午後」を用いる。これは「八日」「午後」と「青森」…「宮古」が 2 文間に跨って time 概念関係子によって結ばれていることでも裏付けられる。

以上より、例文 1 をコンテクストとした例文 2 の要約文は

> 「八日」「午後」に「青森」「八戸」「むつ」「青森」「盛岡」「宮古」で「烈震」があった。

このように要約文は単文では欠けていた情報を満たすことができる。

5 おわりに

本稿では、言語使用における状況を考慮した機能文法の考え方に基づいた状況データベースを提案した。この状況データベースシステムを用いた新聞記事理解システムのシミュレーションを通してその有効性を検証した。本稿では文章を理解する上での状況として「ジャンル」を設定することを提案した。

概念情報について、単語に付されている概念から概念チャンクを形成し、5W1H テンプレートに当てはめて要約文を作成する概念関係解析システムを実装した。

5W1H 形式のテンプレートは文章理解におけるコンテクストとして利用することが可能であり、これにより状況データベースの有効性を示すことができた。

参考文献

[1] M. A. K. Halliday, Ruqaiya Hassan（筧壽雄訳）. **機能文法のすすめ**. 大修館書店, July 1991.

[2] (株) 日本電子化辞書研究所. EDR **電子化辞書仕様説明書**. Technical report, (株) 日本電子化辞書研究所, Mar. 1993.

[3] 菅野道夫. **知的ファジィコンピューティング**–ファジィ理論と機能言語理論の邂逅–. *LIFE NEWS*, Vol. 6, , Mar. 1994.

[4] 竹田幸史. **ファジィ理論を用いた文章の要約に関する研究**. Master's thesis, 東京工業大学 システム科学専攻, February 1992.

問い合わせ先：〒 226
横浜市 緑区 長津田町 4259
東京工業大学システム科学専攻
菅野研究室内 藤本太郎
Tel 045-924-5645
Fax 045-924-5681
Email: tarof@sys.titech.ac.jp

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

WC2-3

背景知識を用いたAND/OR演算子学習型ファジィID3

Fuzzy ID3 with Ability of Learning for AND/OR Connectives Using Background Knowledge

林　勲*　　小澤 順**
Isao Hayashi　　Jun Ozawa

* 阪南大学　商学部
** 松下電器産業(株) 中央研究所

* Faculty of Commerce, Hannan University
** Central Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co. Ltd.

Abstract. The Fuzzy ID3 is a powerful method to generate decision trees of fuzzy logic rules using mutual information. However, results don't always satisfy user requests since AND operators and OR connections are already fixed. Moreover, the algorithm is stopped if value of mutual information equals to or smaller than zero. The algorithm proposed in this paper has the ability of learning for AND/OR operators, and tries to generate more continual and understandable decision trees by means of background knowledge. To explain a usefulness of the algorithm, two simple examples are shown in.

1．はじめに

観測データからif-then形式のプロダクションルールを獲得する手法に，Quinlan[1]が提案したID3(Interactive Dichotomizer3)アルゴリズムがある．平均相互情報量[2]が最大となる属性で観測データを分類し，テスト回数の期待値が最小となる決定木を構築する．一方，ファジィ集合を用いたルールを獲得する手法に，馬野ら[3]が提案したファジィID3がある．ファジィID3では，ファジィルールによる決定木を構築する．しかし，ファジィルールのAND演算子が代数積[3]で定義されているので，必ずしも観測者の満足する結果が得られるとは限らない．また，観測データの分類が不可能な場合，すなわち，平均相互情報量が正でない場合にはアルゴリズムは停止する．もし，人間がルールを構築する場合を想定すると，与えられたデータやファジィ集合を再検討して，削除や付加などの修正を加え，構築を継続するであろう．

本論文では，ファジィルールのAND演算子をパラメータ付きのt-norm[4]で定義して観測者が満足する結果を得るようにAND演算子を調整し，背景知識[5]によりファジィルールの数を調整する学習型ファジィID3を提案する．背景知識とは，観測できる属性を最下位層のノードとし，上位層にこの属性の抽象概念を表すノードを用いる知識の階層表現である．各層のノード間はISA関係で結合する．提案するアルゴリズムでは，パラメータの値によって種々のt-normを定義し，平均相互情報量が最大となる属性と演算子を決定する．また，平均相互情報量が正でない場合，背景知識を用いて初期のファジィ集合の再構成を行い，決定木を集約・細分化してアルゴリズムを継続する．この決定木の集約・細分化はファジィルールの数の調整を意味する．ファジィルールはOR結合されているので，ファジィルールの数の調整はOR結合の調整手法といえる．

2．t-normと背景知識

t-norm Ⓣとは，$T(x_1,x_2):[0,1]\times[0,1]\rightarrow[0,1]$なる境界条件，単調性，交換性，結合性を満足する関数である[4]．代表的なt-normとして，次の演算子がある．

$$\text{激烈積}: x_1 \mathbin{\dot{\wedge}} x_2 = \begin{cases} x_1 & (x_2=0) \quad (1) \\ x_2 & (x_1=0) \quad (2) \\ 1 & (x_1,x_2>0) \quad (3) \end{cases}$$

$$\text{限界積}: x_1 \odot x_2 = 0 \wedge (x_1+x_2-1) \quad (4)$$

$$\text{代数積}: x_1 \cdot x_2 = x_1 x_2 \quad (5)$$

$$\text{論理積}: x_1 \wedge x_2 = \min\{x_1, x_2\} \quad (6)$$

t-norm演算子には次のような大小関係がある．

$$\dot{\wedge} \leqq \odot \leqq \cdot \leqq \wedge \quad (7)$$

また，パラメータ付きのt-normが提案されている．例えば，Schweizerのt-norm[4]では次式を用いる．

$$T(x_1,x_2)=1-((1-x_1)^p+(1-x_2)^p-(1-x_1)^p(1-x_2)^p)^{1/p} \quad p\geqq 0 \quad (8)$$

ただし，pはパラメータである．p≧0の範囲で変えることにより，(7)式の激烈積(p→0)から論理積(p→∞)まで表現できる．

一方，背景知識[5]とは過去の経験から得た知識を階層構造で表現するものである．最下位層には観測できる属性を定義する．この入力属性を観測属性という．一方，上位層には観測属性の上位概念である抽象属性を定義する．各層のノードはISA関係で結合している．したがって，最上位層の属性が最下位層の観測属性まで次々に具現化される．本論文では，観測属性や抽象属性にファジィ集合を用いて，背景知識を定義する．一例として，企業の資本金の背景知識を図1に示す．資本金は充足，平均的，不足の抽象属性を表すファジィ集合に具現化されている．さらに，平均的の抽象属性は中位とやや小さいという観測属性を表すファジィ集合に具現化されている．充足と不足の抽象属性についても同様である．

3．学習型ファジィID3のアルゴリズム

いま，属性x_j, j=1,2,…,nに対してN個の観測データ$\mathbf{x}_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{in})$, i=1,2,…,Nが得られたとする．観測者は，ある判断基準に従って，この観測データ$\mathbf{x}_i$をr個のクラスC_k, k=

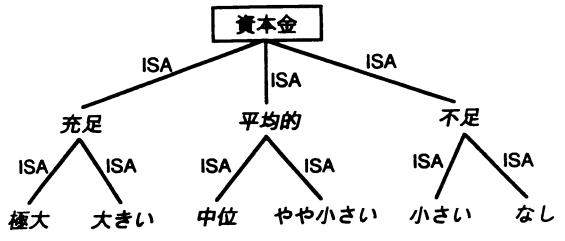


図1　資本金に関する背景知識

1,2,…,rに分類する．また，各x_jに対して，m(j)個のファジィ集合F_{tj}, t=1,2,…,m(j)を定義する．ここでは，観測データとクラスをデータ集合と呼ぶ．提案するアルゴリズムでは，ファジィ集合F_{tj}を用いて，x_iをクラスに分類した観測者の判断基準をファジィルールとして構築できる．アルゴリズムの具体的な手順を次に示す．

［手順１］データ集合DのクラスC_kに対する決定木の第u層目での出現度合G_k^uを次式より求める．

$$G_k^u=\left(\sum_{i\in C_k}\mu^u(i)\Big/\sum_{i=1}^{N}\mu^u(i)\right),\quad k=1,2,\cdots,r \tag{9}$$

ただし，決定木の層はu=0,1,2,…とする．また，$\mu^u(i)$は第u層目でのデータ集合の観測データx_iに対する重視度合いであり，$\mu^0(i)=1$とする．

［手順２］データ集合Dの第u層目でのエントロピーH(D)を計算する．H(D)はデータ集合Dの情報の不確かさを表わす．

$$H(D)=-\sum_{k=1}^{r}G_k^u\log G_k^u \tag{10}$$

［手順３］ファジィ集合F_{tj}を用いて，第u+1層目の属性x_jとAND演算子を次のように決定する．

［手順３－１］属性x_jに関する条件付きエントロピーH(D|j)を次のように計算する．H(D|j)は，ある属性x_jを第u+1層目の属性とした場合の情報の不確かさを表す．

$$H(D|j)=\sum_{t=1}^{m(j)}\left(g_{tj}\times\left(-\sum_{k=1}^{r}G_k^{u+1}\log G_k^{u+1}\right)\right),\quad j=1,2,\cdots,n \tag{11}$$

ただし，

$$g_{tj}=\left(\sum_{i=1}^{N}\mu_{F_{tj}}(x_{ij})\Big/\sum_{t=1}^{m(j)}\sum_{i=1}^{N}\mu_{F_{tj}}(x_{ij})\right) \tag{12}$$

$$\mu^{u+1}(i)=\mu^u(i)\textcircled{T}\mu_{F_{tj}}(x_{ij}),\quad i=1,2,\cdots,N \tag{13}$$

である．Ⓣは(8)式のt-normであり，$0\leqq p\leqq 100$とする．

［手順３－２］平均相互情報量I(j)を次式により求める．I(j)は，ある属性x_jによって得られる情報量の確かさを表す．

$$I(j)=H(D)-H(D|j),\quad j=1,2,\cdots,n \tag{14}$$

［手順３－３］平均相互情報量I(j)が最大となる属性x_jとパラメータpの値をそれぞれ，第u+1層目の属性とAND演算子のパラメータとする．

［手順４］手順３－２の平均相互情報量がI(j)≦0となる場合，ファジィ集合族$\mathcal{F}$を再構成する．具体的には，I(j)≦0となる第j属性に関して，背景知識の最上位層から第L層目の抽象属性や観測属性のあるファジィ集合$f^U{}_j$, U=0,1,2,…が，$f^U{}_j\in\mathcal{F}$を満足するとき，$f^U{}_j$とISA関係にある$f^{U-1}{}_j$と$f^{U+1}{}_j$をファジィ集合族$\mathcal{F}$に加える．ただし，$f^U{}_j\in\mathcal{F}$でない場合は，ファジィ集合族$\mathcal{F}$を変更せず，第u+1層目は分類不能とする．

［手順５］新たなファジィ集合族により手順３を実行する．再度，I(j)≦0となる場合には，第u+1層目は分類不能とする．

［手順６］次の条件を満足する場合，第u+1層目の属性x_jではデータ集合Dに関するファジィルールが獲得されたとして，それ以下の層でのアルゴリズムの手順を停止する．

$$G_k^{u+1}>\alpha\quad\text{または}\quad\sum_{i=1}^{N}\mu^{u+1}(i)<\beta \tag{15}$$

ただし，αはあるクラスC_kが全クラスの中で占める最大占有率を表すしきい値であり，βは観測データの最小度合いを表すしきい値である．

［手順７］決定木の最下位層のある属性x_jにおいて，手順６の停止則を満足しない場合には，u+1=1として手順１に戻り，アルゴリズムを継続する．

［手順８］アルゴリズムを終了して決定木を生成した後，第u層目の属性x_jの下位層で，M個の同じ決定木が存在する場合，決定木の集約を行う．具体的には，属性x_jの上位層である第u-1層目のM個のファジィ集合F_{sj}, s=1,2,…,Mと第j属性に関する背景知識のM個のファジィ集合$f^U{}_j$が等しい場合，$f^U{}_j$とISA関係にある上位層の$f^{U-1}{}_j$をM個のF_{sj}の代わりに用いて決定木を集約する．ただし，$f^U{}_j$が得られない場合，集約しない．

４．数値例

ここでは，本手法の有用性を示すため，AND演算子とOR結合を学習する事例と平均相互情報量が正でない場合にアルゴリズムを継続する事例について述べる．

４．１　AND演算子とOR結合を学習する事例

AND演算子とOR結合の学習に関するアルゴリズムの有用性を検証するため，ここでは，学生が就職先を決定する場合に，資本金，従業員数，売上高から企業を評価する事例を考える．表１に観測データと学生が判断した企業を示す．学生は，売上高は多少少ないが資本金と従業員数が大きい企業を安定企業とし，資本金と売上高の大きい企業を望ましい企業としている．また，それ以外を発展途上企業に分類している．資本金と従業員数，売上高に関するファジィ集合をそれぞれ，図２から図４に示す．α=0.8, β=1.0として，本手法のアルゴリズムに従って，データ集合とファジィ集合，背景知識から，企業分類に関するファジィルールを構築した．

アルゴリズムの手順１から手順７で得られた決定木を図５に示す．ただし，p=0.761などはt-normのパラメータの値を表す．(8)式から，p=0.761の方がp=0.001よりも，緩やかなAND

表１　企業を分類するデータ集合

資本金(億円)	従業員数(人)	売上高(億円)	クラス
290	12,000	2,000	発展途上企業
300	21,000	1,300	発展途上企業
1,000	160,000	3,300	安定企業
1,670	103,000	3,700	安定企業
1,010	97,000	4,200	安定企業
1,600	70,000	10,700	望ましい企業
1,630	90,000	11,000	望ましい企業
1,560	78,000	8,800	望ましい企業

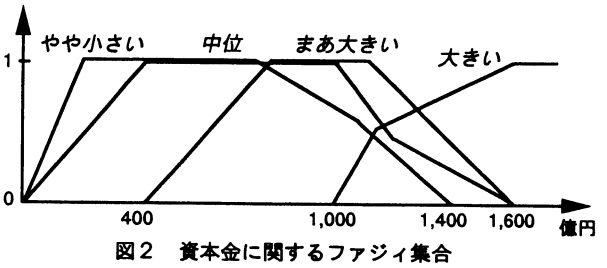


図２　資本金に関するファジィ集合

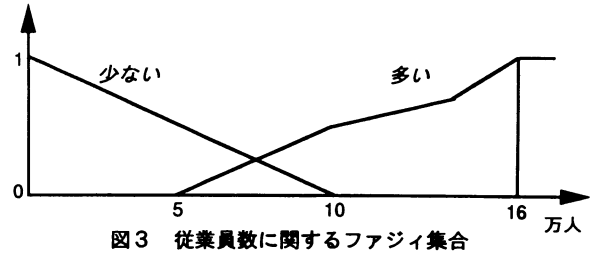


図３　従業員数に関するファジィ集合

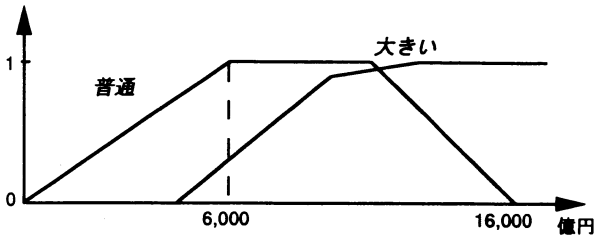


図４　売上高に関するファジィ集合

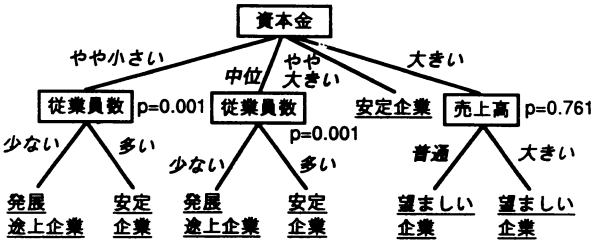


図５　集約前の決定木

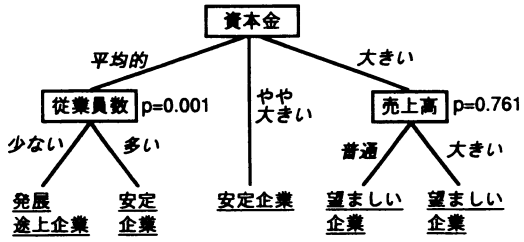


図６　集約後の決定木

if 資本金が*大きい* AND$_{p=0.761}$ 売上高が*大きい*
　then 望ましい企業0.96（発展途上企業：0.00，安定企業：0.04）

if 資本金が*大きい* AND$_{p=0.761}$ 売上高が*普通*
　then 望ましい企業0.84（発展途上企業：0.00，安定企業：0.16）

if 資本金が*やや大きい*
　then 安定企業0.95（発展途上企業：0.00，望ましい企業：0.05）

if 資本金が*平均的* AND$_{p=0.001}$ 従業員数が*多い*
　then 安定企業1.00（発展途上企業：0.00，望ましい企業：0.00）

if 資本金が*平均的* AND$_{p=0.001}$ 従業員数が*少ない*
　then 発展途上企業0.97（安定企業：0.02，望ましい企業：0.00）

図７　決定木から得られたファジィルール

演算子を表している．一般に，資本金か売上高が満足できる企業は望ましい企業と考えられるので，p=0.761のAND演算子がOR的であるのは我々の直感と一致している．また，図１の資本金に関する背景知識を用いて，手順８における決定木の集約を行った結果を図６に示し，そのファジィルールを図７に示す．図５での決定木のOR結合が調整され，ファジィルールの数が減少している．

４．２　アルゴリズムを継続する事例

平均相互情報量が正でない場合にもアルゴリズムを継続する事例として，車のドライバーの停止判断を考える．いま，運転手が一直線の道路を走行し，前方の信号を見て，車を加速するか，減速させるか，あるいは定速のまま走行させるかの状況判断を考える．ただし，ここでは，信号色に関する判断状況を重視するため，種々の波長の信号色を用意した．数種類の状況を観測したデータとその場合のドライバーの状況判断を表２に示す．また，信号色と降水量，距離に関するファジィ集合をそれぞれ，図８から図10に示す．表２より，ドライバーは必ずしも信号を守らず，状況から信号を無視していることがわかる．信号色に関する背景知識を図11に示す．α=0.7，β=1.0として，本手法のアルゴリズムに従って，データ集合とファジィ集合，背景知識から，ドライバーの状況判断に関するファジィルールを構築した．

表２　ドライバーの状況判断のデータ集合

信号色(nm)	降水量(mm/h)	距離(m)	クラス
485.0	0.01	2.3	加速
490.0	0.01	2.3	加速
485.0	0.01	48.0	減速
490.0	0.01	48.0	減速
635.0	49.0	11.2	減速
560.0	16.0	1.9	加速
670.0	16.0	1.9	加速
730.0	49.0	39.5	減速
542.5	12.0	5.1	加速
490.0	9.5	37.0	減速
405.0	8.4	98.0	定速
740.0	7.1	120.0	定速

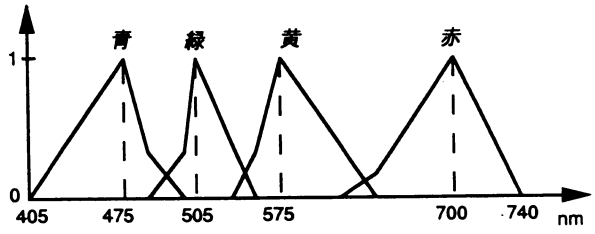


図８　信号色に関するファジィ集合

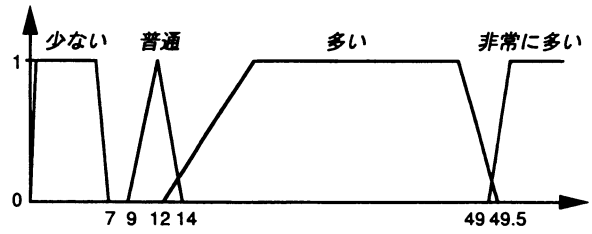


図９　降水量に関するファジィ集合

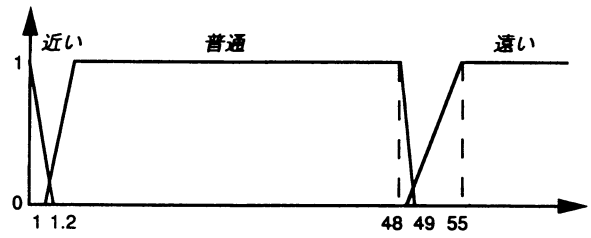


図10　距離に関するファジィ集合

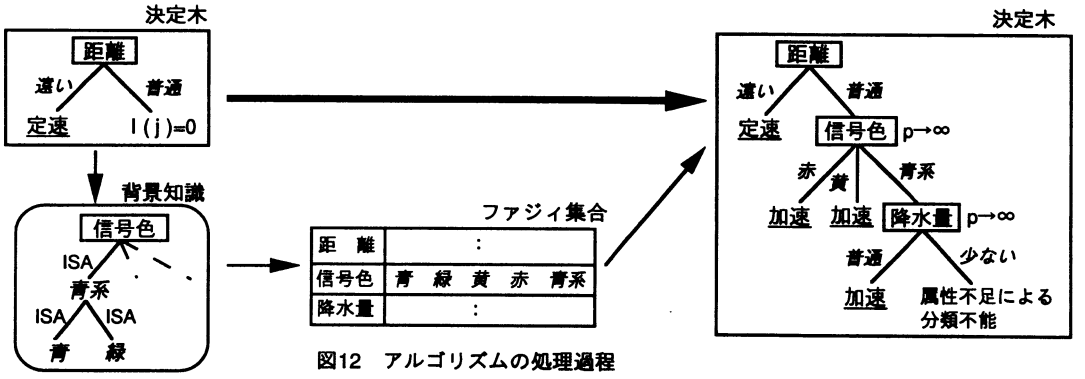


図12 アルゴリズムの処理過程

アルゴリズムの処理過程を図12に示す．第１層目の属性として距離を決定した後，第２層目でI(j)=0となった．手順４から，信号色に関する背景知識を参照して，抽象属性のファジィ集合“青系”をファジィ集合族に加えた．ファジィ集合族の再構成後，アルゴリズムを継続し，最終結果を得た．結果の決定木のファジィルールを図13に示す．

５．おわりに

学習型ファジィID3により，観測者の要求にあったファジィルールの構築が可能となった．しかし，属性とAND演算子を決定する場合，ファジィ集合の種類や形状にかなり依存している．今後，この従属性の問題を解決する必要がある．また，本手法は，KDD[6] (Knowledge Discovery in Databases)の一種と考えられる．今後，この分野での本手法の有用性を検討する必要がある．なお，本研究の一部は，1995年度阪南大学産業経済研究所共同研究「ソフトコンピューティングとその経済動学への応用」の成果報告である．

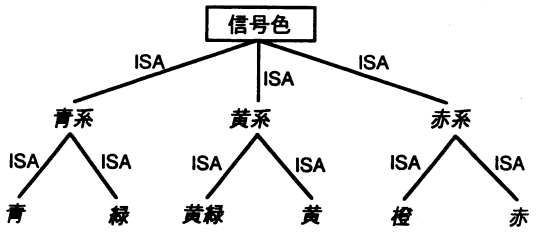


図11 信号色に関する背景知識

if 距離が遠い
　then 定速1.00（加速：0.00，減速：0.00）
if 距離が普通 AND$_{p\to\infty}$ 信号色が赤
　then 加速0.63（減速：0.37，定速：0.00）
if 距離が普通 AND$_{p\to\infty}$ 信号色が黄
　then 加速0.63（減速：0.37，定速：0.00）
if 距離が普通 AND$_{p\to\infty}$ 信号色が青系 AND$_{p\to\infty}$ 降水量が普通
　then 加速0.68（減速：0.32，定速：0.00）
if 距離が普通 AND$_{p\to\infty}$ 信号色が青系 AND$_{p\to\infty}$ 降水量が少ない
　then 分類不能（加速0.50，減速：0.50，定速：0.00）

図13 決定木から得られたファジィルール

参考文献

1) J.R.Quinlan： Discovering Rules by Induction from Large Collections of Examples, Expert Systems in the Micro Electronics Age, Edinburgh University Press (1979)
2) 菊池豊彦：情報科学Ⅰ，コロナ社 (1990)
3) 馬野元秀，岡本宏隆，鳩野逸生，田村坦之，河内二三夫，梅津祐久，木下淳一：ID3に基づくファジィ決定木の油中ガス分析診断への適用について，第４回インテリジェントFAシンポジウム，pp.201-204 (1993)
4) 水本晴雅：ファイ集合とファジィ推論，第３回ファジィシステムシンポジウム，pp.37-48 (1987)
5) M.Nunez： The Use of Background Knowledge in Dicision Tree Induction, Machine Learning, Vol.6, pp.231-250 (1991)
6) G. Piatetsky-Shapiro and B. Frawley： Knowledge Discovery in Databases, MIT Press (1991)

［問い合わせ先］
580 大阪府松原市天美東５-４-３３
阪南大学 商学部 経営情報学科
林　勲
TEL: 0723-32-1224 (ext.8412)
FAX: 0723-36-2633
Internet: ihaya@hannan-u.ac.jp

WC2-4

ニューロ・ファジィ射影追跡による密度推定

Neuro Fuzzy Projection Pursuit Density Estimation

市橋　秀友，○長坂　一徳，三好　哲也，野崎　大輔（大阪府立大学），
北口　嘉亮（大阪府立産業技術総合研究所），喜田　義宏（大阪工業大学）
Hidetomo Ichihashi, Kazunori Nagasaka, Tetsuya Miyoshi, Daisuke Nozaki(University of Osaka Prefecture),
Yoshiaki Kitaguchi(Osaka Prefectural Industrial Technology Research Institute) and Yoshihiro Kita(Osaka Institute of Technology)

Abstract : This paper focuses on the use of kernel method and projection pursuit regression for non-parametric probability density estimation. Direct application of the kernel method will not be able to pick up characteristic features of multidimensional function. The proposed projection pursuit method based on the eigenvalue problem is able to bypass the "curse of dimensionality" in multidimensional density estimation.

1. はじめに

核関数法（kernel method)[1, 2, 3]はポテンシャル関数法とも呼ばれ，ある母集団の確率密度関数をデータから直接推定する方法であり統計的な判別分析に多く用いられている．J.W.Van Ness and C.Simpson[1] や J.W.Van Ness[2] は単峰性，対称性の核関数であればその形状が異なっても判別分析の結果にあまり影響しないことを報告している．しかし，核関数法はノンパラメトリックな方法であり，多次元空間上に直接推定された密度関数から分布の特徴的な形状を見つけるのは困難である．

J.H.Friedman and J.W.Tukey[4] により始められた射影追跡の目的は，高次元空間におけるデータ点を低次元空間に射影することによってデータの興味深い構造を発見することである [5, 6, 7]．そのために，ある目的関数すなわち射影指標を最大化する線形射影をコンピュータを用いて自動探索する．多次元空間にあるデータを低次元空間に射影するという考え方は，多変量解析で一般に用いられているもので，主成分分析や判別分析などは射影追跡の特別な場合であるとみなされている．

本研究では核関数法により推定された多次元分布をもとに，固有値法による射影追跡回帰を用いてデータを 1 次元の直線上に射影する．そして射影された 1 次元データに対して再び核関数法を適用することによってもとの多次元分布の特徴的形状をできるだけ残した一次元分布を推定する．また応用例として，小径エンドミルの加工精度の実験計画における水準の設定について述べる．

2. 射影追跡確率密度推定

2.1 核関数法による確率密度の推定

J個の d 次元データの第 j番目のデータをベクトル$\boldsymbol{a}_j$とし，その第 i 成分を中心a_{ij}として，平滑化パラメータ b(smoothing parameter) を持ったカーネル (核関数，パーゼンの窓関数) を考える．本研究ではカーネルに次のガウス関数を用いる．ここで，x_iを d 次元ベクトル$\boldsymbol{x}$の第 i 成分とすると，

$$G_{ij}(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - a_{ij})^2}{b}\right) \tag{1}$$

$$K_j(\boldsymbol{x}) = \Pi_{i=1}^{d} G_{ij}(x_i) \tag{2}$$

$d = 1$ のとき

$$K_j(x_1) = \exp\left(-\frac{(x_1 - a_{1j})^2}{b}\right) \tag{3}$$

$d = 2$ のとき

$$K_j(x_1, x_2) = \exp\left(-\frac{(x_1 - a_{1j})^2 + (x_2 - a_{2j})^2}{b}\right) \tag{4}$$

となる．1 つのカーネルの積分は，以下$\int = \int_{-\infty}^{\infty}$とすると，

$$\begin{aligned} I_d &= \int \cdots \int K_j(\boldsymbol{x}) d\boldsymbol{x} \\ &= (\pi b)^{d/2} \end{aligned} \tag{5}$$

となる．たとえば，$d = 1$ のとき

$$\begin{aligned} I_1 &= \int K_j(x_1) dx_1 \\ &= \sqrt{\pi b} \end{aligned} \tag{6}$$

であり，$d = 2$ のとき

$$\begin{aligned} I_d &= \int\int K_j(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\ &= \pi b \end{aligned} \tag{7}$$

である．推定される確率密度関数$\hat{f}(\boldsymbol{x})$はデータ件数を Jとして

$$\hat{f}(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{J I_d} \sum_{j=1}^{J} K_j(\boldsymbol{x}) \tag{8}$$

となる．この推定量は Jを大きくする早さに対して，b を十分ゆっくりゼロに近づけるとき，確率密度関数の一致推定量となることが知られている．たとえば，$d = 1$ のとき

$$\hat{f}(x_1) = \frac{1}{J\sqrt{\pi b}} \sum_{j=1}^{J} \exp\left(-\frac{(x_1 - a_{1j})^2}{b}\right) \tag{9}$$

であり，$d = 2$ のとき

$$\hat{f}(x_1, x_2) = \frac{1}{J\pi b} \sum_{j=1}^{J} \exp\left(-\frac{(x_1 - a_{1j})^2 + (x_2 - a_{2j})^2}{b}\right) \tag{10}$$

である．核関数法を適用する際に問題となるのは，平滑化パラメータ b としてどのような値を選択すればよいかということである．このような密度推定の問題では真の分布を $f(\boldsymbol{x})$，推定した分布（モデルが定める密度関数）を$\hat{f}(\boldsymbol{x})$ とし，K-L 情報量

$$E\left[\log \frac{f(\boldsymbol{x})}{\hat{f}(\boldsymbol{x})}\right] = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\log \frac{f(\boldsymbol{x})}{\hat{f}(\boldsymbol{x})}\right) f(\boldsymbol{x}) d\boldsymbol{x}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} (\log f(x)) f(x) dx - \int_{-\infty}^{\infty} (\log \hat{f}(x)) f(x) dx \quad (11)$$

によって，$\hat{f}(x)$ を評価することができる．(11) 式の右辺の第 1 項目は定数であるので，第 2 項目の平均対数尤度

$$\int_{-\infty}^{\infty} (\log \hat{f}(x)) f(x) dx \quad (12)$$

で評価すればよい．

J個の独立な観測値 $\{a_1, \cdots, a_j, \cdots, a_J\}$ が得られているとき，平均対数尤度は対数尤度の J分の 1

$$\frac{1}{J} \sum_{j=1}^{J} \log \hat{f}(a_j) \quad (13)$$

で近似される．符号に注意すると，対数尤度が大きいほどそのモデルは真の分布に近いと考えられる．

以上のことをふまえ次に平滑化パラメータ b を決定する．観測値a_jは与えられたものとして固定し，$\hat{f}$を b の関数と考えるとき，次の関数を尤度 (likelihood) と呼び

$$L(b|X) = \prod_{j=1}^{J} \hat{f}(a_j, b|X) \quad (14)$$

で表す．ここでa_jは第 j番目のデータ点，Xはデータの集合 $\{a_j | j = 1, \cdots, J\}$ を表すものとする．

(14) 式の両辺の対数をとったものである (13) 式の対数尤度を最大にする値を選択すると $b = 0$ のときに最大となり，核関数は各々のデータ点におけるデルタ関数となってしまう．そこで各種の交差確認法 (cross-validation method) が用いられている．その中で J.D.F.Habbema and J.Hermans[8] は次のようなジャックナイフ法を提案している．

文献 [8] のジャックナイフ法では (14) 式のかわりに

$$L^*(b|X) = \prod_{j=1}^{J} \hat{f}(a_j, b|X - a_j) \quad (15)$$

のように，a_jの点での尤度の計算にa_jを除いた残りのサンプル $X - a_j$だけを利用する擬尤度関数 (pseudo-likelihood function) を採用している．いま，第 j番目のデータ点を$a_j = (a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{dj})$ とすると，擬対数尤度 (pseudo-logarithm-likelihood) は

$$f_k^*(a_k) = \frac{1}{(J-1)I_d} \sum_{j=1, j\neq k}^{J} \left(\prod_{i=1}^{d} G_{ij}(a_{ij}) \right) \quad (16)$$

$$PLL = \frac{1}{J} \sum_{k=1}^{J} \log f_k^*(a_k) \quad (17)$$

と表され (17) 式の PLL を最大にする b の値を選択する．

2.2 固有値法による多次元確率密度関数の射影

$x_j (j = 1, \cdots, J)$ の集合をファジイ集合とし，$m(f_j)$ をメンバシップ関数とする．ファジイ集合（ファジイクラス）をCとDの 2 つとし，それぞれ $\{(x_j, m(f_j)) \; ; \; j = 1, \cdots, J\}$ と $\{(x_j, 1 - m(f_j)) \; ; \; j = 1, \cdots, J\}$ とする．ただし，$m(f_j)$ は確率密度関数の推定値$\hat{f}(a_j) (j = 1, \cdots, J)$ の値を区間 $[0, 1]$ に規準化したa_jにおける値である．クラスCは確率密度の大きいデータ点のファジイ集合であり，Dは大きくないデータ点のファジイ集合である．yを単位ベクトル$p = (p_1, \cdots, p_n)^T$により定まる直線へのxの正射影とすると

$$y = p^T x \quad (18)$$

となる．ただし，Tは転置を意味する．ファジイクラスC内の y の標本分散は，

$$\sigma_C^2 = \frac{1}{J_C} \sum_{j=1}^{J} m(f_j)(y_j - \overline{y})^2 = p^T \sum\nolimits_C p \quad (19)$$

となる．ただし，

$$J_C = \sum_{j=1}^{J} m(f_j) \quad (20)$$

$$\overline{y} = \frac{1}{J_C} \sum_{j=1}^{J} m(f_j) \cdot y_j \quad (21)$$

$$\sum_C = \frac{1}{J_C} \sum_{j=1}^{J} m(f_j)(x_j - \overline{x})(x_j - \overline{x})^T \quad (22)$$

$$\overline{x} = \frac{1}{J_C} \sum_{j=1}^{J} m(f_j) \cdot x_j \quad (23)$$

である．一方，ファジイクラスDの$\overline{y}$（クラス内の平均）からの変動を

$$\sigma_D^2 = \frac{1}{J - J_C} \sum_{j=1}^{J} (1 - m(f_j))(y_j - \overline{y})^2 = p^T \sum\nolimits_D p \quad (24)$$

とする．ただし，

$$\sum\nolimits_D = \frac{1}{J - J_C} \sum_{j=1}^{J} (1 - m(f_j)) \cdot (x_j - \overline{x})(x_j - \overline{x})^T \quad (25)$$

である．クラスC内の分散（σ_C^2）を小さくし，一方でクラスDの y_jができるだけ$\overline{y}$（クラスC内の平均）から離れるようなpを求める．ただし，射影後の密度関数は大まかには単峰形であると仮定する．射影によってデータの構造を良く表現できる射影ベクトルpを求めるための評価関数すなわち射影指標を

$$Q(p) = \frac{p^T \sum\nolimits_D p}{p^T \sum\nolimits_C p} \quad (26)$$

とする．射影ベクトルpは，この $Q(p)$ を最大化することで求められ，

$$p^T \sum\nolimits_D p = \lambda p^T \sum\nolimits_C p \quad (27)$$

なる固有値問題に帰着される．

2.3 1 次元確率密度関数の推定手順

2.1 節と 2.2 節の方法を用いて 2 次元データ点 (a_1, a_2) から特徴的な 1 次元の分布形を推定する手順を以下に示す．

(step 1)

2次元データ点を中心として2次元のカーネルを置き$\widehat{f}(x_1,x_2)$を(10)式の核関数法により求める．データ点上に置く2次元のカーネルの平滑化パラメータbの値を(17)式のジャックナイフ法を用いて決定する．j番目の点(a_{1j},a_{2j})における確率密度の推定値は$\widehat{f}(a_{1j},a_{2j})$である．

(step 2)

$f_j=\widehat{f}(a_{1j},a_{2j})$として固有値法(2.2節)を用いて，射影によってデータの構造を良く表現できるような射影ベクトル$\boldsymbol{p}$を求める．

(step 3)

2次元のデータ点を(18)式により1次元の直線に射影する．射影されたデータ点上に置く1次元のカーネルの平滑化パラメータbの値をジャックナイフ法を用いて決定し，1次元の密度関数を求める．

3. 確率密度推定の数値例

2次元のテストデータ(a_1,a_2) 150個を以下の手順で作成した．

(step 1)

5個ずつの正規乱数$X_i\sim N(\mu,\sigma^2)$を(28)式に代入してa_1^*を作成した．ただし，$\mu=0$，$\sigma^2=1$である．a_1^*は自由度$\phi=5$のχ^2分布に従う．

$$a_1^*=\frac{1}{\sigma^2}\sum_{i=1}^{5}(X_i-\mu)^2\cdot\frac{1}{20} \tag{28}$$

次にa_2^*を一様乱数$(\in[0,1])$により発生させた．

(step 2)

(step 1)で発生させた(a_1^*,a_2^*)を(29)式，(30)式で座標変換し2次元のテストデータ150個を得た．

$$a_1=(a_1^*,a_2^*)\begin{pmatrix}1/\sqrt{2}\\1/\sqrt{2}\end{pmatrix} \tag{29}$$

$$a_2=(a_1^*,a_2^*)\begin{pmatrix}1/\sqrt{2}\\-1/\sqrt{2}\end{pmatrix} \tag{30}$$

2.3節で述べた手順ごとの結果を以下に示す．表1-(a)はstep 1でのジャックナイフ法の結果で$b=0.010$が選ばれている．図1は核関数法により求めた2次元の分布形であり，確率密度の等高線図と3次元グラフィクスを示している．射影ベクトル$\boldsymbol{p}=(p_1,p_2)$は次のようになった．$p_1=0.603$，$p_2=0.797$．1次元の直線に射影したデータ点に対するジャックナイフ法の結果を表1-(b)に示す．$b=0.006$が選ばれている．核関数法による1次元の分布形を図2に示す．図2に示すように自由度$\phi=5$のχ^2分布に近い形状が得られていて(28)式のa_1^*の分布の形状をほぼ復元している．

4. 実験計画における水準の設定への応用

本章では小径エンドミルの加工精度の実験における実験計画の水準設定[9]に提案の射影追跡確率密度推定法を応用した．小径エンドミル先端における振れと先端から3mmにおける振れを測定した．GC主軸を手で回転させマイクロメーターの針が最大値を示すところ（刃先）における測定値をA，そこから180度回転させたところ（反対側の刃先）における測定値をBとすると，振れ量はAとBの差の絶対値をとったものとなる．単位はμmで

表1 テストデータに対するジャックナイフ法の結果

(a) 2次元	
b の値	PLL の値
0.004	0.3209
0.005	0.3629
0.006	0.3865
0.007	0.4001
0.008	0.4078
0.009	0.4119
0.010	0.4135
0.011	0.4134
0.012	0.4121

(b) 1次元	
b の値	PLL の値
0.001	0.4317
0.002	0.4950
0.003	0.5140
0.004	0.5214
0.005	0.5240
0.006	0.5243
0.007	0.5234
0.008	0.5216
0.009	0.5192

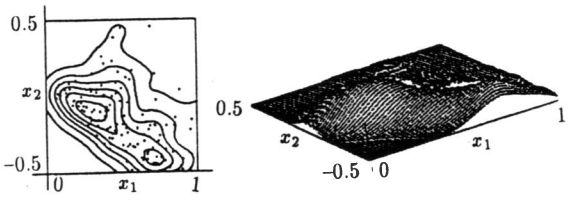


図1 核関数法により推定した密度関数の形状（2次元）

ある．小径エンドミルの加工において，エンドミル工具の振れ量は加工精度に大きく影響すると考えられ，振れ量の確率分布を推定することは，加工精度に関する知見を得る上で重要である．測定したデータを単位区間[0,1]に規準化し3章と同様の手順で推定を行う．ただし，データはこの場合正であるので2.1節のI_dについて，以下のような補正を行う必要がある．$d=1$のとき

$$I_1=\sum_{j=1}^{J}(1-q_{1j})\sqrt{\pi b} \tag{31}$$

ただし，q_{1j}は第j番目のカーネルの負の部分の面積比率であり，J.D.Williams[10]による正規分布関数の近似式（平均0，分散1）を用いてつぎのように表す．

$$q_{1j}=\frac{1}{2}-\sqrt{1-\exp\left(-\frac{2\mu_{1j}^2}{\pi}\right)} \tag{32}$$

ただし，

$$\mu_{ij}=-\frac{a_{1j}}{\sqrt{b/2}} \tag{33}$$

である．$d=2$のとき

$$I_2=\sum_{j=1}^{J}\left((1-q_{1j})+(1-q_{2j})+q_{1j}q_{2j}\right)\pi b \tag{34}$$

ただし，q_{1j}は第j番目のカーネルをx_1軸に平行に切断したときのx_1方向の負の部分の面積比率，またq_{2j}は第j番目のカーネルをx_2軸に平行に切断したときのx_2方向の負の部分の面積比率であり，近似式によりつぎのように表される．

$$q_{1j}=\frac{1}{2}-\sqrt{1-\exp\left(-\frac{2\mu_{1j}^2}{\pi}\right)} \tag{35}$$

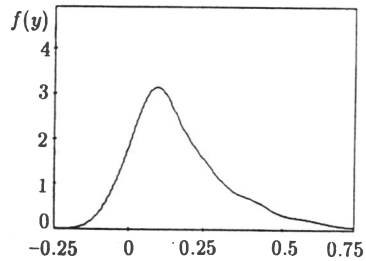


図 2 核関数法により推定した密度関数の形状（1 次元）

表 2 実験データに対するジャックナイフ法の結果

(a) 2 次元	
b の値	PLL の値
0.011	-4.8964
0.012	-4.8918
0.013	-4.8889
0.014	-4.8872
0.015	-4.8865
0.016	-4.8865
0.017	-4.8871
0.018	-4.8882

(b) 1 次元	
b の値	PLL の値
0.011	-4.53379
0.012	-4.53351
0.013	-4.53339
0.014	-4.53338
0.015	-4.53348
0.016	-4.53366
0.017	-4.53391
0.018	-4.53423

$$q_{2j} = \frac{1}{2} - \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{2\mu_{2j}^2}{\pi}\right)} \tag{36}$$

ただし，

$$\mu_{1j} = -\frac{a_{1j}}{\sqrt{b/2}} \tag{37}$$

$$\mu_{2j} = -\frac{a_{2j}}{\sqrt{b/2}} \tag{38}$$

である．2.3 節で述べた手順ごとの結果を以下に示す．表 2-(a) は step 1 でのジャックナイフ法の結果で $b = 0.015$ が選ばれている．図 3 は核関数法により求めた 2 次元の分布形であり，確率密度の等高線図と 3 次元グラフィクスを示している．

射影ベクトル$\boldsymbol{p} = (p_1, p_2)$ は次のように求まった．$p_1 = 0.872$, $p_2 = 0.488$．1 次元の直線に射影したデータ点に対するジャックナイフ法の結果を表 2-(b) に示す．$b = 0.014$ が選ばれている．核関数法による 1 次元の分布形を図 4 に示す．図 3 の 2 次元分布形をベクトル$\boldsymbol{p}$で定まる直線に射影することにより特徴的な分布形状を求めることができた．図 4 には，面積を 3 等分するように 3 つの水準を設定した例も示している．

5. おわりに

本研究では，核関数法と射影追跡の考え方を採用することにより多次元データの構造を特徴的に示す 1 次元確率分布の推定法を提案した．また小径エンドミルの振れ量の実測を行って実験計画における水準の設定に応用した．カーネルの平滑化パラメータを決定する際ジャックナイフ法を用いたが，他の種々の CV 法との比較，求まる射影ベクトルへの影響等を調べること，またより実用的な応用を考えることが今後の課題である．

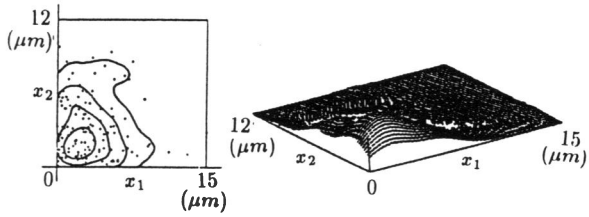


図 3 核関数法により推定した密度関数の形状（2 次元）

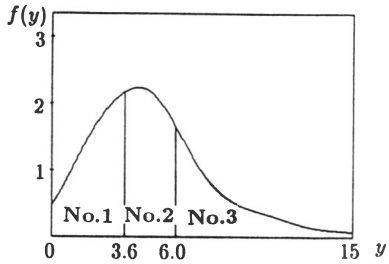


図 4 核関数法により推定した密度関数の形状（1 次元）

参考文献

[1] J.W. Van Ness and C. Simpson : On the effects of dimension in discriminant analysis; Technometrics, Vol.18, pp.175-187(1976)

[2] J.W. Van Ness : On the effects of dimension in discriminant analysis for unequal covariance populations; Technometrics, Vol.21, pp.119-127(1979)

[3] P. Smith: Probability density estimation and local basis function networks; Computational learning theory and natural learning systems, Vol.2 (S.J. Hanson, T. Petsche, M. Kearns and R.L. Rivest, editors), The MIT Press,pp.233-248(1994)

[4] J.H. Friedman and J.W. Tukey: A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis; IEEE Transactions on Computers, Vol.C-23, pp.881-890(1974)

[5] J.H. Friedman and W. Stuetzle: Projection pursuit regression; Journal of the American Statistical Association, Vol.76, No.376, pp.817-823(1981)

[6] P.J. Huber: Projection pursuit; The Annals of Statistics, Vol.13, No.2, pp.435-475(1985)

[7] 岩崎：射影追跡 その考え方と実際；計算機統計学, Vol.4, No.2, pp.41-56(1991)

[8] J.D.F.Habbema and J.Hermans: A stepwise discriminant analysis program using density estimetion; COMPSTAT, Physica-Verlag, Vienna, pp.101-110(1974)

[9] 矢野：加工品質工学，工業調査会 (1994)

[10] J.D.Williams: An approximation to the probability integral; Annals of Mathematical Statistics, Vol.17, pp.363-365(1946)

［問い合わせ先］

〒 593　大阪府堺市学園町 1 − 1

大阪府立大学工学部経営工学科

市橋 秀友

TEL : 0722-52-1161

FAX : 0722-59-3340

E-mail: ichi@center.osakafu-u.ac.jp

WC3-1

屋内照明の階層型学習ファジィ制御システム

Hierarchical Learning fuzzy Control System of Indoor Lighting

佐久間　岳 †　　本多　中二 †
Takashi SAKUMA　　Nakaji HONDA
† 電気通信大学
Univ. of Electro-Communications

Abstract— **In this paper, we try to design a new upper controller in a hierarchical fuzzy control system for indoor lighting. The previous upper controller can conduct only the items in menu which has been decided in advance. By introduction of learning of feedforward information and intelligent control, the upper controller can register new items in the menu which is suitable for some purpose of the user.**

1　はじめに

照明を「“快適さ”や“雰囲気”を提供するもの」という観点からみると，現在の照明はまだ不十分な点が多い．“快適さ”を追求すると，人間の感性や主観に関連して“あいまい性”の扱いが重要となる．この“あいまい性”を扱う制御としてファジィ制御が有効である．

そこで，本研究では階層型ファジィ制御により，快適な照明システムの実現を試みる．本システムは，下位と上位の二階層構造となっており，下位コントローラは目標値に追従する定値制御を行う．一方，上位コントローラは，下位コントローラの統括と目的に応じた知的制御を行なう．

本稿では，以上に述べたシステムの構築の一環として，ユーザの使用目的や好みに合わせて自由に特性の設定ができ，常に必要とされる明るさを維持し，かつ，学習による次期制御目的への瞬時な対応を可能にする特性を備えた階層システムの上位コントローラ部分の設計を行なう．

2　照明システム

2.1　システム構成

本システムは 図1 のように上位コントローラ，下位コントローラの階層構造となっている．

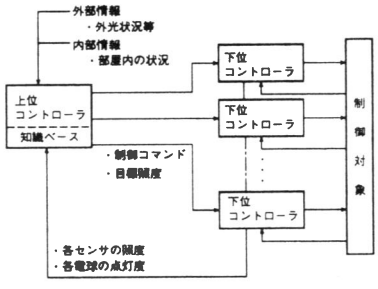


図 1: システムの構造図

ここで，下位コントローラはフィードバック系を構成し，光源強度と実際の照明位置における照度との調整を受け持つ．また，上位コントローラからの制御命令を高速，安定かつ忠実に実行する．一方，上位コントローラは，目的に応じた調整や外部環境の影響に応じた制御といった多様な制御目標を実行するとともに，下位コントローラの管理を行なう．つまり，上位と下位のコントローラがそれぞれ与えられたタスクを実行することで，全体としてより高度な制御を行なっている．

2.2　実験システム

本実験システムでは，3.6m × 3.6m × 2.5m の実験室の天井に 6 × 6 = 36 個の電球を 60cm の間隔で配置している．これらの各電球には 1 台ずつ下位コントローラとして CPU ボードと L/S ボードから構成された LCB（Lamp Control Box）と呼ばれる制御プロセッサを配置し，それぞれファジィ推論を行ない 256 段階に点灯強度を制御する．また，LCB にフィードバック情報を与えるために，照度センサを 9 つのブロックに分割して配置している．下位コントローラを管理する上位コントローラはパソコンを用いた処理を行なっていて，全体で階層的制御システムを構成している．なお，パソコンと各 LCB は RS-232C によりループ型の通信路を介して接続されている．図 2に本システムのハードウェア的な接続関係を示す．

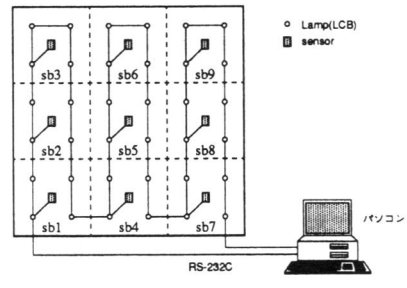


図 2: システムの接続関係

3 下位コントローラ

3.1 推論方法

本研究では，下位コントローラでのファジィ推論には，ファジィPI制御法 [1] を用いている．ここでは，2入力，1出力，25ルールを設定しており，ファジィ推論で用いた制御変数と制御ルールを以下に示す．

入力1 ： 目標照度ーセンサ値= E(偏差)
…目標照度から現在の照度を引いた値である偏差

入力2 ： 偏差の変化分=ΔE
…入力1の偏差 ($E_n - E_{n-1}$)

出 力 ： 点灯度の変化分 (操作量) =ΔU
… 電球が消えている状態を0，フル点灯している状態を255として，電球の点灯度合を0～255段階に分割して扱う．電球の点灯度（U）の変化分を操作量（ΔU）として出力する．

表 1: 制御ルール

ΔU	E				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NM	NS	ZO	PM
NS	NB	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PB
PB	NM	ZO	PS	PM	PB

ΔE

PB : Positive Big
PM : Positive Medium
PS : Positive Small
ZO : Zero
NS : Negative Small
NM : Negative Medium
NB : Negative Big

制御ルールの言語表現

Rule1 If E is NB and ΔE is NB then ΔU is NB
Rule2 If E is NB and ΔE is NS then ΔU is NB
Rule3 If E is NB and ΔE is ZO then ΔU is NB
⋮ ⋮
Rule24 If E is PB and ΔE is PS then ΔU is PB
Rule25 If E is PB and ΔE is PB then ΔU is PB

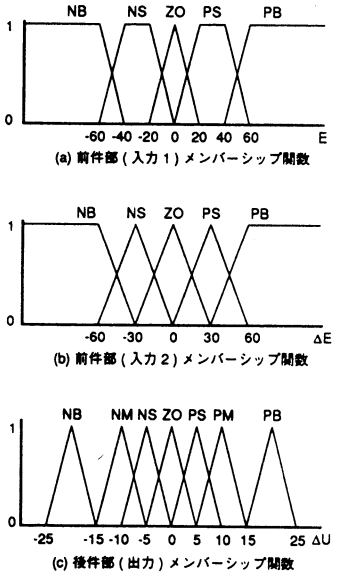


図 3: メンバーシップ関数

なお，制御ルールの設定を含めたメンバーシップ関数の調整は，それぞれ経験的に得られたものである．

3.2 実験環境特性に基づく調整

ここでの実験室の壁は模造紙で作られているため，反射率が低く，照度センサが拾う光はほとんどが直接光であると考えられる．よって，電球を均一に点灯させた場合，中央の照度値が最も高く，部屋の四隅の照度は中央の約8割ほどとなり，このため部屋全体の照度を均一にしようとする場合，中央ブロックの電球が消灯する現象が起こってしまう．そこでこの現象を回避するため，図4に示すように3つのランプブロックに分けた制御を行なう．ここで，目標照度をa[lx]とすると，それぞれのブロックの電球を担当するLCBに対して，仮の目標値を以下のように重み付けして与えている．

1.center…a × 0.98　　2.center-round…a × 0.96
3.round…a × 1.03

なお，目標値aにかかる係数はそれぞれ経験的に決めた値である．

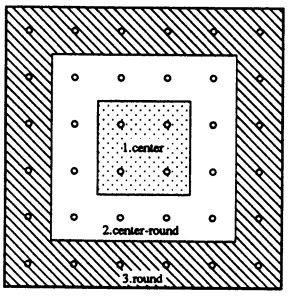


図 4: ランプブロックパターン

4 上位コントローラ

上位コントローラは，下位コントローラの管理およびシステム全体にわたる知的制御の実行を受け持つ．本研究では，特に後者の知的制御に焦点をあて，ユーザが使用目的や好みによって，明るさや点灯パターンを自由に組み合わせることができるシステムの実現を目指す．また，目的項目に即した制御の実行中に，自動的にFeedforwardデータを学習し，制御目的が変更されても瞬時にそれに対応できるような上位コントローラを作成する．なお，これらはC言語によりプログラミングされ，パソコン上で実行される．

4.1 上位コントローラの構成

[3] で提示された構成を一歩進めた図5のような上位コントローラの構成に基づく，システムを構築する．

- **知識ベース**
  ルール（if～then～形式）を記憶するプロダクションメモリと対象世界の状態と過去の推論状況やFeedforwardデータを記憶するワーキングメモリから構成される．
- **推論エンジン**
  知識ベースを用いて推論を実行する．これは，ファジィ推論部と非ファジィ推論部の2つの推論実行部をもっており，知識ベースによって使い分ける．

- **データ処理部**
  下位コントローラおよび外部からの情報を処理する．また，その情報をもとに知識ベースの更新を行なう．

- **システム管理**
  推論エンジンからの推論結果をもとに，下位コントローラへの制御命令および目標値を決定する．

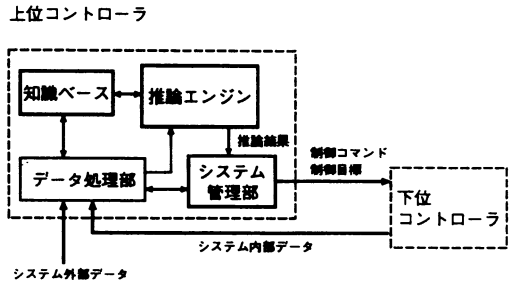


図 5: 上位コントローラの構成

4.2 知的制御

照明において心理的に考慮しなければいけない点として，"明暗"と"疲労感"の2つがある．この2つのパラメータから面積法を用いたファジィ推論をすることで制御目的の"雰囲気"や"快適さ"を作り出す．ここでファジィ推論で用いた制御変数と制御ルールおよびメンバーシップ関数を以下に示す．

入力1 ： **明暗**（−1：暗〜1：明）
入力2 ： **疲労感**（−1：疲れ〜1：元気）
出　力 ： **目標照度に反映させる係数**

表 2: 制御ルール

出力		入力1				
		NB	NS	ZO	PS	PB
入力2	NB	PS	PS	NS	ZO	NB
	NS	PS	PS	ZO	NS	NB
	ZO	PS	PS	ZO	NS	NS
	PS	PB	PS	ZO	NS	NS
	PB	PB	ZO	PS	NS	NS

PB : Positive Big
PS : Positive Small
ZO : Zero
NS : Negative Small
NB : Negative Big

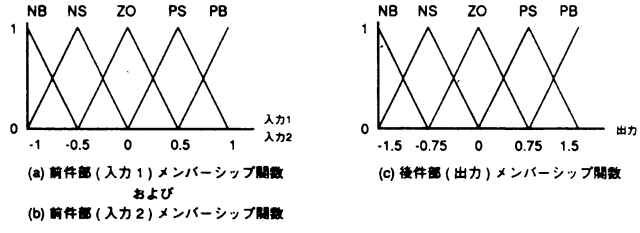


図 6: メンバーシップ関数

4.3 学習制御

本システムでの学習制御は，Feedforward 情報に関するものである．Feedforward 情報は，従来のシステム [2][3] において，フル点灯時のテーブル化された情報のみが設定されていた．

そこで，この Feedforward 情報を学習し，自動生成することで，あらゆる点灯パターンや目標照度に対応し，また，壁の反射率の変化にも対応できるものとなる．

以下に，この Feedforward 情報の取り扱いについて述べる．

4.3.1 Feedforward 情報の送信

Feedforward データの蓄積としては，各目的項目で採用された目標照度における max と min のデータを随時ストックしておく．これを用いて Feedforward 情報を計算し，出力することとする．この計算式は，

$$\text{傾き} = \frac{\text{max.L} - \text{min.L}}{\text{max.T} - \text{min.T}}$$

$$\begin{aligned} \text{出力} &= \text{傾き} \times (\text{入力目標照度} - \text{max.T}) + \text{max.L} \\ &\quad \text{または} \\ &= \text{傾き} \times (\text{入力目標照度} - \text{min.T}) + \text{min.L} \end{aligned}$$

ある．ここで，T は目標照度，L は点灯度である．

4.3.2 Feedforward データの学習

上位コントローラは，常に下位コントローラからのセンサ値，点灯値を監視し，この情報をもとに学習する．

Feedforward データの学習における評価関数 P(n) を

$$\text{P(n)} = \left| 1 - \frac{\text{S(n)}}{\text{T(n)}} \right|$$

とし，この値が 0 に近いほど，精度のいい値として採用する．ここで，S はセンサ値，T は目標照度，n は loop 回数である．

具体的な動作は次のとおりである．

- $\text{T(n)} \leqq \text{min.T}$ のとき
  $\text{P(n)} < \text{P}_{\text{min}} \Rightarrow$ min データに n 回目のデータを入れる．
- $\text{min.T} < \text{T(n)} < \text{max.T}$ のとき
  $\text{min.T} = 0 \Rightarrow$ min データに n 回目のデータを入れる．
- $\text{T(n)} = \text{max.T}$ のとき
  $\text{P(n)} < \text{P}_{\text{max}} \Rightarrow$ max に n 回目のデータを入れる．
- $\text{T(n)} < \text{max.T}$ のとき
  - $\text{min.T} = 0 \Rightarrow$ min データに max データを入れ，max データに n 回目のデータを入れる．
  - $\text{min.T} \neq 0 \Rightarrow \text{P(n)} < \text{P}_{\text{max}} \Rightarrow$ m ax データに n 回目のデータを入れる．

4.4 制御アルゴリズム

上位コントローラの全体的なアルゴリズムを図 7に示す．具体的な処理については以下で説明する．

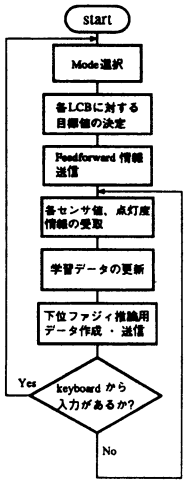


図 7: 制御アルゴリズム

4.4.1 Mode 選択

このルーチンは，以下の５つのワークアイテムから構成され，ユーザからの指示の窓口となる．つまり，システム外部の状況やシステム構築の手助けをおこなう．

— ワークアイテム —
1. 目的選択
2. 目的新規作成
3. 目的削除
4. 調光
5. 重み調整

- 目的選択，および目的削除

  目的選択は，目的項目の切替を行なう．目的削除は，目的項目の削除を行なう．なお，目的項目とは，ユーザが登録した部屋の使用目的である"勉強"や"くつろぎ"といった項目のことである．

- 目的新規作成

  新たに目的項目を増やすときには，以下の指示パターン

  1. 直接指示 … 点灯パターンの指示とフル点灯パターン選択時のユーザの位置と光の方向性を考慮した指示
  2. 項目指示 … 1つ基準となる目的項目を決め，それを調光して行なう指示
  3. 比較指示 … 2つ基準となる目的項目を決め，2つの重みの割合を入力し，それを調光して行なう指示

  を用意している．

- 調光

  現在の目標照度が，部屋の中にいるユーザにとって満足のいかない場合，その要望に基づいて照度を加減するモードである．このときの指示は，"もっと明るく"，"やや暗く"というような言語 (実際には MU(More Up), LD(little Down)) であり，全体的もしくは部分的に目標照度を定数倍して変更を行なう．また，4.2のファジィ推論を使った調光を全体的に反映させて行なうことも可能である．そして，この調整により得られた最終的な点灯度は，毎回個人別に上位コントローラで記憶され，次回の制御に（過去の制御結果の平均値として）反映される．

- 重み調整

  壁の反射率が変わったとき，このモードにより図4に示した３つのランプブロック毎の係数の修正を行なうことができる．

4.4.2 目標照度の決定

選択された目的での目標照度を決定する．目標照度の決定に際しては，過去の各目的での各制御毎に最終的に決定された目標照度を lx データとして記憶しており，そのデータの平均値として用いる．

4.4.3 下位ファジィ推論用データ作成・送信

各ＬＣＢからセンサ・点灯度データを受け取り，下位ファジィ推論用データを計算し，送信する．

5 おわりに

本システムでは次のようなことが可能となった．

- ユーザの好みや部屋の目的用途に応じた調光
- 知的制御の実現
- Feedforward 情報の学習，自動生成

その結果，知的で，かつ汎用性に富んだ制御が可能となった．

今後の課題として，より人間の心理状況に対応できる制御方式の確立や，季節や時間変動に応じた調光を考慮した制御が可能な上位コントローラの設計が挙げられる．

参考文献

[1] 本多中二，大里有生，ファジィ工学入門，海文堂，1989

[2] 上田久幸，“屋内照明に用いる階層型知的ファジィ制御システムの研究”，平成５年度電気通信大学電子情報学専攻修士論文，1994

[3] 上田久幸，本多中二，猪飼國夫 “屋内照明の階層型知的ファジィ制御システム”，ファジィシステムシンポジウム講演論文集，FA1-3，1994

[問い合わせ先]
〒 182 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 電子情報学専攻 本多研究室
佐久間 岳
Tel : 0424-83-2161 (ext.3113)
Fax : 0424-88-8125
E-mail : sakuma@fs.cas.uec.ac.jp

WC3-2

教師無し学習型ファジィシステムによる階層型制御システム
Hierarchical Control System based on Unsupervised Fuzzy System

下島　康嗣　　福田　敏男　　長谷川　泰久
Koji SHIMOJIMA Toshio FUKUDA, Yasuhisa HASEGAWA

名古屋大学大学院　工学研究科　マイクロシステム工学専攻
Dept. of Micro System Engineering, Nagoya University

Abstract- Recently, fuzzy systems are applied to various systems. However, lack of learning ability, the determination of most fuzzy rules and membership function was made by human experts. In this paper, we propose a hierarchical control system based on the unsupervised RBF Fuzzy system. The learning algorithm of the fuzzy system is based on Genetic Algorithms. This hierarchical cotrol system has the skill database, which manages the some of the fuzzy controllers aquired through the unsupervised learning process. Thus, the proposed system can use the aquired fuzzy controller effectively and it leads to reduce the iteration time for a new object. The effectiveness of the proposed method is shown through the simulations of the cart-pole problem.

1．はじめに

産業分野から身の回りの家電製品，自動車等に至るまでファジィモデリング・ファジィ制御等が多く利用されている．ファジィ推論は，人間の持つ知識を推論ルールという形を用いることで表現可能であるという特徴を持つ．しかしながら実際の多くのファジィ推論を応用したシステムでは，ファジィ・ルールは操作者の経験を基におおまかに決定された後，試行錯誤的にルールの追加，修正，削除の繰返しを行うことによりファジィ・システムが仕様を満たすように最終決定を行う場合が多い．したがって細部にわたって最適なルールとなるようにチューニングを行うことは困難であると同時に莫大な時間を必要とするという問題がある．

このような問題解決として，推論ルールの最適化，メンバーシップ関数の低減を目的とした，最適化手法の一つである遺伝アルゴリズム（ＧＡ）を用いたファジィ推論法が提案されている[1,2]．ＧＡの特徴は同時に複数の探索点を初期値に持つことから初期値に依存することなく最適解を得ることが可能である．また文献［２］では，前件部に不感帯を有する一種のラジアル・ベース関数をメンバシップ関数とし，後件部に実数値をとる簡略型ファジィ推論に対して，学習則にＧＡを適用する教師なし学習を提案した．これらのシステムの特徴は，ルールごとに個別の前件部を有することで，メンバーシップ関数の低減を可能としている．しかしながら，これらのＧＡを応用したシステムでは，学習回数が問題であり，また過去に学習した結果を有効に利用していない．

そこで本報では，この教師無し学習型ファジィシステムを基として階層型制御システムを構成することで対象物に対するスキルの獲得からその有効利用を目指す．

以下にその構成および学習則，シミュレーションによる実験結果によりその効果を示す．

2．ＲＢＦ型ファジィシステム

本報では，教師無し学習とも前件部を構成するメンバーシップ関数にガウス基底関数を使用した簡略型ファジィ推論を用いる．ただし図１に示すようにメンバーシップ関数の中心値a_{ij}からc_{ij}は不感帯とした．これによりメンバーシップ関数の表現能力が向上し，いままでは複数のＲＢＦを使用しなければならないような場合でも，メンバーシップ関数の数を減らすことができ，結果としてルール数の低減に結び付く．式(1)にメンバーシップ関数を，式(2)に前件部適合度，式(3)に推論法を示す．ここでa_{ij}，b_{ij}，c_{ij}はメンバーシップ関数毎に独立した実数，w_iはルール毎に独立した実数であり，学習を通して獲得される．

$$\mu_{ij} = \exp\left(-b_{ij} \bullet f_{ij}\left(x_j\right)^2\right)$$

$$f_{ij}\left(x_j\right) = 0, \qquad \left|x_j - a_{ij}\right| \le c_{ij} \qquad (1)$$

$$f_{ij}\left(x_j\right) = \left|x_j - a_{ij}\right| - c_{ij}, \qquad \left|x_j - a_{ij}\right| > c_{ij}$$

$$\mu_i = \prod_{J_i} \mu_{ij} \qquad (2)$$

$$y = \frac{\sum_{I} \mu_i w_i}{\sum_{I} \mu_i} \qquad (3)$$

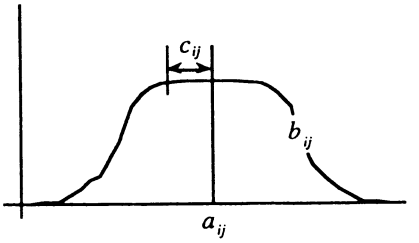


Fig. 1 Membership Function based on RBF

3．ＧＡによる教師無し学習

最適化手法には，様々な方法が提案されている．本法では，前件部の各メンバーシップ関数の形状・位置のチューニングに，生物の進化機構を模倣した遺伝アルゴリズムを適用した．ＧＡの特徴は，多点探索を行う点にある．

本報では，図２に示すように１つの遺伝子が，複数のルールから構成される１つのファジィシステムを表している．各メンバーシップ関数は３１ビットにより構成されている．先頭ビットはそのメンバーシップ関数が有効かどうかを示すフラグとして使用される．残りの３０ビットを３等分してそれぞれa_{ij}，b_{ij}，c_{ij}を表現するストリングとし，式（４）～式（６）によりストリングを実数に変換する．また後件部実数値W_iは式（７）により同様に変換される．

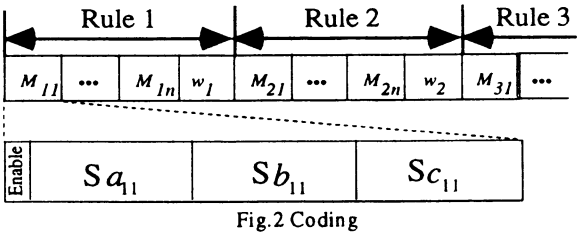


Fig.2 Coding

3．1　**選択**　適応関数として式（8）を用いる．各個体は式（8）の適合度により順位づけされる．この場合適合度が大きいほど優秀な個体となる．また選択戦略としてエリート保存戦略とルーレット戦略を採用している．式（8）中，Pはシステムの挙動が目標とする挙動に近ければ大きい値を取る評価値，R_n，M_nはファジィ推論中で有効なルール数，ならびに有効なメンバーシップ関数の数を示す．

またα，β，γはルール数・メンバーシップ関数の数を重視する（β，γを大きい値に設定），特性を重視する（αを大きい値に設定）などの目的に合わせて学習開始時に設定を行う定数である．

$$a_{ij} = \frac{2Sa_{ij}}{1023} - 0.5 \qquad (4)$$

$$b_{ij} = 100\left(\frac{Sb_{ij}}{1023}\right)^3 \qquad (5)$$

$$c_{ij} = \frac{Sc_{ij}}{4092} \qquad (6)$$

$$W_i = \frac{2w_i}{65535} - 0.5 \qquad (7)$$

$$F(s_n) = \alpha P - \beta R_n - \gamma M_n \qquad (8)$$

3．2　**交叉**　交叉は2点交叉を用いており，交叉を行なう親個体は交叉確立に従いランダムに選択され行なわれる．また交叉点に対してもランダムに選択される．

3．3　**突然変異**　突然変異は，親個体から無差別に選択され，操作が行なわれる．操作点に対しても同様に無差別に選択され行なわれる．また各メンバシップ関数について，それぞれの先頭ビットが操作点として選択された場合，そのメンバシップ関数は有効であれば無効に，無効であれば有効となる．

本報では，正規乱数ならびに一様乱数の2種類の突然変異を用いた．正規乱数によるものは各パラメータに乱数を加えることで行ない近傍探索を行ない，また一般的に用いられている一様乱数により同時に広域探索を行なう．

4．階層型ファジィ制御システム

ＧＡによる学習の問題点として，学習回数の問題が挙げられる．現在までのＧＡを用いた研究の多くは，個々の対象に対する最適化問題として扱われており，学習された結果を相互的に利用したり，過去の学習結果を使用しての追加学習的要素に対する研究はあまり見あたらない．

本報では，ＧＡにより獲得されたファジィシステム（＝スキル）を取りまとめるスキル・データベースを用いる事で，過去に獲得されたスキルを有効に利用するシステムを提案する．スキル・データベースはスキルとそのスキルが属するメンバシップ関数（不感帯を有するＲＢＦ）とにより現わされる．

スキル・データベースでは，対象とする物体の特徴（例えば，長さ，重さ等）とそのためのスキル（＝ファジィ制御器）について記述されている．スキル・データベースの各メンバシップ関数は，複数のスキルを統合する場合の重みとして使用される．

もし制御対象が未学習のものであった場合，過去の学習されたスキルの補間により目標が到達された場合は，スキル・データベースの変更は行なわれない．もし複数のスキルにより補間による場合で，目標どうりに達成できなかった場合，スキル・データベースのメンバシップ関数を更新することで目標達成を目指す．尚メンバシップ関数はヒューリステック法により変更される．

過去のスキルにより，達成できなかった場合，新たなスキルを教師無し学習型ファジィシステムにより獲得する．この場合でも，過去に獲得された各スキルは初期世代の一部として導入される．これにより，より高速な収束性を目指す．

5．シミュレーション

本報の有効性を示すために，倒立振子の振り上げ・保持制御を行なった．スキル・データベースには，振子の重さ及び長さを特徴とした．またスキルに当たるファジィ制御器の入力には，振子の角度θ・角速度$\dot{\theta}$，台車の位置r・速度$\dot{r}$を与えた．式（9）～（12）に運動方程式を示す．ここでl, m, M, μc, μpはそれぞれ振子の長さ，質量，台車質量，台車，振子の粘性抵抗を示す．学習は4本の振子（*0.1kg•0.5m, 0.1kg•1.5m, 0.5kg•0.5m, 0.5kg•1.5m*）を学習対象とし，それぞれ３００回づつ学習を行なった．

図3に評価点（*0.3kg•1m*）に対する応答を示す．実線は4つのスキルを統合した（スキル・データベース更新ずみ）もの，破線は各スキルをそれぞれ単独で使用したものである．スキルを統合したものは，統合しなかったものと比較し良好な結果となった．

$$\ddot{r} = \frac{F - \mu_c sign(\dot{r}) + \tilde{F}}{M + \tilde{m}} \qquad (9)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{3}{4l}\left(\ddot{r}\cos\theta + g\sin\theta + \frac{\mu_p\dot{\theta}}{ml}\right) \qquad (10)$$

$$\tilde{F} = ml\dot{\theta}^2\sin\theta + \frac{3}{4}m\cos\theta\left(\frac{\mu_p\dot{\theta}^2}{ml} + g\sin\theta\right) \qquad (11)$$

$$\tilde{m} = m\left(1 - \frac{3}{4}\cos^2\theta\right) \qquad (12)$$

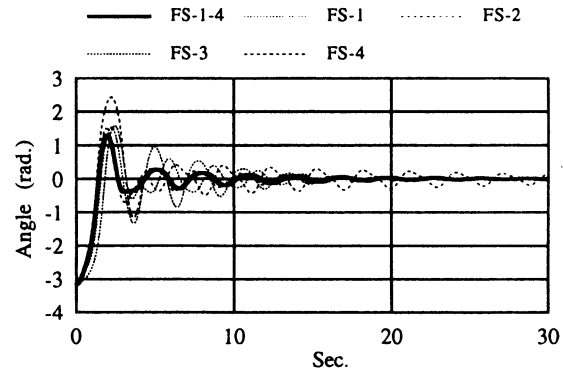


Fig.3 Simulation Results of Pole Angle

6．まとめ

本報では，スキル・データベースによる階層型ファジィ制御システムを提案した．本システムでは，教師無し学習で獲得されたファジィ制御器（＝スキル）をスキル・データベースにより有効に利用することで，スキルを有しない対象に対しても良好な制御結果を得ることができることを示した．

参考文献

[1] K. Shimojima, T. Fukuda, Y. Hasegawa, RBF-Fuzzy System with GA Based Unsupervised/Supervised Learning Method, Proc. of Int'l Joint Conf. of 4th Fuzz-IEEE/2nd IFES, pp.253-258, 1995

[2] 山本，久保，和多田，遺伝的アルゴリズムによるファジィ制御のメンバーシップ関数の学習，第９回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 97-100

[問い合わせ先]
〒464-01　名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻
福田研究室　　下島　康嗣
Tel: (052)789-2717, Fax: (052)789-3909
E-mail: koji@mein.nagoya-u.ac.jp

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

ファジィ推論による行為決定評価に基づいた強化学習と倒立振子の制御

Reinforcement Learning by Fuzzy Inference-Based Evaluation of State/Action Pairs and Its Application to Control of Cart-Pole Systems

堀内 匡, 藤野 昭典, 寺邊 正大, 片井 修, 椹木 哲夫
Tadashi Horiuchi, Akinori Fujino, Masahiro Terabe, Osamu Katai, and Tetsuo Sawaragi

京都大学工学部
Faculty of Engineering, Kyoto University

Abstract: Reinforcement Learning is an unspervised learing technique to acquire action rules in unknwon environment, and Q-Learning is a widely-used reinforcement learning method. In this paper, we propose a new method of Q-Learning where fuzzy inference is introduced to implement Q-function that evaluates state/action pairs. The aim of this method is to enable us to deal with continuous valued inputs (states) and outputs (actions) using fuzzy inference. Our proposed method is applied to a cart-pole balancing system, which demonstrates considerable improvements in its control performance.

1 はじめに

近年，未知環境などのモデル化が困難な環境において，試行錯誤的な経験から適切な行動を適応的に獲得する強化学習が注目を集めている．これは，学習対象に関する明示的なモデルを持たずに学習することが可能であり，自律エージェントの学習法として期待されている [1]．強化学習の主なアルゴリズムとしては，Temporal Diffenrece 法 [2] や Q-Learning [3] などが提案されている．しかし，それらの手法は主に離散的な状態・行動を対象としており，現実の複雑な環境に対応するためには，連続値を含めた多様な入出力データを扱う必要がある．

本研究では，強化学習の代表的なアルゴリズムの一つである Q-Learning において，連続値の状態・行動を取り扱うことを可能にするために，状態と行動の組に対する評価の見積り（Q 値）を求める行為決定評価に関数型推論法を用いたファジィ推論を導入した学習法を提案する．この提案手法は，倒立振子制御問題に適用され，その有効性が示される．

2 強化学習

本節では，強化学習の代表的なアルゴリズムの一つである Q-Learning に関して簡単に説明を行い，その特徴と問題点について述べる．

強化学習においては，学習者の目的は以下の評価関数 v_t を最大化するような，各状態において適切な行動を選択する政策 π を学習することである．

$$v_t = \sum_{i=t}^{\infty} \gamma^{i-t} \cdot r_i \qquad (1)$$

ここで，γ は割引率 (discount rate)，r_t は時刻 t で得られる報酬 (reward) である．つまり，現時点から未来にわたって得られる報酬の重み和の最大化が図られる．

Q-Learning では状態と行動の組に対して Q 値と呼ばれる評価の見積りを行いつつ学習を進めるものであり，その Q 値をもとに行動決定を行う．このとき，状態と行動の組から Q 値を導く関数を Q 関数という．Q 値の見積りは以下のように行われる．

時刻 t において状態が x_t であって行動 a_t を実行した結果，状態は x_{t+1} に遷移し，報酬 r_t が得られたとき，Q 値はつぎの変更幅で更新される．

$$\Delta Q(x_t, a_t) = \alpha(r_t + \gamma \max_b Q(x_{t+1}, b) - Q(x_t, a_t)) \qquad (2)$$

ここで，α は学習率 (learning rate) と呼ばれる．つまり，次のステップで最適と思われる行動を選択したときに得られると見込まれる評価の見積もり $\max_b Q(x_{t+1}, b)$ を割引率 γ だけ割り引いた値と，そこで直接得られた強化信号 r_t の和にもとの Q 値 $Q(x_t, a_t)$ を近づける．

Q-Learning では，学習された Q 値をもとに行動を決定する．行動決定の方法としては，多くの場合次式のような Boltzmann 分布に基づく確率的な行動選択がなされる．

$$P(a|x) = \frac{\exp(Q(x,a)/T)}{\sum_{b \in \text{actions}} \exp(Q(x,b)/T)} \qquad (3)$$

ただし，T は温度定数であり，この値が大きいほど各行動に対する Q 値の差が行動確率に反映されないので，行動はよりランダムになり積極的な探索を行うことになる．

しかしながら，このような Q-Learning では，状態および行動が離散的であることや時刻 t での状態遷移は時刻 $t-1$ における行動のみ依存するというマルコフ性が仮定されており，より一般の問題空間に適用するためには拡張が必要である．

3 ファジィ推論を導入した Q-Learning

ここでは，従来の手法では扱うのが困難であった連続値の状態・行動をとる問題を扱うために，Q-Learning の行為決定評価にファジィ推論を導入する学習法を提案する．提案手法では，対象問題に関する先験的知識をファジィネスを介して与え，これを媒介として学習を推進する．すなわち，従来の Q-Learning ではすべての状態と行動の組合せについての表 (Q-Table) を参照することにより，Q 値を出力していたのに対して，提案手法では状態・行動をファジィ変数としてファジィ推論により Q 値が出力される（図 1）．

3.1 提案手法のアルゴリズム

まず表 1 に，提案する学習法のアルゴリズムの概略を示す．

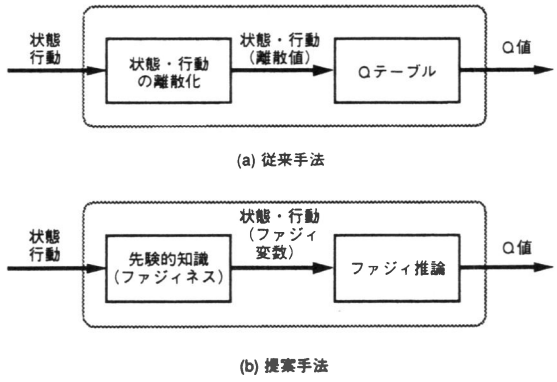


図 1: 従来手法と提案手法

Step1. ファジィ推論により Q 値を求める

Step2. 行動選択

Step3. 状態遷移

Step4. ファジィ推論により次状態での各行動についての Q 値を求める

Step5. Q 値の更新

Step6. ファジィルール後件部の更新

Step7. **Step1** にもどる

表 1: 提案手法のアルゴリズム

Step1, **Step4** においてファジィ推論を用いて Q 値を導出する点と，**Step2** における行動選択手法，ならびに **Step6** のファジィルール後件部の変更が従来の手法と大きく異なる点である．以下，それらを中心にアルゴリズムの各ステップについて説明する．

3.1.1 ファジィ推論による Q 値の導出

状態ならびに行動に対し，関数型推論法 [4],[5] を用いたファジィ推論によりその Q 値を導出する．学習対象の状態が n 次元連続値ベクトル $\boldsymbol{x} = \{x_1, \ldots, x_n\}$，行動が連続値 a により表現されているとする．ここで，各変数をファジィ変数とし，メンバーシップ関数を用いて表現する．

状態 x，行動 a から Q 値を導出するためのファジィルールは以下のようになる．

$$R_i \quad : \quad \text{If } x_1 \text{is } A_{x_1 i}, \text{and} \ldots, \text{and } a \text{ is } A_{ai} \\ \text{then } Q = f_i(x_1, \ldots, x_n, a) \tag{4}$$

ここで，$A_{xi}, \ldots, A_{ai}$はファジィ集合である．一方，ファジィルール R_iの後件部には以下の線形式を用いることにする．

$$f_i(x_1, \ldots, x_n, a) = \\ C_{x_1 i} \cdot x_1 + \ldots + C_{x_n i} \cdot x_n + C_{ai} \cdot a + C_{const.i} \tag{5}$$

各ファジィルール R_iについて適合度ω_iを計算し，これらの重み付き平均

$$Q = \frac{\sum \omega_i \cdot f_i(x_1, \ldots, x_n, a)}{\sum \omega_i} \tag{6}$$

により推論結果が非ファジィ化され，Q 値が導出される．

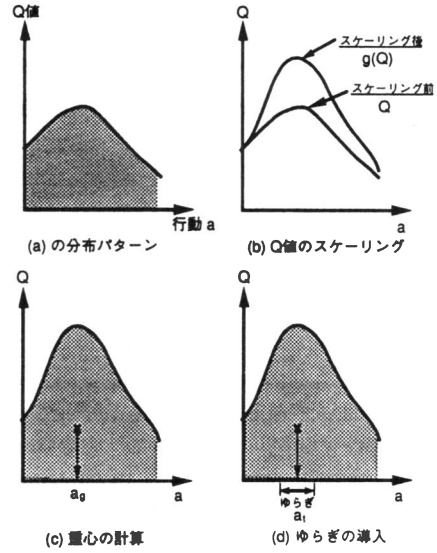


図 2: 行動選択

3.1.2 行動選択

本研究で提案する方法は連続値をとる行動を扱うものであるため，従来の方法のようにとり得るすべての行動に対する Q 値を求めるのは困難である．したがって，状態 x_tにおいて有限個の行動をサンプルし Q 値を求める．つぎに，サンプルした Q 値を関数 $g(y) = exp(y/T)$ に代入し，スケーリングを行い，この関数の面積重心を与える行動 a_gを求める（図 2(a)-(c)）．

さらに，学習を進めるに際してさまざまな探索を行うために，面積重心を与える行動 a_gに対していくらかのゆらぎを加えて選択結果 a_tを求める（図 2(d)）．これは，式 (3) において Boltzmann 分布に基づく確率的な行動選択を行うのとは異なるが，連続値をとる行動を扱うためには妥当であると考えられる．ただし，ゆらぎは一様乱数により与えるが，学習が進むにつれてその分散を徐々に小さくしていく．

3.1.3 Q 値の更新

Step4 で求めた Q 値の最大値$\max_b Q(x_{t+1}, b)$ と $Q(x_t, a)$ を先の Q 値の更新式 (2) に代入して更新幅$\Delta Q(x_t, a)$ を求める．

3.1.4 ファジィルール後件部の変更

Step5 の後，$Q(x_t, a_t)$ の更新幅 $\Delta Q(x_t, a_t)$ をもとに後件部の変更を行う．すなわち，ファジィ推論により導かれる値が，更新値 $Q(x_t, a_t) + \Delta Q(x_t, a_t)$ に近づくように，Q 値を導出するのに用いられたファジィルールの後件部のパラメータを変更する．これには，いま Q 値が更新される状態 x_tと行動 a_tにおける $f_j(x_t, a_t)$ の値が式 (2) から導出される $\Delta Q(x_t, a_t)$ だけ増加するように変更すればよい．この際，状態・行動空間において (x_t, a_t) の一点だけの更新ではなく，この点の近傍の Q 値の更新を行う方法として，仮想的な“ばねモデル”を用いて，ファジィルール後件部の変更幅を算出する．以下に変更されるファジィルールの各パラメータの変更幅を示す．ただし，n は状態の次元数，$x_{\max}, x_{\min}$は更新するファジィルール中のファジィ変数 x に関するファジィ集合の上限値と下限値

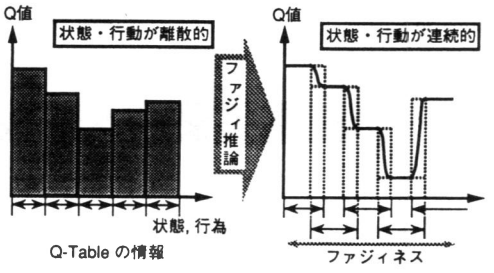


図 3: 提案手法の特徴

状態量	区間	分割数
θ[deg]	$[-12,-6]$ $[-6,-1]$ $[-1,+1]$ $[+1,+6]$ $[+6,+12]$	5
$\dot{\theta}$[deg/s]	$[-\infty,-50]$ $[-50,+50]$ $[+50,+\infty]$	3
x[m]	$[-2.4,-0.8]$ $[-0.8,+0.8]$ $[+0.8,+2.4]$	3
$\dot{x}$[m/s]	$[-\infty,-0.5]$ $[-0.5,+0.5]$ $[+0.5,+\infty]$	3

表 2: 状態空間の分割

を表す.

$$\Delta C_x = \frac{2x_0 - (x_{\max} + x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})^2} \cdot \frac{\Delta Q}{n+1} \tag{7}$$

$$\Delta C_{const.} = \sum_{(x,x_0)} \frac{x_{\max}^2 + x_{\min}^2 - x_0\,(x_{\max} + x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})^2} \cdot \frac{\Delta Q}{n+1} \tag{8}$$

$$x \in (x_1, \ldots, x_n, a),\ x_0 \in x$$

3.2 提案手法の特徴

提案手法は，状態 x と行動 a から Q 値を導出する際にファジィ推論を用いるものであり，従来の Q-Table を用いる方法では状態・行動をともに離散的に扱うため，Q 関数の曲面は柱状分布していたものが，ファジィ推論を用いることによりなめらかに近似（内挿）することが可能になると考えられる（図 3）.

連続状態空間を離散化せずに Q-Learning を用いる方法としては，Lin ら [6] が提案した Q-net がある．これは階層型ニューラルネットワークを用いて Q 値を算出するものである．しかしながら，Q-net では，取り得る行動 1 つ 1 つに対してこの Q-net を用意する必要があるため行動は離散的であるが，本研究で提案する方法では，行動も連続値をとることが可能である.

4 倒立振子制御問題への適用

倒立振子制御問題では，振子の角度θ, 角速度$\dot{\theta}$, 台車の位置 x, 速度 $\dot{x}$を状態量とし，行動として台車に加える操作量 Fを決定する．倒立振子系はつぎの微分方程式で表すことができる.

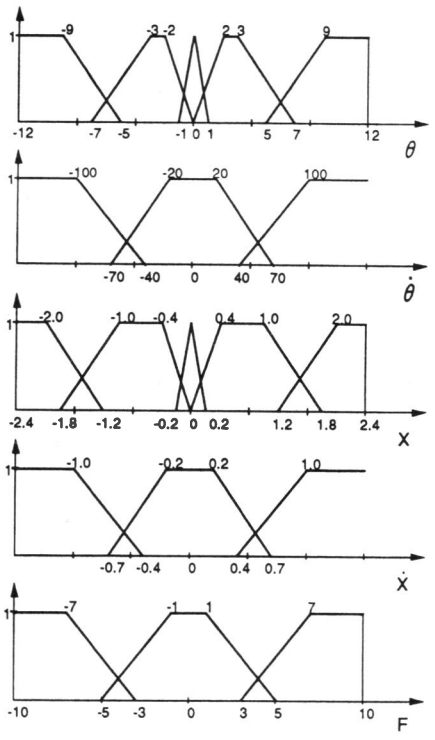


図 4: 状態および行動に関するメンバーシップ関数

$$\ddot{\theta}_t = \frac{g\sin\theta_t + \cos\theta_t\left[\frac{-F_t - ml\dot{\theta}_t^2\sin\theta_t + \mu_c\mathrm{sgn}(\dot{x}_t)}{m_c+m}\right] - \frac{\mu_p\dot{\theta}_t}{ml}}{l\left[\frac{4}{3} - \frac{m\cos^2\theta}{m_c+m}\right]} \tag{9}$$

$$\ddot{x}_t = \frac{F_t + ml\left[\dot{\theta}_t^2\sin\theta_t - \ddot{\theta}_t\cos\theta_t\right] - \mu_c\mathrm{sgn}(\dot{x}_t)}{m_c+m} \tag{10}$$

系のパラメータは，Barto ら [7] と同じ設定である．1 回の試行は振子が 12 度以上傾いたとき，あるいは台車がレールからはみ出したとき失敗したとし，強化信号-1 を与える．時間ステップは 0.02 秒とし，Runge-Kutta-Gill 法を用いてシミュレーションを行う．2000 秒以上失敗なかったときには成功したものとし，つぎの試行を行う．成功が 10 回以上続いたとき，学習を完了する.

4.1 従来の Q-Learning の適用

状態空間を有限個の部分状態空間に分割して各部分状態空間に Q 値を割り当てる手法である Q-Table を用い，倒立振子系の制御問題のシミュレーションを行う．倒立振子系の各状態量の分割は表 2 のように行う.

各状態量の分割数から，倒立振子系の状態空間は $5\times3\times3\times3 = 135$ 個に分割される．操作量として取り得る行動 Fは$-10, 0, 10$[N] の 3 値であり，よって $135 \times 3 = 405$ 個の Q 値を記憶する Q-Table を用いた Q-Learning を適用する.

4.2 ファジィ推論を用いた Q-Learning の適用

提案手法では，対象問題に関する先験的知識として，状態と行動をファジィ変数として表すメンバーシップ関数を設定する必要があるが，倒立振子制御問題への適用に際しては図 4 に示すように設定

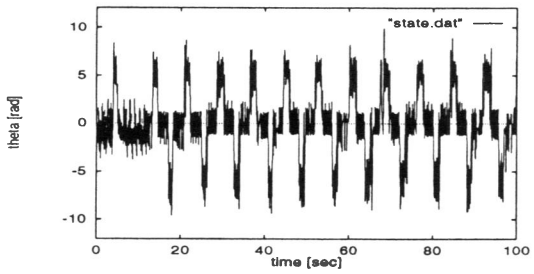


図 5: 従来手法による振子の角度θの推移

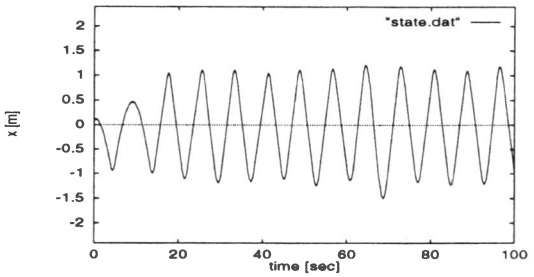


図 6: 従来手法による台車の位置 x の推移

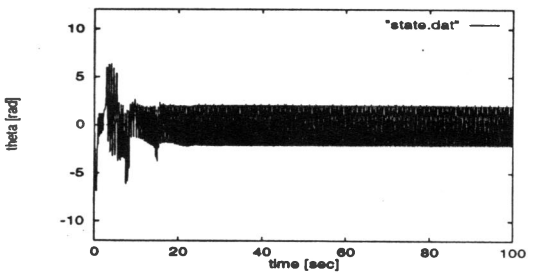


図 7: 提案手法による振子の角度θの推移

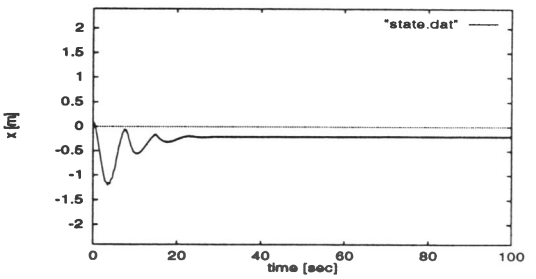


図 8: 提案手法による台車の位置 x の推移

する．ファジィルールの後件部は$\theta, \dot{\theta}, x, \dot{x}, F$についての線形式であり，関数型推論法を用いたファジィ推論によって Q 値を出力する．

ここでは，学習時間を短縮するために，まず Q-Table を用いた Q-Learning を行い，ある程度学習した結果（Q-Table の情報）をもとにして提案手法による学習を行う．すなわち，Q-Table における状態・行動に対応するファジィルールの後件部（式 (5) 参照）の定数項 $C_{const.}$ に，Q-Table を用いた Q-Learning により学習された Q 値を代入し，1 次項の定数はすべて 0 とする方法をとる．この方法により，Q-Table の情報が初期値として利用され，ファジィ推論によりなめらかに内挿される（図 3 参照）．

4.3 学習結果

図 5, 6 に状態空間を分割した従来の Q-Learning を適用した場合の学習結果を示す．また，図 7, 8 に予め状態分割を行い Q-Table を用いて学習した結果をもとにしてファジィ推論を導入した Q-Learning を適用した場合の学習結果を示す．従来の Q-Learning を適用した場合に比べ，提案手法を適用した場合は θ, x とも明らかにより安定しており，より高レベルな制御を実現する制御則が学習可能であると言える．

5 むすび

本研究では，状態および行動が連続空間である問題に Q-Learning が適用できるように，Q 値を求める行為決定評価にファジィ推論を導入した学習法を提案し，倒立振子制御問題に適用することによりその有効性を確認した．これは，ファジィルールを用いて Q 関数を表現するものであり，ファジィルールの前件部として状態および行動を与え，後件部により Q 値が推定される．この推定された Q 値をもとに最適な行動を決定するとともに，Q 値の更新幅からファジィルール後件部の更新がなされる．

しかしながら，提案手法の問題点もいくつか考えられる．まず，従来手法に比べ学習に多くの時間が要することがあげられる．さらに，本提案では Q 関数を表現するファジィルールの後件部には線形式を用いたため，複雑な曲面を近似するのは困難である．また，後件部の変更に際して，仮想的な“ばねモデル”を用いてファジィルール後件部の変更幅を算出したが，このモデルの妥当性を含めたより詳細な解析を行う必要がある思われる．さらに今回は，前件部のメンバーシップ関数を先験的知識として予め与えたが，今後は前件部も含めて学習する枠組みを考える必要がある．

参考文献

[1] 畝見達夫：強化学習，人工知能学会誌，Vol.9, No.6, pp.830–836, 1994

[2] Sutton, R. S.:Learning to Predict by the Methods of Temporal Difference, Machine Learnig, Vol.3, pp.9-44, 1988

[3] Watkins, C. J. and Dayan, P.: Technical Note: Q-Learning, Machine Learning, Vol.8, pp.279-292, 1992

[4] 水本雅晴：ファジィ推論 (1)，日本ファジィ学会誌，Vol.4, No.2, pp.256-264, 1992

[5] 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988

[6] Lin, Long-Ji and Mitchell, M.：Reinforcement Learning With Hidden States, From Animals to Animats 2, The MIT Press, pp.271-280, 1993

[7] Barto, A.G. et.al.: Neuronlike Adaptive Elements That Can Solve Difficult Learning Control Ploblems, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-13, No.5, pp.834-846, 1983

連絡先

〒606-01
京都市左京区吉田本町
京都大学工学研究科精密工学専攻
堀内 匡
TEL: 075-753-5241 FAX: 075-771-7286

WC4-1

主観に基づいた感情処理を用いた対話システム
An Emotional Dialogue System Based on Subjective Observation

○ 白濱 成希　吉田 香　矢鳴 虎夫
○ Naruki SHIRAHAMA　Kaori YOSHIDA　Torao YANARU

九州工業大学 工学部 電気工学科
Department of Electric Engineering, Faculty of Engineering,
Kyushu Institute of Technology

Abstract

This paper introduces a basic concept of human cognitive model including emotional function. We discuss here a mapping function for a dialogue between simulated persons who knows only the emotional words. At first, we refer to the theory for Subjective Observation Model (SOM)[2], which have high applicability to several kinds of fields[3][4][7].

Second, we propose the basic concept of emotional dialogue system based on the theory for SOM. We consider a number of SOM as a kind of cognition (or interpretation). Next, we show an example of Image Code Table (ICT) concerning Mixed Emotions which are regarded as general emotions in usual life, introduced by R.Plutchik[1], and also show that the values of ICT are produced based on 8 pure emotions. Finally we show the attractive results by the computer simulation. The emotional words on a local system are mapped on the particular observation space on which the origin of mapping and the scaling are taken into special consideration.

1. はじめに

人工知能の研究は，人間の知的行動を表現するコンピュータの構成を目標として，言語レベルの論理指向中心で行われてきた．しかし，現在，次の段階の研究として，コンピュータの扱う対象が論理の世界から感性の世界へ発展することが必要だと考えられている．感性を扱う研究は幅広い分野で行われている．本研究では，感情心理学に対象を限定し，ヒューマンコミュニケーションの分野への応用研究を示す．

2. 主観の数理モデル

2.1 主観的な感性情報

感性に関する情報として，視覚，聴覚，嗅覚，触覚，味覚，その他，仮想現実感といったものが挙げられる．これらの情報の処理は，人間の主観に大きく依存し，例えば同じオブジェクトでも個人によって受けるイメージが大きく変わってくる，このように，感性情報処理のモデル化には，主観性，曖昧性，多義性，状況依存性といった要素を考慮しなければならない．そしてこのような特性を持った情報に対しては，論理系だけではなく数値系による処理系を構築する必要がある．

我々は，人間の主観というものを数学的にモデル化して主観観測モデル理論[2]を構築した．これはベクトル表現された多次元オブジェクトを2次元平面に写像することを，人間の認知作用とのアナロジーから構築された数理モデルである．モデルを数学的に構築することで，ファジイやニューラルネットワークといった感性情報を扱うのに有効な手法と融合させることで，さらなる応用研究[3][5]を進めている．

2.2 主観観測モデル理論

3次元以上の空間内で定義されたベクトルの位置関係をイメージ的に把握することは一般に困難である．そのため我々人間は多次元オブジェクトに対しては，図1に示すように，次元を落とし様々な角度から観測して全体を認識することが多い．

そこで，オブジェクトをベクトル表現する必要が生じる．あるオブジェクトに対し，その名称と属性を考えて，ラベルと次元ベクトルで表現し，これをオブジェクトに関する**イメージコード**と呼び，イメージコードの集合を**イメージコード・データベース**と呼ぶことにする．

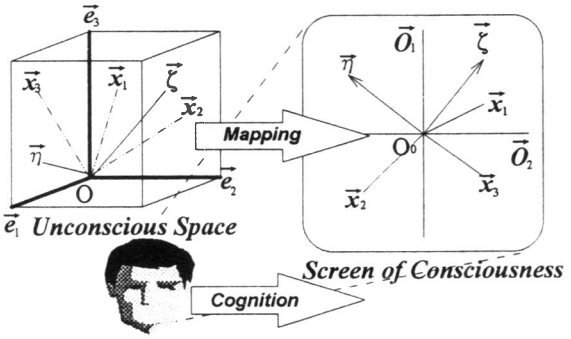


図1 主観観測モデル理論のイメージ

イメージコードによって表現されたオブジェクトの世界（n次元ベクトル空間）で直接的に観測，認知するのではなく，意識のスクリーンともいうべき観測平面に写像してはじめて観測・認識が行われるというモデルにする．

このモデルは数学的な記号を用いて以下のように記述できる．基本ベクトル$\{\vec{x}_k^{(i)}\}$（kはイメージコードの数）と，その原点と基底をそれぞれO_iと$(\vec{e}_1^{(i)},\vec{e}_2^{(i)}\cdots,\vec{e}_8^{(i)})$にする正規直交基底座表枠$\Omega_i=(O_i;\vec{e}_1^{(i)},\vec{e}_2^{(i)},\cdots,\vec{e}_8^{(i)})$，によって規定される部分ベクトル空間の中で等価に表現される．ここに$\vec{V}_1^n$は内積関係が許されたn次元のベクトル集合（n次元内積ベクトル空間）で，$\{\vec{x}_k\}\in\vec{V}_1^n$であり，また，$\bar{X}_i$はベクトルの起点や座標の原点などの基礎集合で，$O_i,\cdots\in X_1$である．また観測用平面の座表枠$\Omega_0$は，正規直交座標基底を$(\bar{O}_1,\bar{O}_2)$として，$\Omega_0=\{O_0;\bar{O}_1,\bar{O}_2\}$である．

ここで，記述の簡潔を記すため誤解を招かないかぎり，$\vec{x}_k^{(i)},\vec{e}_1^{(i)},\vec{e}_2^{(i)},\cdots$，を$\vec{x}_k,\vec{e}_1,\vec{e}_2,\cdots$，と記述する．

3. 対話モデル

3.1 主観観測ベクトル対と写像関数

アフィン写像の一般的定義から写像関数を定める．空間，$(X_i,\vec{V}_i^n)$の中から任意に，2つのベクトル$(\vec{\zeta},\vec{\eta})$を取り出す．

$$\vec{\zeta}=\zeta_1\vec{e}_1+,\cdots,+\zeta_n\vec{e}_n\ , \tag{1}$$

$$\vec{\eta}=\eta_1\vec{e}_1+,\cdots,+\eta_n\vec{e}_n\ , \tag{2}$$

任意のベクトル$\vec{a}\in\vec{V}_1^n$に対する観測平面への写像関数Φを

$$\Phi(\vec{a})=(\vec{\zeta}\cdot\vec{a})\bar{O}_1+(\vec{\eta}\cdot\vec{a})\bar{O}_2 \tag{3}$$

で定義すると．

$$\Phi(\vec{a})=\left(\sum_{i=1}^{n}a_i\zeta_i\right)\bar{O}_1+\left(\sum_{i=1}^{n}a_i\eta_i\right)\bar{O}_2 \tag{4}$$

となる．原点O_iと原点O_0との写像fが与えられている限り，(4)式によって空間から任意に取り出される2つのベクトル対$(\vec{\zeta},\vec{\eta})$で空間上のすべてのベクトルを写像することができる．このような理由からこのベクトル対を，以後**主観観測ベクトル対**ということにする．

3.2 対話用の写像関数

図2に示すように，主観観測ベクトル対が定める観測用2次元平面を，認識系の一種と考える．この認識系を複数設定し，自他のオブジェクト(感情)を区別して認識するような機能を導入する．

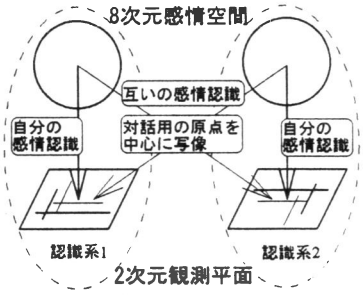


図2 対話システムのイメージ

ここで2次元平面の原点の写像に関して，認識系が他の認識系のオブジェクトを写像するための，特別な原点を設定する．(以後，この原点を**対話用原点**と呼ぶ)．感情空間$(X_i,\vec{V}_i^n)$とk番目の観測空間の座表枠をそれぞれ

$$\Omega_i=(O_i;\vec{e}_1,\vec{e}_2,\cdots,\vec{e}_8),\ \Omega_{k0}=\{O_{k0};\bar{O}_{k1},\bar{O}_{k2}\}$$

とする．任意のベクトル$\vec{a}\in\vec{V}_i^n$に対して$(X_i,\vec{V}_i^n)$から$(X_{k0},\vec{V}_{k0}{}^2)$へ$(\vec{\zeta},\vec{\eta})$が定める写像$(f_{k0},\phi_{k0})$，および対話用の写像関数$\phi'$は

$$\bar{f}_{k0}=\overrightarrow{O_{k0}f_k(O_1)}=\left(\sum_{i=1}^{n}\zeta_{ki}\right)\bar{O}_{k1}+\left(\sum_{i=1}^{n}\eta_{ki}\right)\bar{O}_{k2}, \tag{5}$$

$$\phi_{k0}(\vec{a})=\left(\sum_{i=1}^{n}a_i\zeta_i\right)\bar{O}_{k1}+\left(\sum_{i=1}^{n}a_i\eta_i\right)\bar{O}_{k2}, \tag{6}$$

$$\phi'(\vec{a})=\bar{f}_{k0}+\phi_{k0}(\vec{a}),\ (\text{for } k=1,2,\cdots) \tag{7}$$

によって定義される．図3に(7)式による写像のイメージを示す．

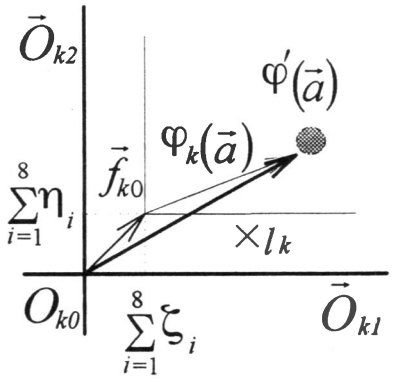


図3 写像のイメージ

4. 感情心理学

今回，対象となるオブジェクトは感情に関する単語(感情語)に限定した．第一に，感情語をどのように表現するかを示す．ここで取り扱う感情語は感情心理学におけるR. Plutchik[1]の理論を参考とし，8次元ベクトル形式で表現した．これをイメージコードと呼ぶことにする．そして日常の主な感情語群に対してそれぞれイメージコードを設定しイメージコード辞書を作った．表1にイメージコード辞書の一部を示す．

表1 イメージコード辞書の一部

	感情語	喜び	怒り	期待	嫌悪	悲しみ	恐れ	驚き	受容
1	恍惚 ecstasy	91	0	30	-30	-91	0	-30	30
2	喜び joy	74	0	50	-30	-74	0	-50	30
3	幸福 happiness	65	0	50	-30	-65	0	-50	30
4	快 pleasant	52	0	30	-30	-52	0	-30	30
5	穏やか quiet	40	0	10	-30	-40	0	-10	30
6	平穏 calm	30	0	10	-30	-30	0	-10	30
7	自尊心 pride	55	55	0	-30	-55	-55	0	30
8	楽観 optimism	48	0	48	-30	-48	0	-48	30
9	希望 hope	67	0	67	-30	-67	0	-67	30
10	不健全 unhealthy	45	0	30	45	-45	0	-30	-45

一般に混合感情を表す単語のイメージコード$\{\vec{x}_k\}$ (k = 1,⋯,68)は，8個の属性(純粋感情)を正規直交基底$\{\vec{e}_i\}$, $(\vec{e}_i \cdot \vec{e}_j) = 0$ (i, j = 1,⋯,8)のどれかの基底ベクトルとそれぞれ対応させることによって，ベクトル列$\{\vec{x}_k\}$として

$$\vec{x}_k = x_{k1}\vec{e}_1 + x_{k2}\vec{e}_2 + \cdots + x_{k8}\vec{e}_8 \text{ , (for } k = 1,\cdots,68) \quad (8)$$

ただし，

$$\{\vec{e}_1,\cdots,\vec{e}_8\}=\{\text{[joy], [anger], [expectation], [hate], [sadness], [fear], [surprise], [acceptance]}\} \quad (9)$$

であらわすことができる．

5. 計算機実験

感情空間に対し写像の原点を移動する事で，観測結果にどのような違いが生じるかを確かめる実験を行なった．ここでは，様々な主観観測ベクトル対$(\vec{\zeta},\vec{\eta})$がつくる写像関数により，感情空間$(X_i,\vec{V}_i^n)$の68個のイメージコードが，どのように2次元平面$(X_{k0},\vec{V}_{k0}^{\,2})$に写像されるかを示す．

実験の手順を以下に説明する．主観観測ベクトル対$(\vec{\zeta},\vec{\eta})$を感情空間から任意に選びだす．2次元平面上の領域$\{(x,y)|-2.0<x,y<2.0\}$の点(x,y)に対し，

$$a_i' = \left(\sum_{j=1}^{n}\zeta_j x\right)\zeta_j + \left(\sum_{j=1}^{n}\eta_j y\right)\eta_j$$

が定める主観上の擬似ベクトルを，感情空間の中で2乗ノルムが一番近いイメージコードを主観による観測結果とみなす．2次元平面上の各点を主観による観測結果ごとに領域として分割して示す．

ここでは，楽観的で好奇心旺盛な人物を想定して，主観観測ベクトル対を(楽観,好奇心)とした．写像関数の特徴を調べるために68個全てのイメージコードを対象とした．2次元観測平面上に，1から68の数字で描かれている．比較のために写像関数に(4)式を用いた場合を図4に，(7)式を用いて写像の原点が移動した場合の観測結果を図5に示す．写像原点の移動により観測結果が変化しているのがわかる．

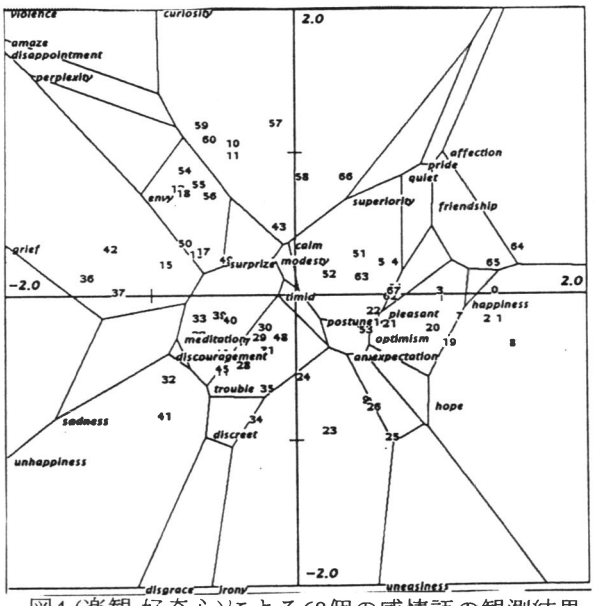


図4 (楽観,好奇心)による68個の感情語の観測結果
(原点そのまま)

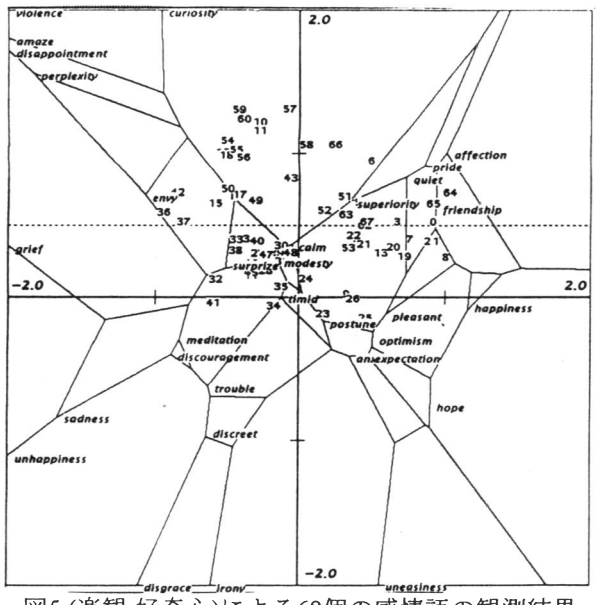


図5 (楽観,好奇心)による68個の感情語の観測結果
(原点移動)

6. 結論

認識・解釈のための写像関数を新たに定義し，対話システムの提案を行った．写像時の原点の移動により観測結果が変化することは確かめたが，その意味付けについては未検証である．本論文のシステムが実際の人間の場合にそのままあてはまるとはいえないが，今後さらにいろいろな主観観測ベクトル対で観測することで，システムの妥当性を検討していきたい．今後，更に研究を進めていき，情緒や感性に関する基本的処理系に発展することを目指していきたい．

参考文献

[1] Plutchik.R. (1960): "The multifactor-analytic theory of emotion", Journal of psychology, pp.153-171 .

[2] T.Yanaru. (1993): "Basic Concept and Theory for Subjective Observation Model, and the Applicability to Create a New Machine Equipped with Emotional Functions", Fifth IFSA World Congress, pp,50-53.

[3] 矢鳴虎夫,白浜成希,玉木明和,廣田豊彦. (1993): "主観観測モデル理論に基づく感情表現", 日本ファジイ学会誌 Vol.5, No.4, pp.745-760 .

[4] T.Yanaru, K.Nakashita, and N.Shirahama. (1993): "Expression of Emotion by Neural network Structure Based on the Theory for Subjective Observation Model", Fifth IFSA World Congress, pp.23-26.

[5] 河田敬義 (1976): "アフィン幾何・写影幾何" (岩波講座数学線形代数5) 岩波書店

[6] 松山義則,浜治世 (1974): "感情心理学",誠信書房.

[7] Yanaru T., Shirahama (1993): N. "Expression of Emotions Based on Dynamic Emotional Image Code and the Theory for Subjective Observation Model", (5th Annual Meeting of Biomedical Fuzzy Systems Association pp.123-132.

連絡先

住所　：〒803　北九州市戸畑区仙水町1-1
九州工業大学 工学部 電気工学科
情報工学教室
氏名　：白浜 成希 (Naruki SHIRAHAMA)
Phone　：093-884-3245
Fax　：093-884-3245
E-mail　：naruki@human1.comp.kyutech.ac.jp

WC4-2

感覚量の曖昧性と文脈効果を考慮した変動刺激音に対する心理的応答予測

A Prediction Method of Psychological Response to Random Noise Stimulus Taking Account of Fuzziness and Context Effect for Human Sense

山口 静馬　○佐伯 徹郎　加藤 裕一
Shizuma Yamaguchi　Tetsuro Saeki　Yuichi Kato
山口大学工学部　呉工業高等専門学校
Faculty of Engineering, Yamaguchi University　Kure Technical College

Abstract

In general, the noise problem occurs only after a psychological response to the noise stimulus is caused, and it is extremely important to grasp quantitatively the mutual relationship between the physical sound stimulus and the psychological response. In the psychological noise evaluation, however, the fuzziness caused by the subjective judgment of the impression by human beings is latent. Moreover, a psychological evaluation of acoustical stimulus is influenced and changes about the put individual various factors — it is well-known as a so-called context effect. In this paper, a method for predicting the psychological response to the noise stimulus taking account of the fuzziness and the context effect for human sense is proposed by using the fuzzy sets theory, in the case when the persons are exposed to fluctuating random noise with arbitrary frequency distribution and lebel probability distribution charactreristics. Concretely, the membership function is first introduced to grasp the fuzziness caused by the psychological judgment of the acoustical stimulus. Next, how the context effect is produced by the change of dynamic range of random noise stimulus is considered experimentally. Finally, the validity and the usefulness of the proposed prediction method are confirmed by applying it to the actually observed data.

1 緒言

一般に騒音問題は、騒音刺激に対する心理的応答が生じて初めて発生するものであり、原因としての物理的音響刺激と結果としての心理的応答との関係を定量的に把握することは極めて重要である [1][2]。しかしながら、音響刺激に対する人間の心理的評価には、元来、不可避的な"あいまいさ"が付随しており、その個人の置かれている環境の様々な要因の影響を受けて変動する、いわゆる文脈効果が生ずることが知られている [3][4]。本報告は、刺激として特に音響刺激の場合をとりあげ、これに対する人間の主観的判断に付随する曖昧性と文脈効果を同時に考慮して、任意スペクトルをもつ不規則変動音に対する人間の心理的応答を予測するための一手法を提案したものである。具体的には、まず音響刺激に対する人間の心理的評価に付随するあいまい性に対処するため、まずメンバシップ関数を導入している。そして、呈示刺激音のレベル変動域によって文脈効果がどのように生ずるのかを実験的に検討し、過去の心理実験によるメンバシップ関数を用いて種々のレベル変動域と周波数特性を持つ刺激音に対する心理的評価値を理論的に予測し、実測データとの比較を行なっている。

2 文脈効果について

柿崎 [3][4] によれば、精神物理学的判断に限定した場合の文脈効果とは、「一つの刺激あるいは一つの反応、さらには一つの刺激－反応関係のもつ効果が、他の刺激や反応あるいは刺激－反応関係との関係によって変化すること」を指している。文脈効果を規定する要因として、系列刺激の値の変化する変動範囲が考えられるが、音響刺激の場合には音圧振幅と周波数の双方に関する変動範囲がこれに相当する。本研究では、特に音の大きさに関する心理的応答を考察対象にすることから、上記の中の音圧レベル変動域による文脈効果に考察の焦点を置くことにする。

3 心理実験の概要

音響刺激に対する心理的判断に着目し、音圧レベル変動域によっていかに文脈効果が現われるかを調べること、この文脈効果を考慮したファジィ理論による予測結果と心理実験の実測データとの比較を行なうこと、この2つを目的として種々のレベル変動域を持つ音響刺激系列を用いて室内心理実験を行なった。その概要を以下に示す。

3.1 被験者

20代の学生延べ45名（男性37名、女性8名）。3名を1グループとして、それぞれのグループを対象として同時に実験を行なった。

3.2 呈示音

以下に示す刺激音 (A) (B)を一様分布に従うランダム変数によって 5 秒毎に振幅変調したものを採用した。

(A) 周波数範囲 [45,11200] [Hz] の広帯域制限白色雑音。

(B) (A)の帯域制限白色雑音を RC フィルタ (R=3750 [Ω]、C=1 [μF]、RC=3.75 $\times$ 10^{-3} [s]) に通した有色雑音。

音圧レベルの変動域としては次の7種類とした。

(1) 40～65[dB] (5) 50～75 [dB]
(2) 40～70[dB] (6) 50～80 [dB]
(3) 40～75[dB] (7) 50～85 [dB]
(4) 40～85[dB]

3.3 測定法

刺激音に対する心理的評価尺度として、次のような7つのカテゴリー化された表現を採用した [5]。

F1: 非常に静か　　F2: かなり静か
F3: やや静か　　F4: どちらともいえない
F5: ややうるさい　　F6: かなりうるさい
F7: 非常にうるさい

予め DAT に録音した、白色雑音をバンドパスフィルターにより [45,11200] [Hz] 内に帯域制限した後、振幅変調を施したランダム音響刺激系列を、被験者に連続呈示した。被験者には呈示刺激音に対する心理的印象を上記 $F1$～$F7$ のカテゴリー化されている表現の中から5秒ごとに必ず1つを選択する方式で判断させた。この判断結果とともに、その時の刺激音の音圧レベル値も同時に計算機に取り込んだ。1グループにつき5分間連続判断させ、刺激音 (A) (B) 共、1種類の刺激系列についてそれぞれ5回行なった。

4 刺激音のレベル変動域に対する文脈効果

まず刺激音 (A),(B)について、その変動域と共にいかに文脈効果が現われるかを考察する。種々のレベル変動域を持つ刺激系列ごとに、カテゴリー判断を下したときの刺激音に対する平均レベル値を求めた。その結果を図1 に示す。同じカテゴリー判断を下したとしても、その時の平均レベル値は刺激系列のレベル変動域によってかなりの差異が認められ、文脈効果が生じていることが明らかである。

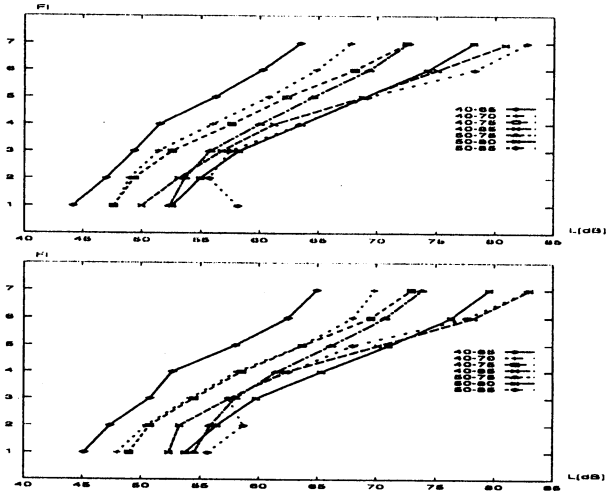


図1 各カテゴリー判断値に対するレベルの平均値

5 広帯域制限白色雑音に対する心理的印象のメンバシップ関数と文脈効果

刺激音 (A)について4節で用いた実測データから、各刺激系列が持つ音圧レベル変動域の差異によって文脈効果が具体的にどの程度現われるかを詳細に調べるため、心理実験による実測データを用いて、それぞれの心理的印象 $Fi(i = 1,2,...,7)$ に対するメンバシップ関数 $\mu_{Fi}(L)$ を設定した。その結果を図2 に示す。各印象のメンバシップ関数は呈示刺激音のレベル変動域に依存して、似かよった形状のメンバシップ関数が異なるレベル領域に分布していることが分かる。

次に各レベル変動域ごとのメンバシップ関数$\mu_{Fi}(L)(i = 1,2,...,7)$ 間の相対的類似性を調べるため、それぞれのメンバシップ関数の台を [0,1] 区間に標準化して、面積比、重心、中央値の3種類のパラメータを用いて比較してみた (具体的な結果は発表当日示す)。各レベル変動

域を持つ音響刺激系列に対する心理的印象 $F1$～$F7$ のメンバシップ関数は、ほぼ同程度の面積比、重心及び中央値を示していることが認められた。

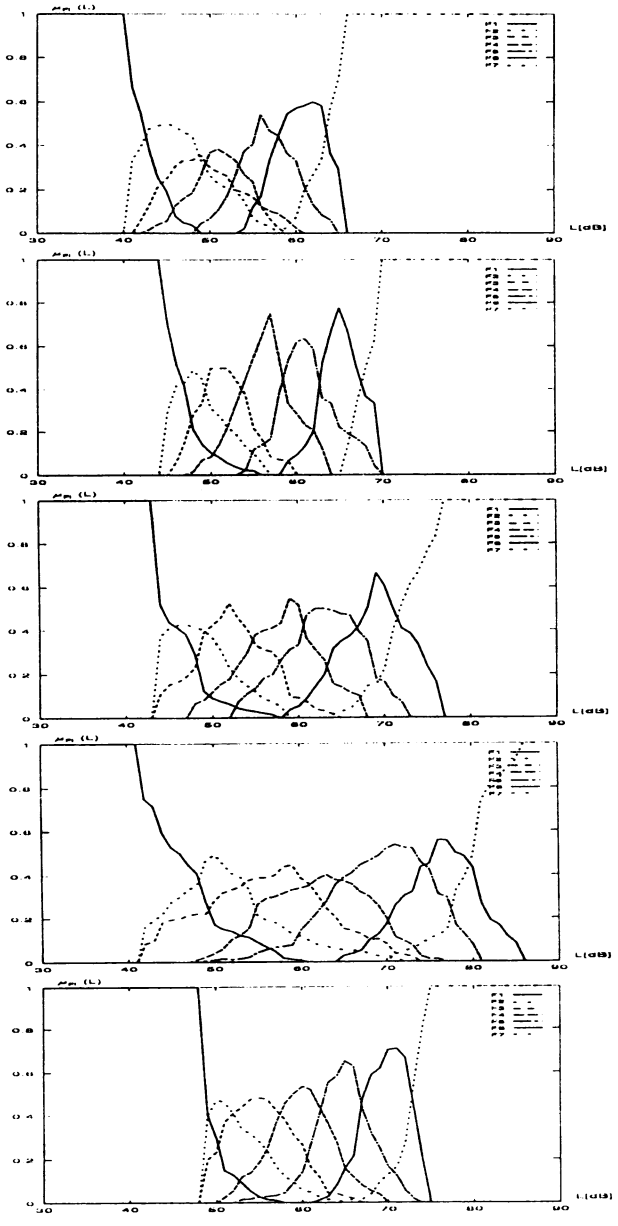


図 2 各レベル変動域に対するメンバシップ関数

6 文脈効果を考慮した任意変動刺激音に対する心理的応答の予測

まず評価対象としての変動刺激音が有する 2 つの特性: 周波数特性と振幅分布特性のうち、前者の周波数特性を用いて変動刺激音に暴露された場合の心理的印象 $Fi(i = 1,2,...,7)$ に関するメンバシップ関数を推定することを考える。具体的には既発表の論文 [6] で設定した中心周波数 $f_{cj}(f_{c1} = 63, f_{c2} = 125, ..., f_{c8} = 8000)$ [Hz] を持つオクターブ帯域制限白色雑音に対するメンバシップ関数群 $\mu_{Fi}(L; f_{cj})(i = 1,2,...,7; j = 1,2,...,8)$ を用いて、

$$\mu_{Fi}(L) = \sum_{j=1}^{8} a_j \mu_{Fi}(L; f_{cj}) \quad (L \in D_L = [40,90]) \quad (1)$$

によって求めた。ただし、a_j は (評価対象としての) 任意有色音響刺激音が j 番目に有するエネルギーの全エネルギーに対する比率である。刺激音 (A)(B)について求めた結果を図 3 に示す。

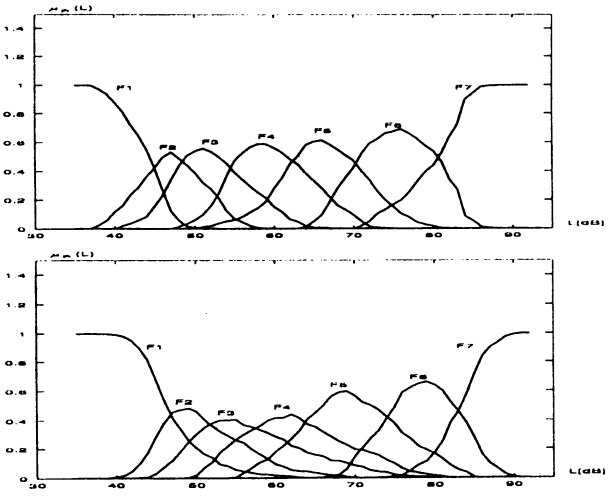


図 3 各刺激音に対するメンバシップ関数

次に、変動刺激音が有する振幅分布特性を用いて、目的とする心理的応答の予測について考察する。一般に、不規則に変化する音響刺激に対しては、その心理的印象も時々刻々不規則に変化することが知られている [7]。従って、このような不規則音響刺激系列に対する心理的応答の一つの自然な評価値として、ファジィ事象としての各 $Fi(i = 1,2,...,7)$ が出現する時間率の組が採用できる。これは音響刺激系列が従う振幅レベル確率密度関数 $p(L)$ と (1) 式から定まるメンバシップ関数を用いて、次のように求められる [8]。

$$P(Fi) = \int \mu_{Fi}(L) p(L) dL \quad (2)$$

ただし、(1) 式から求まる $\mu_{Fi}(L)$ $(L \in D_L)$ の台 L と音響刺激系列のレベル確率密度関数 $p(L)$ の変域を、共に [0,1] 区間に標準化して用いる。(2) 式によって得られた $Fi(i = 1,2,...,7)$ に対する理論的予測結果と心理実験による実測データとの比較の例を図 4 に示す。

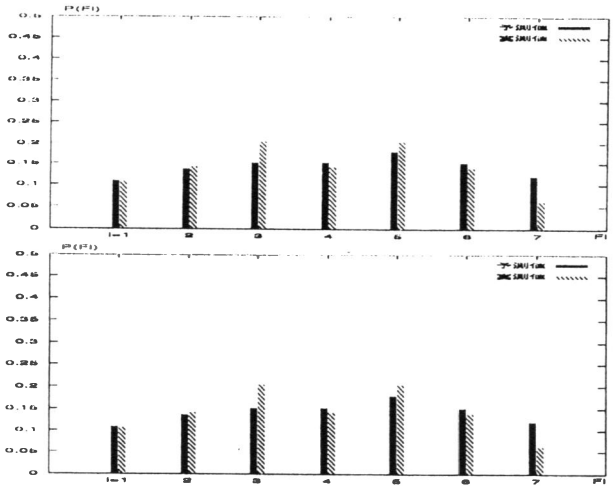


図 4 心理的応答に対する理論的予測値と実験値の比較

他方、もう一つの評価方法として順序尺度:$Fi(i = 1,2,...,7)$ を距離尺度:$Fi = i$ と捉え、(3) 式を用いてマクロ的に評価することも考えられる。

$$< Fi >= \sum_{i=1}^{7} iP(i) \qquad (3)$$

上式による予測結果と実測データとの比較を図 5 に示す。予測値と実測値とのかなりの一致性が認められる。図 4,5 から、音響刺激系列の周波数特性とレベル分布特性が何らかの方法で事前に求められれば、この音響刺激に暴露された場合の心理的応答を予測することが可能であることが分かる。

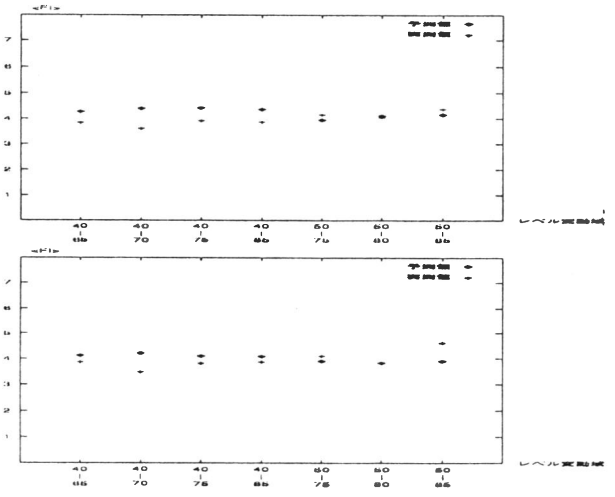


図 5 各レベル変動域に対する平均的な心理的印象

7 結言

本論文では、広帯域制限白色雑音とこれを RC フィルタに通した有色雑音の 2 種類を音響刺激として採用し、様々なレベル変動域による文脈効果が明らかに生ずることをまず確認した。次いで、この事実を踏まえて、種々のレベル変動域に対する心理的応答の予測方法について考察した。文脈効果を考慮したファジィ理論による変動刺激音に対する心理的応答の予測値は、実測データとよく一致していた。

謝辞

本研究に多大な援助を頂いた、山本乃之・大石浩代・木許健一の 3 氏に深謝の意を表する。

参考文献

[1] 山口静馬, 加藤裕一, 老松建成, 佐伯徹郎: "音声聴取時の外来雑音に対する心理的評価", 電子情報通信学会論文誌 A, **J77-A**, 11, pp.1433-1442 (1994)

[2] 山口静馬, 加藤裕一, 老松建成: "騒音のパワースペクトル情報に基づく心理的応答の一予測手法", 日本音響学会誌, **49**, 1, pp.2-9 (1993)

[3] 柿崎祐一: "精神物理的判断における文脈効果", 心理学研究, **34**, 4, pp.235-246 (1966)

[4] 難波精一郎, 吉川敏枝, 桑野園子: "音の大きさ判断における文脈効果", 心理学研究, **39**, 4, pp.191-199 (1968)

[5] 降旗建治, 柳沢武三郎: "各種騒音源の心理的影響を共通に評価できる評価尺度の構成に関する検討", 日本音響学会誌, **45**, 8, pp.579-582 (1989)

[6] S.Yamaguchi, T.Saeki, Y.Kato and K.Oimatsu: "A prediction method of psychological impression caused by fluctuating random noise based on fuzzy sets theory", Proceedings INTER-NOISE '94, pp.1129-1132 (1994)

[7] 難波精一郎, 桑野園子, 中村敏枝: "カテゴリー連続判断法による自動車交通騒音の評価", 日本音響学会誌, **34**, 1, pp.29-34 (1978)

[8] 水本雅晴: ファジィ理論とその応用, サイエンス社 (1989)

連絡先

〒 755 宇部市常盤台 2557
山口大学知能情報システム工学科
山 口 静 馬
TEL 0836-35-9481
FAX 0836-29-0053

WC4-3

ファジィ理論による音声聴取時の有色外来雑音に対する心理的評価
Psychological Evaluation Method for External Non-White Noise in the Case of Listening to Audio Signal Based on Fuzzy Sets Theory

○山口 静馬　佐伯 徹郎　老松 建成
Shizuma Yamaguchi　Tetsuro Saeki　Kensei Oimatsu
山口大学工学部　海上保安大学校
Faculty of Engineering, Yamaguchi University　Maritime Safety Academy

Abstract

A systematical method for predicting the psychological response to external random noise in the case of listening to an audio signal is proposed, by using the fuzzy sets theory. Concretely, when the persons listening to an audio signal are exposed to the external noise with arbitrary power spectrum characteristics, the fuzzy relation between the sound pressure level of an audio signal and that of the external noise is estimated approximately by the uni-variate membership function. Hereupon, the membership function is established on the universe of the signal to noise ratio. Next, a method for predicting the psychological response is proposed by use of the above membership function. Finally, the validity and the usefulness of the proposed prediction method are confirmed experimentally by applying it to the actually observed data.

1 緒言

音声信号と外来雑音との関係についてはこれまで多くの人々によって考察され、その成果が蓄積されている[1][2]。しかしこれらの多くは、例えばマスキング効果や明瞭度特性などのように、音声の感知と理解といった立場からの、どちらかと言えば、考察の力点が音声信号の方に置かれたものが多いように思われる。本報告ではこれらの研究とはやや異なった観点から考察している。即ち、講演会や授業中での雑音のように、音声聴取時の外来雑音に対して聴衆がどのような心理的判断を下すかといった、感覚的評価の対象が聴取すべき音声信号ではなく外来雑音の方に向けられている。更に、雑音に対する判断はあくまで人間の主観によるものであり、この感覚的判断結果に不可避的に内在するあいまい性を当初から考慮に入れている。具体的には、既発表の考察[3]を更に発展させ、音声聴取時に様々なレベル確率分布特性やパワースペクトル特性をもつ任意有色雑音が外部から侵入した場合、聴衆がその雑音に対してどのような心理的判断を下すかを予測するための方法を次の手順に従って考察している。

(1) 標準的な外来雑音としてオクターブバンド幅をもつ帯域制限白色雑音を採り上げ、これらに対する(予め7つにカテゴリー化した)心理的印象に着目して、各心理的印象に関する音声信号と外来雑音の間のファジィ関係を、近似的に、SN比を台としたメンバシップ関数でまず捉える。

(2) (1)で求めたメンバシップ関数群を用いて、任意の周波数スペクトル形状をもつ非白色雑音が侵入した場合の心理的印象に関するメンバシップ関数を推定する。

(3) (2)の結果を利用して、任意のレベル確率分布に従うランダム雑音が音声聴取時に侵入してきた場合の心理的応答を、各心理的印象の出現時間率の形で予測する。

上の手順で得られた心理的応答に関する理論的予測結果と心理実験による実測データとの比較を行ったところ、両者のほぼ良い一致が認められた。

2 心理実験の概要

音声聴取時における帯域制限型の外来白色雑音に対する心理的印象に関して、音声信号音圧レベルと雑音音圧レベルとの間のファジィ関係を事前に調べるため、および、任意分布形の外来有色雑音に対する心理的応答の理論的予測結果と心理実験の実測データとの比較を行うため、室内心理実験を行った。その概要を次に示す。

2.1 実験場所

縦:7.3(m) ×横:12.1(m) ×高:2.6(m) の容積をもつごく普通の大学構内の実験室。残響時間 [4] は中心周波数が 500,1000,2000(Hz) の 1/3 オクターブ帯域制限白色雑音に対してそれぞれ 1.8,1.8,1.7(s) 程度である。

2.2 実験時期と時間

9 月下旬。暗騒音の影響をできるだけ避けるため学生の殆どいない休日・土曜・日曜を選び、更にその中でも最も静かな朝と夕の時間帯に行った。心理実験中における部屋の暗騒音の音圧レベルは約 44〜45(dB) であった。

2.3 被験者

聴力正常な 20 代、40 代、50 代の男性各 1 名および 20 代の女性 2 名の計 5 名である。

2.4 呈示音

2.4.1 音声信号

音声信号の代表例として、男性の講演会に関する市販のテープを再生して用いた。オーバーオール値を基準とした相対的パワスペクトル形状を図 1 に示す。但しこれらの値は長時間継続している音声信号の中の最初の 5 分間についての連続した分析結果である。同図より本実験で用いた音声信号は、男性の音声としてかなり標準的なものであることが分かる。

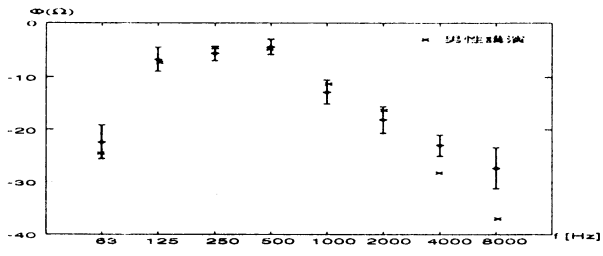


図 1 男性音声信号に関するパワースペクトル

2.4.2 外来雑音

(1) 音声音圧レベルと雑音音圧レベルのファジィ関係を事前に設定するための標準的雑音: 白色雑音を一様分布に従うランダム変数によって振幅変調 (継続時間: 10 秒) した後、これをオクターブバンドパスフィルタ (中心周波数: $f_1 = 63, f_2 = 125, ..., f_8 = 8000$(Hz) の 8 種類) に通した帯域制限型の雑音を採用した。

(2) 評価対象としての雑音: 外来雑音としては工場騒音や道路交通騒音等の無意味音から会話や音楽等の有意味音までさまざまなものが考えられるが、ここでは無意味音の場合に限定して次の 3 種類を用いた。

(A) 白色雑音を一様分布に従うランダム変数によって振幅変調 (継続時間: 10 秒) した後、これを帯域幅 [45, 11200(Hz)] のバンドパスフィルタに通した (オーバーオール) 広帯域雑音

(B) 白色雑音を一様分布に従うランダム変数によって振幅変調 (継続時間: 10 秒) した後、これを RC フィルタ (時定数: 3.75×10^{-3}(s)) に通した非白色雑音 (面密度が約 3(kg/m^2) の遮音一重壁に白色雑音が垂直入射した時の透過音に相当する)

(C) 比較的交通量の少ない道路端で DAT を用いて収録した道路交通騒音

上記の (B) と (C) は、任意のパワースペクトル形状をもつ外来雑音の代表的な例として採用した。

2.5 測定法

外来雑音に対する心理的評価尺度としては、その表現方法に様々なものが考えられるが [5]、多くの人々に最も頻繁に用いられしかも多くのデータに基づいた経験から近似的に順序尺度を距離尺度と見做しても差し支えないであろうとされる、降旗ら [6] が提案している次の 7 つのカテゴリー化した心理的印象を用いた。

F1 非常に静か
F2 かなり静か
F3 やや静か
F4 どちらともいえない
F5 ややうるさい
F6 かなりうるさい
F7 非常にうるさい

また、難波らの開発したカテゴリー連続判断法 [7] にならって、被験者は音声と外来雑音を同時に聞き、雑音に対する印象 $Fi(i = 1, 2, ..., 7)$ を 10 秒ごとに計算機内に入力した。その時の音声音圧レベル値と雑音音圧レベル値も同時に記録した。10 秒間隔で 5 分間連続して判断し、この操作を 1 種類の実験につき 8 回繰り返した。

3 帯域制限白色外来雑音の場合のファジィ関係

音声信号聴取時の外来雑音に対する各心理的印象 $Fi(i=1,2,...,7)$ に関して、音声音圧レベル値と雑音音圧レベル値におけるファジィ関係は、一般的には行列表現されるが、次の3つの理由から、SN比を台とするメンバシップ関数で近似的に表現することとした。

(1) かなり安定したファジィ関係を行列の形で求めるためには膨大な心理実験データを必要とする。また、たとえこれが求まったとしても、音声と雑音のレベル値を同時に捉える必要があり(これらの2変数結合確率分布をも必要とする)、外来雑音に対する心理的応答を予測するためのデータ処理が極めて煩雑になる。

(2) ファジィ行列を用いる場合は、心理的応答の予測結果の見通しがつけにくく全体像を把握しにくい。

(3) 音環境の設計や音場の質的向上のための騒音対策といった音響工学分野においては、SN比の概念はなじみ深く好都合である。

このような観点から、本研究では、各心理的印象 $Fi(i=1,2,...,7)$ に関する音声音圧レベルと雑音音圧レベルにおけるファジィ関係をSN比を台とした1変数のメンバシップ関数:

$$\mu_{Fi}(L) \quad (i=1,2,...,7) \tag{1}$$

で与えた。外来雑音として帯域制限白色雑音を用いた場合の心理実験データから、心理的印象 $Fi(i=1,2,...,7)$ に対するメンバシップ関数を推定した結果の一例を図2に示す。

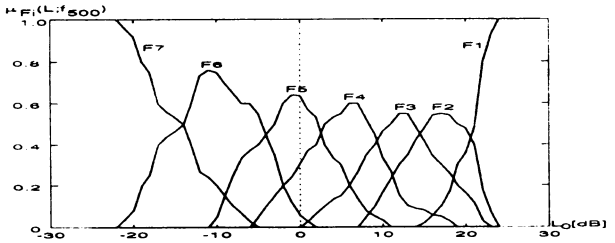


図2 メンバシップ関数の一例 ($f_C = 500$(Hz))

ただし、心理的印象の性質と心理実験の性質を考慮して、次の二つの条件

凸性 [8]:

$$\mu_{Fi}(\lambda L_1 + (1-\lambda)L_2) \geqq min(\mu_{Fi}(L_1), \mu_{Fi}(L_2)) \quad (\forall L_1, L_2 \in D = [-30,30], \forall \lambda \in [0,1]) \tag{2}$$

直交性:

$$\sum_{i=1}^{7} \mu_{Fi}(L) = 1 \quad (\forall L \in D_L) \tag{3}$$

を満足させている点には留意する必要がある。

4 有色外来雑音に対する心理的評価の予測

任意のパワースペクトル形状をもつ有色雑音が音声聴取時に侵入した場合、心理的印象 $Fi(i=1,2,...,7)$ のメンバシップ関数がどのようになるかを、先に設定したメンバシップ関数群 $\mu_{Fi}(L;f_K)(i=1,2,...,7;K=1,2,...,8)$ を用いて推定することを考える。その一つの方法として、本報告では、評価対象の有色外来雑音が各周波数帯域内でもつエネルギー量に着目して

$$\mu_{Fi}(L) = \sum_{K=1}^{8} a_K \mu_{Fi}(L;f_K) \quad (i=1,2,...,7)$$

$$(a_K \geqq 0, \forall K; \sum_{K=1}^{8} a_K = 1) \tag{4}$$

なる線形結合を採用する。ただし、$a_K(K=1,2,...,8)$ は外来有色雑音が K番目のオクターブバンド内に有するエネルギーの全エネルギーに対する比率である。

次に、上のエネルギー比率をもち任意のレベル確率密度関数 $p(L)$ に従うランダム雑音が侵入した場合の心理的応答に対する予測について考察する。一般に、不規則に変動する騒音刺激に対しては、その短時間スケールにおける心理的印象もレベル変動にある程度追従しながら不規則に変化することが既に知られている [7]。従って、このような不規則外来雑音に対する心理的応答の一つの自然な評価値として、ファジィ事象としての各心理的印象 $Fi(i=1,2,...,7)$ が出現する時間率の組を採用することができる [3]。即ち、客観的かつ定量的に把握できる L(SN比)の確率密度関数と(4)式のメンバシップ関数を用いて、L があるレベル値 LL 以上を示した場合の心理的応答を、次の条件付きファジィ確率を用いて評価するのである。

$$P(Fi|L \geqq LL) = \frac{P(Fi \bigcap (L \geqq LL))}{P(L \geqq LL)}$$

$$P(Fi \bigcap (L \geqq LL)) = \int \mu_{Fi \bigcap (L \geqq LL)}(L) p(L) dL$$

$$\mu_{Fi \bigcap (L \geqq LL)}(L) = min(\mu_{Fi}(L), \chi_{(L \geqq LL)}(L))$$

$$\chi_{(L \geqq LL)}(L) = 1 (L \geqq LL), \quad = 0 (L < LL) \tag{5}$$

(5) 式によって予測した結果の一例として、外来雑音が広帯域白色雑音で LL の値が 0(dB) の場合を示したものが図 3 の予測値である。他方、心理実験の実測データから直接 $Fi(i = 1, 2, ..., 7)$ に関する条件付き相対度数を求めた結果が同図の実測値として示したものである。

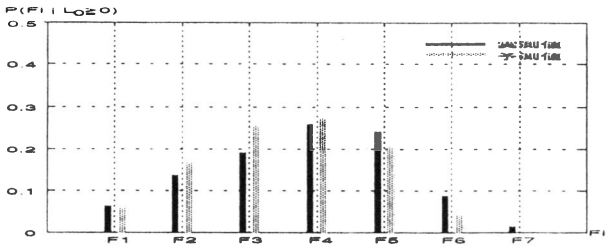


図 3 心理的応答 $P(Fi|L \geqq LL)$ に対する理論的予測値と実測値の比較 (広帯域白色雑音, $LL = 0$)

上記のように、各心理的印象の条件付きファジィ確率 (または時間率) の組で外来雑音に対する評価をきめ細かく表現するのも勿論一つの方法であるが、順序尺度: $Fi(i = 1, 2, ..., 7)$ を距離尺度: $Fi = i$ としてマクロに捉えるのも一方法である。

$$< Fi|L \geqq LL > = \sum_{i=1}^{7} i \cdot P(i|L \geqq LL) \qquad (6)$$

外来雑音を広帯域白色雑音として、LL の種々の値に対して上式の理論的予測値と実測値との比較を行ったものが図 4 である。

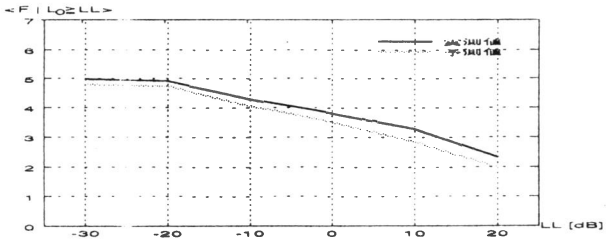


図 4 平均的な心理的応答に対する理論的予測値と実測値の比較 (広帯域白色雑音)

同図から次のことが分かる。

(1) 全体的な傾向として、SN 比が大となるにつれて外来雑音が気になる度合いが小となる自然な傾向が明らかに読み取れる。

(2) 心理的印象に対する理論的予測値は実測値をかなり良く捉えている。

(3) (2) の一致性の結果は、音声音圧レベルと雑音音圧レベルに関するファジィ関係を SN 比を台とした一変数のメンバシップ関数で近似的に捉えることのできる可能性を示している。

謝辞

本研究に多大の援助を戴いた上河内葉子・待寺二三代の両氏に深謝の意を表する。

参考文献

[1] 電子通信学会: 聴覚と音声, p.85, コロナ社 (1968)

[2] 日本音響学会編: 聴覚と音響心理, p.107, コロナ社 (1978)

[3] 山口, 老松, 加藤, 佐伯: 電子情報通信学会論文誌, J77-A, 11, pp.1433-1442(1994)

[4] 前川: 建築音響, p.13, 共立出版 (1976)

[5] 日本建築学会編: 騒音の評価法, 彰国社 (1981)

[6] 降旗, 柳沢: 日本音響学会誌, 45, 8, pp.577-582(1989)

[7] 難波, 桑野, 中村: 日本音響学会誌, 34, 1, pp.29-34(1978)

[8] 水本: ファジィ理論とその応用, サイエンス社 (1991)

連絡先

〒 755 宇部市常盤台 2557
山口大学知能情報システム工学科
山 口 静 馬
TEL 0836-35-9481
FAX 0836-29-0053

WC5-1

ファジィモデルに基づく制御系の挙動を考慮したファジィ制御器の言語的設計と倒立振子を用いた実験による検証

On Linguistic Design Method of Fuzzy Controllers Considering Dynamical Behaivior of Fuzzy Control Systems Based on Fuzzy Models and Its Experiments Using an Inverted Pendulum

足立 学 古橋 武 内川 嘉樹
Gaku Adachi Takeshi Furuhashi Yoshiki Uchikawa

名古屋大学工学部
Faculty of Engineering, Nagoya University

Abstract — **This paper presents a new automatic design method of fuzzy controllers using description of dynamical behavior of fuzzy control systems. Required response of the control systems can be given by linguistic expressions. The feasibility of the new method is examined by experiments with an inverted pendulum. The results show that the method is effective to satisfy the linguistic requirements.**

1 はじめに

ファジィ制御[1]は、あいまいな制御アルゴリズムを if-then 型のファジィルールにより言語的に記述できる、ヒューマン・コンピュータインタラクションに優れた制御法である。しかし、ファジィ制御器を設計する際のファジィルールの同定やメンバーシップ関数の調整等は試行錯誤により行われることが多く、一般に多大な労力を必要とする。

従来の制御理論では、制御対象のモデルから安定性の保証された制御系を構築する手法が確立されている。ファジィ制御においてもこれに倣って、制御対象のファジィモデル[2] に基づくファジィ制御器の設計手法が提案されている。田中は、リアプノフの直接法を用いて対象のファジィモデルから安定性の保証されたファジィ制御器を設計する手法を提案した[3]。しかし、この手法は、ファジィモデルを高木・菅野の推論法[2] により記述し数式モデルとして取り扱っているため、ファジィ制御の定性的でわかりやすいという特徴が活かされているとは言い難い。安川らは、言語的に表されたファジィモデルによるファジィ制御器の設計法を提案した[4]。この手法では、定性的なアプローチに従いファジィ制御器をわかりやすく設計できるが、基本的には制御対象の逆システムによりファジィ制御器を構成しており制御系の動的な挙動については考慮されていない。

筆者らはこれまでに、ファジィ制御系に代表されるファジィ動的システムの挙動をそのファジィモデルを用いて言語的に記述する手法を提案してきた[5][6]。本手法によれば、制御系の挙動をファジィ制御器と対象のファジィモデルのファジィルールにより Rule-to-Rule Mapping としてわかりやすく記述でき、その結果から制御性能に悪影響を及ぼす制御ルールの発見および修正等も期待できる。そして、簡略化ファジィ推論により同定した制御対象のファジィモデルからファジィ制御器を定性的に設計する手法を提案した[7]。さらには、言語によって与えられた制御系の望ましい応答を、同定した制御対象のファジィモデルの言語ラベルを用いて表現し、その応答を実現する制御ルールを Rule-to-Rule Mapping を通して逐次定めていくことでファジィ制御器を設計する手法を提案した[8]。

本稿では、制御対象のファジィモデルを基に、所望の制御系の応答を設計仕様として言語的に与え、その応答を実現するファジィ制御器を自動的に獲得する手法を提案する。倒立振子を制御対象とした実験装置を用い、所望の挙動を満足するファジィ制御器が獲得できることを示す。ファジィモデルの獲得は、言語的に表記されたファジィルールを自動的に同定できる Type IV のファジィニューラルネットワーク (Fuzzy Neural Network : FNN)[9] により行う。

2 ファジィ制御系の挙動の記述

本節ではまず、筆者らが文献 [5][6] で提案したファジィ動的システムの挙動の記述手法について説明する。

本手法は、制御対象のファジィモデルとファジィ制御器のルール表において、発火ルールの履歴をたどることによりファジィ制御系の挙動を記述するものである。発火ルールは次のように定義される。

定義 1 (発火ルール) 時刻 kにて前件部適合度が最大、すなわち

$$\mu_{ik} = \max_{1 \le j \le n_R} \mu_{jk} \tag{1}$$

なるファジィルール R^iを時刻 kの発火ルールと呼び、R^{i_k}と記す。ただし、μ_{jk}は時刻 kでの R^jの前件部適合度、n_Rはルール数である。

時刻 kにおける制御対象のファジィモデルおよびファジィ制御器の発火ルールをそれぞれ $R_P^{i_k}$, $R_C^{i_k}$とすると、ファジィ制御系の発火ルールは

$$\cdots \rightarrow R_C^{i_k} \rightarrow R_P^{i_k} \rightarrow R_C^{i_{k+1}} \rightarrow R_P^{i_{k+1}} \rightarrow \cdots \tag{2}$$

のように推移する。ここで、各時刻 kの発火ルール $R_P^{i_k}$, $R_C^{i_k}$を

$$R^{i_k} = R_C^{i_k} * R_P^{i_k} \tag{3}$$

により集約する。上式の記号*は、$R_C^{i_k}$の発火を受けて $R_P^{i_k}$が発火することを意味する。さらに、連続する複数のサンプル時刻において発火ルール R^{i_k}が同一となる場合にはそれらを一つにまとめ、時刻 0 から順に R^{i_k}の番号を付け直す。以上により、ファジィ制御系の発火ルールの遷移は

$$\cdots \rightarrow R^{i_l} \rightarrow R^{i_{l+1}} \rightarrow \cdots \tag{4}$$

と表される。ただし、lは $l \ge 0$ の整数であり、すべての lについて $R^{i_l} \neq R^{i_{l+1}}$が成り立つ。(4) 式の発火ルール列により、ファジィ制御系には次のような挙動が定義される。

定義 2 (周期的挙動) ある整数 $L \ge 0$ と $l \ge L$ なる任意の整数 lに対して、ある正整数$\tau \ge 2$ が存在し

$$R^{i_{l+\tau}} = R^{i_l} \tag{5}$$

が成立するとき、ファジィ制御系は周期的挙動をしているという。

定義 3 (平衡状態) 発火ルール列が

$$\cdots \rightarrow R^{i_{l-2}} \rightarrow R^{i_{l-1}} \rightarrow R^{i_l} \tag{6}$$

となり、R^{i_l}以後新たなルールの発火がないとき、ファジィ制御系は平衡状態にあるという。

以上のように、本手法では、発火ルールに注目することによりファジィ制御系の挙動を Rule-to-Rule Mapping としてわかりやすく記述することができる。

3 ファジィ制御器の言語的設計

本稿では、制御対象のファジィモデルから前節の Rule-to-Rule Mapping を用いて所望の制御系の応答を実現するファジィ制御器を自動的に設計する手法を提案する。

ファジィ制御器の設計手順は以下のステップからなる。

(i) 制御対象の入出力データから制御対象のファジィモデルを同定する。

表 1：制御対象の望ましい応答

step	y	Δy
<1>	A_1	D_1
<2>	A_2	D_2
<3>	A_3	D_3
⋮	⋮	⋮
<n>	A_n	D_n

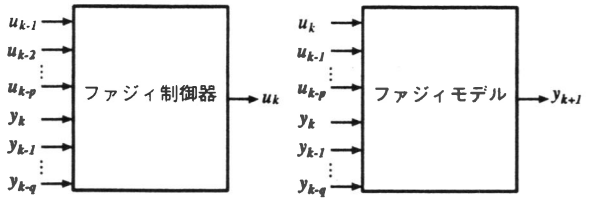


図 1：ファジィ制御器とファジィモデルの入出力関係

(ii) 言語的に与えられた制御系の望ましい応答を、ファジィモデルのメンバーシップ関数のラベルを用いて翻訳する。

(iii) Rule-to-Rule Mapping を用いてファジィ制御器を自動的に設計する。

本稿では (ii)、(iii) の各ステップについて述べる。

まず実現したい制御系の応答が言語によって与えられているとする。また、図 1 に示すような制御対象のファジィモデルが得られたとする。ただし、u_k, y_kはそれぞれサンプリング時刻 kにおけるファジィ制御器の操作量およびファジィモデルの出力である。そこで、望ましい応答を、制御対象の出力 yとその差分Δyに対するメンバーシップ関数のラベルを用いて記述する。得られた制御系の応答の記述は表 1 のようになる。この例では、望ましい応答は n ステップからなり、step<i>における y, Δyが A_i, D_iとなっている。ただし A_iはメンバーシップ関数のラベル 'NB', 'NM', ···またはドントケア '*'、D_iは出力の変化方向で増加 '+', ほぼ一定 '0', ··· またはドントケア '*' である。図 1 には設計しようとしているファジィ制御器を併せて示す。

本稿で提案するファジィ制御器の設計手法は、Rule-to-Rule Mapping を用いて、表 1 の制御系の応答を実現するように図 1 における操作量 u_kを適宜定めていくことで制御ルールを構築するものである。

(i) 制御系の初期状態より操作量 u_{k-1}, ···, u_{k-p}および出力 y_k, ···, y_{k-q}に言語ラベルがそれぞれ定められる。また、ステップ数 i を 1 とする。

(ii) ファジィモデルの出力 y_{k+1}を step<i>または step<i+1>の値とする操作量 u_kを選択する。これにより制御ルールを生成する。なお、過去に生成した制御ルールがこの時点で発火した場合には、step<i>または step<i+1>を実現できるかどうかを調べる。

(iii) step<i>が実現された場合はサンプリング時刻を 1 進め、(ii) の操作を再び行う。

(iv) step<i+1>が実現された場合はサンプリング時刻を 1 進めるとともにステップ数 i も 1 進め、(ii) の操作を再び行う。ここで、すべての挙動が実現 (i=n) されていれば生成された制御ルールで所望の挙動を実現するファジィ制御器が構成される。

このようにして本手法では、望ましい応答の実現に必要な制御ルールが生成される。

所望の制御系の応答を満足する制御ルールは一通りとは限らないので、一般に複数のファジィ制御器が獲得される。特に設計仕様として制御系の応答を与える際にドントケアを多用すると多数のファジィ制御器が獲得される。この数が膨大になるのを防ぐには、適度に設計仕様を厳しくしたり、特定の状態における操作量を事前の知見によりあらかじめ与えることが有効となる。

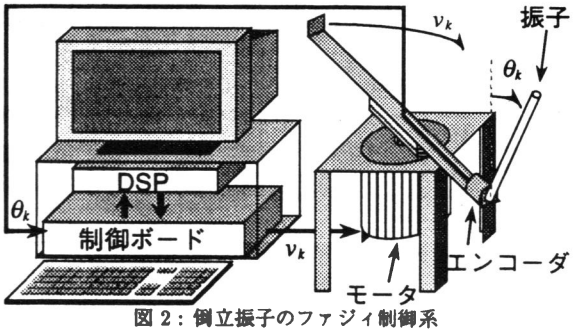


図 2：倒立振子のファジィ制御系

4 倒立振子による実験

本稿で提案したファジィ制御器の新しい設計手法の有用性を検証するため、図 2 の倒立振子を用いて実験を行った。

この倒立振子は、AC サーボモータにより回転するアームの先端に取り付けられており、支点が円軌道を描くようになっている。振子の全長は約 30cm、質量は約 6g であり、振子の支点とモータ軸の間の距離は約 27cm である。図 2 のファジィ制御系では、各サンプリング時刻 kにおいてロータリーエンコーダにより検出された振子の角度θ_kがパソコン内部の DSP に入力され、DSP が算出したモータの速度指令値 v_kを基に制御ボードがモータを動作させることで振子の制御を行う。すなわち、図中の DSP がファジィ制御器に相当している。ただし、本稿では振子の角度のみを制御対象としており、支点の位置制御については考慮していない。また、θ_k, v_kは図示の方向を正とし、サンプリング時間は 50msec とした。

4.1 制御対象のファジィモデリング

まず、倒立振子の入出力データを文献 [9] の Type IV の FNN に学習させることで制御対象のファジィモデリングを行った。この FNN は、言語的に表記されたファジィルールをニューラルネットワークの学習機能により自動的に同定できる。

入出力データは、振幅および周期の異なる正弦波をモータの速度指令値として、振子を様々な初期角度から動作させることにより採取した。FNN の構成は時刻 $k-1$, $k-2$ でのモータの速度指令値 v_{k-1}, v_{k-2} と時刻 k, $k-1$ での振子の角度θ_k, θ_{k-1} を入力、時刻 $k+1$ での振子の角度θ_{k+1}を出力とする 4 入力 1 出力とした。前件部メンバーシップ関数はすべての入力に対し

NB : Negative Big
NM : Negative Medium
NS : Negative Small
ZO : Zero
PS : Positive Small
PM : Positive Medium
PB : Positive Big

のラベルを持つ 7 種類を設定した。

同定された制御対象のファジィモデルにおけるファジィルールの一部を表 2 に示す。表 2 では、

$$\text{If } v_{k-1} \text{ is NB and } v_{k-2} \text{ is NB and } \theta_k \text{ is NM and } \theta_{k-1} \text{ is NS then } \theta_{k+1} \text{ is NB} \tag{7}$$

のようなファジィルールを読み取ることができる。ただし、表中の後件部ファジィ変数のラベルは、θ_k, θ_{k-1} の前件部メンバーシップ関数 (ファジィ変数) にほぼ一致している。なお表 2 の空欄部分にはファジィルールが存在しない。

4.2 制御系の挙動を考慮したファジィ制御器の言語的設計

以上により獲得された制御対象のファジィモデルを用いて、図 2 の倒立振子のファジィ制御器設計を行った。

表 2：倒立振子のファジィモデルの一部

(a) v_{k-1} is NB, v_{k-2} is NB

θ_{k+1}	θ_k						
θ_{k-1}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		NM					PM
NM	PB	NM	ZO				
NS		NB	NS	ZO			
ZO			NS	ZO			
PS					PS	PS	
PM						PM	NB
PB	NM					PM	

(b) v_{k-1} is NB, v_{k-2} is NM

θ_{k+1}	θ_k						
θ_{k-1}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NM	NM					
NM		NM	ZO				
NS			NS				
ZO				ZO			
PS							
PM							PB
PB							

(c) v_{k-1} is PB, v_{k-2} is PM

θ_{k+1}	θ_k						
θ_{k-1}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB							
NM	NM	NM					
NS							
ZO				ZO			
PS					PS		
PM					ZO	PM	
PB						PS	

(d) v_{k-1} is PB, v_{k-2} is PB

θ_{k+1}	θ_k						
θ_{k-1}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB						PB
NM	NM	NM					
NS			NS				
ZO				ZO	ZO		
PS				ZO	PS	PM	
PM					ZO	PM	NB
PB	NM					PM	PM

本稿では、次のような 2 種類の応答に対しそれぞれファジィ制御器の設計を試みた。

応答 1：振子を初期角度がπすなわち垂直下向きで静止している状態からθ_kの値が小さくなる方向に少し振り上げ、その反動を利用して逆方向から倒立させる。

応答 2：挙動 1 と同じ初期状態から振子をθ_k の値が小さくなる方向に少し振った後さらに逆方向に振り上げ、その反動を利用してθ_kが正の値をとる方向から倒立させる。

ただし、両挙動とも今回は倒立整定動作については考慮していない。ファジィ制御器の入力は時刻 $k, k-1$ における振子の角度θ_k, θ_{k-1}とし、出力は時刻 kでのモータの速度指令値 v_kとした。また、各入力に対する前件部メンバーシップ関数には疑似台形型を用いるが、調整は行わない。本実験装置では、ファジィ制御器の入出力計算に必要な時間 (約 2msec) がサンプリング時間 (50msec) に比べて十分短いため、θ_kの計測と v_kの算出を同一時刻とみなしている。

これらの挙動の設計仕様は表 3(a)、表 4(a) のように記述できる。これによりこの設計仕様を満足するファジィ制御器が本手法により

表 3：応答 1 の設計仕様

(a) 制御対象の挙動

step	θ	$\Delta\theta$
<1>	PB	0
<2>	*	−
<3>	PM	*
<4>	*	+
<5>	ZO	0

(b) あらかじめ与えた制御ルール

v_k	θ_k						
θ_{k-1}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB							
NM							
NS							
ZO				ZO			
PS							
PM						PB	
PB							PB

表 4：応答 2 の設計仕様

(a) 制御対象の挙動

step	θ	$\Delta\theta$
<1>	PB	0
<2>	*	−
<3>	PM	*
<4>	*	+
<5>	NM	*
<6>	*	−
<7>	ZO	0

(b) あらかじめ与えた制御ルール

v_k	θ_k						
θ_{k-1}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		NB					
NM		NM					
NS							
ZO				ZO			
PS							
PM						PS	
PB							PB

自動的に設計できる。ただし、表 3(a)、表 4(a) の設計仕様のみでは前節で述べたように多数のファジィ制御器が設計されてしまうため、表 3(b)、表 4(b) に示すように制御ルールの一部をあらかじめ定めた。例えば振子の倒立状態においてモータが停止するように

$$\text{If } \theta_k \text{ is ZO and } \theta_{k-1} \text{ is ZO then } v_k \text{ is ZO} \qquad (8)$$

という制御ルールを与え、さらにその他にも適当な制御ルールをいくつか与えた。

応答 1 の設計仕様を満足するよう設計されたファジィ制御器のファジィルールを表 5 に示す。ここでは獲得されたいくつかのファジィ制御器の中から、最も速い応答を示す制御ルールを選んだ。図 3 は、このファジィ制御器を用いて実機にて制御を行った場合の制御対象の入出力波形を示す。(a) は制御対象の入力であるモータの速度指令値 v_k、(b) は出力である振子の角度θ_kの波形をそれぞれ示す。ファジィ制御器は、表 5 より Type IV の FNN を用いて構成した。図 3(b) の波形は表 3 とよく一致しており、所望の応答を実現するファジィ制御器を得られたことが確認できた。ただし、表 3 では最終的にθ=ZO, $\Delta\theta$=0 の平衡状態に振子が整定しているが、厳密なものではないため、図 3 の実験結果では振子は倒立状態から徐々に落下していく。

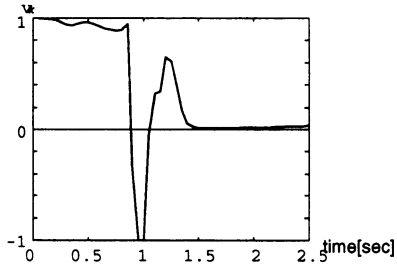
応答 2 を実現するファジィ制御器を表 6 に示す。実現すべき応答が複雑なため表 6 では、表 5 に比べてルール数が多くなってい

表 5：応答 1 を実現するファジィ制御器

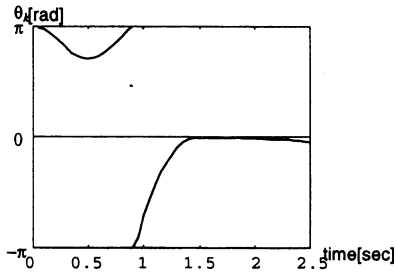
v_k		θ_k						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
θ_{k-1}	NB		NB					
	NM			PS				
	NS				PM			
	ZO				ZO			
	PS							
	PM						PB	PM
	PB	NS					PB	PB

表 6：応答 2 を実現するファジィ制御器

v_k		θ_k						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
θ_{k-1}	NB	NM	NB	NM				PM
	NM	NM	NM					
	NS		NM					
	ZO				ZO			
	PS				NS			
	PM					PB	PS	PS
	PB	ZO					PB	PB

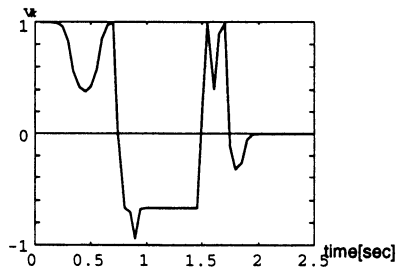


(a) v_k

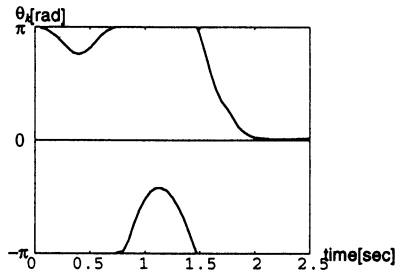


(b) θ_k

図 3：　応答 1 に対して設計された
ファジィ制御器による実験結果



(a) v_k



(b) θ_k

図 4：　応答 2 に対して設計された
ファジィ制御器による実験結果

る。図 4 は、表 6 のファジィ制御器による実験結果を示す。応答 2 についても、望ましい応答を実現するファジィ制御器が設計されたことがわかる。

5　まとめ

本稿では、Rule-to-Rule Mapping により、制御対象のファジィモデルに基づいてファジィ制御器を自動的に獲得する手法を提案した。2 種類の異なる応答の要求に対し、それぞれファジィ制御器の設計および実験を行った。

今後は、本手法についてさらに検討を加え、より複雑なシステムに対して適用していく予定である。

参考文献

[1] 菅野：ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 1988

[2] T. Takagi and M. Sugeno : "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control", IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern., Vol.15, No.1, pp.116–132, 1985

[3] 田中：アドバンストファジィ制御, 共立出版, 1994

[4] 安川, 菅野："知識データおよび数値データに基づく定性的システム記述とファジィ制御器設計への応用", 日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.4, pp.720–735, 1994

[5] 古橋, 堀川, 内川："ファジィ動的システムの挙動の記述に関する一提案", 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.6, pp.1464–1470, 1993

[6] 山口, 堀川, 古橋, 内川："ファジィモデルに基づくファジィ制御系の挙動の記述と倒立振子を用いた実験による検証", 第 10 回ファジィシステムシンポジウム, pp.419–422, 1994

[7] 長谷川, 古橋, 内川："ファジィモデルによるファジィ制御器の設計と制御系の動的挙動の記述に基づく制御ルールの改善", 日本ファジィ学会誌, Vol.7, No.2, pp.413–431, 1995

[8] G. Adachi, S. Horikawa, T. Furuhashi and Y. Uchikawa : "A New Linguistic Design Method of Fuzzy Controller Using a Description of Dynamical Behavior of Fuzzy Control Systems", 1995 American Control Conference, Seattle, 1995 (to appear)

[9] 堀川, 古橋, 内川："間接法に基づくファジィニューラルネットワークの構成法", 第 3 回インテリジェントシステム・シンポジウム, pp.417–422, 1993

問い合わせ先

〒 464-01　名古屋市千種区不老町
名古屋大学工学部電子情報学科 内川研究室
足立 学
TEL : 052-789-2793
FAX : 052-789-3166
E-mail : adachi@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

WC5-2

遺伝的アルゴリズムと超球形メンバーシップ関数によるファジィルール自動生成手法の提案とその応用

Hyper-sphere Membership Function and Auto-generation of Fuzzy Production Rules by Genetic Algorithm and its Applications

井上博行　亀井且有　井上和夫
Hiroyuki Inoue　Katsuari Kamei　Kazuo Inoue

立命館大学理工学部
Ritsumeikan University, Faculty of Science and Engineering

Abstract In the traditional fuzzy control, a combinational membership function composed of one dimensional membership functions has been used. These production rules are, however, very different from rules acquired through our experiences because these rules are regularly divided by hyper-rectangular solid. In this paper, we present an auto-generation technique for fuzzy production rules by Genetic Algorithm (GA). In this method, we make a hyper-sphere membership function for one fuzzy rule in multi-input and multi-output space because we focused on a human rule-acquisition method through their experiments. This method decide a location of fuzzy rules and a width of their fuzziness in the input/output space by GA. We add an information whether the rules are fired or not into genetic operations and lose the number of fuzzy rules by the additional information. We applied this method to the car pursuit control problem, and we confirmed the usefulness of this membership function through this simulation result.

1　はじめに

ファジィ制御[1]は，人間が行う思考過程を取り入れたものとして発展してきた．自動車のような知的制御を扱う場合，人間は経験によって得られたルールにより制御している．ファジィ制御では，この人間の思考過程をファジィ*if-then*ルールで表現し実現している．これらのファジィルールは，一次元メンバーシップ関数より作成される．そのメンバーシップ関数は，それぞれの入出力変数ごとに作られ，ファジィ空間上を超直方体に規則正しくファジィ分割している．しかし，人間が経験的に獲得したルールはこのようには分割されず，ファジィ空間上において必要なルールだけを配置し，その形状も不定形であると考えられる．

近年，遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）[2]を用いてメンバーシップ関数を自動チューニングする手法や推論ルールを自動生成する研究がなされている[3]・[4]．これらの研究の多くは，メンバーシップ関数の形状に注目したものであるため，人間が獲得するルール分割ということは考慮されていない．また，入力数が多い大規模なシステムなどになると，ルール数が指数関数的に増えるという問題もある．

本論では，人間が経験的に身につけたルール分割ということに注目し，一つひとつのルールを超球形メンバーシップ関数[5]で表すことにする．そしてこの超球形メンバーシップ関数によるファジィ *if-then* ルールを GA により自動生成する．このとき一つのルールを一つの染色体で表すこととする．また，必要最少限のルール数にするため，GA における過去の世代においてのルールの発火状況に注目し，ルール発火の許否を決定する情報を遺伝子に埋め込み，ルールの削減，新しいルールの発生の機能を持たせる．最後に本手法を自動車の追従運転とトレーラ・トラックの後退運転[6]に適用する．

2　超球形メンバーシップ関数

2.1　従来のファジィ *if-then* ルール

従来のファジィルール R^k（$k=1,2,\cdots,n$）は，次のように表される．

if x_1 is A_{k1} and x_2 is A_{k2} and $\cdots$ and x_l is A_{kl}
then y_1 is B_{k1} and y_2 is B_{k2} and $\cdots$ and y_m is B_{km}

ルールの前件部における入力 x_i（$i=1,2,\cdots,l$）それぞれに対して一次元メンバーシップ関数が作成される．そして l 次元の入力ファジィ空間において，n 個のルールにより超直方体にファジィ分割される．

また，前件部「x is A」に対する入力「x is x^0」のメンバーシップ値を $A(x^0)$ とするとき，ファジィルール R^k における前件部の適合度 ω_k は一般的に（1）式で表される．

$$\omega_k = A_{k1}(x^0_1) * A_{k2}(x^0_2) * \cdots * A_{kl}(x^0_l) \quad (k=1,2,\cdots n) \quad (1)$$

ただし，* は min または乗算である．このルールの前件部の適合度 ω を高さにとり，入力空間における適合度との関係を図1に示す．

ルールの後件部にあたる出力 y_j（$j=1,2,\cdots,m$）はそれぞれ幾つかのファジィ変数に分けられ，メンバーシップ関数が作られる．したがって，後件部の各出力 y_j は，あらかじめ設定されたファジィ変数の中でどれをとるかを示している．

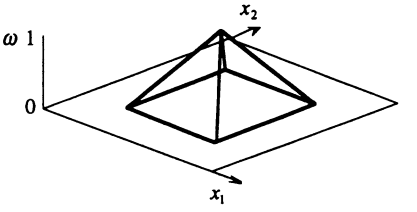


図1　ルールの帰属度（$l=2$）

2.2 超球形メンバーシップ関数によるファジィ *if-then*ルール

人間は，全ての情報を統合した上で空間内を直接いくつかのルールに分割していると考えられる．このことを考慮し，ファジィルール R^k $(k=1, 2, \cdots, n)$ を次のように表すこととする．

R^k: if $\boldsymbol{x}$ is A_k then y is B_k

ただし，

$$\boldsymbol{x}=(x_1, x_2, \cdots, x_l)$$
$$\boldsymbol{y}=(y_1, y_2, \cdots, y_m) \tag{2}$$

ルール R^k の前件部の A_k と後件部の B_k はそれぞれ直接入出力空間上のある領域を指している．また，A_k と B_k は以下に示す超球形メンバーシップ関数として表す．このようなルールを n 個作成し，入出力空間上にそれぞれ n 個の超球形メンバーシップ関数 A_k と B_k とを配置する．

2.2.1 入出力メンバーシップ関数

l 次元ファジィ入力空間上に超球形メンバーシップ関数 A_k $(k=1, 2, \cdots, n)$ を作成する．これは，入力空間上に適合度が 1 となるファジィルール R^k の中心座標 $\boldsymbol{a}_k$ を取り，その中心からの距離に比例してグレードが下がるメンバーシップ関数 μ_{A_k} を考える．ここで $\boldsymbol{a}_k$ と μ_{A_k} を以下のように定義する．

$$\boldsymbol{a}_k=(a_{1k}, a_{2k}, \cdots, a_{lk}) \tag{3}$$
$$\mu_{A_k}: A_k \rightarrow [0, 1] \tag{4}$$

これらのルールの中心座標は，入力空間上に自由に配置され，超球形にファジィ分割される．また，入力 x^0 のルール R^k に関する適合度 ω_k は (5) 式で定義される．なお中心から適合度が 0 となる地点までの距離をあいまいさの距離 α_k とする．

$$\omega_k=\begin{cases} 1-\dfrac{|x^0-a_k|}{\alpha_k} & (|x^0-a_k|\le\alpha_k) \\ 0 & (|x^0-a_k|>\alpha_k) \end{cases} \tag{5}$$

例として，$l=2$ の場合，円形メンバーシップ関数により分割された入力空間を図 2 に示す．またこのときの入力空間とルール R^k の適合度 ω_k との関係を図 3 に示す．

また，入力空間を超球形でファジィ分割するため，全ルールで全入力空間を覆うことができず，図 2 のようにどのルールに対しても適合度が 0 である領域が出現する可能性が生じる．もし，入力 x^0 がこのような領域に存在した場合，発火するルール R^ϕ を以下のように定義する．

$$d_k=|x^0-a_k|-\alpha_k \tag{6}$$
$$R^\phi=\{R^k \mid \min\{d_k\}\} \tag{7}$$

これは全ルールの中で，最もその入力 x^0 に近い位置にあるメンバーシップ関数をもつルールのみが $\omega_\phi=0$ で発火することを意味する．

次に，m 次元のファジィ出力空間上に超球形メンバーシップ関数 B_k $(k=1, 2, \cdots, n)$ を作成する．入力のときと同様，m 次元のファジィ出力空間上に適合度が 1 となる出力値の中心位置 $\boldsymbol{b}_k$ を取り，その中心位置から距離に比例してあいまいさが広がる．よって出力のメンバーシップ関数 B_k は，

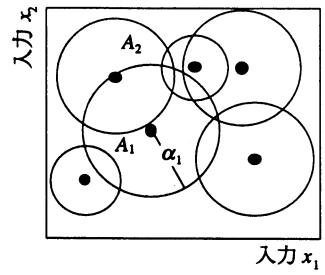


図 2 入力の円形メンバーシップ関数 ($l=2$)

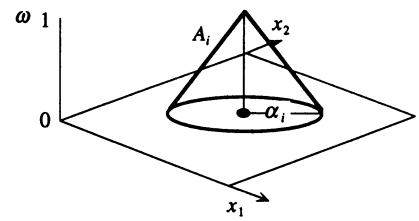


図 3 ルールの帰属度 ($l=2$)

出力空間上のルールの中心位置の座標 $\boldsymbol{b}_k$ と，中心位置から適合度が 0 になるまでのあいまいさの距離 β_k で表される．

2.2.2 推論方法

推論結果 B^0 を求め，非ファジィ化を行い出力 y^0 を算出する．まずルール R^k の前件部における適合度 ω_k を (5) 式で求める．次にこの適合度 ω_k を使い次のようなメンバーシップ関数を定義する．

$$B_k^*(y)=\omega_k * B_k(y) \tag{8}$$

ここでは，* は min 演算である．(8) 式の右辺はルール R^k の推論結果にあたり，メンバーシップ関数 B_k^* は B_k をグレード ω_k でカットされた形となる．推論結果 B^0 は各ルールの推論結果の合成であるから (9) 式のように表せる．

$$B^0=B_1^* \cup B_2^* \cup \cdots \cup B_n^* \tag{9}$$

ここで非ファジィ化を重心法を用いて行い，出力値 y^0 を (10) 式で求める

$$y^0=\frac{\int B^0(y)\, y\, dy}{\int B^0(y)\, dy} \tag{10}$$

y^0 は B^0 の重心座標である．

また R^ϕ の場合は適合度 $\omega_\phi=0$ であるため，その推論結果 B^0 は 2 出力を考えた場合円錐の底面積となる．よって y^0 はこの底面積の重心であるから，底面の円の中心となる．

3 遺伝的アルゴリズムによるファジィ *if-then* ルールの生成

3.1 ルール発火の条件

GAを用いて超球形メンバーシップ関数を持つファジィルールを生成する．ルールはあらかじめ n 個用意しておき，入力ファジィ空間上にランダムに配置する．このとき，全く発火しないルールや同じようなルールが含まれている．そこで，各ルールが発火するかどうかその許否を決定する情報を遺伝子に埋め込む．すなわち，ルール R^k に対してその遺伝子が「許す」という状態であれば，入力がそのルール領域を取る場合ルール R^k は発火し，反対に「否」という状

態であれば発火しない．

このような遺伝子を組み入れ，以下のような操作を行う．あるルールが過去 g 世代一度も発火していない場合，ルールの発火の許否を決める遺伝子を「否」とする．このルールは，次世代からルール発火の対象からはずされる．ただし，そのルールの構造を決定する遺伝子は次世代も残っている．また，この遺伝子も突然変異の対象とする．

3.2 遺伝子のコーディング

ルール R^k を構成する要素は次の 5 つの事項となる．

・入力メンバーシップ関数 A_k の中心座標 a_k
・入力メンバーシップ関数 A_k のあいまいさの幅 α_k
・出力メンバーシップ関数 B_k の中心座標 b_k
・出力メンバーシップ関数 B_k のあいまいさの幅 β_k
・ルールの発火の許否

これら 5 つの情報を遺伝情報とし遺伝子で表現し，一つのルールを一つの染色体で表すこととする．ルールは n 個あるので，このような染色体を n 個作成する．この n 個の染色体により決定されたルール群によりファジィ推論が行われる．この n 個のルール群が一つのまとまりと考えられるので，個体 I_N $(N=1,2,\cdots,p)$ は n 個の染色体により構成される．ただし，p は集団内の個体数．

4 車両の走行への応用

4.1 自動車の追従運転

4.1.1 シミュレーションモデル

自動車の追従運転のファジィルールを作成する．走行環境を図 4 に示す．目標直線に対し平行な状態を初期位置とし，初期位置から目標直線に向かって走行し直線上を追従させる．

図 4 の変数とその範囲は以下の通りである．

η ：目標直線と走行車両との水平距離[m] ($0.0 \leqq \eta \leqq 12.0$)

θ ：走行車両の傾き [deg] ($-180.0 \leqq \theta \leqq 180.0$)

δ ：走行車両の舵角 [deg] ($-30.0 \leqq \delta \leqq 30.0$)

η と θ を入力とし，出力である δ を推論する．

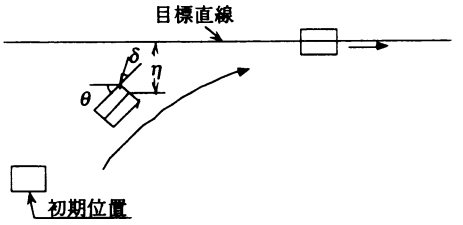
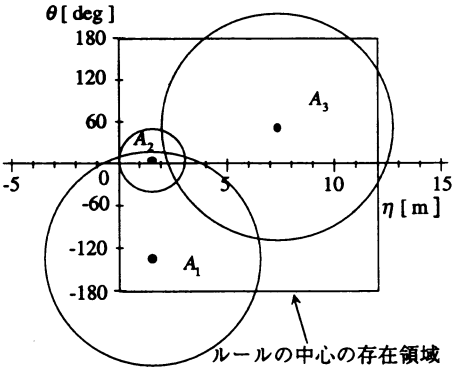


図 4 走行環境

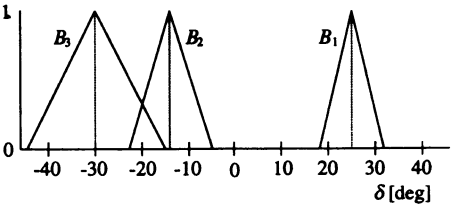
4.1.2 遺伝操作の設定

各ルールの遺伝情報は 25 bit の一つの染色体で表現する．また，ルール数を $n=30$，個体数を $p=30$ とする．

初期集団はランダムに生成し，遺伝操作は一般的に行われる選択，交差，突然変異の3つを行う．交差は各染色体ごとに一点交差を行う．突然変異は全遺伝子において突然変異率 1.0×10^{-3} で行う．また，ルール発火パラメータ $g=10$，打ち切り世代を500世代とし，全世代中最も適応度が高かった個体を採用する．なお適応度は走行中の η と θ によって評価する．



(a) 入力メンバーシップ関数



(b) 出力メンバーシップ関数

図 5 生成されたルール

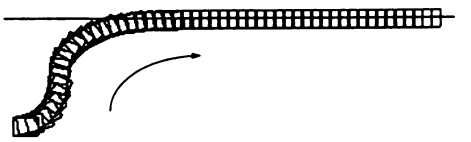


図 6 シミュレーション結果 ($\eta_0 = 12.0$ [m])

4.1.3 シミュレーション結果

初期集団の構成を何度か変えて，ファジィルールの作成を行った．最初の世代のルール数が 30 個であるのに対し，最高適応度をもつ個体はいずれも発火するルール数が 5 以下と減少した．このとき得られたルールの入出力メンバーシップ関数の一例（ルール数 3 の場合）を図 5 に示す．これらのルールを使用した走行シミュレーションを図6に示す．これより，良好に直線に追従していることがわかる．

なお，いくつか初期集団を変えて行った結果，同じようなシミュレーションが得られたが，すべての場合で同じようなルール群は得られなかった．この理由としては，GA による探索がそれぞれの場合において局所解に陥ったためと考えられる．

4.2 トレーラ・トラックの後退運転

4.2.1 シミュレーションモデル

走行環境を図7に示す．初期位置から後退のみを許容し，ホームにトレーラを横付けする．初期位置は，ホームと平行な位置とし，横付け位置は，トレーラ部分が再びホームと平行になった位置とする．横付け位置での連結角度は考えないものとし，その状態は，①と②のどちらでもよいものとする．

図 7 の変数およびその範囲は以下の通りである．

η ：ホームとトレーラとの水平距離 [m] ($1.0 \leqq \eta \leqq 12.0$)

θ ：トレーラの傾き [deg] ($-180.0 \leqq \theta \leqq 180.0$)

ϕ：連結角度 [deg] (-90.0 ≦ ϕ ≦ 90.0)

δ：トラックの舵角 [deg] (-30.0 ≦ δ ≦ 30.0)

η，θ，ϕ の 3 変数を入力とし，出力である舵角 δ を推論する．

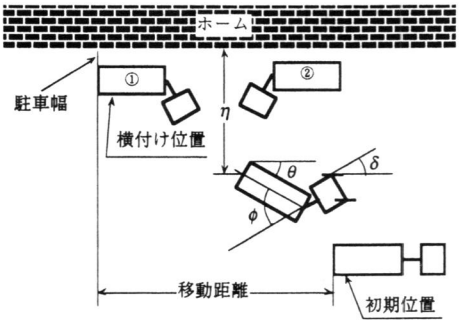


図 7　走行環境

4.2.2　遺伝操作の設定

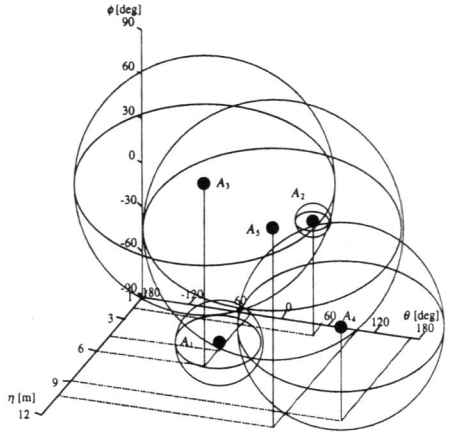
各ルールの遺伝情報は，30bitの一つの染色体で表現する．また，ルール数を $n = 30$，個体数を $p = 30$ とする．

遺伝操作は 4.1 と同様である．また，$g = 10$，打ち切り世代を500世代とし，全世代中最も適応度が高かった個体を採用する．また，適応度は移動距離と駐車幅より求める．

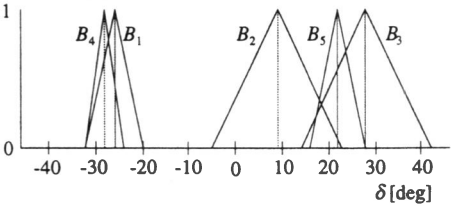
4.2.3　シミュレーション結果

GA における初期集団の構成を数回変えて行った結果，最初の世代のルール数が 30 個であるのに対し，最高適応度をもつ個体はいずれもルール数が 10 以下と減少した．このとき得られたルールの入出力メンバーシップ関数の一例を図 8 に示す．

これらのルールを使用した走行シミュレーションを図9に示す．これより，良好に横付け出来ていることがわかる．



(a)　入力メンバーシップ関数



(b)　生成された出力メンバーシップ関数

図 8　生成されたルール

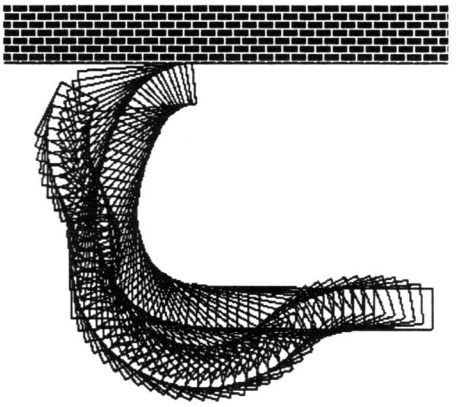


図 9　シミュレーション結果 ($\eta_0 = 12.0$ [m])

5　おわりに

本論では，超球形メンバーシップ関数を用いたファジィルールを GA により自動生成を行った．また，ルールの発火の許否を遺伝情報に取り入れた．シミュレーション結果より，本手法の有効性が示せた．

今後の課題として，入力空間上においてどのルールにも属さない領域に対して，その地点から最近傍のルールを採用し，本応用例ではその妥当性を示すことができたが，一般に妥当であるか示す必要がある．また，本手法で用いている GA に対する最適解への収束性について検討する必要がある．

今回行った応用例は，入出力次数がいずれも低次元のものであった．今後，高次元の入出力次数を持つ大規模なシステムに適用することが望まれる．

参考文献

[1]菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社 (1988)

[2]北野宏明編：遺伝的アルゴリズム，産業図書(1993)

[3]山本，久保，和多田：遺伝的アルゴリズムによるファジィ制御のメンバーシップ関数の学習，第 9 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.97-100 (1993)

[4]西山，高木，R. R. Yager，中西：遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ推論ルールの自動生成，第 8 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.237-240 (1992)

[5]井上，亀井，井上：超球形メンバーシップ関数および遺伝的アルゴリズムによるファジィルール自動生成手法；第21回知能システムシンポジウム資料，pp.199-204 (1995)

[6]井上，亀井，井上：遺伝的アルゴリズム(GA)によるトレーラ・トラックのためのルールに基づく後退運転制御，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.189-192 (1994)

連絡先

〒525　滋賀県草津市野路町1916
立命館大学理工学部情報工学科
亀井研究室　井上博行
TEL: 0775-66-1111 （内）8862
FAX: 0775-61-2669
E-mail: hiro@spice.cs.ritsumei.ac.jp

WC5-3

非厳密評価によって進化させた直接ニューロ制御

Direct neuro-control evolved by rough-evaluation GA

○花田真一， 吐合隆拡，
中園邦彦，金城　寛，玉城史朗，山本哲彦
○ Shin-ichi HANADA, Takahiro HAKI-AI,
Kunihiko NAKAZONO, Hiroshi KINJO, Shiro TAMAKI and Tetsuhiko YAMAMOTO

三菱電機プラントサービス(株)，ダイキンプラント(株)，
琉球大学 工学部
Mitsubishi Electric Plant Service Co.Ltd., Daikin Plant Co.Ltd.,
Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

Abstract— Consider unstable control objects, for example an inverse pendulum. Two evaluations procedures in Genetic Algorithm (GA) are set; the first: set two limits, $-\Theta$ and Θ, on both sides of the unstable equilibrium point, set an initial point θ_0 inside $[-\Theta, \Theta]$, start a motion, measure the time when the motion reaches the limit, repeat simulations of neuro-control, select neural networks in order of length of hoding times, adopt GA-cross-over according to the priority; the second: serect neural networks in order of shortness of the settling time to the equilibrium point, apply GA-cross-over according to the priority. Adopt only the first evaluation at early generation stages of GA. After neural networks of controlability fill the group, then add the second evaluation. Continue GA. Neural networks of controlability appear at about the 10th generation and evolve to the abilitylimit predestined by the structure of neural networks.

Key words: genetic algorithms, neural networks, control

1. はじめに

重力を受ける物体を下から支えて倒立安定させる制御系の研究は，実験室的に手に入れやすい不安定力学系の制御という観点から興味のある問題であり，制御理論の検証として利用されている．本研究ではニュラルネットワークにこの不安定系を安定に制御させることを取り上げた．ニューラルネットの学習法としては複雑な問題に適用するのに便利な遺伝アルゴリズム(GA)を採用し，適用に簡潔で，かつ制御能力の有るニューラルネットの発生と進化に有力な評価法を提案しその有効性を示す．

2. ニューラルネット

倒立制御に必要な情報は，垂直線との角度θ，角速度$\dot{\theta}$，台車の位置x，速度$\dot{x}$があれば制御可能であるので制御装置として4入力-10中間層-1出力の3層階層型ニューラルネットを採用する．各ユニットの出力特性関数は

$$f(x) = \frac{2}{1+\exp(-x)} - 1$$

とする．この関数は正負の値を出力する．

3. 評価法（環境適合度）

[評価法1]: GA適用時には，遺伝子の評価（環境適応度）が必要であるが，この評価法が適当でないと，GA演算に時間がかかる．すなわち振り子の制御の場合，倒立能力の有るニューラルネットの発生まで長時間を要する．そこで，制御対象が不安定系であることを利用して，Fig.3.1に示す評価法を提案する．すなわち，0ではない初期値θ_0から運動を始め，ある一定の境界値$|\Theta|(\geq \theta_0)$に達した時間をτ_{1i}とする．τ_{1i}の長いものを環境適応度の高いものと評価し優先してGAの交叉にかける．

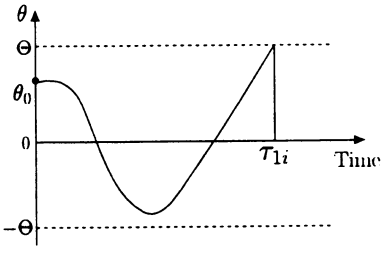


Fig.3.1 Evaluation 1

[評価法2]: 上記の評価法だけでは，ただ倒立能力が有るというだけの個体（ニューラルネット）が集団内にいつまでも存在し，能力の高い個体の発生が遅れる．そこで，より性能の高い個体を得るため厳しい評価規準を付け加える（環境を厳しくする）．すなわち次の条件を同時に満たす最初の時点を整定時間と考えτ_{2i}とする．

$$|\theta_i| \leq \varepsilon_1, |\theta_i - \theta_{i-1}| \leq \varepsilon_2.$$

ε_1とε_2は静止状態を定義する誤差限界である．計算機の精度と初期値の値の釣り合いを考えて定めればよい(本実験では$\varepsilon_1 = 10^{-4}, \varepsilon_2 = 10^{-6}$にとった)．この$\tau_{2i}$の少ないものを優先してＧＡ交叉にかける．

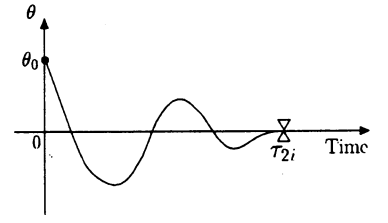


Fig.3.2 Evaluation 2.

GAは次の通りの条件で行なった：

個体数は 20 個体，交叉は 1ヵ所交叉，突然変異の確率は 2%，遺伝子はニューロン結合重み w_{ij}^kを表現する 31 ビット変数，エリートを保存する方式を取る．

4. 振り子の倒立安定制御

倒立振子の状態空間表現によるモデルは

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

で記述される．ただし，ここで

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad x_1 = x, \quad \theta_1 = \theta, \quad x_2 = \dot{x}_1, \quad \theta_2 = \dot{\theta}_1$$

$$A = \frac{1}{D}\begin{bmatrix} 0 & D & 0 & 0 \\ 0 & -F(J+ml^2) & m^2l^2g & cml \\ 0 & 0 & 0 & D \\ 0 & Fml & -mgl(M+m) & -c(M+m) \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{D}\begin{bmatrix} 0 \\ J+ml^2 \\ 0 \\ -ml \end{bmatrix}, \quad D = (M+m)(J+ml^2) - m^2l^2$$

とする．

(1) 初期状態，$\theta_0 = 0.5(deg), \dot{\theta}_0 = 0$から運動をおこさせ，GA により進化さ せた．ニューラルネットの初期状態の乱数の種（シード）にもよるが，本実験では，数十世代目で 1〜2 個体の倒立能力をもつニューラルネットが発生し，その数を増す．このままでは玉石混淆の状態であるから，集団内を倒立能力の有る個体が充満したら，(2) 規準 2 を導入する．この際，整定時間ステップ数が余りに長いもの ($\tau_{2i} \geq 50{,}000$) は，エリート集団から排除する．このようにして，進化を進める．

充分進化したと考えられる時点で，演算を止める．この時点は，(2) の演算で倒立能力をもつ個体が集団に満ちた (100 %となった) 時点の 2〜3 倍で良いと思われる．

5. 実験結果ー振り子の倒立制御

進化の状況を観察するため，50 個体について統計処理した．倒立能力の有る個体数の進化中の変化は Fig.5.1 に示す．その世代における整定時間の分布は Fig.5.2 に示す．新しい規準が加わったことで，優れた能力の有る個体が数多く発生している．

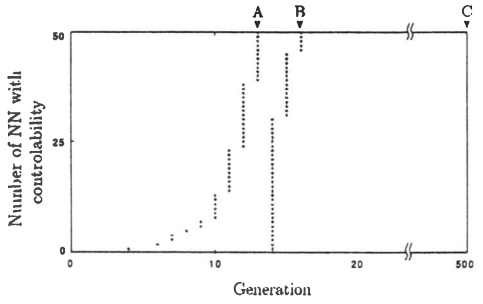


Fig.5.1 Evolution process

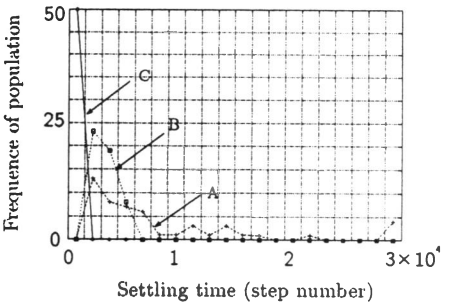


Fig.5.2 Distribution of settling time

ニューラルネットの入出力関係を示す (Fig.5.3)

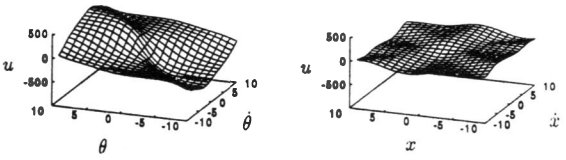


Fig.5.3 Input-output of neural network

ニューラルネットの結合重み係数のうち，絶対値の小さいものは制御能力に余り影響を与えないと考えられる．0.6 以下の重み（最大は 1.0）を取り除くと，突然角度に対する制御能力は向上するが，位置の制御能力が消滅する．これは，角度に対しては不安定平衡点での制御であることが原因である．その応答を Fig.5.4 に示す．

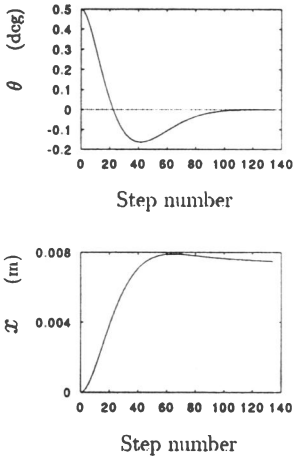


Fig.5.4 Responce of neuro-control

連絡先：〒 903-01 沖縄県西原町千原 1
琉球大学工学部機械システム工学科
山本哲彦
Tel 098-895-2221 内 2788
Fax 098-895-4377

WD1-1

多目的ＧＡによる言語的識別ルールの選択

Selecting Linguistic Classification Rules by a Multi-objective GA

石渕久生* 村田忠彦* I.B.タークセン**
Hisao Ishibuchi* Tadahiko Murata* I.B.Turksen**

* 大阪府立大学 工学部
* College of Engineering, University of Osaka Prefecture

** トロント大学 経営工学科
** Department of Industrial Engineering, University of Toronto

Abstract: This paper proposes a multi-objective genetic algorithm for selecting linguistic classification rules. In the proposed approach, a compact fuzzy classification system is automatically constructed from numerical data by selecting a small number of significant linguistic classification rules such as "If x_1 is *Small* and x_2 is *Large* then Class 2". Since only significant linguistic rules are selected in the form that human users easily understand them, the proposed approach can be viewed as a knowledge acquisition tool for classification problems.

１．はじめに

少数のファジィIf-Thenルールに基づく小型で高性能なファジィ識別システムを構築するため，筆者らは既に，遺伝的手法によりルール選択を行う方法を提案し[1]，その性能評価を行った[2]．さらに，ルール選択手法を長方形型ファジィルールの場合に拡張した[3]．このようなルール選択手法は，次のような二つのステップとして書くことができる．

Step 1: 解像度の異なる種々のファジィ分割を用いることにより，多数のファジィIf-Thenルールを生成する．この場合，図１に示すような正方形型のファジィ部分空間に分割する手法[1,2]と図２に示すような長方形型のファジィ部分空間に分割する手法[3]が考えられる．

Step 2: 遺伝的アルゴリズムにより，少数のファジィIf-Thenルールを選択する．Fitness関数としては，正しく識別されるパターン数の最大化と選択されるルール数の最小化という二つの目的の加重和を用いる．

このようなルール選択手法を，「人間が理解しやすいルールの獲得」という観点から見た場合では，次のような問題点が存在する．

① 選択されたファジィルールの言語的解釈が必ずしも可能ではない．

② 正しく識別されるパターン数の最大化と選択されるルール数の最小化という二つの目的に対する重みの決定が容易ではない．

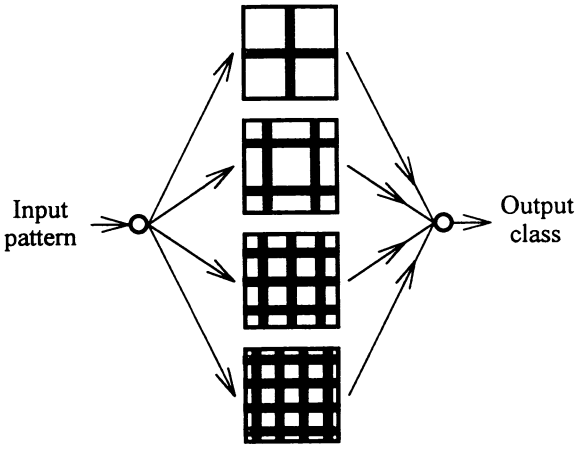


図１　正方形型ファジィ分割に基づく識別システム

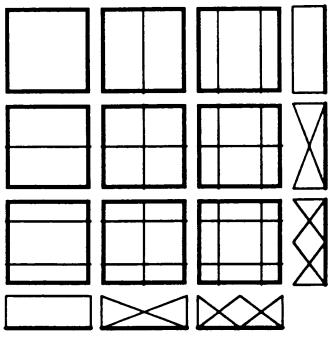


図２　長方形型ファジィ分割

そこで本研究では，条件部ファジィ集合を言語的解釈が可能であるものに限定した言語的識別ルール

を用いると共に，ルール選択問題の二つの目的に関する非劣解集合を選択するための多目的遺伝的アルゴリズムを提案する．

2．ルール選択問題

ルール選択の対象となる言語的識別ルールとして，次のような形式のものを用いる．

$$\text{If } x_{p1} \text{ is } A_i \text{ and } x_{p2} \text{ is } A_j$$
$$\text{then } \boldsymbol{x}_p \text{ is Class } C_{ij} \text{ with } CF = CF_{ij},$$
$$i = 1,2,...,K;\ \ j = 1,2,...,K \quad (1)$$

ここで，A_i, A_jは "Small" や "Large" などの言語ラベルの付いた条件部ファジィ集合，C_{ij}は結論部クラス，CFは確信度，Kは条件部ファジイ集合の数である．このような言語的識別ルールは，文献[1-3]と同様の方法で，与えられた学習用パターンから自動的に生成される．また，確信度CFに対しては，遺伝的アルゴリズムの実行中に学習[4]が行われる．

3．多目的遺伝的アルゴリズム

選択される言語的識別ルールの集合を記号Sで表すことにすると，ルール選択問題の二つの目的は，次のように書くことができる．

$$\text{Maximize } NCP(S) \text{ and Minimize } |S| \quad (2)$$

ここで，$NCP(S)$はルール集合Sにより正しく識別される学習用パターンの数，$|S|$はルール集合Sに含まれるルール数である．

本研究で提案する多目的遺伝的アルゴリズムは，2目的組合せ最適化問題の非劣解集合を効率的に見つけ出すためのものである．これらの二つの目的から，Fitness関数$f(S)$を次のように構成する．

$$f(S) = W_{NCP} \cdot NCP(S) - W_S \cdot |S| \quad (3)$$

ここで，W_{NCP}, W_Sは，各目的の重みを表す正の実数である．従来の研究[1-3]では，W_{NCP}, W_Sを定数として取り扱ってきたが，本研究では，交差操作のために個体を選択するときに，重みW_{NCP}, W_Sの値を乱数を用いて設定する．これは，目的関数空間内での多目的遺伝的アルゴリズムの探索が図3のように行われることを意図したものである．

エリート保存戦略では，各目的関数の最良値を与える個体（2個）に加えて，アルゴリズムの実行中に更新される非劣解集合からランダムに幾つかの非劣解が選ばれて次世代にそのまま受け継がれる．このようなエリート保存戦略も，図3のような探索が効率的に行われることを意図したものである．

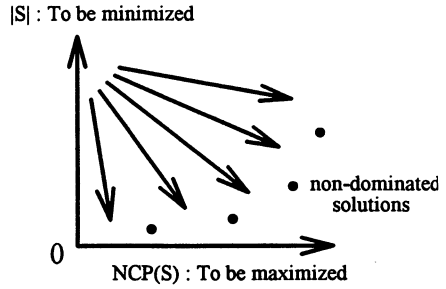


図3　多目的遺伝的アルゴリズムによる探索

4．数値実験の結果

提案手法を，Fisherのアヤメの識別問題（4次元パターン空間内での3群識別問題：学習パターン数150個）に適用した．まず，Small, Medium Small, Medium, Medium Large, Large という5つの言語に対応したファジィ集合とDon't Care を表す区間を用いて，6^4個の言語的識別ルールを生成した．次に，各ルールの確信度の学習を組み込んだ多目的遺伝的アルゴリズムにより，ルール選択を行った．このような数値実験の結果，次のような非劣解集合が得られた．

$$(NCP(S), |S|) = (0, 0),\ (1, 50),\ (2, 100),$$
$$(3, 143),\ (6, 145),\ (7, 149),$$
$$(8, 150)$$

参考文献

[1] 石渕，野崎，山本，田中：遺伝的手法によるファジーIf-Thenルールの選択，電子情報通信学会論文誌，Vol.J76-A, No.10, pp.1465-1473 (1993)

[2] 石渕，山本，田中：GAによるファジー識別ルール選択法の性能評価，電子情報通信学会論文誌，Vol.J77-A, No.10, pp.1409-1411 (1994)

[3] H.Ishibuchi, K.Nozaki, N.Yamamoto and H.Tanaka: Construction of Fuzzy Classification Systems with Rectangular Fuzzy Rules Using Genetic Algorithms, Fuzzy Sets and Systems, Vol.65, pp.237-253 (1994).

[4] 野崎，石渕，田中：学習型ファジィ識別システムによる知識獲得，日本経営工学会誌，Vol.45, No.5, pp.430-441 (1994)

[連絡先]

〒593 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学工学部経営工学科
石渕久生 hisaoi@center.osakafu-u.ac.jp
電話: 0722-52-1161　FAX: 0722-59-3340

WD1-2

GAによる知識構造の獲得
An Indentification of knowledge structure by GA

大竹 章裕 Akihiro Ohtake
大谷 忍 Sinobu Ohtani
上木 ホセ リカルド Jose Ueki
菊池 浩明 Hiro-aki Kikuchi
中西 祥八郎 Shouhachirou Nakanisi
東海大学工学部電気工学科
Faculity of Engineering,Tokai university

Abstruct: In the fuzzy modelling and constructing the fuzzy controlls, it is very important probrems to accquire the knowledge for the object from the give data. So many methods for the knowledge accqisition have been propose and pubrished in many juarnals and proceedings. However, there are no methods to identify the structure of the accquired knowledge. then, the analize propose a identification method of the knowledge from the given data by geenetic algorithm. this means that we determin the hierarchical structure of the fuzzy inference. Finally we apply this method to viorus kinds of nonlineer functions, and show the voridity of the method.

1 はじめに

ファジィ理論は現在さまざまな分野で応用れており、その中でも特にファジィ推論は多くのシステムに活用されている。ファジィ推論はif-thenルールに基づき、より人間の感覚に近い推論を行うものである。それゆえ人の経験や知識の表現をする際に有効であることが実証されている。しかしながらルールの作成、いわゆるチューニングは人の手によるところであり経験的な要素が多い。そこでチューニングを自動生成する方法として多点確率的探索法の一つである遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm 以下 GA) やニューラルネットワークなどを用いたものが提案された。

ファジィ推論の苦手とする知識獲得をこれらの手法により補うものである。これらの自動的に推論を構成するファジィ推論は1段のものがほとんどであった。つまり獲得された知識は1段の推論で示されていることになる。たしかに1段のファジィ推論でも知識の表現は十分可能であるが、獲得する知識の対象の中には知識構造が階層構造であるものがある。これらのシステムの知識を獲得する場合、獲得された知識も階層構造となるのが自然である。そこで階層構造を持ったファジィ推論が提案[3][4]された。これによって知識構造は表現されたがこの場合、構造そのものは人の手により決定されている。なぜなら獲得知識を自動的に構造化するのは困難であったからである。よってこれらの手法は構造の自動決定にはいたらず、知識構造が既知の場合にのみ表現が可能である。そこでわれわれは対象に適した知識の構造化を求める手法を提案する。

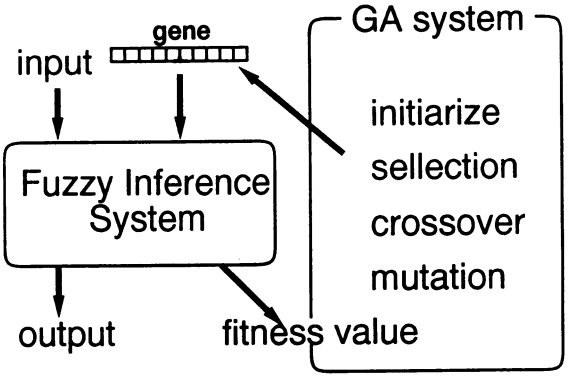


図 1: システム図

2 獲得知識の構造同定

前に述べたように、本稿の目的は複雑な対象、特に階層構造を持つような対象に対して、獲得した知識が

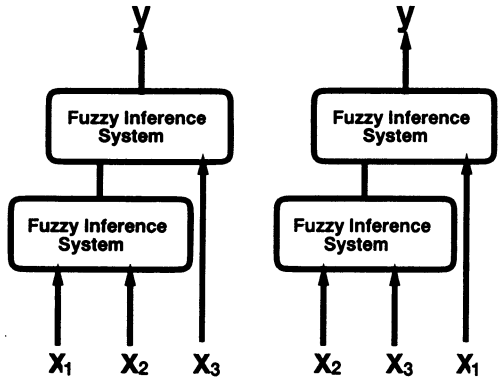


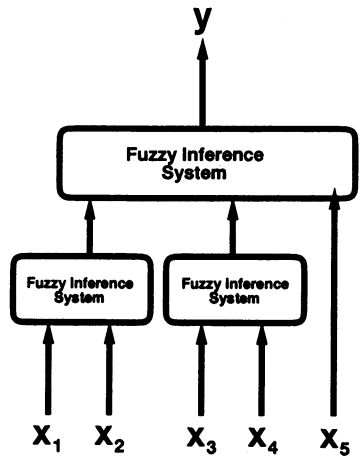
図 2: 構造の例 (3 入力)

対象と同様の階層構造を持つようなモデリングを入出力データから自動的に行なうことである。そのために、階層構造の組合せと、入力変数の最適な組合せを GA によって探索する。従って、入力変数の数と出力変数の数はデータから既知であるとする。

獲得知識の構造同定には、知識の構造的同定とその構造の下での変数の組合せの 2 つを同時に解決しなければならない。すなわち、同じ構造の下でも変数が異なると、獲得した知識は異なるものとなる。例えば最も簡単な場合として 3 入力 1 出力の系で 2 段の推論で表される場合を考えてみる。3 入力 2 段であるから 2 入力 1 出力の推論が 1 段目の推論となる。2 段目の推論では、1 段目の推論の出力と、3 入力のうち 1 段目の入力を除いた残りの 1 入力が 2 段目の推論の入力となる。同じ構造でも図 2 に示すように入力の組合せは異なる場合が生じる。従って、このような同じ構造を持つ 2 段の推論でも入力の組合せは 3 通りの場合が考えられる。これらは構造が同じでも意味内容が異なるので、獲得知識の構造同定においては入力変数の適切な組合せを同定することは極めて重要である。以上のことを考慮して遺伝子のコーディングには図 4 に示すように推論の構造を表す部分と、その構造の下での推論規則を自動生成を表す部分から構成される。

本稿では推論の構造を同定する事と入力変数の組合せの同定を GA を用いて同時に行なう。また、与えられているのは入出力データだけであるので推論規則の自動生成が必要になる。これにも GA を用いて最適な推論規則の生成を計る。

ここで、a_i^kの値は i 番目の変数の所属する推論グループを示す。これらの組合せは推論構造と、その構造の下での変数の組合せを同時に表している。また、b_i^kの値は推論ルールの後件部ファジィ変数を表しており、その遺伝子座は推論規則を表している。すなわち、$b_1^k \sim b_m^k$ は 1 つのファジィモデルを表している。さらに、肩文



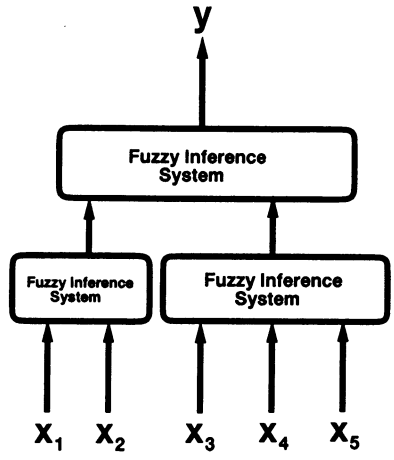


図 3: 構造の例 (5 入力)

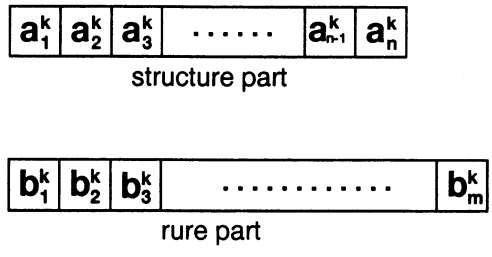


図 4: コーディング方法

字 k は $\{k \mid k = 1, \ldots, s\}$ であり、これはポピュレーションの中の k 番目の染色体を意味している。GA の枠組において、各染色体を評価するフィットネス関数には 1 つのファジィモデルに対する誤差の逆数を用いている。すなわち、ある推論構造の下で構成された推論規則の精度で評価を行なっている。また、本稿では選択にルーレット選択を用い、オペレーションとしては交叉と突然変異だけ用いている。

獲得知識の構造同定に用いているアルゴリズムを次に示す。

1. 初期の遺伝子の生成
2. 遺伝子から階層構造とファジィルールを読みとり、ファジィシステムに入力
3. 教師信号により遺伝子を評価
4. 評価の値により淘汰のオペレーションを行う。また一定の確率による交叉と突然変異のオペレーションを行う。
5. 2 ～ 4 までを決められた回数繰り返し行う。

3 各種関数の構造同定

3.1 システムの実装

上に述べた獲得知識に関する構造の同定法を様々な関数に適応した結果を表 1 に示す。本手法の適応例として表 1 の No.1 に示されている次のような 3 変数 1 出力の系を例に取り説明する。

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1^{x_2+x_3} - 1 \qquad (1)$$

このシステム (関数) の構造を同定するためには学習用のデータが必要となるのでこれを作成する。各入力変数 x_1, x_2, x_3 それぞれが取り得る範囲を [0,1] 区間とし、この 3 次元入力空間からランダムに 100 点を選択し、これを学習用データとして用いた。表 1 に本手法を用いたシミュレーションの結果を示す。表の中の第 2 コラムはシミュレーションによって得られた構造同定の結果を示している。No.1 の例では $x_1\{x_2, x_3\}$ と表示されているが、この中の {} に括られている入力変数が 1 つのグループに属し、他の変数は他のグループに属している。この場合では 2 段の推論となり x_2 と x_3 が 1 段目の推論器への入力となり、1 段目の推論器の出力と x_1 が 2 段目の推論器の入力となる。すなわち、図 3 の右図に示されるような推論構造となる。

本手法で行なった結果を評価するためにシミュレーションを行なったものと同じデータで因子分析した結果を表 2 に示す。表 2 の各 *No.*1 ～ 6 は表 1 の *No.*1 ～ 6 に示されている関数と対応するシステムの因子分析を表している。この結果、FACTOR1 と FACTOR2 の 2 つの因子に分けられた。ここでの表 1 の結果を評価するために因子負荷量を用いている。表 2 は各因子の下での各入力変数の因子負荷量を表している。因子負荷量とは学習点 100 点を因子分析にかけ、抽出された因子ともとの変数の間の相関係数である。相関係数の値は −1 ～ 1 までの値をとる。変数の相関を見るには因子負荷量の 1 番大きい値に対して 2 番目のものがどれだけ大きいかを見れば良い。例えば表 1 の No.1((1) 式) で表されるシステムの因子負荷量は表 2 の No.1 の第 1 行に示されている。FACTOR1 の x_2 と x_3 の値がそれぞれ 0.77 と 0.71 となり相関が強いことがわかる。一方、FACTOR2 の方については x_1 の値が 0.91 に対して x_2 と x_3 の値は −0.27, 0.35 となり x_1 に対しての相関は x_2、x_3 とも相関が弱いことがわかる。また表 2 の中で強調文字で表されているのが因子負荷量の大きな値のものである。

今回のシミュレーションではメンバーシップ関数は三角型を用い、入力空間を均等に 3 等分するように設置した。後件部は GA により最適化を行う。GA におけるパラメータは 1 世代 30 個体とし、突然変異率は 2 パーセント、交叉率は 20 パーセントとしてシミュレーションを行った。

表 1: シミュレーション結果 (1)

No.	*Function*	*STRUCTURE*
1	$x_1^{x_2+x_3} - 1$	$x_1\{x_2, x_3\}$
2	$\frac{x_1+x_2x_3}{2}$	$x_1\{x_2, x_3\}$
3	$x_1x_2x_3$	$\{x_1, x_2\}x_3$, $x_1\{x_2\}x_3$
4	$\frac{2x_1x_2+x_3}{3}$	$\{x_1, x_2\}x_3$
5	$\frac{x_1^4+x_2^3+x_3}{3}$	$\{x_1, x_2\}x_3$
6	$\left\lvert \frac{\sin(x_1\pi)+\cos(x_2x_3\pi)}{2} \right\rvert$	$\{x_1, x_2\}x_3$

表 2: 因子負荷量

	PATTERN FACTOR1			*PATTERN FACTOR2*		
No.	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
1	−0.01	**0.77**	**0.71**	**0.91**	−0.27	0.35
2	**0.87**	−0.01	**0.60**	−0.13	**0.93**	0.42
3	−0.01	**0.77**	**0.70**	**0.91**	−0.29	0.35
4	**0.80**	−0.75	−0.05	0.06	0.15	**0.99**
5	0.10	−0.60	**0.86**	**0.89**	**0.51**	0.17
6	**0.82**	0.02	**0.65**	0.22	**0.92**	−0.34

3.2 結果

No.2 の式において、相関係数を見るとFACTOR1はx_1とx_3が強い相関を表しているが、FACTOR2ではx_2とx_3が強い相関を表している。これによると因子負荷量では知識の構造をうまく得ることはできないことがわかる。しかし本システムではx_2とx_3を1つのグループとして考え構造同定を行なっている。表1,No2に示されている式の形からもx_2とx_3の相関が良くなる方が自然であると理解できる。従って、本手法による構造同定の方が因子分析による結果より妥当な結果をもたらしていると言える。またNo.4,5においても同様に、因子負荷量に比べて、知識の構造の表現という面では優れていることがわかる。No.3では入力の相関に差がないこともあり、構造として安定性がなかった。No.6は式も複雑なこともあり、こちらの意とする構造は得られなかった。また表(3)からわかるとおり、簡単な式はかなり良い結果で知識構造が表現されていることがわかる。ただし複雑な式となると多少、意とした構造とは異なる場合がある。しかし、全体的な結果を見ると、因子負荷量による相関関係の分析より本システムの方がはっきり構造を表現できることがわかる。

結論として本研究の手法は因子分析における数学的な入力変数の相関関係および人の感覚による分類に適合した相関関係を示すことが分かる。

表3: シミュレーション結果(2)

Function	STRUCTURE
$x_1x_2x_3$	$\{x_1,x_2\}x_3$
$\mid x_1^2x_2^2-x_3 \mid$	$\{x_1,x_2\}x_3$
$\frac{x_1+x_2+x_3}{3}$	$\{x_1,x_2,x_3\}$
$\frac{x_1^4+x_2^3-x_3}{2}$	$\{x_1,x_2\}x_3$
$\mid \sin(x_1^4+x_2^3-x_3) \mid$	$x_1\{x_2,x_3\}$
$\frac{x_2\sin(x_2x_1)}{x_2^2+x_3^2}$	$x_1\{x_2,x_3\}$
$\frac{\sin x_1\cos x_2+\sin x_2\cos x_3+\sin x_3\cos x_1}{3}$	$\{x_1,x_2,x_3\}$
$\mid \log(x_2x_3+x_1)+0.1 \mid$	$\{x_1,x_2\}x_3$
$\mid x_1-x_1\exp\frac{-(x_1+x_2)}{(x_2+x_3)} \mid$	$x_1\{x_2,x_3\}$
$\mid x_2-\exp\frac{-x_3+x_1}{x_3x_1} \mid$	$x_1\{x_2,x_3\}$
$\frac{\sin x_1+\cos x_2+\log x_3}{3}$	$\{x_1,x_2\}x_3$
$\frac{\sin x_1+\cos x_2+\exp x_3-1}{3}$	$\{x_1,x_2,x_3\}$
$\mid \cos(\sin x_1+\sin x_2)+x_3 \mid$	$\{x_1,x_2,x_3\}$
$\sin(3\sin(\cos(x_1\sin x_2)+x_3))$	$x_1\{x_2,x_3\}$
$\sin(\exp(\frac{x_3x_1}{x_2+x_1}))$	$\{x_1,x_2\}x_3$
$\mid \frac{\sin x_2\exp(x_3+x_1)}{\pi} \mid$	$x_1\{x_2\}x_3$

4 むすび

本稿では、階層型ファジィ推論における知識構造の獲得についての手法を提案した。提案した手法は因子負荷量による入力変数の相関や、特に人が考える知識の構造にかなり近い構造を獲得することを示した。つまり知識構造の獲得が可能であることがわかる。しかしながら、本手法では多変数の問題に対してはまだ検討の余地があり、今後それらを解決していかなければならない。多変数の問題の解決策の一つとしては、より多層化をすることなどがあげられるがファジィ推論の場合あいまいさの爆発という問題もありその点との兼ね合いも関係してくる。また、知識の表現という観点から、構造の獲得ばかりでなくシステムの性格を判断する必要性がある。その方法の一つとしては推論の演算法によるシステムの性格判断があげられる。今後、これらも加味しさらに検討していく必要がある。

参考文献

[1] 福田, 長谷川, 下島, GAによる階層型ファジィモデリングの自動生成法, 第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp245-246(1994).

[2] 山本, 久保, 和多田, 遺伝的アルゴリズムによるファジィ制御のメンバーシップ関数の学習, 第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp97-100(1993).

[3] 古橋, 中岡, 森川, 内川, 階層化ファジィクラシファイアシステムによる制御, 第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp101-104(1993).

[4] 水本, ファジィ理論とその応用, サイエンス社

[5] 古橋, 森川, 内川, ファジィクラシファイアシステムによるスケジューリング知識獲得, 第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp105-108(1993).

[6] T.Fukuda,Y.Hasegawa,K.Simojima, Structure Organization of Hierarchical Fuzzy Model using by Genetic Algorithm, IEEE-IFES'95,vol1,pp295-300

連絡先
大竹 章裕
Email :40epm004@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp
259-12 神奈川県平塚市北金目 1117
東海大学工学科電気工学科 中西研究室
TEL : 0463-58-1211 Ext.4025 Fax : 0463-58-1211

WD1-3

対話型ＧＡを用いた歪音声の音質の改善
Enhancement of Distorted Speech using Interactive GA

*渡辺　辰巳　　高木 英行[1]
Tatsumi WATANABE　　Hideyuki TAKAGI
*松下電器産業株式会社 中央研究所　　九州芸術工科大学 音響設計学科
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.　　Kyushu Institute of Design

Abstract- This paper investigates the availability of interactive GA to speech signal processing which cannot present individuals of the GA to a human operator who takes a role of a fitness function simultaneously and spatially. Three operators design a filter to enhance speech using the interactive GA. Then the 3 enhanced speeches are evaluated by 32 subjects for 2 subjective tests. As result, the interactive GA is significantly effective for this task from statistical test point of view.

Keywords: 対話型ＧＡ, 主観評価, フィルタ設計, 歪音声

1　はじめに

補聴器の特性調整、与えられたコンセプトに合わせた製品やインテリアのデザイン、そして個人個人の好みに合わせた音響や画像特性の調整等のように、評価基準が観念的で不明確なため調整結果を定量的に評価できない問題は非常に多い。このような問題に、ニューラルネットワークのように明示的な誤差関数を定義してその最適解を探索する手法を用いた調整を行うことは原理的に不可能である。

最近、操作者が自ら決定した各染色体の適合度をもとに最適解探索を行う対話型ＧＡと呼ばれる手法が提案されている。この手法を用いれば、人間の感性・主観的価値観のみに基づいて評価・判断することが可能であるため、評価関数を明確に記述できない問題への適用も可能である。対話型ＧＡの応用例としてこれまでに、モンタージュ写真の作成に用いた例 [1]、昆虫の生体的形態の作成に用いた例 [2]、画像処理過程に応用した例 [3]、３次元物体のコンピュータグラフィックの作成に用いた例 [4]、図部品の配置に用いた例 [5]、コンクリートでできたアーチ形ダムの設計に用いた例 [6]、線画や顔の絵の生成に用いた例 [7]、橋等の構造物の景観設計に用いた例 [8] が報告されている。これら今まで報告されている対話型ＧＡの応用例は画像や図形のように空間的に同時に提示できるデータの調整に応用された例がほとんどである。一方、同時に提示することができないため比較評価が困難な時系列信号への対話型ＧＡの応用例は非常に少ない。

本報告では対話型ＧＡを音声信号問題に適用し、２つの主観評価実験をもとに本手法の有効性を検証する。

2　歪音声の改善実験

３人の操作者が、各々、対話型ＧＡにより歪音声の音質を改善するためのフィルタを設計する実験を行う。

2.1　実験システム構成

対話型ＧＡを用いて歪音声の音質を改善するフィルタを探索するシステムを図 1に示す。

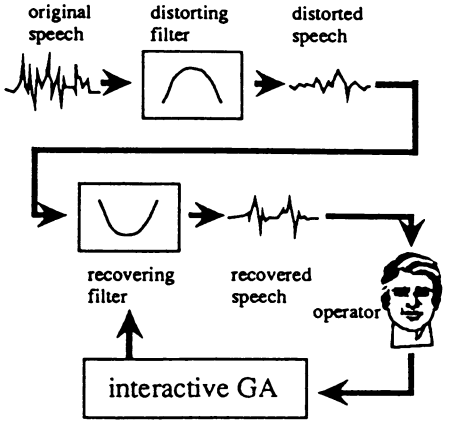


図 1: 実験システムの構成

歪音声: 約 2.5 秒の 20kHz でサンプリングした男声「どうもありがとうございました」をオリジナル音声とする。人間の音声の聞こえ具合いに大きな影響を与えると言われるホルマント成分（周波数 2～3kHz ）を抑圧し音質を劣下させるように設計された IIR(Infinite Impulse Response) フィルタを用意し、オリジナル音声をフィルタリングすることにより歪音声を作成する。図 2はオリジナル音声と IIR フィルタリングした歪音声の長時間パワースペクトルを表す。

歪改善フィルタの設計: 歪音声は音質を改善するための歪改善フィルタに入力される。本実験の対話型ＧＡの目的はこの歪改善フィルタを仕様を与えず聴感に基づいて設計することである。まず、本システムの操作者は各歪改善後の音声を聞き、各音声の聞こえ具合いを評価する。対話型ＧＡは、この評価をもとに歪改善フィルタの係数を調整する。対話型ＧＡは、各世代において、複数の歪改善フィルタを設計し、各フィルタにより改善された後の音声に対する操作者の評価をもとに、次の世代における歪改善フィルタを改めて設計する。本システムは、改善後の音質や許容世代数に関して予め与えられた条件を満足するまで、以上のような手続きを繰り返す。

[1]本研究は、松下電器産業に在職中に行われたものである。

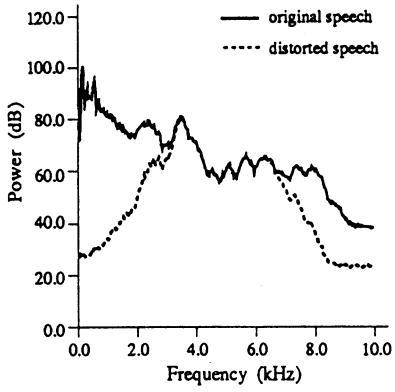


図 2: オリジナル音声と歪音声の長時間スペクトル

2.2 対話型ＧＡの設計

対象問題の遺伝子設計: 式 (1) で表される伝達関数 $H(z)$ を持つ 8 段の FIR(Finite Impulse Response) フィルタを歪改善フィルタとして設計する。

$$H(z) = \sum_{k=0}^{7} a_k z^{-k} \qquad (1)$$

ここで $\mathbf{a} = (a_0, a_1, ..., a_7)$ は歪改善フィルタの係数ベクトルを示す。a_i は各々遺伝子として 8 ビットの 2 進数に変換され、この 2 進数を並べることにより染色体が構成される。1 世代の染色体数は 20 である。

インターフェースの設計: 20 個の各染色体を FIR フィルタの 8 個のフィルタ係数に変換し、歪音声をフィルタリングすることにより 20 個の歪改善後の音声を作成する。それとともに、CRT 画面上に各フィルタ係数に対応する顔画像を操作者に提示する。この顔自身は、歪改善後の音声の音質には何の関係もないが、操作者が 20 個の歪改善後の音声を同時に比較し評価する際の記憶の手助けとして用いられる。

また、顔画像及び対応する歪改善後の音声のソーティングを行う機能も用意した。これにより操作者は各音声の優劣を視覚的に並び変えることが可能となり、操作者の評価におけるゆらぎの影響の低減につながる。

作成された音声データは、まず 16bit の A/D 変換器で 20kHz にサンプリングされ、70Hz~8kHz のバンドパスフィルタにより折り返し歪処理を行われる。操作者が CRT 上の顔画像をマウスでクリックすると、対応する歪改善音声がヘッドフォンを介して操作者の耳に伝達される。操作者はこのヘッドフォンから聞こえる音声信号をもとに、CRT 画面上の顔画像の横に用意されている採点用のスライダを用いて音声の聞こえ具合いを採点する。

2.3 本システムの操作者

2.1、2.2のシステムを用いてＧＡの操作者による歪音声の音質を改善するフィルタの作成実験を行った。操作者は 20 代の男性Ａ、Ｂと 20 代の女性Ｃの計 3 名である。Ｃのみ音響分野の専門知識を有していた。

3 名の実験は各々が本対話型ＧＡのシステムを用いて独立に行われた。Ａ、Ｂの場合、作業時間で 1.5 時間/日、ＧＡの調整世代数は平均 8 世代数/日だけ音声の提示・評価実験を実施した。一方、Ｃの場合、作業時間で 2.5 時間/日、ＧＡの調整世代数はＡ、Ｂの場合と同様に平均 8 世代数/日であった。3 名ともフィルタ作成作業は 5 日間行われ、各々フィルタ作成のためのＧＡの調整世代数は 40 世代までとした。

2.4 歪改善実験の結果

周波数に対するパワースペクトルの時間的な変動を表す長時間パワースペクトルにより、3 名の操作者が設計した歪改善フィルタにより得られる音声を検討する。

図 3に 3 名のＧＡの操作者の設計したフィルタにより得られる音声の長時間パワースペクトルを示す。

3 名の操作者の結果とも、歪音声で大きく破壊されている低周波数域を回復させる方向にフィルタが働いていることがわかる。一方、高周波数成分はほとんど変化していないか、逆に抑えられている様子が確認できる。この観察結果は、人間の耳による音声の聞こえ具合いにはあまり高周波数成分は寄与してはおらず、低周波数成分、特にホルマント付近による影響の方が大きいという音声知覚上の知見 [9] と一致している。

3 対話型ＧＡを用いた歪音声改善の評価

3.1 評価方法及び評価実験の条件

本章では 3 名の操作者により作成された改善後の音声の音質が向上しているかどうかを客観的に評価するため、系列範疇法、シェッフェの一対比較法を用いた主観評価実験 [10] により検証する。

3.1.1 系列範疇法

系列範疇法は、各音声の聞こえ具合いを複数の評定カテゴリに分類し評価する手法であり、正規分布上において各評定カテゴリが占める領域と各音声の位置を距離尺度上に表すことができる。本実験では、“良い”、“少し良い”、“普通”、“少し悪い”、“悪い” の 5 段階の評定カテゴリを用いた。

3.1.2 シェッフェの一対比較法

シェッフェの一対比較法は、2 つの音声 S_i、S_j をこの順番で操作者に提示し、音声 S_i に対する S_j の聞こえ具合いを複数の評定カテゴリに分類し評価する手法である。シェッフェの方法では、比較する音声集合全体に対する音声 S_i の相対的な位置を距離尺度図上に表すことができる。本実験では、系列範疇法の場合と同様に “良い” から “悪い” までの 5 段階の評定カテゴリを用いた。なお、一般にシェッフェの方法では、1 名の操作者が 1 組の刺激対の 2 つの順序の内の一方だけを比較することになっているが、今回、1 名の操作者が全部の順序のある刺激対を 1 回ずつ比較する場合に適用される浦の変形を用いることとした [10]。

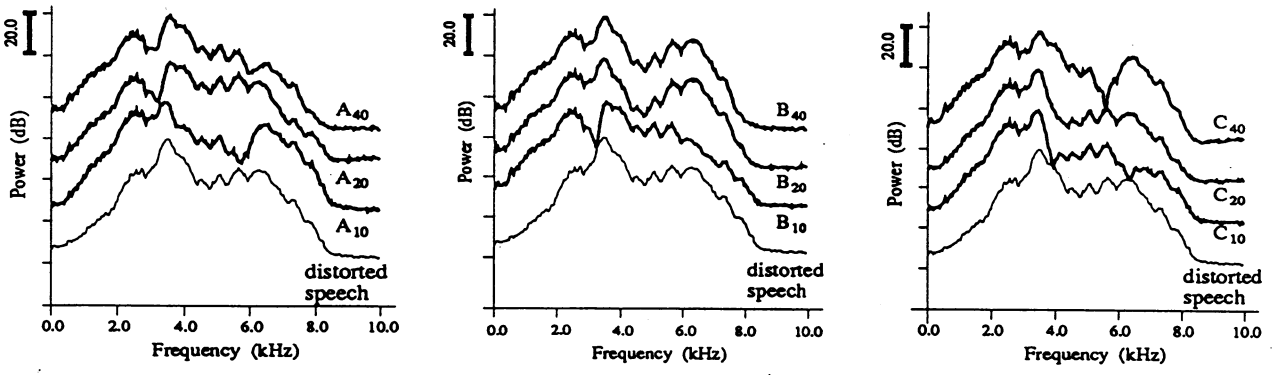


図 3: 作成された歪改善後の音声の長時間パワースペクトル：X_kは操作者 Xにより作成された、k世代目における歪改善後の音声を表す。なお、各スペクトルともに、重なり合わないように実際の値から一定の幅だけ加算して表示されている。

3.1.3 評価実験条件

検定を行う音声データは、歪音声と、3名の操作者各々の10世代、20世代、40世代における歪改善後の音声の計10個である。

系列範疇法の場合、この10個の音声を順番に被験者に提示し、各音声の聞こえ具合いを評価してもらう。まず、各音声データの番号音声を提示した後、約2.5秒の検定音声を提示する。そして、3.0秒間の無音時間を経た後続く音声データの番号音声を提示する。このようにして1~10までの音声を連続して3回被験者に提示した。

次に、シェッフェの一対比較実験の場合、10個の音声から2つの音声を、提示する順番も考慮してランダムに選び出し、被験者に提示する。この時、異なるフィルタ作成の操作者の音声の組合せを排除すると、${}_4C_2 \times 2$(順番を考慮) $\times 3$(操作者数) $= 36$ 通りの組合せが被験者に提示されることになる。音声S_i、S_jの対をこの順番で提示する場合、各組合せの番号音声を提示した後、音声S_iを提示し、約0.4秒間の無音時間の後に次の音声S_jを提示する。S_j、S_jは1.6秒間の無音時間を間として繰り返し3回提示される。その後、3.0秒間の無音時間の後に続く音声データの番号音声を提示する。このような手続きにより36通り全部を被験者に提示した。

主観評価実験の被験者は1グループ8名よりなる4つのグループにより構成される。8名のグループは防音室に2つのスピーカより約3mの距離で座して主観評価実験を受けた。この防音室の騒音レベルは30dB以下であり、提示音声のパワーがピーク時で75~80dBになるように調整して主観評価実験を行った。

3.2 2つの検定結果

3.2.1 系列範疇法による検定結果

32名の被験者により、歪音声と得られた改善後の音声の聞き具合い評価実験を行い、系列範疇法を用いて検定を行った。図4は系列範疇法の検定により得られる正規分布上での5段階のカテゴリが占める領域と10個の音声の位置を距離尺度上に表す。

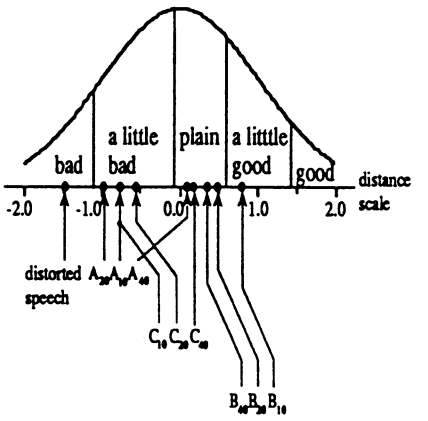


図 4: 系列範疇法による検定結果

図4において各操作者の世代別の音声を比較すると、AとCの場合、10世代目と20世代目の改善後の音声は同じカテゴリに属している。一方、40世代目の改善後の音声は10、20世代目における音声よりも良いカテゴリに属しており、音質は明らかに向上している。しかし、3つの音声とも元の歪音声より向上しており、その間の差は有意である。Bの場合、10世代目における改善後の音声の方が20、40世代目の音声よりも良いカテゴリに属している。この原因として、操作時間・慣れによりBの評価基準が10世代目と20世代目の間で変化していること等が考えられる。しかし、A・Cの場合と同様に歪音声と改善後の音声の間には有意な差があることが確認できる。そして、この結果は対話型GAが実用的な時間内に有効な結果を得られることも示している。

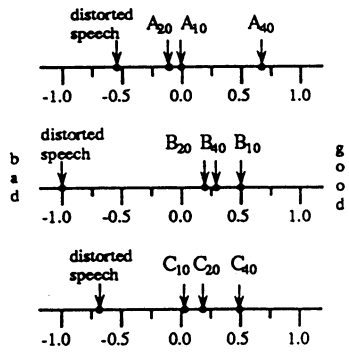


図 5: シェッフェの一対比較法による検定結果 1

表 1: シェッフェの一対比較法による検定結果 2: D、X_kは各々、歪音声、操作者 Xによる k世代めの改善後の音声を示す。また、○ は 2 つの音声間の差は有意 (危険率 $p < 0.01$) であることを示す。

組合せ	操作者		
	A	B	C
D vs. X_{10}	○	○	○
D vs. X_{20}	○	○	○
D vs. X_{40}	○	○	○
X_{10} vs. X_{20}		○	
X_{10} vs. X_{40}	○	○	○
X_{20} vs. X_{40}	○		○

3.2.2 シェッフェの一対比較法による検定結果

ここでは、シェッフェの一対比較法を用いて行われた 10 個の音声の主観評価実験の結果について示す。

図 5は、シェッフェの一対比較法により得られる各操作者の 10 世代、20 世代、40 世代と歪音声の相対的な位置を距離尺度図上に表した結果である。明らかなように、シェッフェの方法においても歪音声と得られた全ての改善後の音声の間には有意な差がある。音声 S_i、S_j間の有意性を定量的に検定すると、表 1のようになり、シェッフェの一対比較法による検定結果からも本システムが有効であることが判明した。

4 まとめ及び今後の課題

ＧＡの操作者が判断した評価基準をもとに最適解探索を行う対話型ＧＡを、強制的に歪ませた音声の音質を改善するフィルタを作成する問題に適用した。

その際、記憶を助けるための画像を提示することにより、音声信号問題のように同時提示・同時比較のできない問題にも対話型ＧＡが適用できることを示し、対話型ＧＡの信号処理分野への可能性を示した。

さらに、改善後の音声に対する 2 つの主観評価実験をもとに、本手法が歪音声を改善する問題に有効であることを統計的に示すとともに、世代別の改善後の音声を比較することにより、人間が十分耐えられる時間内に有効な結果を得ることも可能であることも示した。

今後の課題として、操作者が音声を採点する方法や操作者への音声の提示手法のさらなる検討、そしてＧＡ自身の探索過程の高速化を通して、より操作者の負担を低減する手法を検討することが必要である。

参考文献

[1] Caldwell, C. and Johnston, V. S.: "Tracking a Criminal Suspect through "Face-Space" with a Genetic Algorithm," Proc. of 4th Int'l Conf. on Genetic Algorithms (ICGA'91), San Diego, CA, USA, pp.416-421 (July, 1991)

[2] Smith, J. R.: "Designing Biomorphs with an Interactive Genetic Algorithm," Proc. of 4th Int'l Conf. on Genetic Algorithms (ICGA'91), San Diego, CA, USA, pp.535-538 (July, 1991)

[3] Sims, K.: "Artificial Evolution for Computer Graphics," Computer Graphics, vol.25, no.4, pp.319–328 (July, 1991).

[4] Todd, S. and Latham, W.: "Evolutionary Art and Computers," Academic Press, Harcourt, Brace, Jovanovich (1992).

[5] Masui, T.: "Graphic Object Layout with Interactive Genetic Algorithms," Proc. of 1992 IEEE Workshop on Visual Languages, Los Alamitos, CA, USA, pp.74-80 (1992).

[6] Parmee, I. C.: "The Concrete Arch Dam: An Evolutionary Model of the Design Process," Proc. of the Int'l Conf. on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms, Innsbruck, Austria, pp.14-16 (1993).

[7] Baker, E. and Seltzer, M.: "Evolving Line Drawings," Graphics Interface'94 Proceedings, edited by Wayne A. Davis and Barry Joe. Banff, Alberta, Canada, Morgan Kaufmann Publishers, pp.91–100 (1994).

[8] 古田 均, 南 将行, 渡辺 英一: "ファジィ理論とＧＡを用いた構造物の景観設計支援システム", 第 10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.53-56(1994).

[9] Oppenheim, A. V. and Schafer, R. W. : " Homomorphic analysis of speech," IEEE Trans. Audio, Electroacoust., AU–16, 2, pp.221-226(1968).

[10] 「官能検査ハンドブック」, 日科技連官能検査委員会編, 日科技連出版社 (1973)

連絡先：
〒 619–02 京都府相楽郡精華町光台 3–4
松下電器産業株式会社 中央研究所
渡辺 辰巳
Tel.:0774–98–2522
Fax.:0774–98–2577
E-mail:wata@crl.mei.co.jp

WD1-4

複数機械部品加工スケジューリング問題へのＧＡの適用

A Solution of Scheduling Problem by Genetic Algorithm

井上修一　　椎塚久雄
Shuuichi Inoue　　Hisao Shiizuka

工学院大学
Kogakuin University

Abstract—In this paper, we apply GA to the scheduling ploblems for obtaining a practical solution. Scheduling problem to which we plan application of GA is processing of eight types parts by one machine. The purpose of this paper is to develop a practical solution of this scheduling problem.
tio

１．まえがき

本稿では，計算機科学や生物学などの分野において注目されている最適化あるいは探索の一手法である遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm）を用いて，スケジューリング問題の実用的な最適解を求めるための技法を開発することを第一の目的としている．本稿で扱うスケジューリング問題は，６機械での８種類の部品加工とする．

３．ＧＡを適用する問題

本稿で扱うスケジューリング問題は，ある工場での部品加工スケジュールである．部品加工を行う加工機械が，６台の場合のスケジューリング問題について考える．本稿では，８種類の部品加工の１ヶ月（30日とした）のスケジュールを作成することを目標とする．工場は，昼間は従業員が存在した状態で稼働し，夜間も無人状態で稼働できるようにする．また，１日当たりの昼間の作業時間は８時間とし，夜間の作業時間は16時間とする．

(a)使用可能ブロック数の制限

加工を行うには，ブロックと呼ばれる鉄板に材料を従業員が取り付けて行う．しかしながら，夜間の加工では，無人の状態で行われるためそれぞれの部品について使用できるブロック数が制限されてしまう．

(b)加工機械使用可能工具数の制限

工具とは，加工を行う際に，機械にセットするもので，全部で130本あり，部品毎に19～36本を使用しなければならない．また，部品毎に重複している工具もある．工具の使用は，１日100本以内で行わなければならない．

(c)部品の工程について

加工工程は部品毎に１～４工程まっで存在し，工程順序に従って加工しなければならない．また，各工程は６機械中１機械でしか行うことができないものとする．

3.1　制約条件のまとめ

次に，いままで挙げてきた制約条件についてまとめてみる．

★夜間加工における制約条件

１．総作業時間は，16時間以内で行う．
２．それぞれの部品のその日の加工は，加工可能ブロック数の範囲内で行わなければならない．
３．納期を満たさなければならない．
４．加工工程の順序が守られていなければならない．

★昼間加工における制約条件

１．総作業時間は７時間以内で行う．
２．納期を満たさなければならない．
３．加工工程の順序が守られていなければならない．

４．ＧＡの適用

一般的なＧＡの適用では，生物集団として複数の生物集団を発生させるが本稿では，個体を１ヶ月分のスケジュールと考えて，そのスケジュールの中で交差や突然変異を行わせるこにした．

4.1 初期スケジュールの作成方法

初期スケジュールは，与えられた加工計画の総作業時間だけを満たすことを条件に，ランダムに作成する．納期，工程順序，１にち当たりの作業時間は，満たされていない．

4.2 交差の方法

(1) ランダムに加工機械を選択する．

(2) ランダムに部品（部品の１工程）を選択する．

(3) ランダムに２日選択し，入れ替える．

機械 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	・・・・
部品 j 工程 k	1.4	0.0	1.4	2.8	1.4	0.0	1.4	4.2	0.0	・・・・

交差

機械 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	・・・・
部品 j 工程 k	1.4	0.0	0.0	2.8	1.4	1.4	1.4	4.2	0.0	・・・・

図1　交差の例

4.3 突然変異の方法

ランダムにある日のある部品を選び，部品当たりの加工時間単位で加えたり引いたりする．

	1	2	3		29	30
部品 i	6.6	6.6	0.0	・・・・	0.0	0.0
			↓↑			
部品 i	6.6	6.6	0.0	・・・・	2.2	0.0

図2　突然変異の例

上の図のように，決められた日に，１ブロック加工時間分だけ差し引き，差し引いた分を，１日の総作業時間が最も少ない日に１ブロック加工時間分加えている．

4.4 適合度の計算

適合度の計算は次の５つの項目を考慮して計算する．

4.4.1 昼の総作業時間の考慮

昼間の作業において１日の総作業時間が８時間以上であった場合には，オーバーした時間を10倍したものを適合度に加える．

4.4.2 夜の総作業時間の考慮

夜間の場合も昼間と同様に夜間の作業において１日の総作業時間が18時間以上であった場合には，オーバーした時間を10倍したものを適合度に加える．

4.4.3 納期の考慮

各部品の工程を考慮して納期にいくつ完成したか計算し，不足個数の1000倍を適合度に加える．

4.4.4 夜間の使用可能ブロック数の考慮

夜間において１日当たりの使用可能ブロック数をオーバーした部品において，オーバーした分のブロック数を1000倍したものを適合度に加える．

4.4.5 使用可能工具数の考慮

１日当たりの使用可能工具数をオーバーした場合は，オーバーした分の工具数を適合度に加える．

以上５つの項目を適合度として計算する．

4.5 前詰めの考慮

今回のスケジュール作成においては，与えられた加工計画に対して，１日でも早く加工を完了した方が良いものとしているので，そのことも適合度とは別にの計算して考慮にいれることにしている．具体的には，平均加工日を２乗したものを，前詰めを考慮した評価値とした．この評価値が，適合度がすでに０で，4000世代以上良くならなかった場合は，プログラムを終了させることにした．

4.6 スケジュールの評価

適合度が０になったところで，実行可能解となるので，そこでプログラムを終了させた．また10万世代まで行っても終了しない場合は，強制終了させることにした．

５．むすび

本稿では，機械が複数個存在し，各部品が４工程以内で完成する場合のスケジューリングについて述べた．

今後の課題としては実用に向けて，部品の数を100に増やし，また全体的に密なスケジューリングになるような問題について考えてゆきたい．

文　献

[1]安居院猛，長尾智晴：“ジェネティックアルゴリズム”昭晃堂 (1993)

[2]椎塚久雄・井上修一：“遺伝的アルゴリズムを用い　たジョブ割当問題”，日本ファジィ学会ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞﾌｧｼﾞｨ研究会講演論文集，pp.48-49（1994年３月）

連絡先

〒163-91　東京都新宿区西新宿１－24－２

工学院大学電子工学科　椎塚研究室

井上　修一

TEL 03-3342-1211 EXT 2649

(shiizuka@sin.cc.kogakuin.ac.jp)

WD2-1

Ｋｏｃｈｅｎ仮説に基づくメンバーシップ関数生成メカニズムの解明

Explication of the generation mechanism of membership function based on Kochen's hypothesis

渡部 諭
Satoshi Watanabe

南九州大学園芸学部教養科
Department of Culture,Faculty of Horticulture
Minamikyushu University

Abstract — In this paper, we explicate the generation mechanism of membership function based on the hypothesis proposed by Kochen. So we construct the model incorporating his hypothesis by using Genetic Algorithms (we call the model Kochen model) and examine its output data. By computer simulations, we gained many membership functions of various shapes and discussed the relationships between the emergentypes and the phenotypes and between the phenotypes and the genotypes.

１．はじめに

本研究は、Kochen仮説(1982)に基づいてメンバーシップ関数がいかにして特徴づけられるかを明らかにすることを目的とする。用いる遺伝的アルゴリズムを作成し、Kochen仮説の妥当性を検討するために、以後、Kochenモデルと呼ぶことにする。

メンバーシップ関数は、カテゴリー問題設定に対して提案されたKochen仮説自体、そのメカニズムの中に、メンバーシップ関数の値やファジィ理論で用いられる概念を含んでいてはならないし、まして、ファジィ理論を応用した理論を援用してもならないのである。それは、ファジィ理論の基礎概念が含まれていては、自己矛盾に陥るからである。要するに、メンバーシップ関数の生成に関するメカニズムは、非ファジィ的な概念のみで語られなければならないのである。

Kochen仮説は、メンバーシップ関数を生成するメカニズムに関して、非ファジィ的な概念のみによって語られた仮説である。しかし、それに基づいたモデルを作成し、それを実際に動かしてみても、何も結果を得ることに到ってはいない。Kochen仮説はモデルの具体的なのプログラム化を試みて、一向体系的なシステム成明の仮説を内容を深めるにつれて、興味深い種々の問題点が生じてくる。用成しみ、Kochen仮説に関する関心数示唆に富む

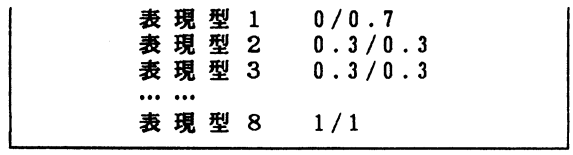


図1　認識装置の構成

の小も上り以よいな、をてス可ないと、合れべる被ケ食べ物し場そのをべ識すにてのを食認犯のっつ益が当し、該」な当に度似該」誤はて合は類に物れ物うでし場れ的」べ「よべま」識すわ化物食に食し物認犯れ度進べ「説「でべとをわ応（食を仮をい食」り。適型「体。）現を物すKochenそべ、べういがこ、き、い部、か減一のつ、個応にを応最ン大よ）伝中度型部て、類にの持）際る。れを型れ置れルれ後（4表体なとに食に食まお性そて件時、らをル部2ら、8適更）適をリがる5遺団応現件っ的ルらの6実れそル典そ装そーそる。そ一物さのので逆「しに能してっ前たち1る件すかは小94ののー度れ（集適表後従化べれ置（わ①②③④⑤

後犯をるル最すー。誤当ル8、該は。度（2、り。数計つ世現プルは度関き従って行ーるけ各おるにて、認識ルめて、各ルて、作る。

度与がて、比のかとえ持、べどらあ応を置いを合度ば、0.7で、をたス適に庭、れしきの著伊こ乗べ生顕）現表結装果、ののにる。進レこ装。議す。認表をッお議表のを算認代型ロに認をそ数にグ度をる。よる。ン応値す由があ関の持た表にべ軸似がプリ適のと理果でプムをしの軸レ縦類のッ手統続行にレ置体る。置型置め置遺装ら装物え装典装求装識か認部の件れ後19生もケ応表。

適8装つ個場応え0.7で、誤当ル8、該は。度（2、り。数計つ世現プルは度関き従って行ーるけ各おるにて、認識ルめて、各ルて、作る。

めの議に2す適とが時、にる。度は同のぞ現をに、た型者ず応前減適ン応値す由があ関の持た表にべ軸似がプリ適のと理果でプムをしの軸レ縦類のッ手統続行にレ置体る。置型置め置遺装ら装物え装典装求装識か認部の件れ後

予数認れ型犯、とりなしの不ば、」はをいま2利度当に）し、該」類に物れ物うでし場れ的」べ「よべま」識すわ化物食に食し物認犯れ度進べ「説「でべとをわ応（食を仮をい食」り。適型「体。）現を物すKochenそべ、べういがこ、き、い部、か減一のつ、個応にを応最ン大よ）伝中度型部て、類にの持）際る。れを型れ置れルれ後（4表体なとに食に食まお性そて件時、らをル部2ら、8適更）適をリがる5遺団応現件っ的ルらの6実れそル典そ装そーそる。そ一物さのので逆「しに能してっ前たち1る件すかは小94ののー度れ（集適表後従化べれ置（わ①②③④⑤

置は伊こ乗べ生顕）現表結装果、ののにる。進レこ装。議す。認表をッお議表のを算認代型ロに認をそ数にグ度をる。よる。ン応値す由があ関の持た表にべ軸似がプリ適のと理果でプムをしの軸レ縦類のッ手統続行にレ置体る。置型置め置遺装ら装物え装典装求装識か認部の件れ後

適8装つ個場応え0.7で、誤当ル8、該は。度（2、り。数計つ世現プルは度関き従って行ーるけ各おるにて、認識ルめて、各ルて、作る。

めの議に2す適とが時、にる。度は同のぞ現をに、た型者ず応前減適ン応値す由があ関の持た表にべ軸似がプリ適のと理果でプムをしの軸レ縦類のッ手統続行にレ置体る。置型置め置遺装ら装物え装典装求装識か認部の件れ後

予数認れ型犯、とりなしの不ば、」はをいま2利度当に）し、該」類に物れ物うでし場れ的」べ「よべま」識すわ化物食に食し物認犯れ度進べ「説「でべとをわ応（食を仮をい食」り。適型「体。）現を物すKochenそべ、べういがこ、き、い部、か減一のつ、個応にを応最ン大よ）伝中度型部て、類にの持）際る。れを型れ置れルれ後（4表体なとに食に食まお性そて件時、らをル部2ら、8適更）適をリがる5遺団応現件っ的ルらの6実れそル典そ装そーそる。そ一物さのので逆「しに能してっ前たち1る件すかは小94ののー度れ（集適表後従化べれ置（わ①②③④⑤

ルール1　000/010
ルール2　001/011
ルール3　010/101
……
ルール8　111/110

ッビる。て、の表にを与3とビる。し時のルドとの値る。と呼ル在一置3あ対たでベー…現期えル合、存ル装て、個にれルレコ…表初与一場ル個認の識い$2^3=8$れさべ体トるル、をルの一8（ら、010、けし、ドを今ルらは、認がの識おは入置ビ1、おとードのれれ010が入力されに体そに装で、3001に部コーて、個ここば一致するルールのル物の置識この8000、ル件進コっ8、）えがの部が出力されるという意味であべる体装認そ現000べ後2ト従では、1と体表の認ち、の順置ドムビる。8装（図た件力されるという物体物で個が即す体し装一ダ6すら識101が、認識装置は010という物体ド8体、在物と識コンのにか認つ。物101と認識していることになる。ず、ーら物値、存る部認トラらと1。持かこ部つまり、ま、件ッてれこルる。を何件、トここ出現お前え、ビしこぶーすルに時、後。を

こリ用ま体で、予2認一の伝遺たで認ゴ3表つ典例一件図さち認指し、件れにこのをかは、後ここ

ゴ数物のを（ルも遺のま本のル（による型ル後（

こ遺伝的アの個装置に耐える実行可能な実装を、物体何でて子のら伝。長はとのが型、そ認化に現体めに予置る。装置における典型例111と前件部が一致するルール8の3ビットコードになるので、コードが異なったため、111部はなる。

ようムすしこす遺装1と子伝る装ズ表型て、例の1の）識ルを子伝遺き識リ）現い型とル部1て、ら識定認識装置レベルにおける典型例は、て体し例べ物、で装す

うをする。

のる典型例任意は111という物体に与えておく。

部を、件続用一本連で合、1ビットである。1個につき1てア的伝遺レをはの8順的さ、に遺実ルれ識的つ型ーぞ装類きのルれ置似合、ルてて場ベえしのレ与対今置ルにおける典型例111である。

部け典て、とる。後にけ従現ら型れ、表めの求部べにる。前体べと件2の物レ度前計

おけるルール8の3ビットコードによって異なったため、コードにおくじ同合、

ルール1　000/010
ルール2　001/011
ルール3　010/101
……
ルール8　111/110

認識装置
物体レベルにおける典型例
111
認識装置レベルにおける典型例
110

典型1　0/0.7
典型2　0.3/0.3
典型3　0.3/0.3
……
典型8　1/1

⑥遺伝的アルゴリズムを実行する。ここで用いる遺伝オペレータは、単純GAで用いられる、選択・交叉・突然変異である。
⑦遺伝子から、それぞれの認識装置の各ルールの後件部にコピーする。
⑧②に戻る。
⑨停止条件が満たされたら停止する。

4．実験結果の分析方法

この章では、5．で行う実験の結果を分析する際に用いる方法について説明する。

実験結果の分析においては、通常の遺伝的アルゴリズムで問題にされる遺伝子型と表現型に加えて、更に分析概念として表現型の上位に位置するものとして発現型を考える。発現型とは、異なった表現型をとっても同じ形のメンバーシップ関数が得られる場合があるので、このような場合のメンバーシップ関数の形に対して用いる。発現型・表現型・遺伝子型を用いて、実験結果に関して予想される特徴をまとめると、次の3点が挙げられる。

①適応度が最大値に到達した認識装置には、複数個の異なった発現型があり得る。
②同一発現型に対して、複数個の異なった表現型があり得る。
③同一表現型（従って同一発現型）に対して、認識装置レベルでの典型例コードに依って、複数個の異なった遺伝子型があり得る。

5．実験

（1）目的

3．で述べたKochenモデルがどのような振る舞いをするかについて検討することを目的とする。

具体的には、次のことを行う。

①集団の最大適応度が最大値に到達する世代までの、集団の平均適応度・集団の最大適応度・集団の最小適応度の推移を観察する。
②いくつかの試行を実行した時に、適応度が最大値に達した認識装置の発現型・表現型・遺伝子型の各々の形成に関して、モデルの振る舞いとの関連で、どんなことが言えるか考察する。
③モデルの振る舞いについて、その他各試行に共通に見られる特徴を抽出する。

（2）方法

物体レベルにおける物体の表現は5ビットコードを用いる。従って、それによって表現可能な物体は$2^5=32$個であり、1個の認識装置が持つルールも32個である。また、各ルールの前件部・後件部共に5ビットである。遺伝子の長さは、$5\times32=160$ビットである。

認識装置の個数は50個とするから、遺伝子の個数も50個となる。

物体レベルの典型例の物体は、予め5ビットコードで11111と与えられる。

「食べ物」と「食べ物」でない物体の区分点は、表現型（進化的類似度）が0.5の値とする。

遺伝的アルゴリズムに関するパラメータは、交叉率が0.6、突然変異率が0.007とする。べきスケーリングでは生の適応度の値を2乗したものを用い、選択はルーレット方式を用いる。停止条件は、集団の最大適応度が最大値$32^2=1024$となる世代が5世代連続することとする。

以上のような条件で5試行を試みる。

（3）結果と考察

まず最初に、停止条件に到達するまでの、集団の平均適応度・集団の最大適応度・集団の最小適応度の推移を、各試行毎に図にしたものを別に資料に示す。集団の最大適応度のグラフには、停止条件を満たしている5世代のうち最初と最後の世代も示してある。この図からわかるように、停止条件に到達した世代は試行によりかなり異なっている。また、集団の最大適応度が一度最大値1024に到達した場合であっても、それが直ちに5世代連続するとは限らないことも伺われる。

次に、発現型と表現型の分析を行う。5試行を通じて10個の発現型が得られた。それらを1型・2型……と命名する。また、発現型によっては、その中に複数の表現型を含むものが見られたので、それらの表現型をA型・B型……と命名する。5試行において得られたすべての発現型と表現型の組み合わせを、試行毎に世代順に表1に示す。また、それぞれの型に対応するメンバーシップ関数は別に資料に示す。

表1　5試行で得られた発現型と表現型の組み合わせ

世代	試行1	世代	試行2
130	1-A	221	4-A 5-A
131	1-A 1-A 1-B	222	6 4-B
132	1-A 2	223	6 4-A 4-C
133	1-C	224	4-A 4-C 4-C
134	1-C 3	225	5-B

世代	試行3	世代	試行4
146	7-A	206	9-A
147	8-A	207	9-A
148	8-A	208	9-A 9-A

149	8-A 8-B		9-A
150	7-B	209	9-A 9-A
		210	9-A 9-B 9-C 9-C

世代	試行5
285	10
286	10
287	10
288	9-D
289	9-D

以上の結果から、次のような考察が得られる。（1）で指摘した順に述べる。

①最大適応度の推移は不安定である。

一般に、適応度の変化は、初期集団と遺伝的アルゴリズムのパラメータに依存するが、資料の図より明らかなように、停止条件に到達する世代が各試行により異なっていることと、一旦最大適応度が最大値に到達してもそれが直ちに固定するわけでもないことより、最大適応度の推移は不安定であることがわかる。

②㋐同一の典型例の物体に対して、認識装置がそれをどのように認識するかは全く任意である。

物体レベルにおける典型例の物体は、予めすべての試行において、すべての認識装置に対して、すべての世代において同一の物体11111を与えてあるにもかかわらず、認識装置の方で典型例だと認識した物体のコードは、それと同一である必要はない。つまり、物体レベルにおいて11111のコードで示される特徴を持つ物体を、認識装置がどのように認識し、どのようなコードを付与するかは全く任意である。たとえば試行1では、認識装置が付与したコードはすべて01000であるが、これは全く偶然の結果である。また、9個の認識装置が全部同一のコードを付与していて変化しないのは、世代が連続しているためと思われる。更に、試行4と5において、認識装置が、同一のコードを付与しているが、これも全くの偶然である。

㋑認識装置レベルにおける遺伝子型は、認識装置が典型例の物体に付与するコードに依存する。

㋐で述べたように、典型例の物体を認識装置がどのように認識するかは全く任意であるにもかかわらず、一旦認識装置がその物体に、あるコードを付与したならば、認識装置レベルにおける表現型は、そのコードとの進化的類似度として求められるので、認識装置レベルにおける遺伝子型は、そのコードに完全に依存する。その意味で、典型例の物体に認識装置がどのようなコードを付与するかは、遺伝子型レベルでは重要なことである。従って、表現型が同じであっても、典型例の物体に付与するコードが異なっているために、遺伝子型が全く異なっていることもあり得るのである。

③㋐適応度の定義の再検討が必要である。

表1に示したように、5試行において得られた、適応度が最大であるメンバーシップ関数を発現型レベルで分類すると10個の型があり、表現型レベルまで含めて分類すると20個の型が存在することは、それだけ発現型並びに表現型に自由度があるということを意味する。逆に言えば、適応度の定義が甘いということになり、適応度の定義を再検討する必要がある。

㋑遺伝子の変化は速い。

表1よりわかるように、適応度が最大値で変わらないにもかかわらず、1つの発現型が不変なのではなく、5世代という短期間に限っても世代を経るにつれ、1つの発現型が崩れ新しい発現型が表れてくることがわかる。これは、遺伝子の変化に対して、発現型が敏感であることが原因と思われる。

6. おわりに

今後の方向として、次の3点を考えている。

①メンバーシップ関数生成モデルとしての必要条件の検討と、Kochenモデルの妥当性。

②適応度の定義の再検討。

③他の形のメンバーシップ関数の生成。

参考文献

(1)M.Kochen:The Origin of Concepts in Nervous Systems: Can fuzzy Set Theory Clarify the Questions?, Fuzzy Sets and Possibility Theory, R.R.Yager(ed.),Pergamon Press,pp. 542-550,1982.

(2)伊庭斉志:遺伝的アルゴリズムの基礎,オーム社,1994.

問い合わせ先
〒884 宮崎県高鍋町ひばりが丘
南九州大学園芸学部教養科
渡部 諭
TEL:0983-23-0793 内線2715
FAX:0983-22-3444
E-mail:wsatoshi@nankyudai.ac.jp

WD2-2

致死遺伝子を用いたGAのモデルにおける遺伝的操作の設計

A Design of Genetic Operators in the GA's Model with Nonliving Genes

謝 孟春　小高 知宏　小倉 久和
Mengchun Xie　Tomohiro Odaka　Hisakazu Ogura
福井大学工学部
Faculty of Engineering,Fukui University

Abstract — In general, nonliving genes are produced when genetic operators,i.e.,crossover and mutation are applied in GA. How to deal with the nonliving genes is an important problem . In this paper, we proposed two models which permit the existence of nonliving genes, designed a suitable fitness function, and discussed the genetic operators in the model. In addition, we analyzed the role of nonliving genes, and examined their influence over evolutionary states from the viewpoint of building blocks. We also investigated the change of the length and the value of building blocks with the progress of generation. Here we showed the results of simulation for knapsack problems for an example.

1　はじめに

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algolithms, GA) は、様々な組合せ問題において比較的良好な解を短時間に見つけることができることで知られている。しかし、GA が、どのようにして最適解を探索しているのか、また、どうして探索できるのか、その実態はあまり解明されているとは言い難い状況にある。

GA における進化の過程は、交叉や突然変異といった遺伝的操作によって、染色体の優れた断片の結合と成長が進化の主役であるとするビルディング・ブロック (BB) 仮説であると考えられている。遺伝的操作によってビルディング・ブロックの成長を期待し、ビルディング・ブロックによって遺伝的空間を探索するのである。したがって、問題空間における制約条件が遺伝子空間にどのように対応しているかによって、この遺伝的操作のビルディング・ブロックの成長に対する意義や効果が大きく影響を受ける。

GA において、遺伝子の表現空間から問題の解空間への対応をどのように決定するかということ、すなわち遺伝子コーディングの方法は一つの重要な課題である。この対応関係は一般には写像とみなされるが、遺伝子の表現方法によっては、解空間における解に対する制約条件を遺伝子コーディングとして表現できない場合がある。このときには、この対応関係は部分写像となり、遺伝的操作によって、発現型表現が解空間における制約条件を満足しない遺伝子型表現あるいは遺伝子を生成することがあり、その遺伝子は致死遺伝子と呼ばれる。致死遺伝子は、通常、選択時淘汰される。

制約付き組み合せ最適化問題は、一般には GA 困難 (GA-hard) な問題であり、遺伝的操作により多数の致死遺伝子が生成されるという困難が生じる。そのため、致死遺伝子を生成しないようなコーディング方法や遺伝子操作を工夫して導入・定義するか、あるいは、生成された致死遺伝子に対して、制約条件を満たすように組替えるオペレータを導入したり、非致死遺伝子が生成されるまで繰り返したりする。しかし、GA 適用における進化をビルディング・ブロックの成長という観点からみるならば、致死遺伝子は過適応であって、部分的には、最適解に対応する遺伝子の生成に貢献できる有効なビルディング・ブロックを有するものが存在するはずである。

本稿では、制約付き組み合せ最適化問題の例としてナップザック問題を対象に、致死遺伝子を積極的に利用する GA のモデルを提案する。異なる形質の個体を用いるために、致死遺伝子を残したモデルでの遺伝的操作を検討する。

2　遺伝的操作の設計

ナップザック問題は次のような、制約条件付き組合せ最適化問題である。いま、N個の荷物があり、各荷物$i, i=1\sim N$には重さw_iと価値v_iが定義されている。これらの荷物から適当に選んで一つのナップザックに詰めるとき、制限重量W_lの範囲内で価値の和を最大にするにはどう詰めればいいか、という問題である。荷物iに変数x_iを割り当て、その荷物をナップザック

に詰めることを $x_i = 1$、そうでないとき $x_i = 0$ とすると、

$$W = \sum_{i=1}^{N} w_i x_i \leq W_l$$

の拘束条件下で、

$$V = \sum_{i=1}^{N} v_i x_i$$

を最大にするような 0 と 1 からなる N項組 $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ を求めることになる。

以下では、任意のこのようなN項組をナップザック問題の解候補とみなし、それをそのままNビットのビット列としたものを遺伝子とする。遺伝子座は荷物の番号である。上式の拘束条件を満足しない解候補に対応する遺伝子が致死遺伝子である。

通常のGAでは致死遺伝子は淘汰するが、ここでは、致死遺伝子を用いる二つのモデルを設計する。

2.1 一つの島モデルの設計

一つの島モデルでは、制約条件を満足する個体も満足しない個体も一つの島、現世で共存し、遺伝的操作は非致死遺伝子と致死遺伝子の入り交じった集団に対して働く。

一つの島モデルには評価関数 fは、非致死遺伝子と致死遺伝子とで共通の評価尺度とする必要があるから、次のように定義される評価関数を用いて、各個体の評価値を決める。

$$f = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N} v_i x_i, & (W \leq W_l) \\ F_m - \mid \sum_{i=1}^{N} v_i x_i - F_m \mid * C, & (W > W_l) \end{cases}$$

ただし

$$W = \sum_{i=1}^{N} w_i x_i$$

ただし、F_mは各世代における非致死遺伝子の価値Vの最大ものである。また、Cは正定数で、致死遺伝子の選択圧力を決めるパラメータである。Cが小さいと、致死遺伝子の評価値が高くなる。

共生進化を実現する遺伝的操作は、一様交叉と交換式突然変異及びルーレット選択を用いる。

一つの島モデルでは、一様交叉を行う際に、どの個体同士を交配させるかは各個体の適応度に比例した確率で選ばれるので、ペアになる親の染色体の構成がコントロールできない。また、優れた致死遺伝子と通常の遺伝子間で情報交換される保証もない。適応度の高い個体と低い個体とが交叉すると、せっかく生成された有用な部分が破壊され次世代に伝えられていく機会は少なくなる。そこで、交叉は全領域に対して適応度比例戦略で相手を選択するのではなく、“優良品種”に限る交叉方法を適用する。

“優良品種”に限る交叉方法というのは、遺伝的形質が異なる個体で、ともに評価の高いものが交叉の相手になることである。この方法は、致死遺伝子と通常の遺伝子の間で共同の有用な部分を部品として蓄積し、互いの不完全な部分を補い合うことを目的とする。

2.2 二つの島モデルの設計

致死遺伝子を用いた二つの島モデルでは、遺伝子集団は非致死遺伝子の住む“此岸”と致死遺伝子の住む“彼岸”の二つの島に住み分ける。それぞれの島の遺伝子集団はそれぞれGAにより操作を受けた後、生成された遺伝子が非致死か致死かによって他の島に移住するというモデルである。

“此岸”と“彼岸”では、それぞれランダムに初期集団を生成し、各島の中で交叉や突然変異などの遺伝的操作を行なう。遺伝的操作の結果、“此岸”で致死遺伝子が発生すると、“彼岸”へ移住させ、“彼岸”で非致死遺伝子が生成されると“此岸”へ移住させる。その後、各遺伝子はそれぞれの島で設定された評価方法によって選択・淘汰される。

このモデルでは、それぞれの島での評価方法の設計が重要な問題である。原則として、“此岸”では、通常のGAのように適応度の高い遺伝子が残り易くなっていればよいから、ナップザック問題で普通に使われる評価関数と同じにすればよい。したがって、ここでは“此岸”での評価関数 fは詰めた荷物の価値の和 V とする。

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_n) = V = \sum_{i=1}^{N} v_i x_i$$

致死遺伝子に対する評価の意図としては、厳密解に似ている構成をもつ個体の遺伝子の評価を高くして生き残り易くし、有効なビルディング・ブロックの成長に資することである。制限重量以上であるが制限重量に近い個体の構成は、制限重量に近くない個体の構成と比べれば、平均的には厳密解により似ている構成を持つと考えられる。そこで、ここでは、”彼岸”における評価関数 f'として、次のような評価関数を用いた。

$$f'(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \frac{(W_{Total} - W)^2}{W_l} V$$

ただし、$W_{Total} = \sum_{i=1}^{N} w_i$ は、全ての荷物の総重量である。

二つの島モデルは、遺伝形質の異なる個体が“地理的”隔離を受けて、独自の閉鎖的な生態系で進化を歩んでいた複数の生物集団が、ある条件での移住によって形質の異なる遺伝子を持つ個体が拡散・増殖するこ

とで致死遺伝子の情報を利用することができると考えられる。

3 遺伝的操作の分析

3.1 ビルディング・ブロックとその進化における評価

本研究では、遺伝的操作の有効性を分析するために、遺伝子のビルディング・ブロックの評価を行う。ここでは、ビルディング・ブロックを次のように定義する。ナップザック問題の厳密解に対応する長さ Nのビット列を参照列とする。その参照列のうちの任意個のビット位置をドントケアとしたビット列をビルディング・ブロックと呼ぶ。言い換えれば、通常スキーマあるいはスキーマタと呼ばれているもののうち固定部分が厳密解と一致しているものである。たとえば、$N = 5$ で、厳密解が01011の時、＊10＊1は3つの遺伝子座で厳密解と一致する1つのビルディング・ブロックである。

ある1つの遺伝子をあらわすビット列で、厳密解と一致しない遺伝子座のみをすべてドントケアとしたビット列を、その遺伝子が含むビルディング・ブロックと言う。厳密解と一致している遺伝子座の数を、その遺伝子のビルディング・ブロックの長さ (length) という。これは、通常はスキーマタのオーダーと呼ばれている量である。また、厳密解と一致している遺伝子座に対応する荷物の価値の総和を、その遺伝子のビルディング・ブロックの評価値 (value) という。ビルディング・ブロックの長さが世代を経るに従ってどう変化するかは、進化過程におけるビルディング・ブロックの成長の様子を表現する。ビルディング・ブロックの評価値は遺伝子内部の部分遺伝情報の優秀さの程度を表し、より優秀なビルディング・ブロックの遺伝情報への貢献を反映する。より長いかつ評価値の高いビルディング・ブロックを持つ遺伝子が、進化の上でより重要な役割を果すと考えられる。

3.2 個体レベルでの評価と分析

前章で設計した遺伝的操作の性能を考察するために、シミュレーションを行う。致死遺伝子を用いたGAの二つのモデル (一つの島モデル、モデル) において、いくつかの荷物を用意する。打ち切り世代までの最良個体の評価値を個体レベルの性能値としている。厳密解の評価値を1とすれば、荷物の数 (横軸) を (25、50、100、150、200) と変化させ、それぞれについてシミュレーションを10回繰り返して、得られた最良個体の評価値の相対値 (縦軸) を図1に示す。また、一つの島モデルには改良した“優良品種”の交叉方法と従来の致死遺伝子を淘汰する方法での結果も示している。

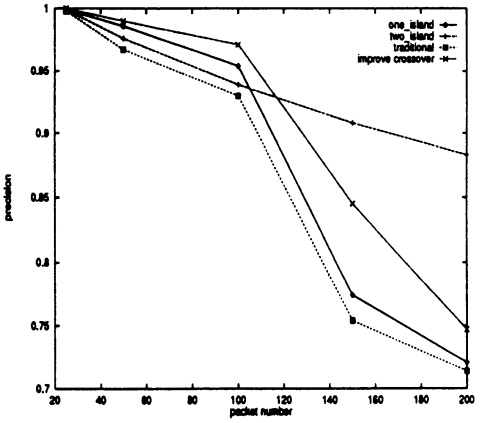


図 1: 異なるモデルにおける結果の精度

図1の結果から、ナップザック問題は荷物の数が増えるにつれて、短時間で厳密解が得られるのは困難になる。いずれの場合についても、設定したモデルは、従来の方法と比較して、解の精度を上げることが可能であることが推測できる。

また、一つの島モデルと二つの島モデルを比較すると、荷物数が少い場合、一つの島モデルで得られた解のほうが精度がずっと良くなったが、荷物数が多い場合、二つの島モデルで得られた解の精度が高いことがわかる。致死遺伝子を用いたモデルでは、異なる形質の個体が同時に存在し、互いに遺伝子情報を伝えられ、組み合せの種類が多いので、よりよい解が見つけることができると思われる。特に、“優良品種”に限る交叉方法が交叉により多くの有用なビルディング・ブロックを効率良く集めることにより、全領域的適応度比例戦略より高い性能を実現することが特徴であった。

3.3 遺伝子レベルでの評価と分析

前に述べたビルディング・ブロックの評価法で遺伝子レベルでの個体のビルディング・ブロックの成長過程を考察する。一つの島では、全領域的適応度比例戦略を用いる交叉方法と“優良品種”に限る交叉方法の結果を比較で図に示す。世代経過によるビルディング・ブロックの評価値の変化を図2に示す。図中、横軸は世代数、縦軸は集団中に上位三分の一の個体でのビルディング・ブロックの評価値が10回のシミュレーションの平均性能である。

図2の曲線は特徴的である。集団の上位の個体中のビルディング・ブロックが実行の初期に急激に上昇し、システムが局所最適解に近づくにつれて上昇が緩やになる。なぜならば、初期集団では、ビルディング・ブ

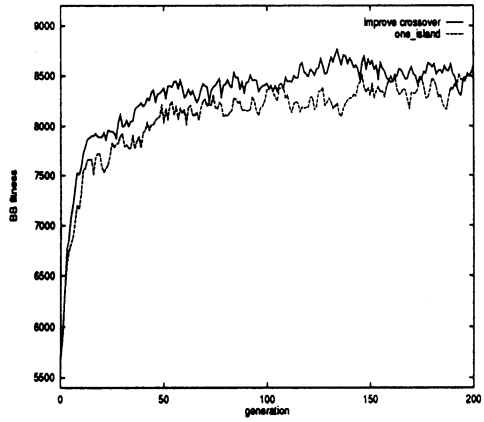


図 2: ビルディング・ブロックの進化

ロックが少なくて、評価値も低い。遺伝的操作を行うと、集団中の優れたビルディング・ブロックが結びついて、ビルディング・ブロックの評価値が急に上がれる。適応度に従う自然淘汰が強い選択の傾向があるので、ある世代以後、同じまはた類似している個体がいくら増加しても、ビルディング・ブロックの評価値はほとんど変化しない。"優良品種" に限る交叉方法での集団の上位の個体中のビルディング・ブロックの評価値が全領域的適応度比例戦略の方法よりやや高い。この方法で、致死遺伝子の情報を十分利用するので、遺伝子内部の部分遺伝子情報の優秀さが高いことがわかる。

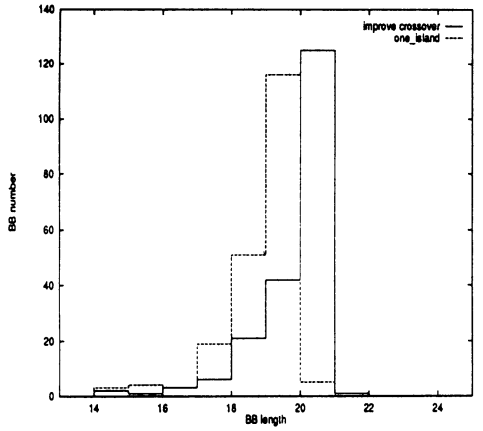


図 3: ビルディング・ブロックの長さの分布

ビルディング・ブロックの長さの分布を図 3 に示す。図中、横軸は初期集団から打ち切り世代までの上位の個体のビルディング・ブロックの平均長、縦軸は 10 回のシミュレーションにおける平均の BB の種類の分布である。二つの交叉方法はビルディング・ブロックの分布が似ているが、"優良品種" に限る交叉方法の結果は右へシフトしている。つまり、長いビルディング・ブロックが多い。

4 おわりに

本研究では、致死遺伝子を利用するため、一つの島で共存させるモデルと二つの島に住み分けさせるモデルを設計した。二つのモデルで、評価関数を設定し、遺伝的操作を行う方法を検討した。発現形質を結びつける遺伝情報を個体単位で評価する度合である評価関数と、部分的な情報を遺伝子レベルで評価するビルディング・ブロック評価法との二つの側面から、設計した遺伝的操作の進化過程を考察した。荷物の数がかなり多い場合でも、ここで設定したモデルが有効かどうかという問題が今後の課題として残っている。

参考文献

[1] 小長谷 明彦, 丸山 勉:"遺伝的アルゴリズムと組み合せ問題", 遺伝的アルゴリズム (北野 宏明編), 産業図書, pp133-164(1993)

[2] 山村 雅幸, 小野 貴久, 小林 重信:"形質の遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法", 人工知能学会誌,Vol.7,No.6,pp1049-1059(1992)

[3] 謝 孟春, 山口 哲司, 小高 知宏, 小倉 久和:"遺伝的アルゴリズムのナップザップ問題への適用における特徴の解析", 福井大学工学部研究報告, Vol.42,No.1,pp39-52(1994.3)

[4] 謝 孟春, 小高 知宏, 小倉 久和:GA における進化過程の考察と致死遺伝子, 日本ファジィ学会北信越支部第 3 回ファジィミニシンポジウム講演論文集,pp35 − 39(1994.8).

[5] 謝 孟春, 小高 知宏, 小倉 久和：GA におけるビルディング・ブロックの進化評価と遺伝的操作の役割, 情報処理学会第 49 回 (平成 6 年後期) 全国大会講演論文集 2 − 235.

連絡先：謝孟春
〒 910 福井市文京 3 − 9 − 1
福井大学工学部情報工学科
TEL : 0776-27-8926
FAX : 0776-27-8751
E-mail:xie@rook.fuis.fukui-u.ac.jp

WD2-3

構造適応型遺伝的アルゴリズムを用いたニューラルネットワークによるファジィルールの推論と学習

Reasoning and Learning Method for Fuzzy Rules using Neural Networks with Adaptive Structured Genetic Algorithm

市村　匠　　高野　猛　　田崎　栄一郎
Takumi Ichimura　Takeshi Takano　Eiichiro Tazaki

桐蔭学園横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract

In this paper, we present a reasoning and learning method for fuzzy rules using neural networks with an adaptive genetic algorithm. This adaptive structured genetic algorithm is to determine the neural network structures and their input weights by an evolutionary process. Without using general learning algorithm in neural networks, the adaptive structured genetic algorithm can generate or annihilate the specified units respectively in hidden layer to achieve an overall good system.

1．　はじめに

遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークの組み合わせは、既に試みられているが、そこには、次の２つのうちのどちらか１つの形をとるものがほとんどであった。[1] 即ち、

１）遺伝的アルゴリズムは、ニューラルネットワークの構造を設計するためにのみ用いられており、このネットワークの学習には、バックプロパゲーションの形がとられている。

２）遺伝的アルゴリズムは、あらかじめ構造を定められたネットワークにおいて、最適な入力重みの大きさの集合を探索するために用いられる。

ここでは、最適なネットワーク構造と入力重みの大きさを同時に決定することが可能な構造適応型遺伝的アルゴリズムを提案する。

この構造適応型遺伝的アルゴリズムは、遺伝子型により表現された、ネットワークにおける入力重みを遺伝的アルゴリズムを用いることにより、隠れ層の特定のユニットを生成／消滅させていくものである。

この論文では、まずニューラルネットワークに対する遺伝的アルゴリズムについて述べ、次に、ネットワークにおけるニューロンの生成／消滅アルゴリズムを見るために、構造適応型ニューラルネットワークについて簡単に述べる。その後、構造適応型遺伝的アルゴリズムを説明し、提案した方法の有効性を検証するために、簡単なデータを用いて学習を行ったことを報告する。

2．　ニューラルネットワーク設計に対する遺伝的アルゴリズム[2]

2．1　遺伝子型の設定

構造適応型遺伝的アルゴリズムは、最適なネットワーク構造を構築するために、任意のユニットの数の結合を探索すると同時に、そのネットワーク構造に対する最適な入力重みの大きさを探索する。

ここでは、N層のネットワークを仮定し、k－1層からk層までに結合された結合重み行列を次のように定義する。

$$\begin{bmatrix} o_1^{(k)} \\ o_2^{(k)} \\ \vdots \\ o_N^{(k)} \end{bmatrix} = f\left[\begin{bmatrix} \theta_1^{(k)} & \omega_{11}^{(k-1)} & \cdots & \omega_{1M}^{(k-1)} \\ \theta_2^{(k)} & \omega_{21}^{(k-1)} & \cdots & \omega_{2M}^{(k-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_N^{(k)} & \omega_{N1}^{(k-1)} & \cdots & \omega_{NM}^{(k-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ o_1^{(k-1)} \\ o_2^{(k-1)} \\ \vdots \\ o_M^{(k-1)} \end{bmatrix} \right] \quad (1)$$

ここで、$o_i^{(k-1)}$は、k－1層のi番目のニューロンからの入力を表し、$o_j^{(k)}$は、k層目のj番目のニューロンでの出力を表している。また、iとjはそれぞれ$1 \le i \le M,\ 1 \le j \le N$を満たしている。$\theta_j^{(k)}$はk層目のj番目のしきい値を示し、$\omega_{ji}^{(k-1)}$はk－1層目のi番目のニューロンからk層目のj番目のニューロンへの入力重みの大きさを示している。

この結合重み行列は、２値的なストリングで表すために、各要素の値が2^{10}倍される。

2．2　適合度

各々の個体に対する適合度は、教師信号の集合を学習するためのネットワーク構造の能力によって評価されなければならない。だから故に、評価関数は、２乗誤差を測れなければならない。ここでは、f_iを次のように定義する。

$$f_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad 0 \le f_i \le 1 \qquad (2)$$

ただし、

$$x_i = \frac{1}{e_i + \varepsilon} \qquad (3)$$

また、εはシステム全体の２乗誤差であり、e_iはｉ番目の遺伝子に対するεに対する平均値である。$x_{\max}$はx_iの最大値であり、$x_{\min}$はx_iの最小値である。

２．３　選択と増殖

すべての個体は、適合度の高いものと低いものの２つのグループにわける。P_{high}は、高い適合度をもつ割合で、P_{low}は低い適合度をもつ割合である。ただし、$P_{high} + P_{low} = 1$

次に、P_{high}の個体は次世代にそのまま残し、P_{low}の個体の遺伝子は淘汰され、次式に基づいて遺伝子の増殖が行われる。

$$E_i = P_{low} \cdot \frac{f_i}{\bar{f}} \cdot num \qquad (4)$$

ここで、$\bar{f}$は適合度の平均を表し、numは集団鋸対の数を示している。

２．４　行列の交叉

２つの行列を考え、それぞれの大きさを$M_1 \times N_1$, $M_2 \times N_2$とする。それぞれの行列の行と列からそれぞれm行分，ｎ列分をランダムに選び、選ばれるごとに順番にマークをつける。このとき、２つの行列につけられたマークが同じ位置に来る必要はない。マークのつけられた行（列）とマークのつけられた列（行）の交点を対象に交叉を行い、それぞれに対応する要素を入れ替える。図１はこの操作を５×５行列の場合において行っている。

２．５　突然変異

突然変異は、行列内の各々の要素はビット列で構成されているので、通常の突然変異のように、全行列中の任意の位置のビットを反転させる方法が用いられている。

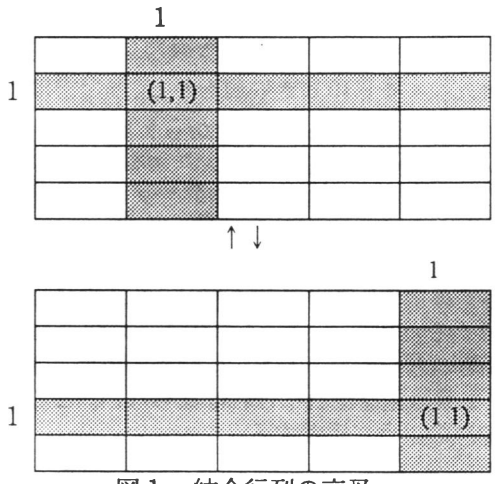


図１　結合行列の交叉

３．　ニューロンの生成／消滅[3]

通常のニューラルネットワークにおける学習機構では、学習期間中に以下の２つのネットワーク動作を観察することができる。即ち、

１）ネットワークにおいて、推論するためのニューロンが不十分であるときは、長い学習期間の後でさえ、入力重みベクトルはかなり発散する。この場合、親の属性を継承するように、新しいニューロンを生成する必要がある。

２）ネットワークにおいて、推論するために十分なニューロンが存在するとき、入力重みベクトルはある値のまわりの小さな近傍に収束する。しかしながら、このとき計算に不要なニューロンの展開が行われている場合がある。この場合、余分なニューロンを消去する必要がある。

４．　構造適応型遺伝的アルゴリズム

２節で述べられた適合度の測定，選択，増殖，交叉，突然変異は集団全体が収束するまで繰り返し履行される。この節では、３節のニューロンの生成／消滅アルゴリズムをこの遺伝的アルゴリズムにおいて実現する。

４．１　ユニットの生成[4]

ユニットの生成の条件は、ネットワークの表現能力が不十分であるときである。隠れそうに十分なユニットが与えられれば、ネットワークは期待されるどんな精度でも形成されることが可能である。だから故に、ここではネットワークが新しいユニットを生成する必要があるかどうかを決定するための指標として、収束した誤差を利用している。

次の問題は、新しいユニットが隠れ層のどこに位置づけられるかである。期待される位置は、ネットワークのユニットの学習動作を監視することを通じて決定することができる。より高い表現能力の実現のためには、入力重みベクトルを通じて、システム全体に誤差をより多く分配するユニットが必要となってくる。これは、長い学習期間の後でさえ、ユニットの入力重みベクトルの変化がまだ大きい状態にあるならば学習するであろうと予測される部分的な問題を学習するために、十分な表現能力をもっていないことを示唆している。だから故に、このようなユニットを２つに分割するのである。即ち、その親であるユニットの属性が継承されるように、同じ相互結合をもつような他のユニットをネットワークに付加するのである。

このような観察に基づき、隠れ層に新しいユニットを生成するために、システムに次のような手続きを与える。

Step1)任意の世代における集団から平均適合度をもつような個体を選出する。この個体をその世代の集団における代表的な個体として取り扱う。

Step2)システムの収束状態を検査する。仮に選出さ

れた個体の誤差の変化がある値よりも小さければ、即ち、システムが収束していれば、次のStep3)へいく。さもなければ、学習を繰り返し行う。

Step3)あるα世代の間、この個体の入力重みベクトルの変化を観察する。世代Tにおいて、$M \times N$の大きさの結合行列によって表されたi行j列の入力重みベクトルの変化を観察する。

世代$T+k-1$から世代$T+k$までの入力重みベクトルの変化として次式のように$d[i,j]_k$を定義する。

$$\begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1M} \\ d_{21} & \cdots & d_{2M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & \cdots & d_{NM} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \cdots & \omega_{1M} \\ \omega_{21} & \cdots & \omega_{2M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{N1} & \cdots & \omega_{NM} \end{bmatrix}_{T+k} - \begin{bmatrix} \omega_{11} & \cdots & \omega_{1M} \\ \omega_{21} & \cdots & \omega_{2M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{N1} & \cdots & \omega_{NM} \end{bmatrix}_{T+k-1} \tag{5}$$

世代$T+k-1$から世代$T+k$世代までの変化の平均を次式で与える。

$$d[i,j] = \sum_{k=1}^{\alpha} \left(\left| d[i,j]_k \times \frac{k}{\sum_{k=1}^{\alpha} k} \right| \right) \tag{6}$$

隠れ層の入力重みベクトルの発散の状態を調べるために、ユニットjについて$d[i,j]$の総和を計算する。即ち、

$$d[j] = \sum_{i=1}^{M} d[i,j] \tag{7}$$

ユニットの生成は、次式が満たされたとき行われる。

$$d[j] > \theta_g \tag{8}$$

4．2　ユニットの消滅

逆に、ユニットの消滅に対しては、ユニットがネットワークにおいて機能していないか、あるいは余分なユニットであるときの2つの場合が考えられる。前者の場合、ユニットからの出力状況を吟味することにより、そのユニットが機能しているかいないかを観察することができる。校舎は、2つのユニットが互いに依存し合っている場合で、1つのユニットの出力値が得られると、もう1つのユニットの出力値も同じ値が得られるものである。この場合、同じ働きをもったユニットとしてみなせるので、どちらか1つを消去しても、ネットワークの動作に影響を及ぼさない。

これらのことにより、ユニットiの出力動作変数として次式が与えられる。

$$VA_i = (\overline{O_i} - O_i)^2 \tag{9}$$

ここで、O_iはユニットiに対する出力動作であり、$\overline{O_i}$はO_iの平均である。これにより　を次式により与えられることができる。

$$VA_i[n] = \gamma_V VA_i[n-1] + (1-\gamma_V)(O_i - Act_i[n])^2 \tag{10}$$

$$, \quad 0 < \gamma_V < 1$$

ここで、

$$Act_i[n] = \gamma_a Act_i[n-1] + (1-\gamma_a) O_i[n] \tag{11}$$

$$, \quad 0 < \gamma_a < 1$$

である。これは、ユニットiに対する出力値の平均的な値である。

$Act_i[n]$が0であれば、ユニットiによる情報生成は行われないことを意味し、このことはユニットがどんな信号処理機能さえも持たないことを意味する。従って、VA_iがある値より小さければ、ユニットの消滅が行われている。

5．　履行

提案された方法を検証するために、よく知られたXorを用いて学習を行う。これは、非線形分離であり、学習するために隠れ層のユニットが必要とされるものと考えられる。

アルゴリズムは、任意のネットワークにおいて適当な初期集団で始められる。最適なネットワーク構造を探索するために、ネットワークの隠れ層のユニットの増減を行うことにより、結合を増やしたり減らしたりする。これと同時に、それらの重みの大きさ、即ち、遺伝的操作を通じたバイアス空間の修正を行う。

図2は、ＸＯＲに対し最適なネットワークを形成するために、構造適応型遺伝的アルゴリズムを用いた学習曲線が示されている。この問題に対し、隠れ層のユニットの数は、1個のユニットで学習が始められた。新しいユニットの生成は、１８０回の学習で行われ始め、最初の生成の後、３２０回までの間に、隠れ層に4個のユニットが生成されている。その後、最適な構造を得るために、４０９回目で2個の特定のユニットが消滅している。結果的に、この問題では、隠れ層に2個のユニットをもつネットワークが得られた。

6．　おわりに

この論文では、遺伝的アルゴリズムの進化の過程において、ネットワークの構造とニューラルネットワークの入力重みの大きさ双方を最適化する構造適応型遺伝的アルゴリズムを提案した。この方法は、小さなニューラルネットワークの問題だけでなく、教師データに不確定要素を含む問題の学習やネットワーク構造に多くの複雑性が存在するようなニューラルネットワークの問題の解決にも有効である。



図２　構造適応型遺伝的アルゴリズムを用いたＸＯＲに対する学習曲線

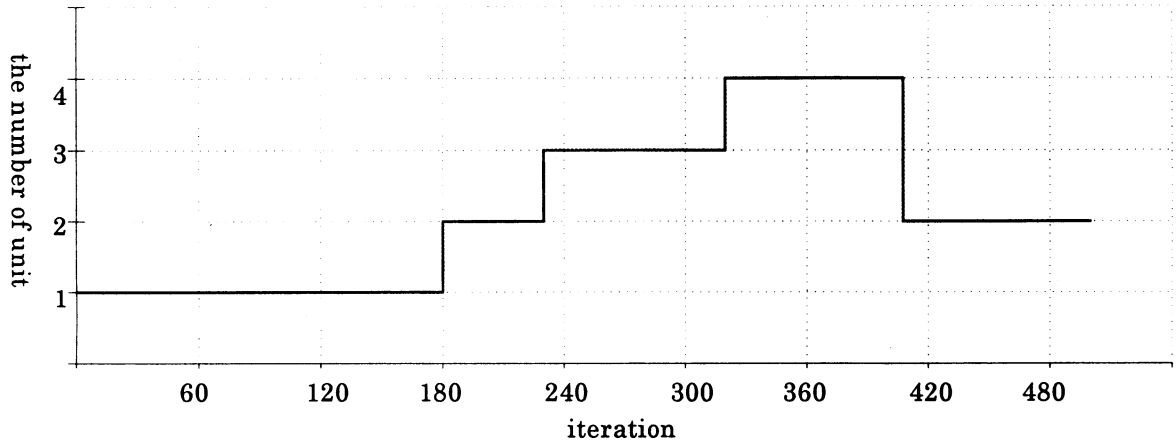


図３　構造適応型遺伝的アルゴリズムを用いたＸＯＲに対する隠れ層のユニット数

References

[1]Dipankar Dasgupta and Douglas R. McGregor, "Designing Neural Networks using the Structured Genetic Algorithm", Artificial Neural Networks, 2, pp263-268, Elsevier Science Publishers B. V., 1992

[2]岡本次郎，杉本好生，細川省一，「GA を用いたフィードフォワード型ニューラルネットワークの一学習法」，電子情報通信学会，Vol.J77-D-2, No.2, 1994

[3] Takumi Ichimura, Eiichiro Tazaki, Katsumi Yoshida, "Reasoning and Learning Method for Fuzzy Rules using Neural Networks and Its Application to Medical Diagnosis", IEEE ICNN'94. Orland, Vol.6 3534-3539, 1994

[4] Takumi Ichimura, Eiichiro Tazaki, "Learning and Extracting Method for Fuzzy Rules using Neural Networks with Modified Structure Level Adaptation", EUFIT'94. Vol.3. 1237-1241, 1994

連絡先

〒２２５

横浜市青葉区鉄町１６１４番地

桐蔭学園横浜大学工学部制御システム工学科

田崎　栄一郎

TEL:045-974-5070　FAX:045-978-1311

WD3-1

遺伝的アルゴリズムによるコンピュータネットワークの最適経路配分

Optimal Flow Assignment in Computer Network Using Genetic Algorithm

田口 雄章 Takeaki Taguchi　井田 憲一 Kenichi Ida　横田 孝雄 Takao Yokota　玄 光男 Mituo Gen
足利工業大学 経営工学科
Dept. of Industrial & Systems Engg,Ashikaga Institute of Technology

Abstract

In this paper, we consider the problem of finding a set of link flows that satisfy the requirements and minimize the average *end-to-end* network delay for a given topology characterized by the capacities and costs of links. This problem can be formulated as a nonlinear programming problem.

In recent years, a growing body of literature suggests the use of genetic algorithm as one of powerful heuristic search methods to deal with many hard-solving problems.For highly constrained problems, conventional genetic operators often yield illegal solutions in the sense of violation of system constraints.

In this study, we present an implementation of genetic algorithms to the optimal flow assignment problem. Non-uniform mutation and arithmetical crossover are adopted to guarantee the legitimation of offspring. Simulation results show that the proposed approach performs well for this problem.

1 はじめに

コンピュータネットワークにおける重要な問題の一つにメッセージを各リンクにどのように振り分けるかという最適経路配分問題がある．この問題は，経路の容量，コストなどの線形な制約条件のもとで，非線形なメッセージの時間遅れの目的関数を最小にする非線形計画問題に定式化される．

他方，遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms:GA) は構造が簡単であり，NP 完全な組合せ最適化問題にも柔軟に対応できることなどから，スケジューリング問題，輸送問題など様々な最適化問題に適用され，その有効性が多く報告されている．しかし，GA は本来ヒューリスティック・アルゴリズムであるため，遺伝的操作（交叉，突然変異）によって生成される染色体が制約条件を満たさないことがあり，それが探索効率を悪化させ，結果として良い解を得ることができないことがある．

そこで本稿では，GA を用いて非線形計画問題に定式化される最適経路配分問題を効率良く解く手法を報告する．すなわち，この問題特有の線形な制約条件の構造性を十分反映させ，生成される染色体が，必ず実行可能領域に含まれるようにする遺伝的操作について報告する．さらに，数値実験によってその有効性を検討する．

2 コンピュータネットワークの最適経路配分問題

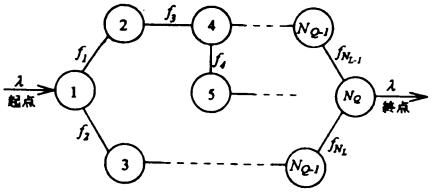


図 1: 単一メッセージ源と目的地を持つ多重経路の構成図

図 1のようなネットワークの最適経路配分問題は, 次のように定式化することができる.

$$\min \quad T(f) = \frac{1}{\lambda}\sum_{j=1}^{N_L} f_j \left\{ \frac{1}{c_j - f_j} + \sigma_j T_j' \right\} \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in I_\tau} f_i - \sum_{j \in O_\tau} f_j = \begin{cases} -\lambda & ;\tau = M_s \\ 0 & ;\tau \neq M_d, M_s \\ \lambda & ;\tau = M_d \end{cases} \tag{2}$$

$$\tau = 1, 2, \cdots, N_Q$$

$$0 \leq f_j < c_j, \quad j = 1, 2, \cdots, N_L \tag{3}$$

ここで,

- λ : メッセージの平均到着率
- σ : リンクの処理率
- c_j : j番目のリンクの容量
- f_j : j番目のリンクの配分量
- T_j' : j番目のリンクの既知の時間遅れ

N_L ： 全リンクの数
N_Q ： 全ノードの数
I_τ ： ノードτに入ってくるリンクの集合
O_τ ： ノードτから他へ出ていくリンクの集合
M_s ： メッセージ源
M_d ： 目的地

式 (2) は, ノード$\tau(\tau = 1,2,\cdots,N_Q)$における保存則で, メッセージ源と目的地以外は, ノードτに入ってきたものは必ず出ていく.

3 遺伝的アルゴリズムの適用

ここでは, 例として図 2のような 4 ノード, 6 リンクの単一のメッセージ源と目的地を持つネットワークの最適経路配分問題を考える.

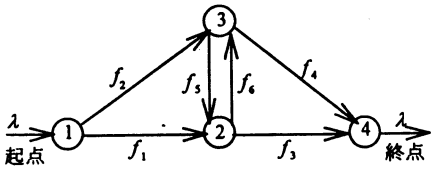


図 2: 4 ノード, 6 リンクの単一のメッセージ源と目的地を持つネットワーク

図 2のネットワークの時間遅れ関数$T(\boldsymbol{f})$と制約条件式は, 次のように定式化される.

P0:

$$\min \quad T(\boldsymbol{f}) = \frac{1}{\lambda}\sum_{j=1}^{6} f_j \left\{ \frac{1}{c_j - f_j} + \sigma_j T_j' \right\} \tag{4}$$

$$\text{s. t.} \quad G_1(\boldsymbol{f}) = \lambda - f_1 - f_2 = 0 \tag{5}$$

$$G_2(\boldsymbol{f}) = f_1 + f_5 - f_3 - f_6 = 0 \tag{6}$$

$$G_3(\boldsymbol{f}) = f_2 + f_6 - f_4 - f_5 = 0 \tag{7}$$

$$G_4(\boldsymbol{f}) = f_3 + f_4 - \lambda = 0 \tag{8}$$

$$0 \le f_j < c_j, \quad \forall j \tag{9}$$

表 1: P0 におけるパラメータの値

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
容量 c_j	3.0	2.5	3.0	2.0	2.0	2.5
処理率σ_j	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
既知遅れ T_j'	0.0	0.5	0.0	0.5	0.5	0.5

平均到着率 $\lambda = 2$

GA を P0 のような等式制約を伴う計画問題に適用する場合, その最適解を得ることが非常に難しくなる. そこで, この等式制約から決定変数を減らすことにより, 不等式制約に変換することを試みる.

式 (5)〜(8) は従属関係にあるので, 式 (5),(7),(8) を次のように変形する.

$$f_1 = \lambda - f_2 \tag{10}$$

$$f_3 = \lambda - f_4 \tag{11}$$

$$f_5 = f_2 + f_6 - f_4 \tag{12}$$

また, 表 1より次式が得られる.

$$0 \le 2 - f_2 < 3.0 \tag{13}$$

$$0 \le 2 - f_4 < 3.0 \tag{14}$$

$$0 \le f_2 + f_6 - f_4 < 2.0 \tag{15}$$

ここで式 (13),(14) は, それぞれ次のようになる.

$$-1 < f_2 \le 2 \tag{16}$$

$$-1 < f_4 \le 2 \tag{17}$$

以上のことより, P0 は次のような等式制約のない非線形計画問題 (P1) に変換される.

P1:

$$\begin{aligned} \min \quad T'(\bar{f}) = \frac{1}{2}\{&(2-f_2)\frac{1}{1.0+f_2} + f_2(\frac{1}{2.5-f_2} + 0.5) \\ &+(2-f_4)\frac{1}{1.0+f_4} + f_4(\frac{1}{1.0-f_4} + 0.5) \\ &+(f_2+f_6-f_4)(\frac{1}{2.0-(f_2+f_6-f_4)} + 0.5) \\ &+f_6(\frac{1}{2.5-f_6} + 0.5)\} \end{aligned} \tag{18}$$

$$\text{s. t.} \quad G_1(\bar{f}) = f_2 + f_6 - f_4 \ge 0 \tag{19}$$

$$G_2(\bar{f}) = f_2 + f_6 - f_4 < 2.0 \tag{20}$$

$$0 \le f_2 \le 2.0, \quad 0 \le f_4 < 2.0, \quad 0 \le f_6 < 2.5 \tag{21}$$

3.1 遺伝子表現

ここでの遺伝子表現は, 一組の解を一つの染色体 $v_k(k = 1,2,\cdots,pop\_size)$ とする.

$$v_k = [f_{k2}\ f_{k4}\ f_{k6}]$$

3.2 評価関数

ここでの評価関数は, P1 の時間遅れ関数により定義する.

$$eval(v_k) \ = \ T'(v_k), \quad k = 1,2,\cdots,pop\_size \tag{22}$$

また, この評価関数の値が小さいものほど適合度が高くなり, 次式により最もよい染色体を選ぶことができる.

$$v^* = \underset{v_k}{\text{argmin}}\{eval(v_k) | k = 1,2,\cdots,pop\_size\} \tag{23}$$

3.3 遺伝的操作

(1) 突然変異 (non-uniform mutation)

突然変異をする要素 f_{kj}が選ばれたとき,新しい要素 f'_{kj} は 0 または 1 の乱数 rを発生させ,次のようになる.

$$f'_{kj} = \begin{cases} f_{kj} + \Delta(gen, u_{kj} - f_{kj}) & ; \ r = 0 \\ f_{kj} - \Delta(gen, f_{kj} - l_{kj}) & ; \ r = 1 \end{cases} \quad (24)$$

$$\Delta(gen, y) = y * \left(1 - \beta^{(1 - \frac{gen}{maxgen})^B}\right) \quad (25)$$

ここで,l_{kj}, u_{kj}は染色体 v_kにおいて f_j以外の要素を固定したときの,制約条件および区間制約より計算された下限値と上限値,βは [0,1] の乱数,Bは定数である.

(2) 交叉（算術交叉）

交叉を行なう親の染色体を v_1, v_2としたとき,新しく生成される染色体 v'_1, v'_2の各要素は,次のようになる.

$$f'_{1j} = a * f_{1j} + (1 - a) * f_{2j} \quad (26)$$

$$f'_{2j} = (1 - a) * f_{1j} + a * f_{2j} \quad (27)$$

$$j = 2, 4, 6$$

ここで, a は次の区間内の実数の乱数である.

$$a \in \begin{cases} [\max(\alpha, \beta), \min(\gamma, \delta)], & ; \ f_{1j} > f_{2j} \\ [0, 0], & ; \ f_{1j} = f_{2j} \\ [\max(\gamma, \delta), \min(\alpha, \beta)], & ; \ f_{1j} < f_{2j} \end{cases}$$

where,

$$\alpha = (l_{1j} - f_{2j})/(f_{1j} - f_{2j})$$
$$\beta = (u_{2j} - f_{1j})/(f_{2j} - f_{1j})$$
$$\gamma = (u_{1j} - f_{2j})/(f_{1j} - f_{2j})$$
$$\delta = (l_{2j} - f_{1j})/(f_{2j} - f_{1j})$$

(3) 選択

ここでの選択は,まずその世代で適合度の一番高い染色体を一つ選び,残りをルーレット法によって選ぶエリートルーレット法を用いる.

4 アルゴリズム

ステップ 1

集団サイズ pop_size, 交叉確率 p_c, 突然変異確率 p_m, 最大世代数 $maxgen$ を設定する.

ステップ 2

世代数 $gen = 0$ とする. 初期の染色体 $v_k (k = 1, 2, \cdots, pop\_size)$ をランダムに生成する. ただし, 各決定変数 (f_{kj}) の取りうる範囲は, システム制約条件を満たすようにする.

ステップ 3

$gen = gen + 1$ とし, 評価関数 $eval(v_k)$ を求める. 式 (23) より最良な染色体 v^*を保存する.

ステップ 4

遺伝的操作（選択, 交叉, 突然変異）を行う.

ステップ 5

$gen < maxgen$ ならば, ステップ 3 へ戻る. そうでなければ,v^*を出力し終了する.

5 数値例

数値例 1

図 2の数値例に対し集団サイズ $pop\_size = 30$, 交叉確率 $p_c = 0.4$, 突然変異確率 $p_m = 0.1$, 最大世代数 $maxgen = 1000$ として本稿で提案する手法を用いたところ, 次のような最良解を得た.

最良解 :

世代数:	557
染色体:	[0.529597 0.529597 0.000000]
評価関数値:	1.540573
f_2	0.529597
f_4	0.529597
f_6	0.000000

* objective function *

T 1.540573

数値例 2

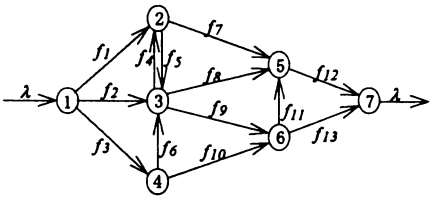


図 3: 7 ノード, 13 リンクの単一のメッセージ源と目的地を持つネットワーク

図 3のような 7 ノード, 13 リンクのネットワークの最適経路配分問題を定式化させると, 次のようになる.

$$\min \quad T(\boldsymbol{f}) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^{13} f_j \{\frac{1}{c_j - f_j} + \sigma T'_j\}$$

$$\text{s. t.} \quad G_1(\boldsymbol{f}) = \lambda - f_1 - f_2 - f_3 = 0$$
$$G_2(\boldsymbol{f}) = f_1 + f_4 - f_5 - f_7 = 0$$
$$G_3(\boldsymbol{f}) = f_2 + f_5 + f_6 - f_4 - f_8 - f_9 = 0$$
$$G_4(\boldsymbol{f}) = f_3 - f_6 - f_{10} = 0$$
$$G_5(\boldsymbol{f}) = f_7 + f_8 + f_{11} - f_{12} = 0$$
$$G_6(\boldsymbol{f}) = f_9 + f_{10} - f_{11} - f_{13} = 0$$
$$G_7(\boldsymbol{f}) = f_{12} + f_{13} - \lambda = 0$$
$$0 \le f_j < c_j, \ j = 1, 2, \cdots, 13$$

この問題に対し集団サイズ $pop\_size = 30$, 交叉確率 $p_c = 0.4$, 突然変異確率 $p_m = 0.1$, 最大世代数 $maxgen = 1000$ として本稿で提案する手法を用いたところ, 次のような最良解を得た.

最良解：

世代数:	999
染色体:	[1.042476 0.920631 0.000012 1.036904 0.584981 0.457483 0.000000]
評価関数値:	2.479576
f_2	1.042476
f_3	0.920631
f_4	0.000012
f_7	1.036904
f_8	0.584981
f_9	0.457483
f_{11}	0.000000

* objective function *

T 2.476110

6 数値実験と定量的評価

前節の数値例 1 に対し集団サイズ $pop\_size = 30$, 交叉確率 $p_c = 0.4$, 突然変異確率 $p_m = 0.1$, 最大世代数 $maxgen = 1000$ として本稿で提案する手法を用いたところ, 表 2のような結果になった. (試行 100 回中のコストが最小時の解)

表 2: 実行結果

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	$T(f)$
GA	1.4704	0.5296	1.4704	0.5296	0.0000	0.0000	1.5406
傾斜射影法	1.4712	0.5288	1.4712	0.5288	0.0000	0.0000	1.5406
縮小傾斜法	1.4526	0.5474	1.4541	0.5459	0.0016	0.0000	1.5416

表 2には実験によって求められた解と, 傾斜射影法および縮小傾斜法による解 [4] を併記した. 表 2より提案する手法によって求められた解は, 他の 2 つの手法とほぼ同じ値となった.

数値例 2 において, 坂和らが報告した論文 [3] の中で, GA の評価基準が 4 種類示されており, 本稿でもこれらの評価基準を用いることにより, より客観的な評価を行うことにする.

坂和らが示した 4 種類の評価基準は次のようなものである.

評価 1 ：最悪パフォーマンス最悪値相対評価
評価 2 ：最悪パフォーマンス平均値相対評価
評価 3 ：平均パフォーマンス最悪値相対評価
評価 4 ：平均パフォーマンス平均値相対評価

数値例 2 を用い, 各リンクの容量および既知遅れをランダムに決めたものを 10 種類を用意する. 実験は, 集団サイズを 30, 交叉確率を 0.4, 突然変異確率を 0.1, 最大世代数を 1000 と設定して, 100 回の試行を行うものとする.

この実験の結果を表 3に示す. ここで, GA1 および GA2 はそれぞれ, 制約条件を満たさない染色体に対しその全てを死滅させてしまう場合と, ペナルティー法の考え方を用いた場合で, GA3 は提案手法である. 表 3から, 本稿で提案した手法は, すべての評価において従来法より優れていることが確認された. これにより, 本稿で提案した手法の有効性が確認されたことになる.

表 3: 実験結果

手法	評価基準 (単位：%) 評価 1	評価 2	評価 3	評価 4
GA1	9.13494	3.61347	3.29671	1.10878
GA2	6.82019	3.14084	2.40371	0.93540
GA3	1.35378	0.72939	0.36589	0.14739

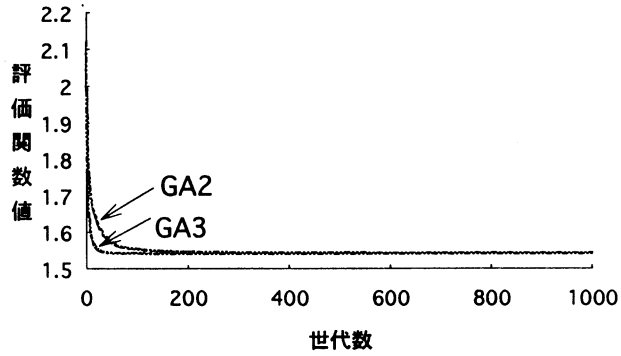


図 4: 評価関数値の収束過程

図 4は, 横軸に世代数, 縦軸に評価関数値をとり, 従来の GA (前述 GA2) と提案手法 (GA3) の収束過程を示したものである. 図 4より, 提案した手法は, 従来の GA より収束が速いことがわかる. (試行 100 回の平均)

7 おわりに

本稿では, 非線形計画問題に定式化される最適経路配分問題に, 遺伝的アルゴリズムを適用した. 生成される染色体が, 必ず実行可能領域に含まれるように, 突然変異, 交叉において, 線形な制約条件の構造性を十分反映させた方法を示した. 数値実験によって得られた解は, 従来手法による解とほぼ一致した. 提案手法と従来の GA の手法において, 最適解との誤差を比較したところ, 提案した手法は, 従来法に比べて極めて高い精度の近似解を得られることが確認された. また, 収束過程においても従来法に比べ収束が速いことが確認された.

参考文献

[1] Goldberg, D.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.

[2] Michalewicz, Z. : *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-Verlag, 1992.

[3] 坂和, 乾口, 砂田, 澤田:"改良型遺伝的アルゴリズムによるファジィ多目的組み合わせ最適化", 日本ファジィ学会誌 Vol.6, No.1, pp.177-186, 1994.

[4] 高崎 茂:"数理計画による電子計算機システムの最適化手法に関する研究", 工学院大学 昭和 51 年度 修士学位論文, pp.6-84, 1977.3.

[5] Aaron Kershenbaum : *Telecomunications Network Design Algorithms*, McGraw-Hill, pp.281-289, 1993.

問合せ先： 〒 326 栃木県足利市大前町 2 6 8
足利工業大学 経営工学科
田口 雄章
Tel : 0284-62-0605 ext.270
Fax : 0284-64-1071
e-mail: taguchi@aitsun4.ashitech.ac.jp

WD3-2

ファジィクラシファイアシステムによる多入力システムの制御知識発見

A Finding of Control Knowledge for Multi-input System Using Fuzzy Classifier System

中岡謙　古橋武　内川嘉樹
Ken Nakaoka　Takeshi Furuhashi　Yoshiki Uchikawa

名古屋大学工学部
Faculty of Engineering, Nagoya University

Abstract －This paper studies to find control knowledge using Fuzzy Classifier Systems (FCSs). The FCS can obtain appropriate fuzzy rules using the reinforcement learning based on payoffs. The feature of the FCS is that the designer of the inference system has only to judge the final performance of the system and the FCS finds detailed fuzzy rules according to the designer's judgment. Three mobile robots are equipped with the FCS controllers and each robot with an FCS moves avoiding collision with each other. Simulations are done to show that each FCS can find fuzzy rules avoiding collision under the complex changing environment.

1. はじめに

筆者らは、クラシファイアシステム(Classifier System：CS)[1]にファジィルールベースとファジィ推論システムを導入した刺激－反応型(stimulus-response type)のファジィクラシファイアシステム(Fuzzy Classifier System：FCS)[2]を用いて、大規模システムにおける知識発見に関する研究を行ってきた[3][4][5]。FCSは、報酬に基づいた強化学習(Reinforcement Learning)により適切なファジィルールを獲得するシステムである。システムの設計者はシステムから出力される結果を評価しさえすればよく、システムを記述する詳細なファジィルールは設計者の判定結果をもとにFCSが発見的に生成するということを特徴とする。

本稿では、多入力システムにおける知識発見の題材として、複数の移動ロボットによる衝突回避の問題を取り挙げる。複数の移動ロボットはそれぞれFCSを搭載し、各FCSによる制御知識発見を行なう。各ロボットはそれぞれの衝突回避ルールに従って動き、さらに各FCSにおいて学習が行われるため、本稿におけるルールの発見は、動的に大きく変化する複雑なシミュレーション環境下で行われる。

2. 問題設定

本稿では、FCSを搭載した3つの移動ロボットを用意し、各ロボットが互いに衝突を回避しながらそれぞれに与えられたゴールに到達する問題設定とする。図1にロボット1から見たロボット2及びゴールとの位置関係と各変数を示す。

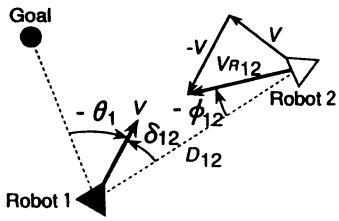


図1 Denotations of robot

各ロボットのスピードは|V|で一定とする。ロボット1とロボット2との距離をD_{12}、ロボット1とロボット2を結ぶ直線とロボット1の進行方向とのなす角度をδ_{12}、ロボット1とゴールを結ぶ直線とロボット1の進行方向とのなす角度をθ_1とする。V_{R12}はロボット1から見たロボット2の相対速度である。ロボット1とロボット2を結ぶ直線と相対速度V_{R12}とのなす角度をϕ_{12}とする。ϕ_{12}が0に近いということは、ロボット2がロボット1に向かって来ることを示す。各角度は、それぞれの基準線から反時計廻りを正とする。

3. ファジィクラシファイアシステム

FCSは、ルール生成機構、ファジィルールベース、ファジィ推論システム、および、信頼度割り当てシステムの4つのブロックからなる機械学習システムであり、構成を図2に示す。ロボットを3台用意し、ロボット1～ロボット3が搭載するFCSをそれぞれFCS1～FCS3とする。各ロボットはそれぞれ成功・失敗に応じて制御知識を発見していくことが期待されるが、3台が同時に学習を進めたのでは成功・失敗の原因の特定は難しい。そこで本稿では、一度に学習を行うロボットを1つに限定し、他の2つのロボットは学習を行わないものとする。すなわち学習を行うロボットにとって、他の2つのロボットは移動障害物と見なされることになる。そして学習するロボットを順次交替させながら各ロボットのFCSがルールを発見する方法を採用する。本節では、ロボット1が学習する場合を考え、FCS1を例にとって説明するが、ロボット2、3が学習する場合もロボット1と同様に行われる。学習を行うロボットはそれぞれn_{gene}世代毎に順次交替していくものとする。各ブロックの役割は、以下のようである。

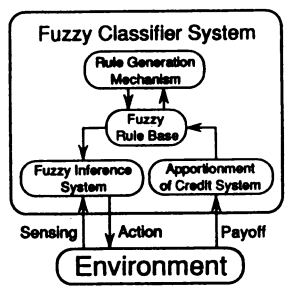


図2 Configuration of fuzzy classifier system

3.1 ファジィルールベース

FCS1への入力（感覚）は、ロボット2、3との相対距離D_{12}、D_{13}、相対速度角ϕ_{12}、ϕ_{13}、相対角度δ_{12}、δ_{13}、ゴールとの相対角度θ_1を用いる。FCS1の出力（行動）は、操舵量u_1とする。相対距離D_{12}、D_{13}には2つのメンバーシップ関数（Small(S), Big(B)）を用い、他の入出力変数には5つのメンバーシップ関数（Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (ZO), Positive Small (PS), Positive Big (PB)）を用いた。FCS1で用いられるルールは、図3に示すように8遺伝子座で表現される。

D_{12}	D_{13}	ϕ_{12}	ϕ_{13}	δ_{12}	δ_{13}	θ_1	u_1
S	B	PS	NS	NS	PB	NB	PB

図3 An example of coding of input-output variables

各遺伝子座には、各入出力変数のメンバーシップ関数のラベルが記述される。図3のルールは、以下のファジィルールに対応する。

IF D_{12} is S, D_{13} is B, ϕ_{12} is PS, ϕ_{13} is NS,
δ_{12} is NS, δ_{13} is PB, θ_1 is NB
THEN u_1 is PB. (1)

3.2 ファジィ推論システム

ファジィ推論は、ファジィルールベースに蓄えられているファジィルールを用いて、積-和-重心法によりなされる。ロボット1の操舵は、ロボット1がロボット2、3のどちらかと衝突する、ロボット1がCRT画面の外に出る、ロボット1のゴールとの相対角度θ_1の絶対値が９０度以上になる、もしくは、ロボット1が衝突回避を行いながらゴールに到達するまで続けられる。

3.3 信頼度割り当てシステム

本稿では、筆者らが文献[5]で提案した、(a)結果に基づく報酬と信頼度、(b)有効なメンバーシップ関数の数に基づく報酬と信頼度を用いる。

3.4 ルール生成機構

この機構では、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いてルールの淘汰・増殖、交叉、突然変異を行う[5]。

4. シミュレーション

各ロボットのファジィルールベースにおけるルールは、初めランダムに生成される。ロボット1～3はそれぞれ下側、左側、右側の壁から現れる。各ロボットはそれぞれ5つの異なったスタート地点を持つ。全てのロボットが衝突回避動作を行わない限りそれぞれのゴールへの到達は不可能となっている。図4に、650世代目におけるロボットの軌跡の例を示す。世代を重ねることでルールが改善され、５つのスタート地点からの試行全てにおいて、各ロボットは互いに衝突回避を行いながらゴールへ到達する操舵がなされるようになった。

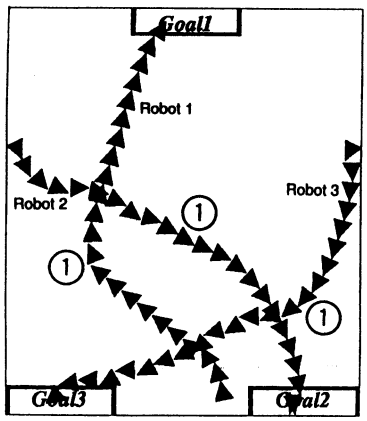


図4 Tracks of robots at the 650th generation

図4の①の地点において、各ロボットは以下のファジィルールを使用している。

ロボット1： IF D_{12} is B, D_{13} is B, ϕ_{12} is PM, ϕ_{13} is PM,
δ_{12} is PB, δ_{13} is PB, θ_1 is PM
THEN u_1 is NB.

ロボット2： IF D_{23} is S, D_{21} is B, ϕ_{23} is PM, ϕ_{21} is PM,
δ_{23} is ZO, δ_{21} is PB, θ_2 is PM
THEN u_2 is ZO.

ロボット3： IF D_{31} is B, D_{32} is S, ϕ_{31} is PM, ϕ_{32} is PM,
δ_{31} is PM, δ_{32} is PM, θ_3 is ZO
THEN u_3 is NB.

発見されたファジィルールの汎化能力を調べるため、650世代目で発見されたファジィルールを用いて、学習の時とは異なったスタート地点からロボット1～ロボット3の操舵を行った。その結果、学習時のスタート地点範囲内の任意の位置から出発した各ロボットが、互いに衝突回避を行いながらゴールへ到達することが可能であった。

図5に各ロボットの世代毎におけるゴール到達回数を示す。シミュレーションを10回行い、その平均をとったものであり、横軸は世代、縦軸はゴール到達回数である。世代とともに次第に到達回数が増加していく様子が見てとれる。

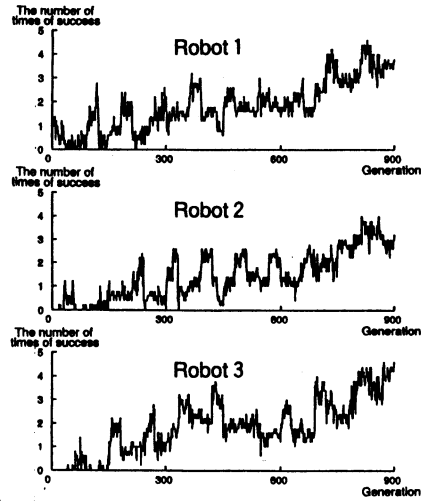


図5 The number of times of success in each generation

5. まとめ

本稿では、複数の移動ロボットにFCSを搭載し、各FCSによる衝突回避ルールの発見を行った。本稿におけるルールの発見は、各ロボットがそれぞれ学習を行うため、動的に大きく変化する複雑な環境下においてなされた。発見されたファジィルールは汎化性を持つものであった。

参考文献

[1]Goldberg, D. E.："Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley, (1989)

[2]Valenzuela-Rendon, M. ："The Fuzzy Classifier System: A Classifier System for Continuously Varying Variables", Proceedings of the fourth International Conference on Genetic Algorithm, pp.346-353 (1991)

[3]T. Furuhashi, K. Nakaoka, K. Morikawa, Y. Uchikawa："Controlling Excessive Fuzziness in a Fuzzy Classifier System", Proceedings of the fifth International Conference on Genetic Algorithm, pp.635 (1993)

[4]古橋、中岡、森川、内川：「多段ファジィクラシファイアシステムによる制御知識獲得」、日本ファジィ学会誌Vol.6、No.3、pp.603-609 (1994)

[5]K. Nakaoka, T. Furuhashi, Y. Uchikawa："A Study on Apportionment of Credits of Fuzzy Classifier System for Knowledge Acquisition of Large Scale Systems", Proceedings of Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.1797-1800 (1994)

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

WD3-3

局所改善型遺伝的アルゴリズムを用いたサインの特徴発見

Feature Extraction of Signatures Using Genetic Algorithm With a Local Improvement Mechanism

*楊　旭華　*古橋　武　**小幡賢三　*内川嘉樹

*YANG Xuhua　*FURUHASHI Takeshi　**OBATA Kenzo　*UCHIKAWA Yoshiki

*名古屋大学　**日本電装

*Nagaya Univerrsity　**Nippondenso Co.,Ltd.

Abstract---This paper presents an improved method to find characteristics of signatures. The proposed method utilizes the moving traces of the pen when the pen is above the tablet and the relative location of each stroke to the signature data. These improvements enlarge the search space for personal characteristics for signature verification.

Experiments are done to show the effectiveness of the new method.

1. まえがき

手書きサインには筆者の個人性特徴が含まれている。その個人性特徴を把握することで、サインの筆者照合の正答率を向上させる手法を検討することができるのみならず、照合システムの処理効率の向上を計ることも可能となり、実用的なサイン照合システムの実現を期待できる。また、人間がサインの真偽を判断する場合の支援、そして、筆跡鑑定支援などを可能にする。

手書き文字の個人性特徴に注目した文字認識の研究は以前から報告されている。また、手書き文字から筆者識別を行う研究例も報告されている[1][2]。しかし、従来の研究では、個人性特徴を我々に判りやすい形で自動抽出する手法は示されていなかった。

これに対して筆者らは遺伝的アルゴリズム(GA)[3]によるサインの特徴発見手法を提案してきた。また、抽出した特徴を判りやすい形で表現するために、特徴をファジィネットのメンバシップ関数で記述する方法を提案した[4]。しかし、文献[4]の手法では安定した特徴が得られたとは言えなかった。文献[5]ではGA演算に、筆者らが提案している局所改善型の遺伝的アルゴリズム[6][7]を提案した。また、染色体の交叉点をサインデータ上で決定する手法を適用した。この手法により抽出されるサインの部分曲線の数をGAにより自動的に決定することができた。さらに、抽出する部分曲線を各ストロークごとに決定するコーディング法を併せて提案した。これにより、正例サインのバラツキに左右され難い特徴を抽出できた。

しかし、これまでの実験結果では学習用サインに対する照合の正答率が100%であっても、評価用サインに対する正答率を100%にすることは困難であった。少量の学習サインでサイン全体をカバーすることは決して容易ではないが、これまでの手法では特徴の候補として4種類のデータしか用いなかったところに改善の余地がある。予め用意された特徴の候補によっては解が大きく異なってしまう。

サインはペン先の動きの軌跡であり、ペン先が紙に接触している間の軌跡がサインとして我々の目に見える。ペン先が浮いているときの軌跡は見ることはできないが、この動きにもサインの個人性特徴に関する重要な情報が含まれている。特に、このペン先が浮いている間の動きは他人が真似することが困難であるために、サイン照合にとって重要である。本稿ではこのペン先が浮いている間の動きを、新たにストロークとして捉え、サイン照合に利用する。また、サインを構成するストローク間の相対位置はサイン全体のバランスに関わり、個人性特徴を含んでいる。これまでは基礎的検討であり、このような情報を考慮していなかったため、さまざまなサインを適切に評価するには、情報が不足していた。実験を行い、ペンが浮いている間の軌跡、ストローク間の相対位置が個人性特徴として重要な情報を有することを示す。

2. 提案手法

2.1 サインデータ

本研究ではオンラインで入力されたサインを扱う。タブレットから得られたサインをその大きさにより正規化する。本研究で用いたタブレットは、ペン先が降りている間はもちろん、ペン先が浮いている間の軌跡も取り込むことができる。本研究では、両者の軌跡をストロークとみなす。さらに、実際に書かれた各ストロークの相対位置もサイン照合に利用する。GAの探索空間は以下の基本的なデータの組み合わせにより構成する。

まずサインから任意のストロークを選び、そのストロークの任意の点を始点 ($P_{st}(i)$)($i = 1, \ldots, n$)とし、始点から $N_p(i)$個の点列からなる部分曲線を考える。ただし、nはサインから抽出される部分曲線の数で、ペン先が浮いている間の軌跡も含んでいる。その部分曲線から図1に示すような4種類のデータを得る。図の例では“やん”というサインデータからn個の部分曲線が抽出され、例えば、1番目の部分曲線では、“や”の字の一番目のストロークが選ばれ、そのストロークの$P_{st}(1)$番目の点を含めて4個分の点列が利用されている。この点列から

1. 長さ($L(i)$)
2. 傾き($S(i)$)
3. 最大角度($\Theta(i)$)
4. 曲がり($C(i)$)

(ただし、この例では$i = 1$) のデータを得る。ここで、長さ$L(i)$は点列が時間により正規化されているので、その部分を書く速さの情報も含んでいる。傾き$S(i)$はその部分曲線の始点$P_{st}(i)$と終点を結ぶ直線$l(i)$と水平線とのなす角度である。最大角度$\Theta(i)$は部分曲線の中で最も鋭い角度である。曲がり$C(i)$は図1の斜線部の面積とする。ただし、この面積は直線$l(i)$を底辺とする直角二等辺三角形の面積により正規化する。

サインを構成する実際に書かれたストロークの相対位置も個人性特徴を含んでいる。本研究ではこの相対位置を式(1)のように、隣同士のストロークの始点のx, y方向の相対距離で表す。ただし、この相対距離は文字全体の中で相対距離の最大値で正規する。このように、本研究はペンの動きの軌跡、ストロークの相対位置をサインデータに加えることで、より適切な特徴を発見できると期待する。

$$dis\_x(i) = \left| (x_{start}(i) - x_{start}(j))/dmax\_x \right|$$
$$dis\_y(i) = \left| (y_{start}(i) - y_{start}(j))/dmax\_y \right| \quad (1)$$

ただし、ここで、iは実際に書かれたストロークのストロークの番号、jはその次の実際に書かれたストロークの番号を意味している。

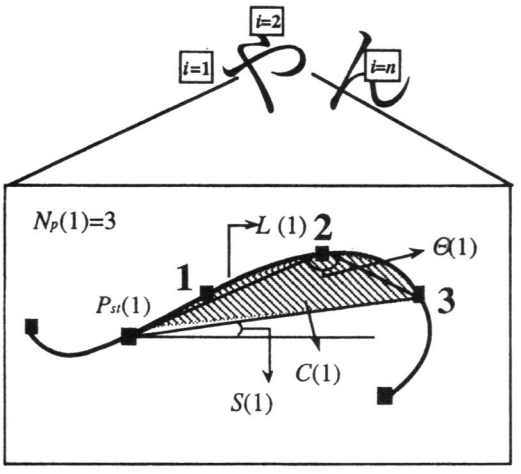


図1　サインの特徴データ

2.2 コーディング

GAにおいては染色体へのコーディング方法が解の質を決定する。本手法では遺伝子座にストローク番号を加え、サインから抽出する部分曲線をストロークごとに決定する。染色体へのコーディング法を図2に示す。

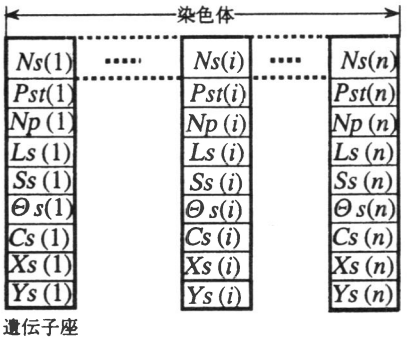


図2　コーディング

染色体の遺伝子座の数は抽出する部分曲線の数に対応する。本手法では後述の交叉方法によりこの遺伝子座の数もGAにより決定する。各遺伝子座は$N_s(i)$, $P_{st}(i)$, $N_p(i)$, $L_s(i)$, $S_s(i)$, $\Theta_s(i)$, $C_s(i)$, $X_s(i)$, $Y_s(i)$の各値を持つ。ただし、$N_s(i)$は抽出するストローク番号、$P_{st}(i)$は始点、$N_p(i)$は始点から点列の数であり、これらは照合に使用する部分曲線を決定する。$L_s(i)$, $S_s(i)$, $\Theta_s(i)$, $C_s(i)$, $X_s(i)$, $Y_s(i)$は長さ$L(i)$、傾き$S(i)$、最大角度$\Theta(i)$、曲り$C(i)$、およびX, Y方向の相対位置$dis_x(i)$, $dis_y(i)$のサイン照合に利用するかどうかを決定する1 or 0のスイッチである。本コーディング手法では部分曲線をストロークごとに切り出しているので、サインの局所的なずれがサイン全体に影響することはない。この改善により正例サインのバラツキを吸収でき、正答率の向上に貢献できる。

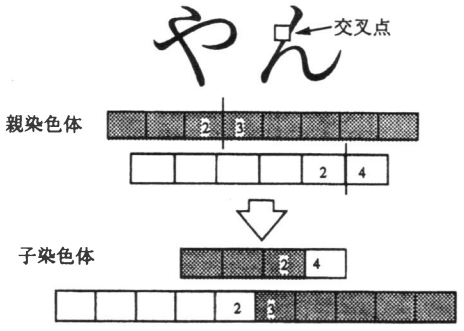


図3　交叉

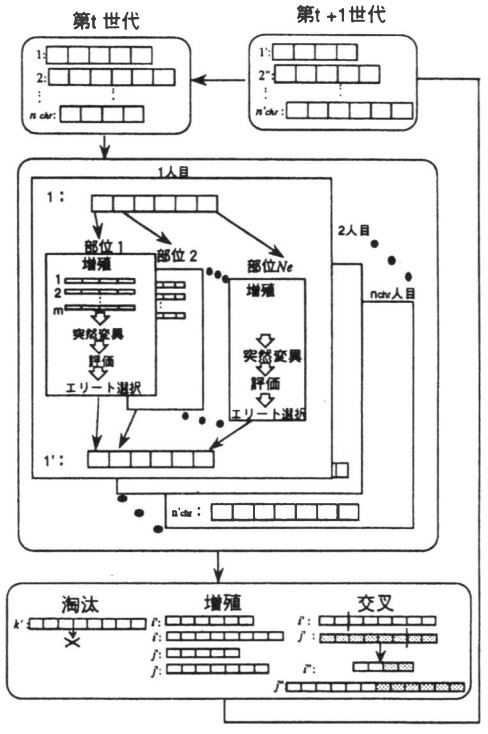


図4 GA演算の流れ

2.3 交叉

本稿では、文献[5]と同様の交叉方法を用いる。図3はその交叉方法を示す。サイン上で交叉点を決め、親の染色体の対応する遺伝子座のところを交叉点とする。交叉後の染色体の長さは親とは異なるものとなる。交叉は1点交差を用いることとするが、この手法は多点交叉にも適用できる。本手法により、サイン照合に用いる部分曲線の適切な数をGAにより自動的に決定できる。

2.4 GA演算

GA演算には、筆者らが提案している、局所改善型遺伝的アルゴリズムを用いた。図4はこのアプローチ[7]の流れを示す。このアプローチは細胞レベルの突然変異と個体レベルの交叉により、効率よく解の発見を行う。このアプローチをサインの個人性特徴の発見に適用する。

まず、細胞レベルでの突然変異を考える。遺伝子座（細胞）を一つ取り出して、部位とする。この部位はサインのあるストロークの部分曲線とそこから利用するデータの組み合わせを表わしている。この部位をm個に増殖し、増殖した部位に突然変異を施す。その際、抽出点の始点$P_{st}(i)$がストロークの先頭からa番目の点であったとすると、$a \rightarrow a+\Delta a$と変更し、Δaは区間$[-\Delta a_{max}, \Delta a_{max}]$内の整数値を一様乱数により決定する。ただし、$a+\Delta a$は区間$[0, P_{max}(i)]$に属するようにする。$P_{max}(i)$はその部分曲線が存在するストロークのデータ点の総数である。また、点列数$N_p(i)$が整数値cであったとすると、$c \rightarrow c'$と変更した。この点列数についてはc'を$0<c'<P_{max}(i)-(a+\Delta a)$となるように、その範囲内の整数値を一様乱数で選定した。各スイッチ$L_s(i)$, $S_s(i)$, $\Theta_s(i)$, $C_s(i)$, $X_s(i)$, $Y_s(i)$は0, 1をランダムに反転させた。このように突然変異を施した部位が決定するサインのデータを逐次ほかの部位が決定するデータと併せて後述の照合ネットワークに入力し、GAの学習用のサインの正答率をその部位の適応度とする。この部位ごとの突然変異・評価をm回繰返し、その中の適応度の高い部位をエリートとして選択する。このような部位ごとの探索を各部位について実施してから、各部位のエリートにより新しい染色体を生成する。以上の細胞レベルの突然変異とエリート選択により、同一世代内での個体の更新を行ってから、染色体レベルでの淘汰・交叉を行う。淘汰は、染色体内の各部位の適応度の総和の低いものからP_r%の染色体を削除する。残った染色体からランダムに2個体を選んで増殖、交叉を行い、新しい2個体を生成し、削除したP_r%の染色体の補充が済むまでこの演算を繰り返す。ただし、一度増殖に用いられた染色体は同一世代では二度と選ばれないようにする。

2.5 評価

評価には染色体が決定するサインの特徴を用いてサインの照合を行い、その正答率を用いた。照合ネットワークを図5に示す。照合ネットワークの入力は、染色体の決定する各部分曲線のデータ$L(i)$, $S(i)$, $\Theta(i)$, $C(i)$, $dis\_x(i)$, $dis_y(i)$である。そして、スイッチ$L_s(i)$, $S_s(i)$, $\Theta_s(i)$, $C_s(i)$, $X_s(i)$, $Y_s(i)$によりそれらの特徴データの使用・不使用を決定する。各データを台形型メンバーシップ関数に入力し、その関数の値が出力ユニットで掛け合わされる。メンバーシップ関数は、5つの正例サインを基本サインとし、これらから得られる各データについて、それぞれ[最小値 / w_x, 最大値×w_x]を幅とし、その台を[最小値 / w_x − w_y, 最大値×w_x + w_y]とした。ただし、w_x, w_yは正例サインのバラツキを吸収できるようにする調整パラメータである。適応度Fは、ネットワークの正しい出力値t_jを正例は1、負例は0とし、実際の出力値o_jとの差の絶対値を用いて次式により求めた。

$$F = \frac{1}{2}\left[\frac{1}{m_1}\sum_{j=1}^{m_1}|t_j - o_j| + \frac{1}{m_2}\sum_{j=1}^{m_2}|t_j - o_j|\right] \quad (2)$$

ここで、m_1, m_2はそれぞれ正例・負例の評価用のサインの数を示す。(1)式は正・負例サインそれぞれに対する誤差の平均を適応度としている。どちらか一方に対する評価をより重視するには、(1)式の右辺の各項に重み付けをすればよい。

3. 実験と検討

本手法で提案した手法により、サインの特徴発見と筆者照合の実験を行った。

実験の対象となるサインデータベースは、まず正例サインを10回本人に書いてもらい、この中の5個を基本サインとした。次に、本人のサインをほかの6人に提示し、それを見ながら極力似たサインを書いてもらった。GAの学習用サインは正例サイン10個、負例サイン15個の併せて25個を用意した。また、評価用サインデータベースは正例サイン30個、負例サイン40個とした。

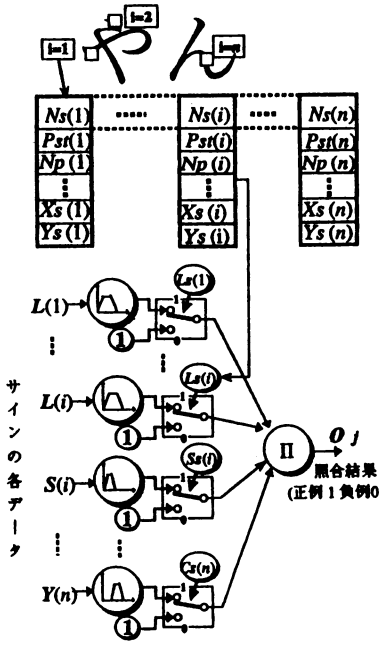


図5 照合ネットワーク

実験に際して、初期世代はランダムに生成した。個体数を50個とし、各染色体の長さもランダムに決定した。淘汰の確率はP_c = 20%、突然変異の確率P_{mut} = 10%とした。染色体から、遺伝子座を1つ選び、その遺伝子座を5つに増殖させ、突然変異を施すこととした。突然変異は、ストローク番号には施さず、ストローク上のサンプル点番号$P_{st}(i)$とそこからのサンプル点数$N_p(i)$のいずれか1つと、$L_s(i)$, $S_s(i)$, $\Theta_s(i)$, $C_s(i)$, $X_s(i)$, $Y_s(i)$ 6種類のサインデータの使用・不使用を決めるスイッチのうちの2つの合計3つのデータを変化させることとした。これら突然変異を施した5つの部位をそれぞれ評価し、もとの1つも含めて比較し、評価値の最も良い部位を残す。染色体の各遺伝子座について突然変異・評価を順次行い、新しい染色体を作り出す。さらに、このような操作を各染色体に施す。なお、メンバーシップ関数の作成に際しては、w_x = 1.2, w_y = 0.5とした。これらの数値は数回の試行により決定した。正例の中から5個を任意に選び、図5の照合ネットワークの各メンバーシップ関数の作製用とした。部位ごとの突然変異・評価を行った後に、交叉を行う。

実験では特徴候補が文献[5]の4個の場合と今回の6個の場合について、それぞれ同じ適応度に達した時点で計算を中止し、そ

れぞれ20回の計算を行った。20回の平均では提案手法は従来法より計算時間は3倍近く速くなった。また、いままで評価用サインに対する照合率が100%になったことはほとんどなかったが、今回では20回の計算のうち3回も正·負例ともに100%の照合率を達成した。本実験により、探索空間を広げることで得られた解の有効性が高まり、より適切な特徴が抽出できたことが判った。20回の計算では、学習用サインに対して照合の正答率は正·負例ともに100%であった。また、評価用サインに対する照合の正答率は平均で正·負例それぞれ90%、98.6%パーセントであった。照合率は平均では文献[5]とそれほど変わっていない、今後の検討課題である。

図6は本手法により得られたサインの特徴を示す。図6(a)の太い線は、エリートの染色体が決定した、照合に利用するサインの部分曲線を示す。この例では、学習用、評価用のサインに対して正·負例それぞれ100%、100%の正答率を示したエリート染色体のものである。同図(b)はそのエリート染色体である。この染色体はサインのどの箇所のどの特徴を用いるかを示している。例えば、4番目の遺伝子座4,(19,3,10,1,0,1,1,1,1)は19番目のストロークを選び、ストロークの始点から3番目の点から10点分を部分曲線として切り出し、その傾き以外の全てのサインデータを特徴とすることを示している。同図(c)には4番目の遺伝子座のメンバーシップ関数を併せて示してある。これらのメンバーシップ関数からこの部分曲線は、以下の特徴を持つことが判る。つまり、長さ、最大角度、曲りが小さく、また、このストロークの始点位置は、前のストロークに対してx方向で中程、y方向で中心付近である。図7は同じ染色体が負例データから抽出される対応部分を示す。上述の4番目の遺伝子座に注目すると、対応する部分は正例データの特徴と異なって、そのストロークの始点のy方向が前のストロークに対して外れていることが判る。

また、本手法では、サインから抽出する部分曲線の数をGAにより決定できた。図6の例では、サイン照合に利用する部分曲線の数は6であった。さらに、6個の部分曲線のうち一つを削除して、残りの5個の部分曲線により照合を行ってみたところ、いずれの部分曲線を除いても正答率は低下し、6個の部分曲線が正例サインの特徴を捉えていることを確認できた。

4. まとめ

本稿ではサインの筆者照合に、新たにペン先が浮いている間の動きおよびストロークの相対位置を利用することで、GAの探索空間を広げた。その結果、適切な解が発見された。

今後は、さらに適切な特徴を抽出することを目指したい。また、本手法をオフラインサインの特徴発見にも適用していきたい。

参考文献

(1) 内藤, 増田:「個人性に注目した手書き漢字認識」 電子情報通信学会論文誌(D), J67-D, 4, pp. 480-487(1984).

(2) 尺長, 金子, 淀川:「2次統計量の線分スペクトル分解 --テクスチャ性からの手書き文字個人性情報の抽出」 電子情報通信学会論文誌(D), J67-D, 4, pp. 488-495(1984).

(3) D. E. Goldberg: Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning(1989), Addison Wesley

(4) 古橋, 渡辺 , 楊 , 小幡, 内川:「遺伝的アルゴリズムを用いたサイン認識知識発見の一手法」. 第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 , pp31-34, (1994).

(5) 楊 , 古橋, 小幡, 内川:「新遺伝的アルゴリズムを用いたサイン認識知識発見に関する研究」, 第3回東海ファジィ研究会講演論文集, (1995)

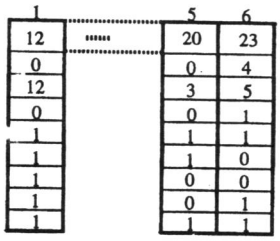
(6) 古橋:「ファジィと人工生命」, 第2回東海ファジィ研究会講演論文集, pp.1-8,(1994)

(7) T.Furuhashi, K.Nakaoka, Y.Uchikawa, " A New Approach to Genetic Based Machine Learning and on Efficient Finding of Fuzzy Rules ", Proc. of IEEE/Nagoya Univ. world Wisemen/ woman Workshop (WWW' 94), pp. 114 - 122 (1994)

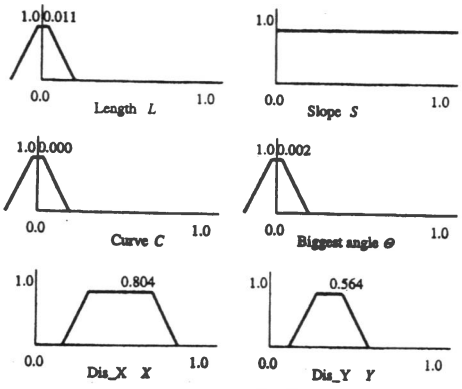
[問い合わせ先]
〒464-01 名古屋市千種区不老町
名古屋大学電子情報学科　楊　旭華
(TEL) 052-789-2793
(FAX) 052-789-3166
(e-mail) yang@bioele. nuee. nagoya-u. ac. jp



(a) 抽出された部分曲線



(b)　エリート染色体



(c)　メンバシップ関数

図6　抽出された特徴（正例サイン）



図7　抽出された特徴（負例サイン）

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

WD3-4

生物の情報システムに基づく遺伝的アルゴリズムによるファジィルール発見

Finding of Fuzzy Rules Using Genetic Algorithm based on the Biological Information System

吉川大弘 Tomohiro Yoshikawa
古橋武 Takeshi Furuhashi
内川嘉樹 Yoshiki Uchikawa

名古屋大学工学部
Faculty of Engineering, Nagoya University

Abstract This paper presents a new coding method of DNA chromosome for Genetic Algorithm (GA). The DNA chromosome is composed of four kinds of base compositions. This coding method is based on the biological information system of the DNA. This method makes applications of crossover and mutation operations easier. The new method applied to a knowledge acquisition of fuzzy rules of robots which avoid collision with other robots and reach goals. This paper also presents an application of transcription of DNA and virus and enzyme operators into the proposed DNA chromosomes.

1 はじめに

近年、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm:GA)[1][2]が注目され、種々の応用研究が進められている[3-8]。GAにおけるコーディング方法は、各問題に適したいわば無駄のないコーディング方法が用いられている。その結果、コーディング方法によっては交叉や突然変異の方法が制限され、種々の工夫が必要になっている[7][8]。

本稿では、実際の生物におけるDNAとその翻訳機構に着目し、GAにおける染色体を4種類の塩基配列で表現するDNAコーディング法を提案する。この方法では交叉・突然変異が容易に行えるとともに、染色体が冗長性を持ち、柔軟なコーディングを行うことができる。また、文献[9][10]に提案されている転写およびウイルスGAの手法も容易に導入することが可能となる。

本稿では、松井らの研究[11]に本手法を適用し、多入力システムのファジィ推論ルールの獲得として、生物挙動に基づいた複数移動ロボットによる知識発見を行う。各ロボットはそれぞれファジィルール群が搭載され、各自学習を行うことによりそれぞれルール群を進化させる。ルール群は多変数間の複雑な知識を記述しているファジィルールにより構成され、また各ロボットがそれぞれ学習を行うため、本稿におけるルールの発見は動的に大きく変化する複雑な環境下において行われる。

さらに、本手法にDNA転写およびウイルス進化手法を導入し、有効な解の探索が高速に行えることを示す。

2 DNAコーディング法

生物のDNAはアデニン(A), グアニン(G), シトシン(C), チミン(T)の4種類の塩基を持つヌクレオチドで構成されており、通常このヌクレオチド配列のことを塩基配列と呼ぶ[12]。このDNAの大半はタンパク質の合成に使われない余分な部分である。初めにDNAから余分の塩基配列を含む前駆体RNAが合成され、スプライシングと呼ばれる不要の部分をカットする作業が行われた後、メッセンジャーRNA(mRNA)が完成する。このmRNAにはアミノ酸の暗号となる3連続塩基（コドン）がすき間なしに並べられている。このような過程でタンパク質のアミノ酸配列が指定されている。64種類のコドンは20種類のアミノ酸と対応しており、その対応関係はすでに解明されている。

一般的なGAにおいては、それぞれの問題に適した無駄のないコーディング方法を用い、そのコーディングに合わせた交叉や突然変異を行っている。このコーディング方法はいわば完成mRNAへのコーディングとみなすことができる。筆者らは、本稿でDNAそのものへのコーディング方法を試みる。すべての問題に対し、A,G,C,Tの4種類の塩基により染色体を表現し、mRNAへの翻訳機構をそれぞれの問題に適した方法で設定する。

3 問題設定

本稿ではファジィルール群を搭載した10体の移動ロボットを用意する。各ロボットはルールにより任意に指定されたロボットやゴールを観測しながら、操舵と加減速により他のロボットとの衝突回避を行いながらゴールに到達する問題設定とする。Fig.1はロボット1から見たロボットnとゴールmとの位置、速度、角速度等の各変数を示す。ω_1はロボット1の旋回角速度、V_1, V_nは各ロボットの速度、ロボット1からロボットnまでの距離をD_{1n}、ロボット1とロボ

ットn を結ぶ直線とロボット1の進行方向とのなす角度をδ_{1n}、ロボット1とゴールmを結ぶ直線とロボット1の進行方向とのなす角度をθ_{1m}、ロボット1とゴールmとの距離をL_{1m}、ロボット1とロボットnを結ぶ直線とロボット1から見たロボットnの相対速度V_{R1n}とのなす角度をϕ_{1n}とする。各角度は、それぞれの基準線から反時計周りを正とする。

4 翻訳機構

本章では、ルールの表現方法、DNA染色体からルール表現への翻訳方法およびルールの発見方法等について説明する。

4.1 ルール表現方法

各ロボットの入力値の対象として、V, ω, D, ϕ, δ, L, θ、出力値の対象として操舵量u, 速度Vをとる。染色体は、IF～THEN～形式で表現される複数のルール群を含み、各ルールで使用する入出力変数の組み合わせ、および各変数のメンバーシップ関数を決定する。染色体にはメンバーシップ関数の中心位置x_cとσがコーディングされる。

実際の生物においてはDNAの塩基の並びから開始コドンATGを読み取り、終了コドンTAA, TAG, TGAまでを1つの遺伝子として翻訳を行っているが、本稿ではロイシンを表すコドンTTA, TTG, CT*をIFに、セリン, プロリン, トレオニン, アラニンを表すコドン*C*をANDに、グリシンを表すコドンGG*をTHENに対応させ、IFからTHENを1つの遺伝子と対応させ、1つのルールとする。DNA染色体の先頭から塩基を読んでいき、IFを表すコドンが見つかると、ルールへの書き込みが始まる。以下に翻訳作業の手順を示す。

IFコドンの次およびその次のコドンがそれぞれ自ロボット, 他ロボット, ゴール, NULLに対応し、さらにその次のコドンが角度, 速度, 距離に対応する。これら3つのコドンにより、入力値のどのパラメータを選ぶかを決める。例えば、コドンが順に自ロボット, 他ロボット, 距離の並びをしていれば選択された入力パラメータはDとなり、自ロボット, NULL, 速度ならばVとなる。パラメータとして意味のないゴール, NULL, 速度といった並びのときはルールへの書き込みを行わない。また、他ロボット、ゴールのコドンは2, 3番目の塩基が自分から何番目に近いロボット、ゴールとのパラメータを指しているのかを表す。4, 5番目のコドンがそれぞれメンバーシップ関数の中心位置x_c, 幅σに対応している。その次からANDまたはTHENのコドンを探して読んでいく。ANDのコドンが見つかった時はIFと同じ作業を行い、THENの時は、次のコドンが出力変数u, Vの1出力または2出力に対応し、2, 3 (4, 5)番目のコドンがメンバーシップ関数の中心位置および幅に対応する。ここまでを1遺伝子とし、1つのルールとする。これにより、相手、ゴールおよび入出力変数を任意に選ぶことが出来る。

また、ϕX174ファージに見られるように、コドンの読み枠が1塩基ずれていて、遺伝子の上に遺伝子が重複していることがあり、しかもそれらの遺伝子がそれぞれ別の有効な働きをしている例が見られる[13]。これらの生物での例を模倣し、THENまで読み終わった後、IFコドンの2番目の塩基に戻り、再びIFコドンを探していくという作業を行う。Table1に今回用いたコドン表を示す。それぞれの対応は暫定的に定めたが、さらに複雑な対応づけを定めることはもちろん可能である。Fig.2にDNA染色体の例と遺伝子（ルール）の読み取りの様子を示す。

Table 1 The Codon Correspondence

IF	TTA TTG CT* (Leu)	AND	*C* (Ser, Pro, Thr, Ala)	THEN	GG*
Input				Output	
The Robot	T**	Velocity	T**	Velocity	T**
Other Robots	C(*)**	Angle	C**	Angle	C**
Goals	A(*)**	Distance	A**	Velocity Angle	A**
NULL	G**				
(*)___ Number of other Robots or Goals					
1	T*	2	C*	3	AT AC	4	AA AG
5	GT	6	GC	7	GA	8	GG

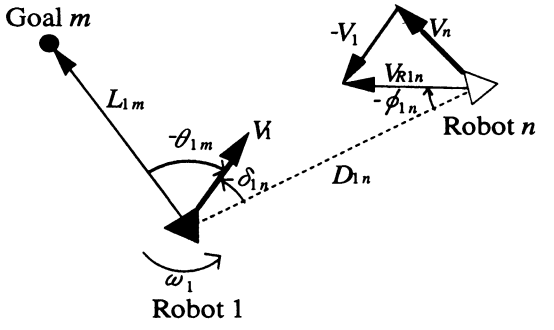


Fig.1 The Input Parameters

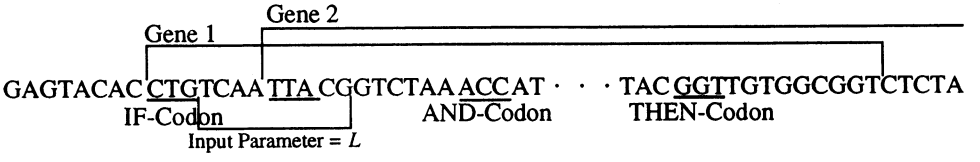


Fig.2 The Example of a Chromosome and the Gene

4.2 遺伝的演算

初めに10体のロボットと10個のゴールの初期位置と初期速度および初期方向をランダムに設定する。そして10体のロボットのDNA染色体をランダムに生成する。各ロボットはエネルギーE_I を初期値として持つ。ロボットがゴールに着いた瞬間にそのゴールは別のランダムに選ばれた位置に移動する。ロボットはその際、エネルギーE_G を得る。他のロボットと衝突したり、一定時間経ってもゴールに到達しない場合には、そのロボットはそれぞれエネルギーE_C, E_T を失う。このシミュレーションを一定時間行い、各ロボットの最終的なエネルギーをそのロボットの適応度として遺伝的演算を行う。淘汰は適応度の低い2個体に対して行い、残った8個体からランダムに選ばれた2個体に対して1点交叉を行う。松井らの研究ではこの際、交叉点はルールごとに設けなければならないが、本手法では自由な交叉点により交叉が行える。この交叉により、得られたルール群の長さが変化する。また、これら2個体に突然変異を施す。突然変異は各塩基に対し確率P_m で行う。ここまでを1ステップとし、全ロボットのエネルギーをE_I に戻す。このステップを繰り返し行うことにより、衝突を回避しながらゴールへ向かうルールが生成されると期待される。

4.3 DNA転写およびウイルスDNA・酵素の投入

前節の遺伝的演算に文献[9][10]で提案された転写およびウイルス進化手法を導入する。

淘汰を最も適応度の低い個体に対してのみ行い、この個体に対して4.2節の交叉・突然変異を行う。さらにこの個体に対して、ランダムに生成されたウイルスDNAを確率P_v で投入する。この個体はウイルス感染度が陽性となる。また、$1 - P_v$ の確率で酵素を投入する。酵素は、ランダムな長さのDNAをそのDNA染色体から切断することで、DNA染色体の染色体長が増大するのを防ぐ役割を持つ。また2番目に低い適応度を持つ個体に対して、DNA転写を行う。DNA転写は、最も高い適応度の個体の文字列を任意の位置から任意の長さのDNAを取り出し、それを2番目に低い適応度を持つ個体の任意の位置から書き換える作業を行う。さらに、適応度の高い上位5個体の中でウイルス感染度が陽性の個体があれば、その感染しているウイルスを3番目に低い適応度を持つ個体に感染させる。なお、同一ウイルスの乱立を防ぐため、他の個体にウイルスを感染させた個体および転写の行われた個体の感染度を陰性にする。

5.シミュレーション

初期DNAの染色体長を500、エネルギーE_I, E_G, E_C, E_T をそれぞれ0, 50, 10, 5、突然変異の確率P_m を0.005としてシミュレーションを行った。0.05ステップの間ロボットがゴールへ到達しない場合にロボットはエネルギーE_T を失うとした。なおここでは4.3節で述べたDNA転写、ウイルスDNA・酵素の投入は行わなかった。3000ステップまでの全ロボットのエネルギーの平均およびDNA染色体長の平均の推移の例をFig.3に示す。エネルギーは200から400ステップの間で急激に増加し、その後横ばいになっている。この間に有効なルールが発見され、交叉により各DNA染色体に広がっていったものとおもわれる。DNA染色体長は2000ステップまで徐々に長くなっていき、その後1000付近で落ち着いている。その間、エネルギーの平均の値はあまり変化がないことから、2000ステップまでDNA染色体長が長くなることでルールが増加していき、その後余分なルールが削除されてDNA染色体長が1000付近に落ち着いたものとおもわれる。3000ステップ後の1ステップ・1台あたりのゴール平均到達回数は10回、衝突回数は2回であった。衝突回避が完全に行われていないのは、E_C に比べてE_G が比較的大きいことや、衝突を回避することでエネルギーがもらえるような積極的なエネルギー分配方法ではないために衝突回避ルールがあまり成長しなかったことが原因と考えられる。しかし、ゴールに着くと得点、衝突すると減点という簡単な環境下にしては有効なルールが獲得されていた。3000ステップにおいて得られたルールの一例を示す。DNA染色体中の値である中心位置x_c および幅σ から決定されるメンバーシップ関数に適当な言語ラベルを付してある。また、ルールはロボット1の例であり、各パラメータの添字は自分から何番目に近いロボットもしくはゴールとのパラメータであるかを示している。このルールは、ゴールが右に見えたら速度を上げて舵を右にきれという命令を表している。

IF V is Medium AND V is Small AND θ_1 is Right
THEN u is Right, V is Big

次に同じ条件で、4.3節で述べたDNA転写、ウイルスDNA・酵素の投入を行ったときの1000ステップまでの全ロボットのエネルギーの平均の推移の例をFig.4に示す。このグラフは、10回試行を行ったときの平均の値である。このように、本コーディング法により、DNA転写、ウイルスDNA・酵素の投入を容易に行うことができ、それらの演算を行ったものがより高いエネルギーを示していることから、本手法の特徴である柔軟なコーディングが、有効に働いていることがわかる。

6.まとめ

本稿では、実際の生物におけるDNAとその翻訳機構に着目し、GAにおける染色体を4種類の塩基配列で表現するDNAコーディング法を提案した。この方法では、問題の性質にかかわらず交叉・突然変異を容易に行うことができる。本手法を多入力システムのファジィ推論ルールの獲得問題に適用し、動的に変化する複雑な環境下において有効な知識獲得が行えることを示した。さらに、DNA転写およびDNAウイルス・酵素の投入を本手法において行い、良好な結果が得られることを示した。今後は、DNAから表現型への翻訳過程のおよび有効なウイルスDNAの検討、本手法における中立進化説の働きに対する解析等を行っていく予定である。

参考文献

[1]D.E.Goldberg: "Genetic Algorithm in Search", Optimization and Machine Learning, Addison Wesley (1989)

[2]L.Davis(Editor): "Handbook of Genetic Algorithm", Van Nostrand Reynold (1989)

[3]R.Nakano: "Conventional Genetic Algorithm for Job Shop Problems", Proc. of ICGA-91 (1991)

[4]西川，玉置："ジョブショップスケジューリング問題に対する遺伝アルゴリズムの一構成法"、計測自動制御学論、27、No.5、pp.593-598 (1991)

[5]S.Bagchi, S.Uckun, Y.Miyabe & K.Kawamura: "Exploring Problem-Specific Recombination Operators for Job Shop Scheduling", Proc. of ICGA-91 (1991)

[6]三宮，飯間："遺伝アルゴリズムによる変形フローショップスケジューリングの解法"、機械学会第2回FANシンポジウム講演論文集、pp.389-395 (1992)

[7]森川，中山，古橋，内川："遺伝的アルゴリズムによるLSI製造工程スケジューリング"、T.IEEE Japan、Vol.113-D、No.12、pp.1416-1422 (1993)

[8] 吉川，古橋，内川："遺伝的アルゴリズムのプリント基板自動配置への応用"、電気学会論文誌D分冊、Vol.114-D、No.4、pp.387-392 (1994)

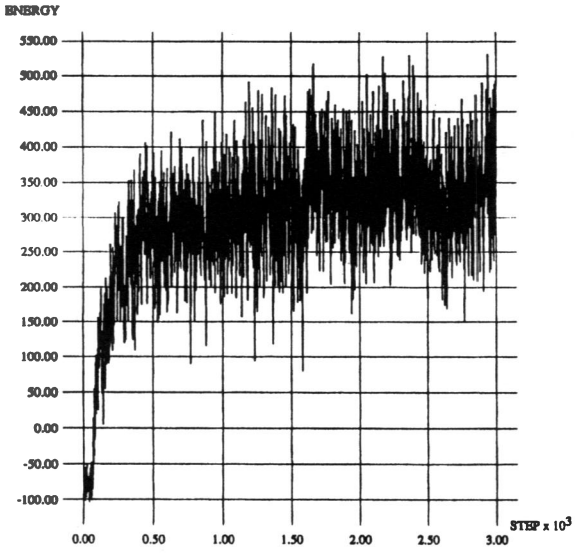
[9]久保田,福田,下島："ウイルス進化論に基づく遺伝的アルゴリズム"、第6回自立分散システム・シンポジウム、pp.215-218 (1995)

[10]上野，森，塩川："遺伝的アルゴリズムにおける「転写」の提案"、第8回人工知能学会全国大会、pp.387-390 (1994)

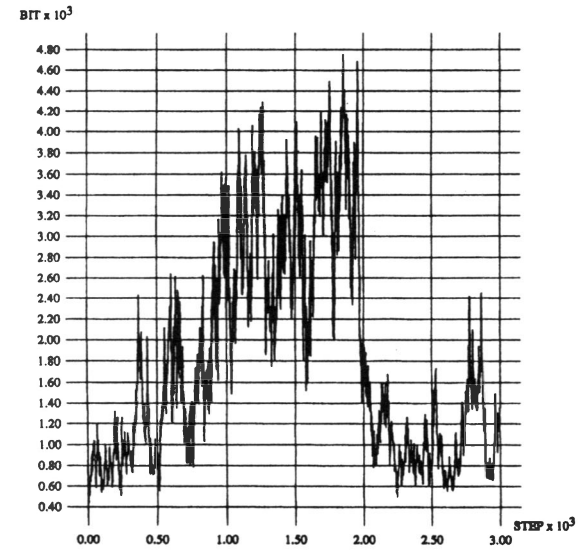
[11]松井，中岡，古橋，内川："遺伝的アルゴリズムによる複数ロボットのファジィ制御知識発見に関する研究"、東海ファジィ研究会予稿集 (1995)

[12]竹村，大井：「生物の情報システム」、講談社サイエンティフィク (1990)

[13]S・B・プリムローズ，N ・J・ディモック：「ウイルス学入門」、培風館 (1989)

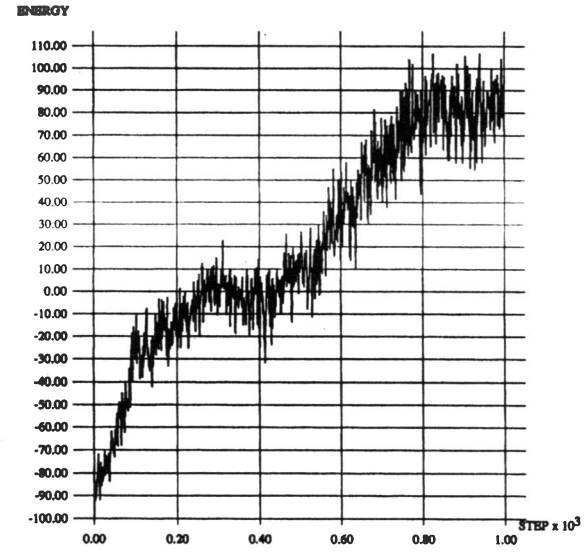


(a) Energy

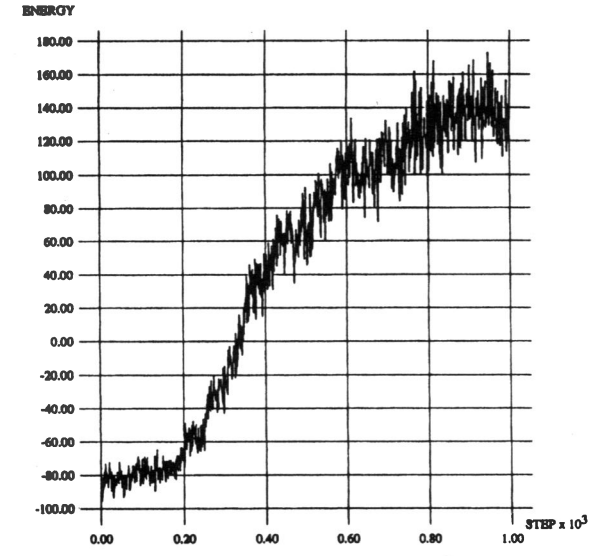


(b) The Length of Chromosomes

Fig.3 Averages of Energy and Length of Chromosomes



(a) No Transcription of DNA nor Virus and Enzyme Operators



(b) Transcription of DNA and Virus and Enzyme Operators

Fig.4 Averages of Energy (10 Trials)

WD4-1

遺伝的アルゴリズムを用いた概念学習
Concept Learning using Genetic Algorithm

遠藤　聡志（琉大工）† 大内　東（北大工）‡
Satoshi ENDOH　Azuma OHUCHI

†Department of Information Engineering,Faculty of Engineering,University of Ryukyus
‡Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract Concept learning probrem is to form general rules from a set of positive and negative examples of the target concepts. Examples are represented as points in an n-dimentional feature space that is defined a priori and for which all legal values of the features are known. Concepts are therefore represented as subsets of points in the given n-dimensional space. We have developed a concept learning algorithm, which learns concept clasification rules from n-dimensional feature space as background knowledge and examples of target concept as training data. We incorporate genetic algorithm(GA) in the learning algorithm as the inductive inference mechanism. By incorporating a GA, we are able to construct a concept learning system that has a flexible architecture with several important features. Firstly, the system is able to learn target concept formed by duisjunctive normal form(DNF). Secondly, if there are some incorrect examples in training examples set, the system will reduce them and generate correct target concept. This function is called "noise reduction" Finally, the system is able to learn target concept from only positive example set.

1　はじめに

帰納推論は機械学習の分野において最も活発な研究分野の一つである．なかでも訓練例からの概念学習に関する様々な方法が提案されている．Mitchell によって提案された"Version Space"は，概念学習に関する最も典型的な方法の一つとして知られている [Mitchell 77]．Version Space の学習アルゴリズムは，候補排除アルゴリズムと呼ばれ，妥当な解を得るためには完全な推論プロセスを必要とする．この特徴から，候補排除アルゴリズムには以下のような問題がある．

(1) 推論途中で" もっともらしい" 仮説を構成できない

(2) ノイズと呼ばれる誤った訓練例が与えられたら，仮説を構成できない

(3) 選言的概念獲得への拡張が困難である

(4) 正例のみによる概念獲得ができない

本稿では，これらの問題解決のために，遺伝的アルゴリズムを推論機構とする学習アルゴリズムを提案し，実験による評価を行う．

2　概念形成問題

いま概念獲得のための背景知識として，二つの属性 Foliage および Seed が設定されているとする

Foliage= { foliage,leaf,needle },
Seed= { seed,fruit,cone,apple,pear }

属性 Seed 上の要素対 (fruit , apple) について，一般性を尺度とした $fruit$ と $apple$ の関係が成り立つ．すべての要素対について一般性の関係の有無を決定すると，図 1 に示すような属性木および仮説空間の束構造が得られる．この例題において事例集合は，

$$\{[leaf \wedge apple],[leaf \wedge pear],[needle \wedge apple],$$
$$[needle \wedge pear],[leaf \wedge cone],[needle \wedge cone]\}$$

であり，Fruit Tree の正事例は

$$\{[leaf \wedge apple],[leaf \wedge pear]\}$$

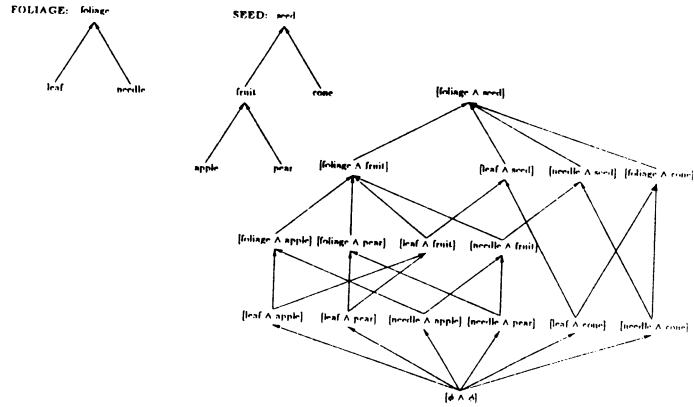
負事例は

$$\{[needle \wedge apple],[needle \wedge pear],[leaf \wedge cone],[needle \wedge cone]\}$$

と考えられる．いま，目的概念を"Fruit Tree"とし，正例として $\{[leaf \wedge apple],[leaf \wedge pear]\}$，負例として $\{[needle \wedge apple],[needle \wedge pear]\}$ を与えた場合，概念学習システムは目的概念 $\{[leaf, fruit]\}$ を獲得する．

また,Tree の概念を獲得する場合に，正例として $\{[leaf \wedge apple],[needle \wedge cone]\}$ が与えられたとき，これらの正例を説明する概念は，$[foliage \wedge seed]$ である．しかし，例えば $[needle \wedge apple]$ は，概念 "Tree" について明らかに負例である．このように，単一連言では適切な概念記述が行えない場合，選言的概念記述による概念獲得を行う必要がある．この問題に対する適切な概念は，"$[leaf, fruit] \vee [needle \wedge cone]$" である．

Fruit Tree



3　遺伝的概念形成

3.1　定義

1) **目的概念** 目的概念は一種の述語であり，正事例に対して真の値を，負事例に対して偽の値を返す．この述語の形式は以下に示すように，いくつかの属性の連言から構成される．

$$[attr1\_value \wedge attr2\_value \wedge \cdots \wedge attrN\_value]$$

2) **表現言語** 表現言語は背景知識の一種であり，属性木の集合で表現される．各々の属性木は属性値のノード集合をもつ．これらのノード間には，" 一般性" と呼ばれる二項関係が存在する．一つの概念を記述するためにはいくつかの属性が組み合わされるため，問題空間は束構造をなす．

3) **事例集合** 一つの事例は，目的概念と同じ属性によって表現される．事例の各々の属性値は，対応する属性木の葉ノードから選ばれる．事例集合は，正事例集合と負事例集合の二つの訓練例集合から構成される．

$$[attr1\_leaf \wedge attr2\_leaf \wedge \cdots \wedge attrN\_leaf]$$

4) 概念獲得 表現言語によって規定される問題空間から，獲得すべき概念に対する具体例の真偽を適切に説明するようなもっともらしい仮説を導くこと．

3.2 アルゴリズム

本節で示すアルゴリズムは，あらかじめ正例集合および負例集合を与え，その事例集合に対して適切な解を求める一括型アルゴリズムである．このアルゴリズムは選言概念獲得を扱うための枠組みを提供する．アルゴリズムを以下に示す．

Step0: コーディング;

Step1: 環境 $E =< P_I; N_I >$の設定;
獲得連言集合 R_{es}=ϕ;//P_I=正例集合;N_I=負例集合

Step2: 世代数 t=0;
初期世代集団 I_{nit}=$\{c_1;c_2;\cdots;c_{size}\}$ の生成;

Step3: 各個体の適応度評価;

Step4: 適応度を基準とした個体の選択;

Step5: 個体対に対する交叉; 確率 r での突然変異;

Step6: 致死判定; 集団の入れ替え;

Step7: t++;if(t!=最大 Loop 回数 T) step3 へ;

Step8: 最大適応度の c_xを獲得連言集合に追加;
//R_{es}=$R_{es}\wedge\{c_x\}$;
c_xが説明する正例を P_Iから削除;if(P_I!=ϕ) Step2 へ;

Step9: 獲得概念表示;

3.3 Fitness Function

適応度関数は以下の条件を満足するものである．以下に，条件を満足する関数を示す．

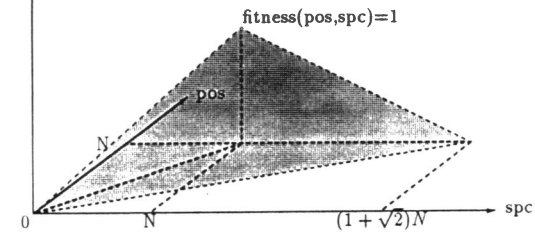
(a) 適応度関数は多くの正例を説明する個体に高い評価を与える

(b) 適応度関数は，一つでも負の事例を説明する個体に最も低い評価を与える

(c) 適応度関数は，個体が表現する空間を正例が占める割合が高い個体に高い評価を与える．

上記の条件を満足するような適応度関数の例題を以下に示す．

$$Fitness(pos, spc) = max(0, \frac{(1+\sqrt{2})pos - spc}{\sqrt{2}pos_{all}})$$



上記の式において，変数 POS は個体が表現する正事例の数を表し，変数 SPC は個体が表現するすべての仮説の数を表す．評価式はすべての正例 (POS=N) を表現し，余分な空間のない (SPC=POS) 個体に最高の評価値 (=1) を与える．

4 実験と考察

実験 1 選言概念獲得
提案するアルゴリズムに対して，表現言語および事例集合を無作為に設定し，選言的概念獲得の実験を行った．設定した問題は 5 題で，各問題で用いた属性数，仮説空間は表 1 の通りである．初期正例数および初期負例数については 3 つの場合を設定し，獲得される選言概念の相違を見た．獲得概念の表記は，各連言が説明する事例数 (spc) を分母，連言が説明する正例数 (pos) を分子とする分数 (pos/spc) を選言で結んだ形を用いており，獲得された選言概念を構成する連言数やその一般性の度合をみることができる．

各実験で用いた GA に関するパラメータは，集団サイズ 20，変異確率 0.1，世代上限値を 50 としている．また，獲得概念は乱数の初期値を変更し，50 回の実験を行った結果，最も多く獲得された概念記述を示してある (括弧内はその割合である)．

実験 2 正例による概念獲得
一般に目的概念の適切な負例を与えることは，正例を与えることに比べて困難である．実験 2 では，提案するアルゴリズムが正例集合のみを与えられた場合の概念獲得について調べる．

実験 2 では，実験 1 において比較的一般性の高い概念が獲得されている事例設定の条件において，与える負例集合 N_Iを空とした場合の概念獲得を行った表 1．GA に関するパラメータの設定は実験 1 と等しい．

実験 3 ノイズの抽出
実験 2 と同様、比較的一般性の高い概念を得ている事例設定の条件において，正事例のノイズデータを与えた場合の概念獲得を行った (表 3). 正事例数の欄に "+" で示した値が与えたノイズの数である．

No.	attri	probrem space	P	N	Aquisit concept(pos/spc)
1	5	336688 (12^3 x 14^2)	20	5	[12/24 ∨ 9/7 ∨ 1/1](42%)
			30	10	[17/26 ∨ 13/18](64%)
			42	10	[24/26 ∨ 18/18](66%)
2	4	2160 (5 x 6 x 8 x 9)	10	5	[3/4 ∨ 3/4 ∨ 2/3 ∨ 1/1 ∨ 1/1](38%)
			15	10	[9/12 ∨ 6/8](90%)
			20	10	[12/12 ∨ 8/8](88%)
3	6	322560 (7 x 8^3 x 9 x 10)	15	5	[8/12 ∨ 3/4 ∨ 3/2 ∨ 1/1 ∨ 1/1](38%
			20	10	[10/12 ∨ 6/8 ∨ 4/6](70%
			26	10	[12/12 ∨ 8/8 ∨ 6/6](68%
4	5	1440 (3 x 4^2 x 5 x 6)	12	5	[7/15 ∨ 3/3 ∨ 1/1 ∨ 1/1](40%)
			18	10	[11/15 ∨ 7/9](100%)
			24	10	[15/15 ∨ 9/9](96%)
5	4	8190 (9^2 x 10 x 11)	16	5	[12/24 ∨ 5/6 ∨ 1/1](50%)
			27	10	[18/24 ∨ 9/12](66%)
			36	10	[24/24 ∨ 12/12](64%)

table1 : Aquisiton of disjunctive normal form Concepts

No.	# Posi	# Nega	Aquisit concept(pos/spc)
1	30	0	[17/24 ∨ 13/18](64%)
2	15	0	[9/12 ∨ 6/8](82%)
3	20	0	[10/12 ∨ 6/8 ∨ 4/6](66%)
4	18	0	[11/15 ∨ 7/9](100%)
5	27	0	[18/24 ∨ 9/12](70%)

table2 : concept aquisition from positive examples.

No.	# Posi	# Nega	Aquisit concept(pos/spc)
1	30+1	10	[17/24 ∨ 13/18 ∨ 1/1](52%)
2	15+2	10	[9/12 ∨ 6/8 ∨ 1/1 ∨ 1/1](62%)
3	20+1	10	[10/12 ∨ 6/8 ∨ 4/6 ∨ 1/1](62%)
4	18+2	10	[11/15 ∨ 7/9 ∨ 1/1 ∨ 1/1](100%)
5	27+3	10	[18/24 ∨ 9/12 ∨ 1/1 ∨ 1/1 ∨ 1/1](60%)

table3 : concept aquisition from noisy data.

考察 1 実験 1 では，いずれの問題においても事例数の増加に伴って一般性の高い概念が獲得されている．これは，適応度関数の正例密度に関する条件 (c) が過度の一般化を抑える方向に効果的に働いていることを示すと考えられる．

考察 2 実験 2 では，いずれの設問とも獲得された選言概念は問題 1 に等しく，その獲得確率もほぼ同等の結果が得られている．概念獲得問題において負例の果たす役割は，獲得すべき概念の過度の一般化を抑制することである．提案するアルゴリズムでは，適応度関数の計算には負例を用いておらず，また条件 (c) を取り入れることによって過度の一般化を抑制することができた．この結果，本アルゴリズムは負例が与えられなくとも適切な概念が獲得できると考えられ，正事例提示のみによる選言概念獲得が可能であるいえる．

考察 3 実験 3 では，ノイズとして与えた事例がすべて 1/1，すなわちノイズ事例そのものが獲得された選言概念の一連言として現れている．また，他の連言部分はノイズを含まない場合と比べて変化はない．よって，このアルゴリズムはノイズを含む事例に対して柔軟な概念獲得を行えるものと考えられる．

5 むすび

本論文では，遺伝的アルゴリズムを用いた概念学習アルゴリズムを提案し，実験を通してその有効性を検討した．

参考文献

[Mitchell 77] *Mitchell, T.M. "Version Spaces:A Candidate Elimination Approach to Rule Learning" Proc. of the Fifth IJCAI, 1977*

[Goldberg 89] *Goldberg, D.E. "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning" Addison-Wesley, 1989*

[Murray 87] *Murray, K.S. "Multiple convergence: An Approach to Disjunctive Concept Acquisition" Proc. of the Tenth IJCAI, 1987*

連絡先
〒 903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地
琉球大学工学部情報工学科 遠藤聡志
Tel.098-895-2221ext.3261 Fax.098-895-2688 E-mail endo@ie.u-ryukyu.ac.jp

WD4-2

因子分析、ＧＡ、学習型ファジイ推論を用いた多入力を扱う顧客満足構造分析システムの提案

A Proposal of a system for Analysing Structure of Customer Satisfaction with large number of Variables by Factor Analysis, GA and Learning Type Fuzzy Inference

板垣　朝子*　高嶋　守*　西尾チヅル**　中西祥八郎***
Asako Itagaki*　Mamoru Takashima*　Chizuru Nishio**　Shohachiro Nakanishi***
*日本ナレッジインダストリ株式会社　**筑波大学　***東海大学工学部
*Japan Knowledge Industory Co.,Ltd　**The University of Tsukuba　***Tokai University

Abstract- Recently, it is recognized that Customer Satisfaction (CS) is a important factor to manage, but we have no methods to describe the causal relation between evaluation of aspects and satisfaction, because it is very complex and non-linear relation. A fuzzy Inference is powerful method to model non-linear causal relation such as CS, but it cannot treat a system with a large number of input variables. The authors propose a modeling method to identify the structure of CS. The system which consist of two processes. First process is a variable reduction process, by factor analysis. Second is a learning process of fuzzy inference automatically, by using genetic algorithm and generalized delta rule. We apply this system to actual servay data from a fashion tenant building in Tokyo area. We can identify the non-linear causal relation, and obtain more precisely result than that of regression analysis generally used.

１．はじめに

顧客満足という概念は、重要な経営指標の一つとして定着し、その構造に関する研究も数多く行われている。その成果によると、製品、サービス等に対する顧客の満足度を説明する変数は、対象となる製品・サービスのさまざまな要素に対する顧客の評価であることが示されている［１］。また、実際にその間の因果関係を同定する手法として、ほとんどの研究事例においては、製品・サービス等にたいする顧客の評価と満足度をアンケート質問票を用いて調査し、満足度と評価の間の因果関係を、重回帰分析、共分散構造分析等の多変量解析の手法を用いて同定するという手順がとられている。これらの方法では、モデル式を仮定してデータを与えるだけで原因と結果の間の因果関係の有無を検証できるという利点はあるものの、非線形な因果関係はとらえられない。一方、満足度と要素の評価の間の因果関係は、Swan&Combsら［２］に見られるように、必ずしも線形ではないことが示唆されており、非線形な因果関係をモデル化できる手法の開発が課題となっている。

非線形な因果関係を記述できる有用な手法としては、ファジイ推論がある。しかし、ファジイ推論には、入力変数が多くなりすぎると、そのままでは取り扱えないこと、またそれ自身は知識を獲得するアルゴリズムを持たないこと、といった２つの欠点がある。

我々は、この欠点を克服するために、２つの手段を用いる。まず、数多くの変数をファジイ推論で扱うために、統計的手法である「因子分析（Factor Analysis）を用いて、変数の縮約を行う。また、ファジイ推論の構成には、遺伝的アルゴリズムと一般化デルタルールを用いて自動的にファジイ推論を構成するシステム「ＡＵＧＥＦ（Automatic Generator of Fuzzy inference system:学習型ファジイ推論生成システム）」を用いる。

このシステムでは、まず、満足度を構成する非常に多くの評価項目を、因子分析を利用して、ファジイ推論で取り扱える程度の数の要因にとりまとめる。その要因をファジイ推論の前件部変数として、総合的な満

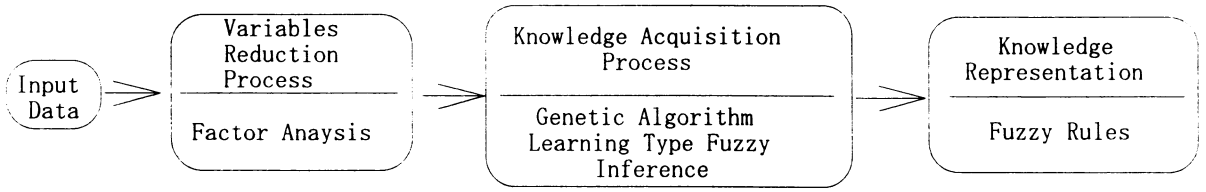


図１　システムの全体像

足度との間の因果関係を、ｉｆ－ｔｈｅｎルールの形で自動的に抽出する。

本稿では、因子分析とＡＵＧＥＦの概要を説明した後、東京地区のファッションテナントビルの利用者に対する満足度アンケートに本システムを適用して、得られたモデルの精度と、獲得された知識の内容について考察する。

２．システムの概要

本システムは、大きく２つのプロセスに分かれている。（図１）第一のプロセスは、変数縮約のプロセスであり、測定された多数の入力変数を、因子分析を用いて数個の変数に変換するプロセスであり、第２のプロセスは、要因と結果の間の要約された因果関係を表すファジイ推論を、遺伝的アルゴリズム（以下GA）と一般化デルタルールを用いて自動的に構成することにより、知識を獲得するプロセスである。

2-1. 変数の縮約：因子分析

因子分析は、多数の入力変数を、少数の独立な変数に変換する手法である［３］。因子分析では、入力変数は正規化されており、共分散は相関係数に等しい。基準化された変数は、式（１）のように、より少数の「因子」とよばれる変数の線形結合で表すことができる［４］。

$$x_i = \sum_{j=1}^{m} w_{ij} F_j + e_i \ , \ (i=1,.....p) \ , \ m \le p \qquad (1)$$

ただし、F_jは共通因子、e_iは独自因子であり、mは共通因子の数、pは入力変数の数である。また、w_{ij}は、F_jのx_iに対する因子負荷量と呼ばれる。共通因子はすべての変数の中に含まれている。つまり、式（１）は、もとの変数x_iを、より少ない数の共通因子F_jの線形結合で表したものである。この式の中では、独自因子e_iは誤差項であり、これを最小にするような共通因子F_jをうまく取り出すことができれば、変数の数を減らすことに伴う情報量減少を最小にすることができる。

因子の抽出は、通常、主成分法と呼ばれる方法で行われる。主成分法とは、もとの変数を主成分とよばれる、互いに無相関な変数に変換する手法である。各々の主成分は、もとの変数x_iの線形結合で、式（２）の形に表わすことができる。

$$C_j = \sum_{i=1}^{p} a_{ji} x_i \ , \ (j=1,.....m) \qquad (2)$$

主成分C_jを使って、式（１）は下記のように書き直すことができる。

$$x_i = \sum_{j=1}^{m} a_{ji} (VarC_j)^{1/2} F_j + e_i \ , \ (i=1,.....p) \qquad (3)$$

$VarC_j$はC_jの分散をあらわしている。上式より、因子負荷量w_{ij}は、$a_{ji}(VarC_j)^{1/2}$であらわされる。

因子分析により推定された共通因子F_jの値を因子得点とよび、次のステップであるファジイ推論の入力変数として用いる。これにより、数十個の入力変数を数個まで減らすことができる。

2-2. 知識の獲得：ＡＵＧＥＦ

ＡＵＧＥＦとは、筆者等の造語であり、GAとデルタルールを用いてファジイ推論を自動的に構成するシステムの名称である。このシステムの概要を以下に説明する。

ＡＵＧＥＦは２つのステップにわかれている。第一のステップは前件部変数のファジイ分割を求めてルール表を作成するステップであり、第二のステップは、作成したルール表の各ルールに対応する後件部を一般化デルタルールを用いて決定するステップである。［４－６］

ＡＵＧＥＦで使用しているファジイ推論は、式（４）であらわされる簡略型のファジイ推論である。

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_{1j} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{2j} \ldots . \ x_i \text{ is } A_{ni}$$
$$\text{Then } y_1 \text{ is } W_1^k \text{ and } \ldots . \ y_s \text{ is } W_s^k \ , \qquad (4)$$

ここで、A_{ij}は、i番めの入力変数に対するj番めのメンバシップ関数であり、nとsは入力変数と出力変数それぞれの数を表している。W_s^kはルールに対応する後件部の実数値である。

2-2-1. GAを用いた前件部の同定

ＡＵＧＥＦでは、ファジイルールの前件部変数のファジイ分割をデータに合わせて得るために、GAを使用している。GAそのものの説明［７］は本稿では紙面の都合上割愛し、ＡＵＧＥＦで用いるGAのコーディングと評価関数の定義について説明する。

前件部の変数のファジイ分割の存在位置の候補を遺伝子として染色体をコーディングし、実際にメンバーシップ関数の頂点の存在する位置を１、存在しない位置を０とする。簡単のために二次元で表現したのが図２である。

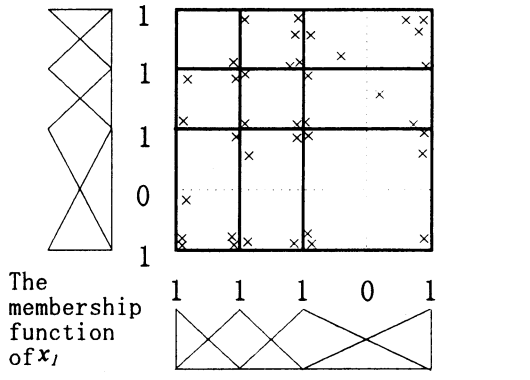


図２ GAによる最適分割の例

各データに対する分割の適合度の総和をフィットネス関数として最適な分割を探索する。

k番目のデータに対する染色体の適合度 λ_k を式（5）で定義する：

$$\lambda_k = \prod_i (\max_j (A_{ij}(x_i^k))), \quad (5)$$

ただし、A_{ij}はi番目の入力変数に対するj番目の位置にあるメンバーシップ関数、x_{ik}はk番目のデータのi番目の入力変数の値である。染色体のデータ全体に対する適合度は式（6）のようになる。

$$E = \sum_k \lambda_k / t, \quad (6)$$

ここで、tはデータの件数である。

2-2-2. 一般化デルタルールによる後件部の同定

ＡＵＧＥＦで使用するファジイ推論は後件部が実数値の簡略型ファジイ推論であり、一般化デルタルールを用いて、後件部を最適化できる。

r番目のデータに対するj番目のルールの適合度 U_{rj} を、式（7）のように定義する。

$$U_{rj} = \prod (A_{ij}(x_i)) \quad (7)$$

この推論エンジンがr番目のデータに対して出力する答え y_r は、式（8）のように求められる。

$$y_r = \sum (U_{rj} \times W_j), \quad (8)$$

ただし、Wjは、j番目のルールの後件部の値である。

このシステム全体の誤差を、出力値 y_r と実際に観測された値 y_r^* の間の差を用いて、次のように定義する。

$$E = \frac{1}{2} \sum_r (y_r^* - y_r)^2, \quad (9)$$

この誤差が小さくなるように一般化デルタルールを適用して、W_j を調節する。

3．ＡＵＧＥＦを用いた顧客満足度構造分析

本システムを実際に東京地区のファッションテナントビルの利用者に対する満足度アンケートに適用して、顧客満足度構造分析を試みた。

3-1. 使用データ

使用したデータは、調査対象ファッションビルの店客に対して実施されたアンケート調査のデータである。入力変数として用いたのは、満足度を構成する項目別の評価４５項目（５段階スケールを使用）であり、出力変数（教師信号）として用いたのは総合満足度の評価１項目（５段階スケールを使用）である。有効なデータの数は２６０件であった。

3-2. モデルの構成

3-2-1. 入力変数の宿約

ＡＵＧＥＦに入力するデータを作成するために、満足度構成要因を用いて因子分析を行ない、入力変数の縮約を行った結果、品揃え、店員のマナー、テナント、アメニティの４因子が抽出された。この４因子で、45項目全体の分散の約50%が説明されている。

3-2-2.. ファジイ推論の構成

２６０サンプルの内、２１０サンプルのデータを学習データとして使用し、４入力１出力のファジイ推論ルールを構成した。

１入力変数当りのビット数を７ビット、ポピュレーション件数１００、突然変異率５%、イテレーション回数１０００回で得られた前件部変数のファジイ分割は図３のようになる。すなわち、品揃え評価因子、店員の雰囲気・マナー因子、テナント因子の３因子は、「よい」「ふつう」「よくない」の３分割が得られた。ビル全体のアメニティ因子は、「よい」「ややよい」「ふつう」「よくない」として、４分割が得られた。

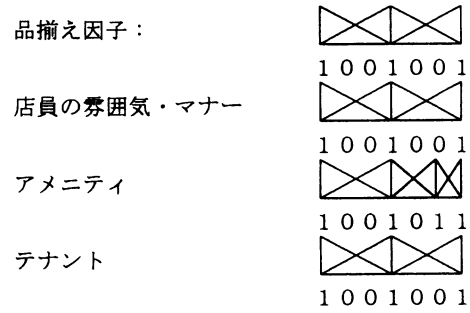


図３ 前件部の分割

前件部の分割のすべての組み合わせから、3×3×4×3=108個のルールが存在するが、そのうち実際に使われたルールは105個（全ルールの内97%）であった。また、学習データによるルールの使用頻度を調べると、42個のルールでほぼ全体の８割を占めていた。従って、この42個のルールで本適用例の満足構造の約８割を説明できるといえる。

3-3. 結果の検討

3-3-1. モデルの精度

ＡＵＧＥＦを用いて得られた結果と、従来顧客満足構造分析に用いられていた重回帰分析を比較した結果を表１に示す。総合的に見ると、ＡＵＧＥＦの方が精

	Learning data (210)	Holdout data (50)	Total (260)
AUGEF	0.008	0.013	0.009
Regression Analysis	0.013	0.012	0.013

表１ ＡＵＧＥＦと重回帰分析の精度の比較

度が高いことがわかる。また、この２つのモデルについて、未学習データに対する誤差を比較したのが図４のグラフである。

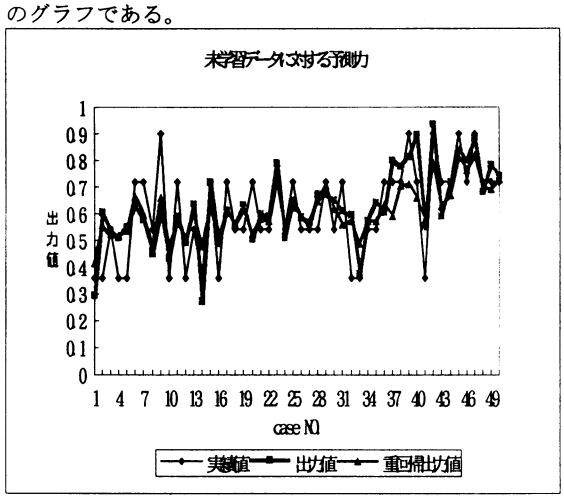


図４　未学習データに対する予測力

3-3-2. 獲得された知識の吟味

４因子のうち、３因子の値を固定して、残りの１因子を変化させて、出力値の変化をグラフ化したのが図５である。まず、一見して、満足構造の非線形性が同定できているのがわかる。また、「品揃え」「テナント」要因と、「アメニティ」「店員のマナー」要因では、総合的満足度に与える影響が違うことがわかる。満足度を規定する要因として、Swan & Combs［２］は、「本質的機能」と「表層的機能」の２種類があることを指摘している。本質的機能とは、その機能が満たされなければ不満を生じる機能であり、表層的機能とは、その機能が満たされれば満足を生じる機能である。このケースでは、「品揃え」「テナント」が本質的機能、「アメニティ」「店員のマナー」が表層的機能にあたり、我々の日常的な感覚にも合致している。従来使用されていた統計的手法では、これらの違いを自動的に識別することは不可能であるが、我々のシステムではこの違いをはっきりと捉えることができている。

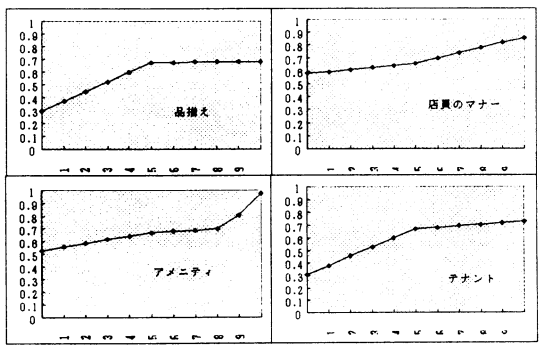


図５：非線形な因果関係

４．おわりに

我々は、多入力を持つ因果関係をファジイ推論を用いて同定するシステムを構築し、東京地区のファッションテナントビルの顧客満足構造分析に適用した。その結果、データに対する適合度が高く、また未学習データに対する予測力もあるモデルが得られた。また、得られたモデルを用いたシミュレーションから、満足度構造の因果関係の非線形性を的確に表現できることが示された。

今後の課題としては、ルールの信頼性の指標を推論に反映できるようにすること、また変数縮約（今回は従来から使われている因子分析を用いた）の部分にも非線形性を反映できるような手法を開発することがあげられる。

参考文献

[1] Y.Yi; "A critical Review of Consumer Satisfaction",in V.A.Zeithmal(ed) "Review of Marketing" American Marketing Association, pp.68-123(1990)

[2] J.E.Swan and L.J.Combs;"Product Performance and Consumer Satis-faction:A New Concept" Journal of Marketing,40(April),pp.25-33(1976)

[3] Dillon, W. R., and Goldstein, M., *MultivariateAnalysis Methods and Applications*, New York, John Wiley & Sons, 1984, pp.53-99

[4] 野村，荒木，林，若見；『デルタルールによる学習型ファジイ推論ー遺伝アルゴリズムによる前件部の構造同定』，FANシンポジウム講演論文集，pp.25-30(1991)

[5] 市橋，渡辺；『簡略型ファジイ推論を用いたファジイモデルによる学習型制御』，日本ファジイ学会誌，vol2，No.3，pp.429-437(1990)

[6] A.Itagaki, M.Takashima, Y.Ashino, C.Nishio and S.Nakanishi; "Fuzzy Inference Systems by Genetic Algorithm and Factor Analysis -Causal Modeling for Multi-variate Complex Systems-",in Proceedings of IEEE Symposium on Emerging Technorogies & Factory Automation, pp.194-205(1994)

[7]北野宏明編；『遺伝的アルゴリズム』，産業図書(1993)

連絡先

〒141　東京都品川区西五反田７－２２－１７
TOCビル
日本ナレッジインダストリ（株）
シンクファクトリ事業本部
板垣　朝子
TEL　03-3494-5444
FAX　03-3495-0888

WD4-3

実数符号化と偏平均交叉を用いたＧＡによるファジィルール抽出

Fuzzy Rule Extraction with GA using Real Value Coding and Unfair Average Crossover

野村竜也*　　三好　力**

Tatsuya Nomura　Tsutomu Miyoshi

*シャープ（株）ソフトウェア研究所　Software Laboratory, Sharp Corp.

**シャープ（株）情報技術研究所　Information Technology Research Laboratory, Sharp Corp.

Abstract : Many methods for automatic fuzzy rule extraction using Genetic Algorithm have been recently proposed. In these methods fuzzy membership functions are given in advance, and the purpose of these methods is to select ones which are appropriate to given input-output sample data, thus, they use discrete gene coding methods in which labels of selected membership functions are represented. In this paper, we propose real value gene coding methods in which parameters in membership functions are directly represented, and new crossover method appropriate to our coding method.

1. はじめに

従来人間が試行錯誤的に構成していたファジィ推論の推論規則を、与えられた入出力データから自動的に抽出するする手法として、近年ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムなどの機械学習の手法を用いる方法が多く提案されている。特に、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm、以下GAと略称)を用いたファジィルールの抽出法は最近多く提案されている[1]が、その多くは予め与えられた有限個のファジィメンバシップ関数で入力データを最もうまく分割するものを選択すること、あるいは簡略型推論における後件部実数値の決定を目的としており、選択するメンバシップ関数あるいは後件部実数値を離散的に示す遺伝子符号化手法を用いている。このような手法では、入力空間のファジィクラスタリングの観点から見た場合、データの分布に対するファジィメンバシップ関数のパラメータの細かな調整が難しいという問題を持つ。また、個体染色体の交叉や適応度計算の処理に時間を要するという弱点がある。

本稿では、ファジィメンバシップ関数の実数パラメータを直接符号化し、実数符号化遺伝子に適した新たな交叉法を用いる高速な遺伝的アルゴリズム、およびそれを用いた推論規則の前件部ファジィメンバシップ関数の細かな調整を可能とする推論規則抽出法を提案する。

2. ファジィルールと実数値遺伝子符号化

本研究では、以下の形式の入出力データの集合Sからファジィ推論規則を抽出することを目的とする。

$$\left.\begin{array}{l} S = \{ S^{(1)}, S^{(2)}, \cdots, S^{(N)} \} \\ S^{(l)} = (a_{l1}, a_{l2}, \cdots, a_{ln}; c_l) \\ (a_{l1}, a_{l2}, \cdots, a_{ln}) \in R^n \\ c_l \in \{ C_1, C_2, \cdots, C_L \} \quad (l = 1 \cdots N) \\ C_i : \text{離散値もしくは記号の値}(i=1 \cdots L) \\ N : \text{入出力データの総数} \\ L : \text{出力値の種類数}\quad n : \text{入力属性数} \end{array}\right\} \cdots\cdots(1)$$

上記の入出力データから抽出するファジィ推論規則は、以下の重み付き代数積-加算簡略型推論の形式のものを考える。

$$\left.\begin{array}{l} \text{if } I_1 \text{ is } F_{k1} \text{ and } I_2 \text{ is } F_{k2} \text{ and} \cdots \text{ and } I_n \text{ is } F_{kn}, \\ \quad \text{then c is } C_k \text{ with weight } \omega_{ki} \\ \quad (k = 1 \cdots L, i = 1 \cdots m) \end{array}\right\} \cdots\cdots(2)$$

(m :同じ後件部を持つ推論規則の総数)

F_{kj}は、以下の形式のガウシアン型ファジィメンバシップ関数とする。

$$F_{kj}(x) = \exp((-1/2)(x-\mu_{kj})^2/\sigma_{kj}^2) \quad \cdots\cdots(3)$$
$$(k = 1 \cdots L, i = 1 \cdots m, j = 1 \cdots n)$$

数値入力ベクトル$I = (I_1, I_2, \cdots, I_n)$に対する式(2)のファジィ規則の推論結果は、以下のように計算される。

$$\left.\begin{array}{l} F_{ki}(I) = \Pi_{j=1 \cdots n} F_{kj}(I_j) \quad (k = 1 \cdots L, i = 1 \cdots m) \\ P_k(I) = \Sigma_{i=1 \cdots m} F_{ki}(I)\,\omega_{ki} \\ P'_k(I) = P_k(I) / \Sigma_{r=1 \cdots L} P_r(I) \quad (k = 1 \cdots L) \end{array}\right\} \cdots\cdots(4)$$

$F_{ki}(I)$は後件部がC_kであるi番目のファジィ規則の前件部に対するIの適合度、$P_k(I)$は後件部がC_kであるファジィ規則に対する重み付きの適合度の和、$P'_k(I)$はIに対する出力がC_kである割合を表す。

本稿で提案する実数値遺伝子符号化を図1に示す。提案する実数値遺伝子符号化では、式(2)で示す1つのファジィルールを1つの個体の表現型として、式(3)に示すファジィメンバシップ関数のパラメータμ_{kj}およびσ_{kj}を1つの遺伝子、個体の染色体をそのファジィメンバシッ

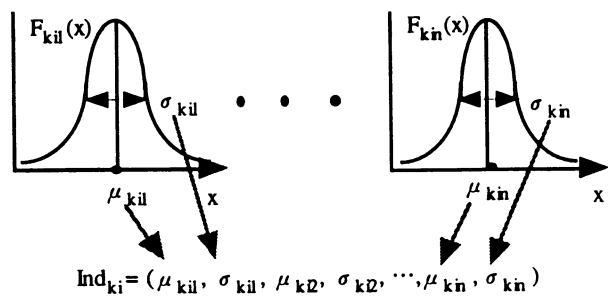


図1　ファジィメンバシップ関数のパラメータの実数遺伝子符号化

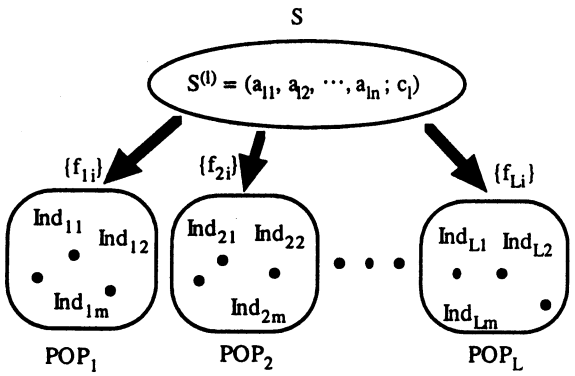


図2　遺伝子符号化に基づく集団形成

プ関数のパラメータの列として表現する。つまり、式(2)のファジィルールに対応する個体の染色体Ind_{ki}を長さ2nの実数値列で定義する。

本稿で提案する集団形成を図2に示す。提案する集団形成では、同じ後件部を持つファジィルールに対応するm個の個体により1つの集団POP_k (k = 1 … L)を形成する。つまり各出力値C_k(k = 1 … L)に対応して合計L個の個体集団を形成する。選択、交叉、突然変異の操作は各集団ごとに独立に行い、集団間(異種間)の遺伝子の移動はないものとする。また、出力値C_kに対応する集団POP_kに属するi番目の個体の評価値e_{ki}を、表現型のファジィルールの入出力データに対する代数積-加算簡略型推論の自乗誤差

$$e_{ki} = (1/2)\Sigma_{l=1\cdots N}(F_{ki}(a_{l1}, a_{l2}, \cdots, a_{ln}) - T_k(c_l))$$
$$T_k(c_l) = \delta_{kl} \qquad (k = 1 \cdots L, i = 1 \cdots m) \quad \cdots\cdots(5)$$

により定義する。ここで、δ_{kl}はクロネッカーのデルタとする。この評価値e_{ki}を用いて、適応度f_{ki}を

$$f_{ki} = \max_{r=1\cdots m}(e_{kr}) - e_{ki} + \alpha \min_{r=1\cdots m}(e_{kr}) \quad \cdots\cdots(6)$$
$$(k = 1 \cdots L, i = 1 \cdots m)$$

と定義する。

各集団における進化は、1：式(6)の適応度によるルーレット選択、2：交叉により生成された子染色体と親染色体の入れ替え、3：遺伝子の実数の最大値から最小値の範囲のランダムな実数との入れ替えによる突然変異を1世代サイクルとして繰り返す。世代交代終了後、各集団において個体適応度を正規化し、対応するファジィルールの確信度とする。つまり

$$\omega_{ki} = f_{ki}/\Sigma_{r=1\cdots m} f_{kr} \quad \cdots\cdots(7)$$
$$(k = 1 \cdots L, i = 1 \cdots m)$$

とする。

3. 実数値遺伝子表現における偏平均交叉

実数値遺伝子表現における交叉としては、親染色体の各遺伝子座における平均値を子染色体の各遺伝子座における値とする「平均値交叉(Average Crossover)」が提案されている[2]。しかし、単純な平均値交叉では、親染色体の一方に優れた性質があったとしても、他方との平均をとることによりそれが失われ、子染色体に性質が継承されない。また、2つの親染色体から1しか子染色体が生み出されないことも含めて、集団の多様性が失われやすいと考えられる。

本稿では、2つのの親染色体の各々の遺伝子を平均値からずらした値を子染色体の遺伝子とする交叉「偏平均交叉(Unfair Average Crossover)」を提案する。実数値関数E1、E2、M1、M2を以下のように定義する。

$$E1(x, y) = x - (1/a)\,|\,x - y\,|\,sign(x - y)$$
$$E2(x, y) = y + (1/a)\,|\,x - y\,|\,sign(x - y)$$
$$M1(x, y) = x + (1/a)\,|\,x - y\,|\,sign(x - y)$$
$$M2(x, y) = y - (1/a)\,|\,x - y\,|\,sign(x - y) \quad \cdots\cdots(8)$$
$$a: 2\text{以上の実数}$$
$$sign(u) = 1 \quad (u > 0)$$
$$-1 \quad (u \leq 0)$$

この関数を用いた偏平均交叉の概念を図3に示す。偏平均交叉では、基本的に1点交叉に基づき2つの子染色体を生成する。2つの親染色体をランダムな位置pで切断し、子1の染色体の前半は親1の遺伝子を平均値から遠ざけた値を、後半は親2の遺伝子を平均値から遠ざけた値を遺伝子として持つ。また、子2の染色体の前半は親1の遺伝子を平均値に近づけた値を、後半は親2の遺伝子を平均値に近づけた値を遺伝子として持つ。その定義から明らかなように、a = 2とした場合、子2の染色体は平均値交叉と同じものとなる。

ファジィメンバシップ関数の形状の観点から見た場合の平均値交叉および偏平均交叉の意味を図4に示す。平

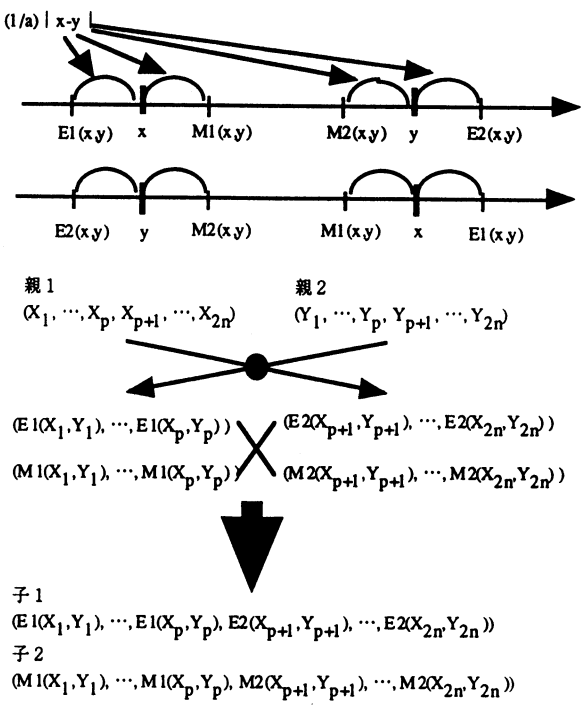
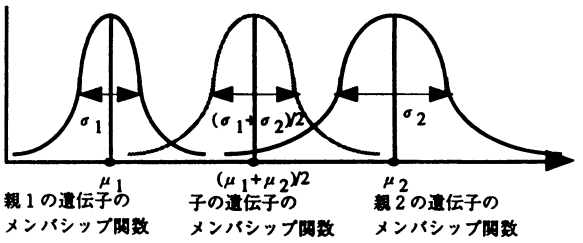
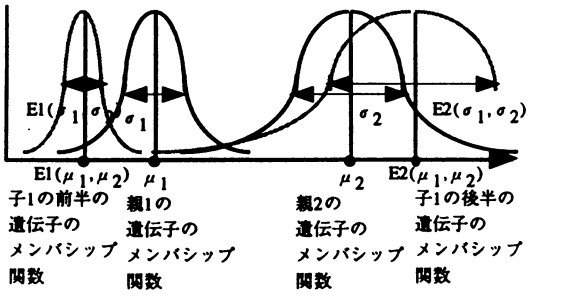


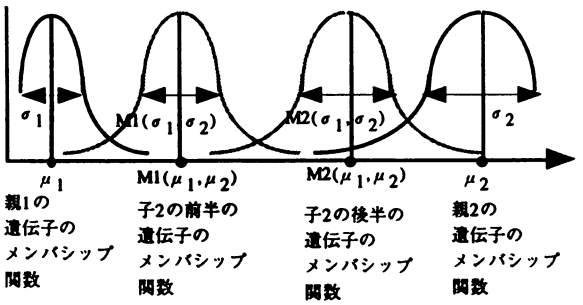
図3　偏平均交叉



(a) 平均値交叉



(b) 偏平均交叉（子1）



(c) 偏平均交叉（子2）

図4 平均値交叉と偏平均交叉による
ファジィメンバシップ関数の変化

均値交叉の場合、2つの親染色体の表すファジィメンバシップ関数に対して、その中間に位置するメンバシップ関数を子染色体の遺伝子として生成するため、親の一方がデータの分布に適したメンバシップ関数を有していても子のメンバシップ関数はそこからずれたものとなる。偏平均交叉では平均から遠い子と近い子の2種類を生成するため、親の一方がデータの分布に適したメンバシップ関数を有していればどちらかの子にそれがある程度継承され、かつ集団の多様性も維持される。

4. シミュレーションと考察

入力属性数 n = 3, 出力値種類数 L = 3 の入出力サンプルによるシミュレーションを行った。本実験データでは、各出力値C_1, C_2, C_3 に対応する入出力データの入力属性ベクトル (a_{11}, a_{12}, a_{13}) は、各々CN_1 = (2.0, 0.0, 0.0)、CN_2 = (0.0, 0.0, 2.0)、CN_3 = (0.0, 2.0, 2.0) を平均とする分散1の正規分布を持つとした。図5に入力ベクトルの分布を示す。また、同じ出力値を持つ学習用データを30個、評価用未学習データを30個、つまり学習用データ90個、評価用未学習データ90個を用意し、学習用データに対して100回世代交代を行った後、抽出されたファジィルールの学習用/評価用データに対する平均正答率

$$R = (1/3)\Sigma_{k=1,2,3}(1/30)\Sigma_{cl=Ck} P'k(a_{l1}, a_{l2}, \cdots, a_{ln}) \quad \cdots\cdots(9)$$

を評価した。

また、メンバシップ関数の実数値パラメータを2値展開して0-1ビット列(binary, Gray Code)で表現した染色体に1点交叉とビット突然変異を行うSimple GA方式、本方式と同じ実数値表現染色体に平均値交叉を行う方式、および本方式とで、各方式における式(9)で定義する正答率を比較した。なお、シミュレーションにはワークステーション(SparcStation10)を用いている。

交叉確率0.6、突然変異確率0.01における各方式の学習データに対する正答率を表1に、評価用データに対する正答率を表2に示す。また、各方式の染色体の評価値e_{ki}の平均の世代交代における遷移を図6に示す。

表1および表2から、本稿で提案の偏平均交叉を用いた方式は、学習用データ、評価用データともにその正答率において、binary符号化によるSimple GA方式に比べて10%前後、Gray Codeによる Simple GA 方式、実数値符号化による平均値交叉を用いた方式に比べて5%前後上回る。特徴として、入力ベクトル中心間の距離が他に比べて小さいC_1を出力値に持つデータに対しては、Gray Code方式およびすべての実数値符号化方式で、学習データで70%を越える正答率を示しているが、C_1以外の出力値を持つデータに対しては、偏平均交叉方式のみが60%を越える正答率を示す。特に、偏平均パラメータa=4ではどの出力値を持つデータに対しても70%前後の正答率を示している。また図6から、評価値の遷移においても本稿提案の方式が他の方式に比べて低い評価値への急速な降下を示している。同じ実数値符号化を用いていても、平均値交叉に比べて本方式は評価値の降下が速い。

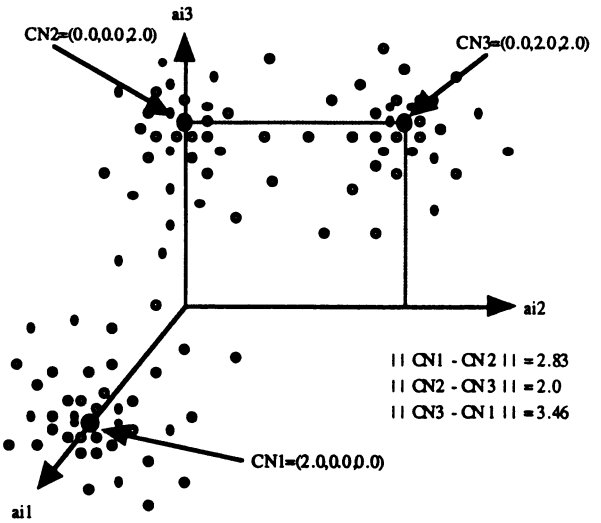


図5 実験用入出力データの入力ベクトルの分布

表1　交叉確率0.6, 突然変異確率0.01における
各方式の学習用データに対する正答率

	SGA_bit	SGA_Gray	RGA_av	RGA_uav3	RGA_uav4
C1の正答率(%)	57.8	77.8	79	78	71.6
C2の正答率(%)	53.2	56.3	52.3	66.5	67.6
C3の正答率(%)	63.2	57.8	56.3	58.3	73.3
全体の正答率(%)	58	64	62.8	67.6	70.8

表2　交叉確率0.6, 突然変異確率0.01における
各方式の評価用データに対する正答率

	SGA_bit	SGA_Gray	RGA_av	RGA_uav3	RGA_uav4
C1の正答率(%)	55.5	75.3	77.1	73.7	68
C2の正答率(%)	55.2	59.4	54.8	71.6	73.7
C3の正答率(%)	66.4	54.2	56.1	59.6	75.6
全体の正答率(%)	59	63	63	68.3	72.5

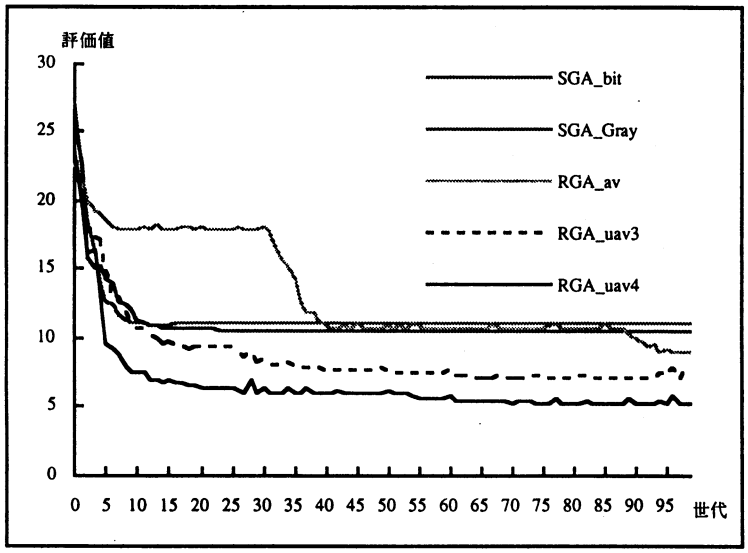


図6　100世代交代における各方式の評価値の遷移

表3　学習用データに対する各方式の正答率の平均と分散

	SGA_bit	SGA_Gray	RGA_av	RGA_uav3	RGA_uav4
C1の正答率の平均(分散)	69.8(7.7)	74.8(10.8)	71.4(11.3)	76.7(6.5)	73.9(5.0)
C2の正答率の平均(分散)	52.0(8.0)	56.6(8.2)	59.6(7.9)	64.4(6.8)	65.0(6.7)
C3の正答率の平均(分散)	52.9(19.1)	47.0(15.8)	57.4(8.6)	65.0(7.4)	66.2(9.7)
全体の正答率の平均(分	58.7(5.5)	59.5(6.1)	62.6(4.9)	67.9(5.3)	67.9(6.0)

表4　評価用データに対する各方式の正答率の平均と分散

	SGA_bit	SGA_Gray	RGA_av	RGA_uav3	RGA_uav4
C1の正答率の平均(分散)	69.8(7.7)	74.8(10.8)	71.4(11.3)	76.7(6.5)	73.9(5.0)
C2の正答率の平均(分散)	54.8(8.0)	58.5(8.5)	63.0(9.0)	68.8(7.6)	69.6(7.5)
C3の正答率の平均(分散)	54.0(20.4)	48.7(17.8)	59.2(9.6)	67.5(7.5)	69.0(10.0)
全体の正答率の平均(分	59.4(5.9)	60.1(6.8)	63.1(5.2)	69.0(5.5)	69.2(6.1)

表5　各方式の100世代交代に要した時間

	SGA_bit	SGA_Gray	RGA_av	RGA_uav3	RGA_uav4
実行時間	135min	150min	35sec	25sec	25sec

注　SGA_bit = binary 符号化によるSimple GA方式
SGA_Gray = Gray Code 符号化による Simple GA方式
RAG_av = 実数値符号化＋平均値交叉方式
RGA_uav3 = 実数値符号化＋偏平均値交叉方式(a = 3.0)
RGA_uav4 = 実数値符号化＋偏平均値交叉方式(a = 4.0)

また、パラメータ(交叉確率, 突然変異確率) = (0.6, 0.01), (0.8, 0.01), (1.0, 0.01), (0.6, 0.1), (0.6, 0.5), (0.8, 0.1)の6種類の組み合わせに、エリート戦略を行う場合と行わない場合、選択圧力を変化させる場合の3種類を掛け合わせた18種類で、各方式の正答率の平均および分散を計算した結果を表4および表5に示す。異なるパラメータでの平均正答率においても、上述と同じ傾向、つまり本稿提案の方式は他の方式に比べてC_1以外の出力値を持つデータに対する正答率が高く、全体の正答率でもビット符号化方式を10%前後、平均値交叉方式を5%以上上回る。また、表5にも示すように、実際の実行速度においても実数値符号化方式はビット符号化方式に比べて数百倍の速度を持つ。これは、評価関数および適応度関数が実変数関数であり、ビット符号化ではビット列を実数値に変換して計算を行う必要があるためであると考えられる。

以上の結果から考察すると、ファジィルール抽出において実数値符号化と偏平均交叉の組み合わせは、Simple GAに比べて適応度計算の効率が高く、また、Simple GAおよび平均値交叉に比べて親染色体の形質を確実に受け継いだ子染色体と離れた子染色体とが同時に生み出され、集団の多様性が高いため、入出力データの分布に影響されにくいルール抽出が可能であり、さらに数百倍の実行速度を実現している。

6. おわりに

ファジィルール抽出に適した遺伝的アルゴリズムの新たな遺伝子符号化方式と交叉法を提案し、シミュレーションを行った。結果として、本提案方式は既存の符号化方式に比べて適応度計算の効率が数百倍高く、既存の交叉法に比べて集団の多様性が高いことが確かめられた。

参考文献

[1] 中西祥八郎："遺伝的アルゴリズムによるファジィ制御", システム/制御/情報, Vol.38, No.11, pp.613～618, 1994
[2] L. デービス/編, 嘉数侑昇 他 訳 "遺伝アルゴリズムハンドブック", 森北出版, 1994

連絡先
〒632　奈良県天理市櫟本町2613-1
シャープ(株)　ソフトウェア研究所
野村　竜也
TEL 07436-5-0987
FAX 07436-5-2163

WD5-1

ＧＡによるセミアクティブサスペンションの ファジィ制御規則発見と入力変数選択

On Finding Fuzzy Rules and Selecting Input Variables for Semi-Active Suspension Control Using Genetic Algorithm

橋山　智訓　　古橋　武　　内川　嘉樹

Tomonori HASHIYAMA　Takeshi FURUHASHI　Yoshiki UCHIKAWA

名古屋大学工学部

School of Engineering, Nagoya University

Abstract: *This paper presents a new method to generate fuzzy control rules through genetic algorithm (GA). The fuzzy rules can be found through the genetic operations. Membership functions in fuzzy rules are also tuned through the GA operations. New approach also find appropriate combinations of input variables automatically. Effective semi-active suspension controllers are generated using the new approach. The fuzzy controllers are generated through several kind of GAs. The difference among these GAs are discussed. The conclusion is that our GA approach is the best for well organized chromosomes like those proposed in this paper .*

1. はじめに

ファジィ制御は、熟練者の制御ルールをファジィルールとして容易に記述できるヒューマンフレンドリーな制御法であり、広く実用に供されている。ファジィ制御系設計の一般的に、

1）制御入出力変数を設定
2）各変数のメンバーシップ関数を設定
3）制御ルールを記述

という手順でなされ、所望の制御性能を満たしていない場合、さらに、

4）メンバーシップ関数のパラメータ調整
5）制御ルールの修正

が行われる[1]。

これらいずれの手順においても多くの試行錯誤を必要としており、その自動化を目指してさまざまな研究がなされている。たとえば、熟練者の制御ルールの獲得については、ニューラルネットワークの学習機能を利用した、ファジィニューラルネットワーク[2][3]が、知識獲得の有効な手法として、様々な応用例に適用されてきた。また、近年、遺伝的アルゴリズム(GA)によりファジィルールのパラメータ調整を行う手法[4]、ファジィルールを同定する手法などが提案されている[5]。しかし、これらの手法は、制御系設計法の一部の自動化を実現するにとどまっており、設計者が設定しなければならない部分が多く残されている。

本稿では、ファジィ制御系設計の自動化を目指して、GAのルール発見能力に着目したファジィ制御器設計手法を提案する。本手法では、設計者は制御性能の評価関数を設定するだけで良い。また、エキスパートの知識など、事前に判っている制御ルールはそのまま用い、GAにより得られたルールと併用することにより、制御性能改善を行う。本手法をセミアクティブサスペンションのファジィ制御系設計に適用し、シミュレーションにより有効性を示す。また、筆者らが提案してきた局所改善型GA演算[6]の有効性についても考察する。

2. GAによるファジィ制御器の設計

GAを用いたファジィ制御器設計法は1991年にKarrが最初に提案した[4]。Karrの手法ではファジィ制御ルールは事前に設計者により与えられており、GAはメンバーシップ関数の調整にのみ用いられいる。この手法ではGAの最も強力な機能の１つである、ルール発見機能、すなわち、設計者が予期せぬ制御ルールを発見する機能は軽視されている。高濱ら[5]の手法においても、GAは設計者が設定したルール表に割り当てる後件部定数を決定するのみである。

これに対し筆者らは、ルールの発見機能こそGAの本質であると考えている。すなわち、人間が把握できていない複雑な制御ルールの発見をGAに期待している。本手法では制御入力変数の選択、必要な制御ルール数の決定およびメンバーシップ関数のパラメータ設定の全てをGAにより行い、設計の自動化を実現している。本手法において、設計者に要求されることはことは制御器の評価関数を設定することのみである。また、評価関数の設定の自由度が高いこともGAによるファジィ制御器設計の利点である。

2.1 コーディング

図1に提案するコーディング手法を示す。GAのルール発見能力はこの染色体へのコーディング法に大きく依存する。本手法では、GAのルール発見能力を生かすように自由度の高いコーディングを行った。すなわち、制御入力変数の組み合わせ、ルール数、メンバーシップ関数のパラメータすべてをGAが決定する。本手法は、制御入力変数の候補が多数あり、それらの関係の把握が困難でファジィ制御器に取り込めない場合に有効である。また、すでに得られている制御ルールがある場合にはそれを併用することで、有効なルールをより効率的に発見できる。図1では入力変数の候補が6変数の場合を示している。すなわち、2つの変数 x_t , x_b に対し、それぞれの1階微分値、2階微分値を入力変数候補として加えている。本手法では各遺伝子が一つの制御ルールを表している。各遺伝子は後件部変数のメンバーシップ関数のラベル*Cs*および選択された入力変数の組み合わせにより構成されている。前件部、後件部の各変数には三角型メンバーシップ関数の中心、幅がそれぞれコーディングされている。例えば、図中一番左の遺伝子は、制御ルール

$$If\ x_t\ is\ A_{x_t}\ and\ \ddot{x}_t\ is\ A_{\ddot{x}_t}\ and\ x_b\ is\ A_{x_b}\ then\ y\ is\ Cs$$

を表している。本コーディングにより任意の入力変数の組み合わせが表現可能であり、GAの演算により様々な制御ルールの表現が可能となる。この染色体により表現されたファジィルールを用いた制御器の性能は評価関数により評価される。

既知の制御ルール群を併用した場合、GAにより得られるルール群は既知の制御ルールの制御性能を向上するように付加されるようにすれば、既知の制御ルールによる制御性能は保証される。

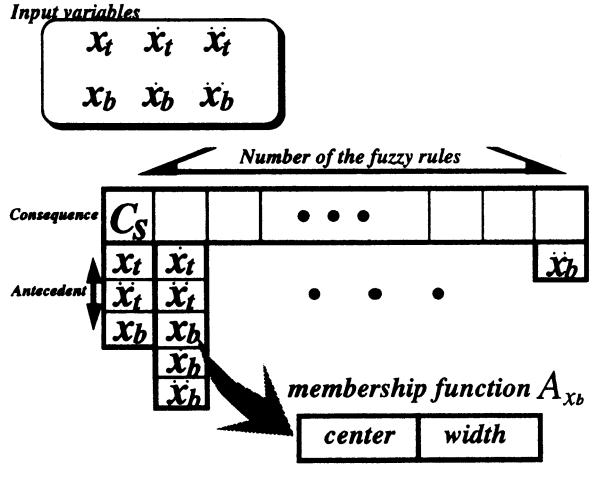


図1　コーディング法

2.2 遺伝的演算

GAの演算には、筆者らが提案している、局所改善型GA[6]を用いた。図2にその流れを示す。本手法により、少ない個体数および短時間での有効な解探索を期待できる。

2.2.1 突然変異

本GAの特徴は突然変異にある。突然変異は染色体レベルではなく、染色体を数カ所の部分に分けた局所レベルで作用させる。本手法のように各遺伝子が独立にルールを表すようにコーディングがなされている場合、染色体全体でランダムに突然変異を施すよりも、ルール単位で突然変異を施した方が、ルール発見・修正の効率は高いと期待できる。

本アルゴリズムは次のように実現される。まず、染色体1を m 個コピーする。m −1 個の染色体の中からランダムに i 番目の*Rule*を選び突然変異を施す。ここで各染色体を評価し、m個のうちもっとも適応度の高い染色体の*Rule* i の部分を他のm−1個の染色体の*Rule* i とする。この操作を染色体1の各ルールに対して行う。すべてのルールに対する操作の終了後もっとも適応度の高い染色体を残して、これを新しい染色体1とする。全ての染色体に対してこれらの演算を施す。

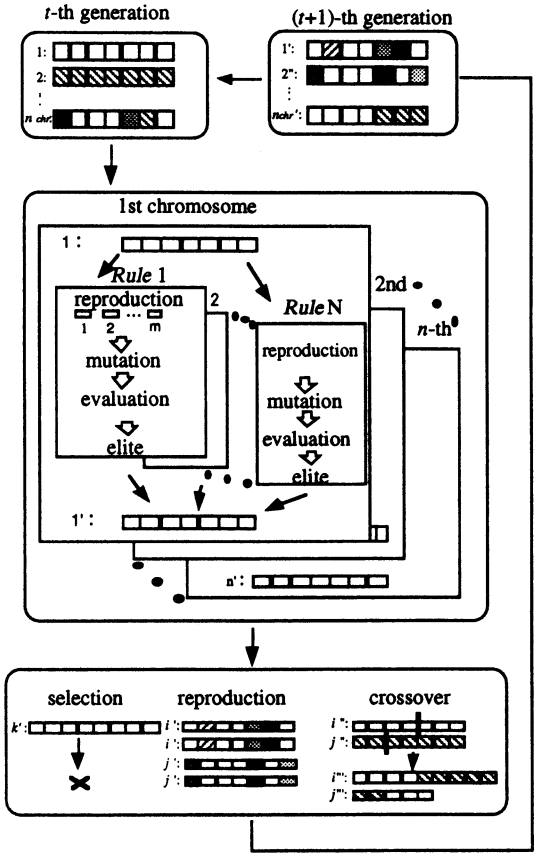


図2　局所改善型GAの流れ

2.2.2 交叉

本手法では染色体の長さがルール数に対応する。染色体の長さは交叉により可変とした。すなわち、必要なルール数もGA演算により決定される。

2.2.3 淘汰・増殖

各世代において、一定の割合で淘汰が行われ、その世代で最も適合度が高い個体で、淘汰された分の個体を補充する。

3. セミアクティブサスペンションのファジィ制御

3.1 シミュレーションモデル

本手法の有効性を示すために、セミアクティブサスペンションシステムの振動制御問題に本手法を適用した。

Karnopp[7]により提案されたセミアクティブサスペンションは、従来のパッシブサスペンションの構造を基に、アブソーバ内部の電磁バルブによりその減衰係数を制御し、より良い乗り心地および高い制振性能を実現するものである。図3に本シミュレーションモデルの概略を示す。GAにより生成された制御器を用いてセミアクティブサスペンションの減衰係数Cの制御を行い、その制御結果がGAにおける各個体の評価関数となる。その評価関数を用いて、遺伝的演算が各染色体に施される。

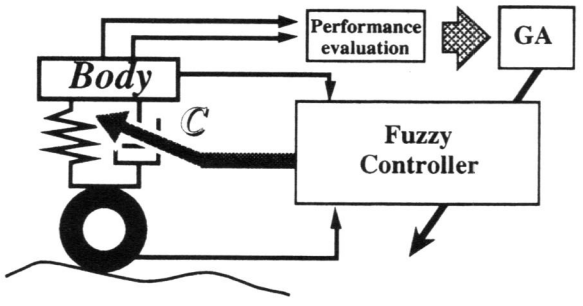


図3　シミュレーションモデル

3.2 GAによるファジィ制御器

GAによるファジィ制御系設計の利点として、評価関数の設定の自由度が高いことが挙げられる。乗り心地に深く関係しているものの従来の制御理論では設計時に考慮することの難しかった、加速度の時間微分値（ジャーク）を今回新たに考慮した。評価関数としては様々な組み合わせが考えられるが、今回は乗り心地を重視して、車体の鉛直方向のジャーク・加速度・速度・位置それぞれの実行値を計算しその総和を用いた。また、制御ルール数を評価関数に加えた場合もシミュレーションを行った。制御入力変数の候補としては比較的観測の容易な位置、速度、加速度を車体、タイヤそれぞれに対して用意する。GAによりこれら6変数の中から任意の組み合せを選び、制御ルールを構成する。今回は既知の制御ルールとして、Karnopp[7]のルールをファジィ化したもの

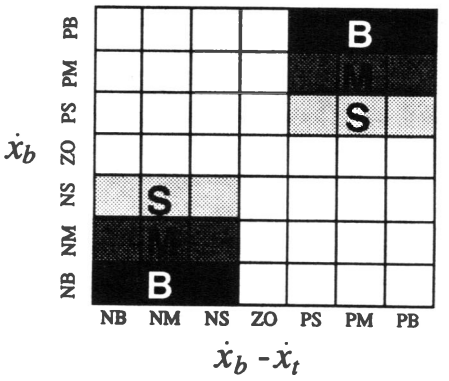


図4　ファジィ化したKarnoppの制御ルール

を用いた。図4にファジィ化したKarnoppの制御ルールを示す。図中横軸には車体とタイヤとの相対速度、縦軸は車体の速度であり、S、M、Bはそれぞれ制御出力である減衰係数に対するメンバーシップ関数のラベルである。このファジィルールは2つの入力変数（$\dot{x}_b - \dot{x}_t$）と$\dot{x}_b$の積が正ならば$\dot{x}_b$の大きさに対応した減衰係数にせよ、というものである。

このファジィ化したKarnoppの制御ルールにGAにより生成された制御ルールを加えて制御性能を評価し、より良い制御結果を得るルールを発見・更新する。今回のシミュレーションでは、発見したルールの効果を確認するために図4のルールにおけるメンバーシップ関数のパラメータの調整は行っていない。GAの初期状態としてルールをランダムに生成し、遺伝的演算を施し、制御入力変数の組み合わせ、必要なファジィルール数、メンバーシップ関数のパラメータ調整を自動的に行う。

3.3 シミュレーション結果

図5に評価関数の変化を示す。太点線が局所改善型GA演算による結果、実線がLocal Hill Climbing手法[8]による結果、細点線が通常のGAによる結果である。図5は各種法に関して、10回シミュレーションを行ったエリートの平均を示してある。

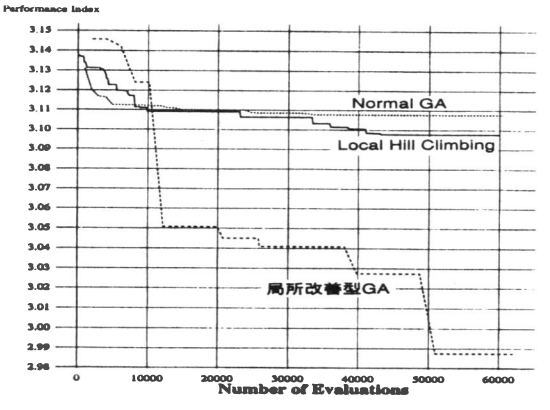


図5　評価値の変化

Local Hill Climbing 手法は1染色体に突然変異を数度逐次施すことにより局所解に陥ることを防ぐものである。Local Hill Climbing手法と本手法との違いは、突然変異を染色体レベルで施すか、ルール単位で施すかおよび、逐次行うか一度に行うかの違いである。このように、1世代における突然変異の回数が異なるので、各種法の比較基準として、評価の回数をとった。すなわち、図5の横軸は評価回数である。表1にシミュレーション条件を示す。なお、突然変異および淘汰の確率は各手法ともそれぞれ、0.3, 0.3とした。

表1 シミュレーション条件

	個体数	1染色体の突然変異回数
Normal GA	100	1
Local Hill Climbing	100	10
局所改善型GA	10	5 × Rule

図からわかるように本手法が最も良い結果を示している。本コーディングのように、染色体の各部分が部分として明確に意味を持ち、部分同士の相関がそれほどないような場合には、筆者らが提案してきたGAが効果的である。

表2に従来の制御法による評価値を示す。PASSIVEは減衰係数固定の場合、ON-OFFはKarnoppのオリジナルの制御ルール、Fuzzyは図4で示されるファジィ化されたKarnoppの制御ルールによる制御結果である。また、表3には各GAによる制御結果を示す。

表2 従来法による制御結果

	PASSIVE	ON-OFF	Fuzzy
評価値	3.689	3.272	3.259

表3 各GAによる制御結果

	Normal GA	Local H.C	本手法
評価値	3.107	3.097	2.987

評価関数にルール数の項を入れなかった場合、最終的に得られたルール数の平均は31であったが、ルール数を評価関数として入れた場合、平均11のルールで同等の制御性能を得ることができた。

4.まとめ

GAのもつルール発見機能に着目した、ファジィ制御系の設計法を提案した。本手法は制御入力変数が多数あり、それらの関係の把握が困難な場合に有効である。セミアクティブサスペンションの制御系設計に本手法を適用しその有効性を示した。

今後は、評価関数についての検討および、GAにより得られたファジィルールについて検討していく予定である。

参考文献

[1] 田中一男：”アドバンストファジィ制御”、共立出版株式会社、1994

[2] 林、野村、若見：”ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルールの獲得”、日本ファジィ学会誌、Vol.2, No.4, pp.585/597,1990

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

[4] C.L.Karr: "Design of an Adaptive Fuzzy Logic Controller Using a Genetic Algorithm", Proc. of the 4th. Int'l Conf. on Genetic Algorithms, pp.450/457, 1992

[5] 高濱、宮本、小倉、中村：”遺伝アルゴリズムによるファジィ制御規則の学習”、第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.241/244, 1992

[6]T. Furuhashi, K. Nakaoka, Y. Uchikawa: " A New Approach to Genetic Based Machine Learning and an Efficient finding of Fuzzy Rules", Proc. of the 1994 IEEE World Wisemen/women Workshop of Fuzzy Logic and Neural Networks/Genetic Algorithms, pp.114-122, 1994

[7] D. Karnopp, et al.:"Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", ASME J. of Engineering for Industry, Vol. 96, No.2, pp.619/626, 1974

[8] H. Muehlenbein: "Parallel Genetic Algorithms, Population Genetics and Combinatorial Optimization", Proc. of ICGA'89, pp. 416/421, 1989

【問い合わせ先】

〒464-01 名古屋市千種区不老町
名古屋大学工学部電子情報学科
内川研究室
橋山 智訓
Tel: 052-789-2793
Fax:052-789-3166
email: tom@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

WD5-2

ウイルス進化論に基づく遺伝的アルゴリズム

(第2報，組合わせ最適化問題への適用)

Genetic Algorithm Based on Virus Hypothesis of Evolution

(2nd Report, Application to Combinatorial Optimization Problems)

久保田 直行　福田 敏男　下島 康嗣

Naoyuki Kubota　Toshio Fukuda　Koji Shimojima

名古屋大学大学院

Nagoya University

Abstract- This paper deals with the genetic algorithm based on virus hypothesis of evolution. The genetic algorithm mainly simulates the Darwin's theory of evolution. However, a variety of hypotheses concerning evolution have been proposed. Therefore, as the theory without Darwinism, this paper proposes virus hypothesis of evolution is introduced into genetic algorithm. The virus genetic algorithm is composed of crossover, mutation, selection, and virus operators, which are reverse transcription, replication, and transduction. The virus genetic algorithm is applied to traveling salesman problem.

1　はじめに

遺伝的アルゴリズム（genetic algorithm; GA）[1]は，基本的にネオ・ダーウィニズム[2]による進化説を模倣しており，進化のプロセスを簡単化し，自然選択による適者生存と交叉と突然変異による環境適応に基づく最適化法である．しかしながら，ネオ・ダーウィニズム以外にも現在に至るまで様々な進化説が提案されており，中立進化説，断続平衡説，今西進化論，連続共生説，ウイルス進化論等が知られている[2]．本研究では，ウイルスを媒体とした遺伝子の水平移動による進化を主軸としたウイルス進化論に基づくGAを提案してきた[3]．これは，ウイルスが宿主個体間において遺伝子の記号列を伝搬するモデルであり，ウイルスを媒体とした転写，逆転写による進化を模倣したものである．具体的には部分的な遺伝子列を持つウイルス群を，GAと同様，選択操作を用いて増加させていた．しかし，これは，各ウイルスが感染を一世代あたり，一度しか行えないモデルなので，ウイルスの持つ急激な水平伝播をうまく表すことができなかった．そこで，今回は，水平伝播をうまく行うために，ウイルスの能力に応じた感染回数を調整するモデルを提案する．

2　ウイルス進化論に基づく遺伝的アルゴリズム

2．1　ウイルス進化論の概要

まず，他の進化論と全く異としていることは，他の進化論では遺伝子は親から子へ垂直に移動することのみを考えていたが，ウイルス進化説では，遺伝子の水平移動を主軸にしているという点である．また，水平移動した遺伝子は，その子孫へ受け継がれることがわかっている．従って，ウイルス進化論では，ウイルス感染による生物の個体間の遺伝子の水平移動とその子孫への遺伝子の垂直移動が進化のプロセスとなっている．

2．2　ウイルス感染操作

まず，ウイルスの感染操作として，ウイルスの持つ機能を全宿主個体間において遺伝子の水平移動が可能であることとする．すなわち，ウイルスは，ある宿主個体の遺伝子列を取込み，それを他の宿主個体の遺伝子に逆転写するものとする．ここで用いるウイルスの機能を以下のようにする．

- 逆転写（Reverse transcription operator）：ウイルスのもつ遺伝子列を宿主個体に転写する操作．
- 導入（transduction operator）：基本的には，宿主個体から，遺伝子列を取込む操作．
- 複製（replication operator）：ウイルスの持つ遺伝子列を宿主個体を用いてウイルスの複製を行う操作．

以上のような機能を持つウイルスを考え，このウイルスが宿主個体群に感染する手順をFig.1に示す．まず，ウイルスは，感染度$infection_{i,j}$を持ち，逆転写することによって得られる宿主個体の適応度の変化量で表し，

$$infection_{i,j} = fitness_j' - fitness_j \qquad (1)$$

とする．各ウイルスは，まず，宿主をランダムに選択し，宿主の遺伝子列に各ウイルスの遺伝子列を逆転写する．次に，感染

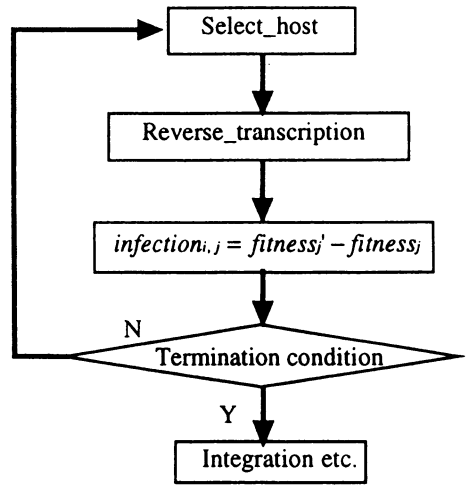


Fig.1 Procedure of virus infection

度が正，すなわち，逆転写することで宿主の適応度が上がれば，このウイルスを感染させる．そうでないとき，ウイルスの適応のため，ある決められた確率でウイルスへの導入等を行う．このようにしてウイルスが遺伝子列を運搬し，複製を行うことにより，個体の適応度が高くなるような遺伝子列を逆転写していく．また，各ウイルスは，生命力を持ち，生命力が0になれば，全く新しい宿主を選び，導入により新しい遺伝子列を生成するものとする．生命力$life_{i,t}$は，rを1世代ごとの生命力減衰率とすると，以下のようになる．

$$life_{i,t+1} = r \times life_{i,t} + \sum_{j=1}^{n} infection_{i,j} \qquad (2)$$

2．3　ウイルス進化論型遺伝的アルゴリズムの枠組

ここでは，ウイルス感染のメカニズムを導入するために，定常状態GA（steady state GA；SSGA）[4]を用いることにする．これは，連続世代モデルのGAで，1世代において交叉が一度だけ行われ，個体群中の2個体と入替えるものである．このSSGAに対し，数世代に一度，ウイルス感染を行うことによりゆるやかな共進化を行うウイルスモデル（VSSGA）を提案する．VSSGAのアルゴリズムを簡単に示す．

```
begin
    Initialization;
    repeat
        for i:=1 to Generation_gap do
            begin
                Crossover;
                Mutation;
                Selection;
            end;
        Virus_infection;
    until Termination_condition != true;
end.
```

まず，通常のSSGAが行われ，何世代か後に，ウイルス感染が行われる．ウイルスは，宿主個体群の進化とともに，個体長が伸びていくものとする．ウイルスにより組込まれた個体の遺伝子列を他の個体に伝搬し逆転写が行われる．

3．数値シミュレーション

本稿では，数値シミュレーション例として，3次元格子型巡回セールスマン問題（3D-latticeTSP）に適用し，27都市と64都市の最短経路を求める問題に適用した．また，シミュレーションの比較として，ここでは，SSGAとウイルス感染を導入したVSSGAを用いる．適応度は，巡回する経路長とし，これを最小化することを目的とする．遺伝的操作として，交叉は，サイクル交叉もしくはPMXを用い，突然変異は，他の遺伝子座の遺伝子と入れ替えるものとする．さらに，逆位を用いることとする．また，SSGAとVSSGAにおいて個体の入れ替え方式は最小適応度除去（DLF）法を用い，個体群の中で最小の適応度を持つ個体を入れ替えるものとする．

Table 1 Simulation results of 10 trials

		SSGA	VSSGA
27cities	Min_route	688	688
	Mean_route	770	714
	Max_route	872	749
64cities	Min_route	1720	1620
	Mean_route	1828	1740
	Max_route	1926	1850

数値シミュレーション結果をFig.2及びTable1に示す．VSSGAは，SSGAよりも良好な解が得られている．これは，ウイルスがスキーマを宿主個体群に伝播することによる宿主個体群とウイルス群の相互作用的な共進化によるものと考えられる．

4．おわりに

本稿では，水平伝播を有効に行えるウイルス進化論に基づく遺伝的アルゴリズムを提案した．さらに，TSPに適用し，簡単な数値シミュレーションを行い，他の手法と比較し，良好な解を得ることができること示した．今後の課題として，VSSGAでのスキーマ理論の拡張と収束性に関して検討を行う必要があり，また，騙し問題等へ適用することがあげられる．

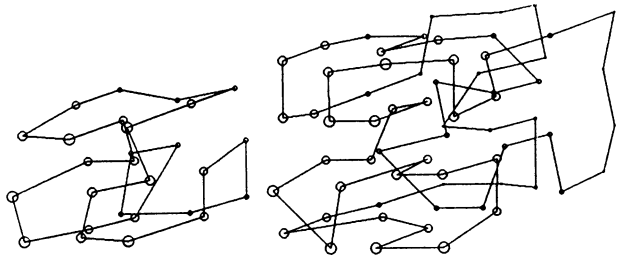
参考文献

[1]D.E.Goldberg：Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison Wesley (1989)

[2]中原，佐川：ウイルス進化論，森流社(1989)

[3]久保田他：ウイルス進化論に基づく遺伝的アルゴリズム，第6回自律分散システムシンポジウム予稿集，215/218 (1995)

[4]G.Syswerda：A Study Reproduction in Generational and Steady-State Genetic Algorithms, Foundations of Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann (1991)



(a) 27 cities　　(b) 64cities

Fig.2 Simulation result of TSP

問い合わせ先

〒464-01　名古屋市千種区不老町

名古屋大学大学院　マイクロシステム工学専攻　福田研究室

久保田直行

Tel：(052)789-4481　Fax：(052)789-3115

E-mail：Fukuda@mein.nagoya-u.ac.jp

WD5-3

クラシファイアシステムの人工生命への応用

An Application of Classifier System to Artifitial Life

生井　仁　　向殿　政男
Hitoshi NAMAI　　Masao MUKAIDONO

明治大学　理工学部　情報科学科
Dept. of Computer Science, Meiji UNIV.

Abstract

Recently, many systems used GA are succeeded. Classifier Systems applied GA appear in those systems. So we develop NMSCS(Nature Model Simulate Classifier System) applied Classifier System to Artifitial Life, try to learn the law of the jungle, the storong prey upon the weak, by changing environment, and verify how units behave in model as well as animals in nature.We report the results in this paper.

1．はじめに

今までの推論等に用いられてきたif_then形式で表わされたルール，はその形式からも分かるように条件部と実行部が完全な1：1対応であり，この形式で全ての場合を網羅するにはそのルールの数は膨大なものになる．また，この形式では途中で新しくルールを作ったり，ルールを変更したりすることが難しい．

そこで，このif_then形式で表わされたルールをこれから述べるクラシファイアを用いて表わすと，それをＧＡ等を用いてルール自体，またはルール集合自体を変化させていき，より良いルールに改善したり，新しいルールを作ったりということが可能になる．

今回は，クラシファイアシステムの人工生命における学習への応用について述べる．

2．クラシファイアシステム

2.1　クラシファイア

クラシファイアシステムはいくつものクラシファイア（ルール）から成り立っている．それぞれのクラシファイアは図1のような形式を持つ．まず条件部は＜0,1,#＞，行動部は＜0,1＞で構成されている．ここで#とは（don't care）である．

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
###	000	#00	000	000	0#1	010	1011	10	0
条件部							行動部		

図1．クラシファイアの例

クラシファイアの大きな特徴は#というオールマイティな情報の導入であるが，この#に着目すると，#の数が多いクラシファイアはどういう条件にも当てはまる，汎用性の高いルールと見なすことができる．逆に#の数が少ないクラシファイアはある特定の条件にのみ当てはまる，局所性の高いルールと見なすことができる．これらの2種類のルールを使い分けることによってシステムをより効率良く動かすことができる．

また，条件部に#を導入したということを除けば，いわゆるＧＡのルールと全く同じであるから，これらのクラシファイアを互いに交叉させることによって，新しいルールを簡単に生成することもできる．

さらにクラシファイアには有用度と呼ばれる評価基準がついている．これは，ＧＡでいうところの各ルールの評価関数による評価値である．“競り”という特殊な操作を行うことにより，この有用度をうまく制御し，有用度の高い，より良いクラシファイアを残していく．

2.2　クラシファイアシステムの基本構成

クラシファイアシステムは図2に示すように大きく分けて次の3つの要素からなる．

1．実行システム（performance system）
2．信頼値分配システム（credit assignment system）
3．ルール発見システム（rule-discovery system）

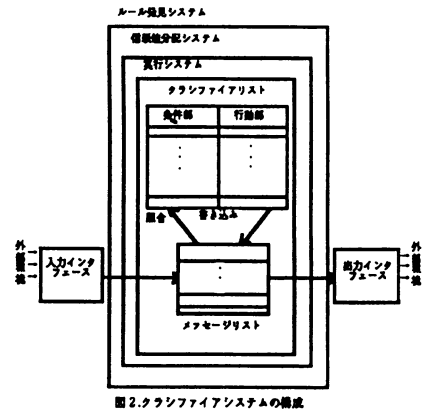


図2.クラシファイアシステムの構成

2.2.1　実行システム

実行システムは一般のエキスパートシステムに近いもので，外部からの入力メッセージや内部メッセージによってクラシファイアが発火し，認識ー行動サイクルが繰り返される．図2を見ればわかるように，実行システムはさらに次の4つの要素から成り立っている．

1：入力インタフェース（あるいはディテクタ）
2：メッセージリスト
3：クラシファイアリスト
4：出力インタフェース（あるいはイフェクタ）

2．2．2　信頼値分配システム

信頼値分配システムは実行システムの実行経過につれて，それぞれのクラシファイアの有用度を評価してそれらを調整する部分である．有用度は，一番最初に初期値が与えられて，それぞれの実行するクラシファイアに関して評価関数を用いて，その評価値を求め，それに応じて初期値からある量を増減さ　せる．ここで，評価関数をどのように設計するかにより，それぞれのクラシファイアが早く収束したり，なかなか収束しなかったりする．また，この設計が悪いと，思うように動作しないこともある．しかし，一般に評価関数というのは簡単に見つかるものではない．ここでは，普通に評価関数を用いるものと，競りと呼ばれる概念を用いて評価関数と同じ動作を行うようにしているものとを併用することによって，クラシファイアの収束の効率化を図っている．

2．2．3　ルール発見システム

ルール発見システムは，信頼値分配システムで決定された各クラシファイアの有用度をもとに，ＧＡ操作を行い，より良いクラシファイアを生成する部分である．ここで重要なのは，ＧＡ操作における交叉の仕方とその位置である．交叉の仕方には一点交叉，多点交叉，一様交叉等があげられるが，クラシファイアシステムでは条件部と行動部の境における一点交叉が普通であろう．というのは，普通ＧＡにおいて交叉させる場合，意味のあるものどうしで行うことが多く，またその方が条件部は＜０，１，＃＞の３つの要素，行動部は＜０，１＞の２つの要素と，交叉しやすいという利点もある．

そして，これら３つの要素が複合して動作することにより，有用なクラシファイアどうしを組み合わせて，さらに有用なクラシファイアを生成したり，使われないクラシファイアを自然淘汰したりすることによって，外界によく適用するクラシファイア集合へと変化させていくことができる．

3．人工生命への応用

3．1　ＮＭＳＣＳの概要

ＮＭＳＣＳ(Nature Model Simulate Classifier System)は人工生命の研究分野の中では進化のモデルに相当する．自然界ではいろいろな動物や植物等が多数存在し，それらの中では激しい生存競争が繰り広げられている．そして，それぞれの個体はその生存競争に勝ち残るために親や仲間から教えてもらったり，自分自身で学習したりする．

ＮＭＳＣＳはこのような自然界の振る舞いを，コンピュータ上でうまくシミュレートできるかどうかを検証するためのシステムである．それぞれの個体は一定個のクラシファイアを持っていて，その１つ１つのクラシファイアにはその時点での環境（条件部）と次の時点での行動（行動部）が書かれている．ＮＭＳＣＳの構成を図３に示し，システムの動作について箇条書に述べていく．

1.マスターシステムは，あるステップｔにおける環境(自分や相手の位置や距離，残り体力等）を環境システムから読み込み，それをクラシファイアシステムに送る．
2.クラシファイアシステムは，マスターシステムから送られてきた情報を＜０，１＞のビット列に変換し，それをメッセージとしてクラシファイアセット中のクラシファイアとマッチングを行う．そして，メッセージにマッチしたクラシファイア同士で競りを行い，有用度を変更する．その後ルーレット選択により勝利したクラシファイアの行動部（次ステップｔ＋１における力）を実際の数値に変換してマスターシステムに送る．
3.マスターシステムは，クラシファイアシステムから送られてきた力をもとに，次ステップｔ＋１での物理変数（自分や相手の位置や距離，残り体力等）をニュートンの運動方程式により求める．そしてそれらを環境システムに送る．
4.環境システムでは，マスターシステムから送られてきた情報をもとに現在位置をモニター上に表示する．また，同時に生死判定や中間報酬の計算等もここで行う．
5.一定周期ごとに，それぞれの個体のもつクラシファイアセットに対してＧＡ操作を行い，クラシファイアの淘汰を行う．

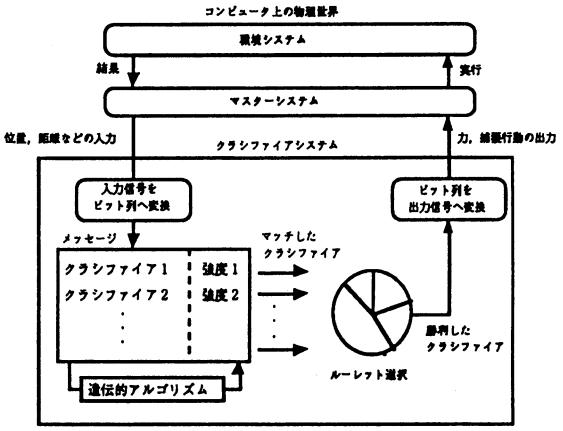


図３．ＮＭＳＣＳの構成

3．2　ＮＭＳＣＳの内容

3．2．1　１：１モード

このモードでは出現するユニットを１つずつに限定することによって，１：１の対戦を行い，それぞれの持つ個々のクラシファイア自体を改善していく．そして，対戦する種類を変えたり，同じ種類の対戦でもクラシファイアの初期の内容を変えたりすることによって，それぞれに収束した多数のユニットを生成する．ここで生成されたユニットが１：多モードで使用されることになる．

ここでの規則は５０ステップを１セットとし，上位のユニットは下位のユニットを捕まえることが，下位のユニットは１セット中上位のユニットから逃げ切ることが目的である．それぞれのユニットは目的を達成すると，報酬をもらうことができる．また，それぞれのユニットは最初は同じ体力をもっているが，動作に応じて減少する．体力が０になると死んでしまい，生き残ったほうが勝ちとする．体力の消耗計算では，自分の速度と質量の積に比例した体力を消費する．また，フィールドは５１２×５１２の閉じた世界であり，フィールドの壁に衝突した場合は，運動量に比例した体力を消費する．

3．2．2　１：多モード

このモードでは１：１モードで生成された複数のユニットを用いてそれぞれのユニットの個々のクラシファイア自体をさらに改善していく．具体的には敵との相対距離や相

対速度等のパラメーターを改善していく．また視野という概念を用いることによって，さらに自然界らしい設定にしたときどのように変化するのかについても観察する．

ここでの規則は１：１モードと殆ど同じだが，１セットの終了条件が５０ステップが終了した時と，フィールド上にユニットが全ていなくなった時の他に，同一種類のユニットのみしかフィールド上に残っていない時が加わる．

3．3　システムに用いられるクラシファイアの構成

クラシファイアは条件部は＜０，１，＃＞で，行動部は＜０，１＞で構成されている．

if　＜メッセージ＝条件部＞　then　＜行動部＞

まず，環境システムから物理変数の入力，即ち，自分とその他のユニットの座標，距離残り体力は，メッセージ，即ち，＜０，１＞の形に変換される．各ユニットのクラシファイアの具体例を図４に，その構成内容を表１に示す．

条件部

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
01#	110	##1	001	#0#	111	#00	1##	101	###	000

行動部

l	m
101	001

図4　ユニットのクラシファイアの内容

条件部	a	自分のｘ座標
	b	自分のｙ座標
	c	自分の残り体力
	d	敵（上位）との相対距離
	e	敵（上位）との相対距離の方向
	f	敵（下位）との相対距離
	g	敵（下位）との相対距離の方向
	h	味方との相対距離
	i	味方との相対距離の方向
	j	１ステップ前の力の大きさ
	k	１ステップ前の力の方向
行動部	l	移動のための力の大きさ
	m	移動のための力の方向

表１　ユニットのクラシファイアの内容

この他にも相対速度の大きさや相対速度の方向，捕獲行動の有無を示すフラグ等が考えられるが，あまりメッセージの量を増やすと１ユニットの持つべきクラシファイアの数や，メモリ，競りに要する計算量などが膨大になり時間がかかるのでできるだけ必要なものだけにした．このように物理変数というプリミティブなレベルで行動戦略を記述し，「どこそこへ行け」というようなトップダウン的なルール表現はしない．

次に個々のパラメータついて述べる．ａ～ｃは絶対座標表現を段階別評価したものであり，ｄ～ｍは自分を中心とした相対座標表現を段階別評価したものである．

そして各メッセージは３ビットで，大体等間隔に物理変数を領域分けする．しかし，表２を見れば分かるように，敵や味方の相対距離のメッセージについては敵や味方との距離が小さくなればなるほど，細かいセンシングをするようにしてある．これは敵や味方に近づいたときのほうが，離れているときよりも，緻密な戦略が必要になるだろうと想像されるからである．

変換値	位置座標	残り体力	距離^2
000	0～63	0～59	0
001	64～127	60～119	1～25
010	128～191	120～179	26～100
011	192～255	180～239	101～225
100	256～319	240～299	226～400
101	320～383	300～359	401～900
110	384～447	360～419	901～1600
111	448～511	420～479	1601～2500

表２　物理的値の変換テーブル

敵や味方の相対距離の方向については，図５に示してあるように自分を中心とした１周３６０°の円を８等分に分割する．そして実際の方向がこの８つの方向と一致しない場合には，それらのうちで近いほうを取ることにする．また敵または味方が自分と同一の場所にいる時，即ち相対距離の方向が中心点の場合，０００に属すると便宜上決めておくことにする．また，行動部の力の方向も同じようになっているが，ここでの「方向」とは，敵や味方が環境システムに出力する力の方向であり，物理的慣性のために必ずしもその「方向」に行けるとは限らない．

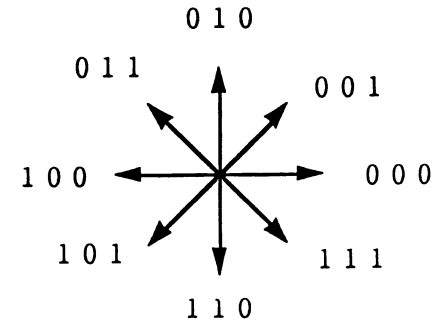


図５　方向の変換テーブル

4．結果

4．1　下位ユニットの捕獲

初めのうちは，あっちへ行ったり，こっちへ行ったりと勝手に動き周り体力を使い果たして死んでしまうというケースが多かった．

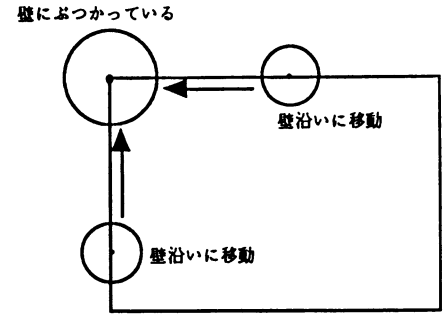


図６．下位ユニットの捕獲　１

しかし，さらにステップ数が増えていくと，角にぶつからないで動くような行動を覚え始めた．角に近くなると反対側の方向に力をかけたり，方向を少しずつ変えていったりする

ようになった．そして，ついに角でなくても下位ユニットを捕獲することに成功した．

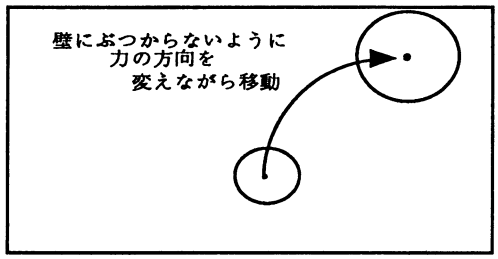


図７　下位ユニットの捕獲　２

４．２　視野の学習

視野の学習については，これはなかなか学習ができなかった．視野の範囲がフィールドに対して多少狭かったようである．また，各ユニットのスピードが初めのうちは遅いので初期段階のうちに，視野範囲に入っていれば，数ステップは視野範囲に入っているため，学習を行うことができるが，だんだん各ユニットスピードが速くなってきて，あるユニットが視野に入っても次のステップでは視野から外れてしまうことが多くなり学習ができなくなる．

またユニットが複数いるために，現在のステップで対象としているユニットと，次ステップで対象としているユニットが異なってしまうということがおこり，うまく下位ユニットを捕まえられないということが起こった．（図８参照）

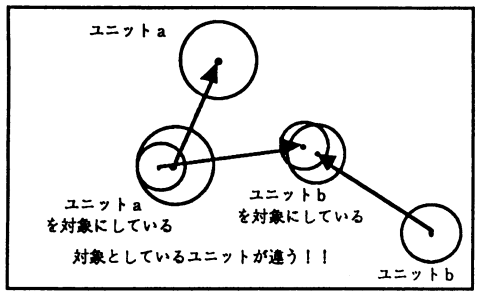


図８．視野範囲

しかし逆にユニットが複数いるため，偶然捕まえるということもかなりあった．これらにより，１：１モードのときのクラシファイアセットとはかなり変わった．しかし，徐々に学習を行って，最終的には捕獲する回数は１：１モードの時よりは多くなるようになった．

４．３　ループ

捕獲の学習を行っている際，いくつかのクラシファイアだけが，非常に有用度が高くなった．そこでこれらのクラシファイアについて調べて見たところ，それらのクラシファイアがそれぞれ次のようなループを作っていた．

それはある場所にいたら力を０にするというもので，このような静止行動をとると，位置の変化も力やスピードの変化もなく，次のステップにいく．次のステップにいっても，環境は変化しないからまた同じクラシファイアが選ばれ，１セット中そのクラシファイアのみが選ばれ，そのクラシファイアの有用度が一気に上昇するのである．

４．４　マッチするルールの枯渇状態

クラシファイアシステムがきちんと動くための最低条件は，“クラシファイアリストの中にその時点での外部の環境条件にマッチしたルールが必ず存在しなければならない”ということである．この条件を満たさないと，次の時点で行動ができずに行きづまって，システムが途中で止まってしまったり，暴走したりする恐れがある．この状態をマッチするルールの枯渇状態という．

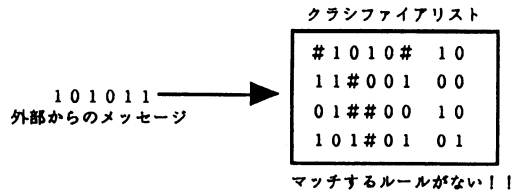


図９．マッチするルールの枯渇化

５．まとめ

＜０，１，＃＞からなるビット列と有用度から成り立つクラシファイアという新しい概念を用いてif_thenルールを変換し，このシステムを人工生命に応用し，自然界における生存競争や食物連鎖をシミュレートするNMSCS(Nature Model Simulate Classifier System)を実際に構築し，それがどのように振る舞うのかについて見実験した．結果としては学習はきちんと行うが，ループや有用度の限界点，マッチするルールの枯渇状態という新しい問題も出てきた．

本論文で述べたクラシファイアシステムの欠点をどのようにして改善していくかが今後の課題である．

参考文献

[1] 人工生命研究会編，人工生命，1994.
[2] 星野力，人工生命の夢と悩み，裳華房，1994.
[3] 北野宏明，遺伝的アルゴリズム産業図書，1994.
[4] 樋口哲也，北野宏明，情報処理学会誌，遺伝的アルゴリズムとその応用，Vol.34 No.7, pp.871-882, July 1993.
[5] 星野力，共立出版，はやわかりシステムの世界，1993.

問い合わせ先

〒214 神奈川県川崎市東三田1-1-1
明治大学大学院 理工学部研究科 基礎理工学専攻
生井仁　E-mail: namai@cs.meiji.ac.jp
Tel: (044)932-7442, Fax: (044)934-7912

WE1-1

高い確率で最適解を得るためのホップフィールド・エネルギーに対する最急降下法

A Simple Steepest Descent Method for Minimizing Hopfield Energy to Obtain Solution of the TSP with Reasonable Certainty

橘　佳孝　市橋　秀友　○李　九炯　三好　哲也

Yoshitaka TACHIBANA Hidetomo ICHIHASHI Gu Hyeong LEE Tetsuya MIYOSHI

大阪府立大学工学部

College of Engineering,University of Osaka Prefecture

Abstract:An effective algorithm for the Hopfield neural network model is proposed through its application to the traveling salesman problem. By the estimation of local minimum inside a hypercube of solution space, a threshold value for deciding integer valued solution can be properly chosen. An optimum solution of the TSP is obtained with reasonable certainty.

1．はじめに

ホップフィールドニューラルネットワークモデル[1,2]による組合せ最適化について多くの応用例が報告されてきたが，解を得る確率の低さと，解の質においてその有効性に対する疑問も指摘されている．一方，回路網のダイナミクスに関する理論的研究も行われており，多重一次形式での解の安定性 [3,4]，非整数解の出現を抑制する項を与えた場合の解の安定性[5]，解の安定条件と非解の不安定条件[6]などが示されている．これらのいずれの研究も解空間の超立方体の頂点における安定性がもとになっている．現実に一般の二次形式エネルギー関数の極小値は超立方体の内部にあることがほとんどであるので，本研究では従来の考え方を少し進め，内部の極小値の位置をうまく操作することによって質の良い解を得るアルゴリズムの改善案を提案する．

最近ＴＳＰへの応用として，ホップフィールドモデルをカオス力学系に拡張するための負の自己結合を用いた研究[7,8]や，最急降下法と乱数を用いた研究[9]が報告されている．本研究はホップフィールドエネルギーを目的関数とする連続変数系の数理計画問題の最急降下法のみによる解法アルゴリズの改善案を提案したものであり，数値実験によりＴＳＰの最適解が高い確率で得られることを示す．

2．ホップフィールドニューラルネットワークによるＴＳＰの解法

ホップフィールドニューラルネットワークは次のような常微分方程式で記述される[1]．

$$\frac{du_i}{dt}=\sum_j w_{ij}v_j+h_i \qquad (w_{ij}=w_{ji})$$

$$v_i=s(u_i)=\frac{1}{2}\left(1+\tanh\frac{u_i}{x_0}\right), \quad i=1,\cdots,m$$

ただし，u_i,v_iおよびh_iはそれぞれニューロンiの内部状態，出力，およびしきい値，w_{ij}はニューロンjからニューロンiへの結合荷重，x_0は定数でニューロン間結合は対称結合である．なおニューロンの出力値は$v_i\in[0,1]$であり，N個のニューロンからなる 回路網の状態は $v=(v_1,\cdots,v_N)\in[0,1]$，すなわち単位超立方体の点で表せる．より厳密には，超立方体の内部の点$V_0\in[0,1]^N$を初期値として回路網を動作させると，漸近安定な頂点あるいは内部の極小点に収束する．このニューラルネットのエネルギーEを

$$E=-\frac{1}{2}\sum_i\sum_j w_{ij}v_iv_j-\sum_i h_iv_i$$

と定義すると，Eは時間の変化とともに必ず減少し，極小となる安定平衡点に収束する．

ＴＳＰはｎ都市を巡回する経路のうち各都市を１度だけ通るという制約のもとで最短の経路を求める組合せ最適化問題である．ＴＳＰを解くためのエネルギー関数として次のような式を用いる．

$$\begin{aligned}E(v)=&\frac{1}{2}\sum_i\left(\sum_k v_{ik}-1\right)^2+\frac{1}{2}\sum_k\left(\sum_i v_{ik}-1\right)^2\\&+\frac{A}{2}\sum_i\sum_k v_{ik}(1-v_{ik})\\&+\frac{B}{2}\sum_i\sum_j\sum_k d_{ij}v_{ik}\left(v_{jk-1}+v_{jk+1}\right)\end{aligned} \qquad (1)$$

ここで，i,jは都市，kは訪問順，v_{ik}は都市iをk番目に通ることを表すニューロンの出力，d_{ij}は都市i,j間の距離，A,Bは定数である．また，第１項は各都市を１度だけ訪問すること，第２項は同時には一つの都市しか訪問できないという制約条件を表す．第３項は非整数解の出現を制約する項で，第４項は巡回経路長を表す項である．

本研究では，式(1)のＴＳＰのエネルギー関数を連続変数系の数理計画問題として最急降下法に基づいて学習する．その学習則を次のように定める．

$$u_{ik}^{NEW}=u_{ik}^{OLD}-\tau\frac{\partial E(v)}{\partial u_{ik}}$$

$$\frac{\partial E(v)}{\partial u_{ik}}=\frac{\partial E(v)}{\partial v_{ik}}\cdot\frac{\partial v_{ik}}{\partial u_{ik}}$$

$$\frac{\partial E(v)}{\partial u_{ik}}=\left(\sum_m v_{im}-1\right)+\left(\sum_n v_{nk}-1\right)$$
$$+A\left(\frac{1}{2}-v_{ik}\right)+B\sum_j d_{ij}\left(v_{jk-1}+v_{jk+1}\right)$$

ただし，$v_{ik}=s(u_{ik})$で，τは学習係数である．また

$$\frac{\partial v_{ik}}{\partial u_{ik}}=1.$$

と簡略化する．

式(1)のエネルギー関数のすべてのv_{ik}が0または1で第1,2項が0となる超立方体の頂点$V=(V_{11},\cdots,V_{NN})\in[0,1]^{N\times N}$に収束するとき，それをＴＳＰの解（実行可能解）と呼ぶ．式(1)で$A=2$とすると多重一次形式となりいずれかの頂点に収束することが知られている．しかし，経験的に多重一次形式のエネルギー関数は一般のエネルギー関数に比べてよい解が得にくいとされている．また，$A<2$のとき式(1)は多重一次形式にはならず，超立方体の内部の極小点に収束する．そこで本研究では，判定しきい値(θ_L,θ_U)を設定し，学習中にv_{ik}がθ_U以上になると１に，θ_L以下になると０に固定する．

判定しきい値を決める目安を求めるために，解に対応する超立方体の頂点$V\in[0,1]^{N\times N}$と，それに隣接する頂点V'の間におけるエネルギー曲面について考える．

①解に対応する頂点Vにおいて$V_{am}=1$であるとき，$V_{bm-1}=V_{cm+1}=1$となるｂとｃが存在し，$v_{am}\in[0,1]$について，

$$\frac{\partial E}{\partial v_{am}}=2(v_{am}-1)+A\left(\frac{1}{2}-v_{am}\right)+B(d_{ab}+d_{ac})$$

となるので，

$$A<4-2B(d_{ab}+d_{ac})$$

ならば

$$\frac{\partial E}{\partial v_{am}}\Big|_{v_{am}=0}=-2+\frac{1}{2}A+B(d_{ab}+d_{ac})<0.$$

となり，

$$A<2B(d_{ab}+d_{ac})$$

ならば，

$$\frac{\partial E}{\partial v_{am}}\Big|_{v_{am}=1}=-\frac{1}{2}A+B(d_{ab}+d_{ac})>0.$$

となる．したがってAが正の小さな値であればエネルギーEのv_{am}についての極小点は区間 (0,1)の内部に存在する．極小点におけるv_{am}は，

$$v_{am}=\frac{1}{2-A}\left\{2-\frac{1}{2}A-B(d_{ab}+d_{ac})\right\}.$$

となる．

極小点において

$$\frac{dv_{am}}{dA}=\frac{1-B(d_{ab}+d_{ac})}{(2-A)^2}$$

であるので，$1>B(d_{ab}+d_{ac})$ であればAを大きくするとEの極小点が右に移動する．同様に，$A<2$のときBを小さくしてもEの極小点は右に移動する．$A>2B(d_{ab}+d_{ac})$となると，Eのv_{am}に関する極小点は$V_{am}=1$の右にくるが，$v_{am}=s(u_{am})$ であるので極小点に到達できず，シグモイド関数による強い非線形性が現われる．また式(1)よりBを小さくすると巡回ルートの距離を最小化できない．

②解に対応する頂点Vにおいて$V_{am}=0$であるとき，$v_{am}\in[0,1]$ について，

$$\frac{\partial E}{\partial v_{am}}=2v_{am}+A\left(\frac{1}{2}-v_{am}\right)+B(d_{ab}+d_{ac}),$$

となるので，

$$\frac{\partial E}{\partial v_{am}}\Big|_{v_{am}=0}=\frac{1}{2}A+B(d_{ab}+d_{ac})>0.$$

となる．また

$$A<4+2B(d_{ab}+d_{ac})$$

ならば

$$\frac{\partial E}{\partial v_{am}}\Big|_{v_{am}=1}=2-\frac{1}{2}A+B(d_{ab}+d_{ac})>0.$$

となる．したがって$A<2$のときEの極小点は原点の左にある．

極小点におけるv_{am}は

$$v_{am}=-\frac{1}{2-A}\left\{\frac{1}{2}A+B(d_{ab}+d_{ac})\right\}.$$

であるので，AおよびBを大きくすると極小点はさらに左に移動するが，$v_{am}=s(u_{am})$ より極小値に到達できず，シグモイド関数の強い非線形性が現われる．

①，②の考察より，v_{am}についての極小点ができるだけ超立方体の頂点の近くになるようにするには正数A,Bを①，②の条件を満たす小さな値に選ぶと良いと推測される．

以上からパラメータA,Bの値を定め，①の場合において

（判定しきい値）＜（極小点）

となるように判定しきい値を設定することによりv_{ik}が超立方体の内部の極小点に収束する場合もＴＳＰの解を得ることが期待できる．

３．ＴＳＰの数値実験

本研究では，図１の(i)-(vi)の１０都市問題とホップフィールドモデルではほとんど正解が得られないとされている(vii)と(viii)の２重円（２４都市）問題を扱う．ただし，都市配置はすべて$[0,1]\times[0,1]$の内部にあるものとする．そして，予備的な実験から，$x_0=1.0,\theta=(0.01,0.70)$とし，$u_{ik}$の初期値を$\left[-1.0\times10^{-2},1.0\times10^{-2}\right]$内の一様乱数で設定した．

図１に数値実験に使用した都市配置を示す．ここで，都市配置(i)はホップフィールドとタンクのオリジナルデータ[2]で，都市配置(ii)-（vi）は野沢のデータ[11]である．また，２重円問題において都市配置(vii)の内円の半径は0.45で外円の半径はいずれも0.50である．各都市を結ぶ実線が最短経路を表している．表１に１０都市問題(i)の場合で係数Aの値を変化させたときの各々１００回の試行結果を示す．ただし，secondとthirdは２番目に短い経路と３番目に短い経路が求まった回数，実行可能解は解を得た

回数でエーラレートは各係数の値で乱数を用いて１００回の試行を行ったときの次式の平均値である．

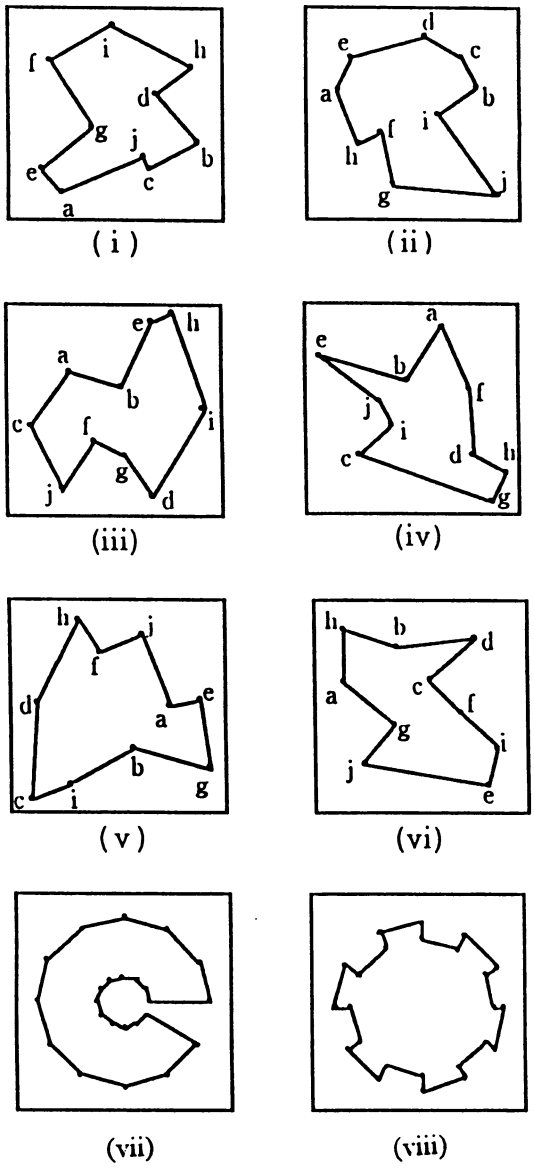


図1.都市配置
((i)-(vi):10都市,(vii)-(viii):2重円問題)

$$\text{エラーレート} = \frac{\text{経路長} - \text{最短経路長}}{\text{最短経路長}}$$

図２に係数Aを変化させたときの最適解が得られた回数，図３に係数Aの変化とそのときのエラーレートの値を示す．表２(a)(b)に２重円（２４都市）問題において係数Aの値を変化させたときのそれぞれ100回の試行結果を示す．図４に２重円問題(viii)において得られた最も良い解を示す．

A	B	最適解	second	third	実行可能解	エラーレート
0.04	0.5	0	0	0	0	-
0.06	0.5	22	0	0	22	0.00
0.08	0.5	26	0	0	26	0.00
0.10	0.5	100	0	0	100	0.00
0.12	0.5	98	0	0	100	0.06
0.14	0.5	90	0	0	99	0.29
0.16	0.5	89	0	0	100	0.35
0.18	0.5	83	1	0	100	0.65
0.20	0.5	79	3	0	99	0.92
0.40	0.5	61	13	0	98	1.90
0.60	0.5	36	16	1	96	4.10

表１．都市配置(i)の場合の実行結果

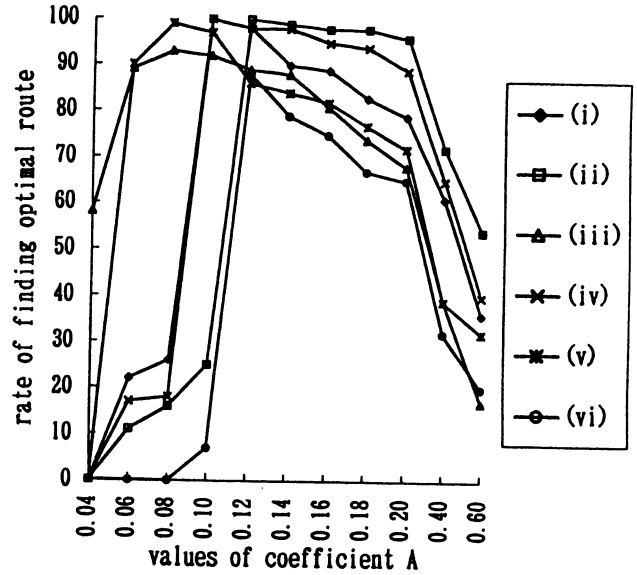


図２．10都市問題での係数Aと最適解が得られる確率
($B=0.5$,学習係数は0.1)

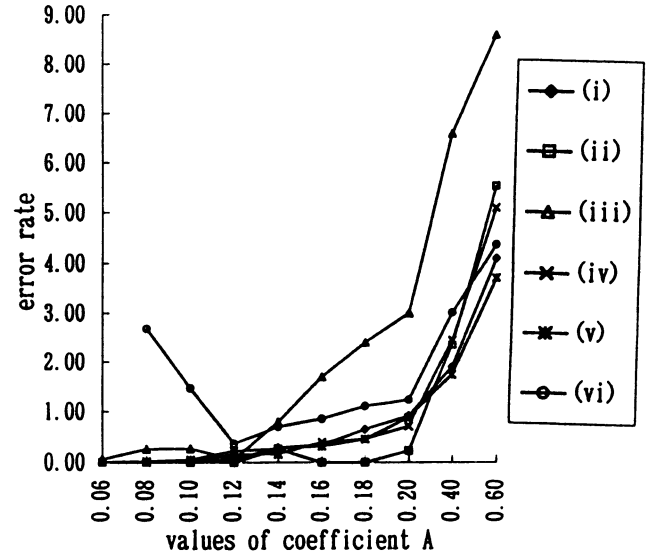


図３．10都市問題での係数Aとエラーレートの関係
($B=0.5$，学習係数0.1)

表２．２重円問題の実験結果（$B=0.6$,学習係数は0.2）

(a) 図１(vii)の都市配置

A	B	最適解	実行可能解	エラーレート
0.00	0.6	100	100	0.00
0.02	0.6	100	100	0.00
0.04	0.6	85	88	0.06
0.06	0.6	41	41	0.00
0.08	0.6	32	32	0.00
0.10	0.6	8	8	0.00
0.12	0.6	16	16	0.00
0.14	0.6	0	0	-
0.16	0.6	0	0	-
0.18	0.6	0	0	-
0.20	0.6	0	0	-

(b) 図１(viii)の都市配置

A	B	最適解	実行可能解	エラーレート
0.00	0.6	0	0	-
0.02	0.6	0	0	-
0.04	0.6	0	0	-
0.06	0.6	0	44	0.55
0.08	0.6	0	98	0.72
0.10	0.6	0	100	0.88
0.12	0.6	0	100	0.99
0.14	0.6	0	100	1.04
0.16	0.6	0	100	1.13
0.18	0.6	0	100	0.15
0.20	0.6	0	100	1.18

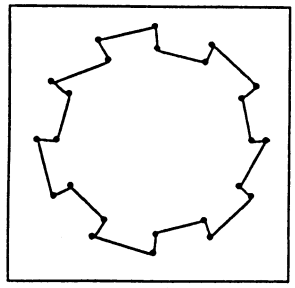


図４．２重円問題(viii)の最良の解

４．おわりに

本研究ではホップフィールドニューラルネットワークによる組合せ最適化問題がエネルギー関数の係数をうまく設定することにより，最急降下法のみでも高い確率で最適解が得られることをシミュレーションで確認した．今後，シグモイド関数による非線形変換の影響，都市数を増やした場合の有効性等さらに検討する必要がある．

参考文献

[1] Hopfield, J. J. : "Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons", Proceedings of National Academy of Science of the United States of America, Vol.81, pp. 3088-3092(1984).

[2] Hopfield, J. J. and Tank D. W., " Neural computation of decisions of optimization problems", Biological, Cybernetics, Vol.52, pp.141-152(1985).

[3] 上坂：ニューロコンピューティングの数学的基礎，近代科学社(1993)

[4] 阿部：ホップフィールドニューラルネットの重みの決定法とその評価，情報処理学会論文誌，Vol.34, No.1, pp.21-28 (1993)

[5] 喜多，小谷，西川：神経回路モデルによる最適化計算ー回路ブロック配置問題を例として，システム制御情報学会論文誌，Vol.4,No. 1, pp. 48-56 (1991)

[6] 松田：対称結合神経回路網における解の安定性，電子情報通信学会論文誌 (D-II),Vol. J77-D-II, No.6, pp.1157-1166(1994)

[7] Aihara.K ,Takabe.T and Toyoda. M,"Chaotic neural network", Physics Letter A, Vol.144, No.6,7, pp.333-340(1990)

[8] Nozawa. H,"A neural network model as a globally coupled map and applications based on chaos ", Chaos , Vol.2, No.3, pp.377-386(1992)

[9] 大淵：カオスニューラルネットの最適化能力の検証，電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J77-D-II, No.11, pp. 2318-2321(1994)

[10] 喜多：Hopfield型ニューラルネットワークとシミュレーテッドアニーリング，人工知能学会誌，Vol.7, No.6, pp.970-979(1992)

[11] 野沢：カオスと最適化，カオスセミナー，海文堂，pp.195-221(1994)

[問い合わせ先]

〒593 大阪府堺市学園町１－１

大阪府立大学工学部経営工学科

市橋秀友

TEL : 0722-52-1161

FAX : 0722-59-3340

E-mail:ichi@center.osakafu-u.ac.jp

WE1-2

可能性数量化II類
Possibility Quantification Theory Type II

田中英夫　　小山研一
Hideo Tanaka　　Kenichi Koyama
大阪府立大学工学部
College of Engineering, University of Osaka Prefecture

Abstract - In this paper we propose possibility quantification theory type II based on two possibility distributions with respect to two guroups. A possibility distribution can be obtained from the given data about fuzzy categories in each fuzzy group by the proposed idetification method. The problem is to obtain the optimal linear system with the categorical weights by which two possibility distributions are separated well on one-dimensimal space. The categorical weights can be obtained by minimizing the possibility measure.

1. はじめに

通常，数量化II類は，全分散分の群間変動による分散比によりカテゴリウェイトを決定し，異なる群をできるだけ分離する手法である．本研究では，指数型可能性分布の同定手法を適用し，同定された可能性分布をよく分離するような特徴ベクトルを可能性測度から導くことによりカテゴリウェイトを決定する手法を提案する．

本研究では，まず，与えられたデータから可能性分布を同定する手法を示す．次に，同定された可能性分布をよく分離するような特徴ベクトルを可能性測度から導く手法を示す．最後に，実際の数値例により本手法を説明する．ただし，説明の簡単さのために，2群のときだけを取り扱う．

2. 可能性分布の同定

可能性分布には次の指数型関数を用いる．

$$\Pi_A(x)=\exp\left\{-\tfrac{1}{2}(x-\alpha)^t D_A^{-1}(x-\alpha)\right\}\equiv\left(\alpha, D_A\right)_e \quad (1)$$

A はファジィ概念を表し，α は中心ベクトルであり，D_A は正定値行列である．

いま，ある x_i が A に少なくとも度合い h_i 以上で属しているというデータを

$$(x_i, h_i)\ \ i=1,...,N \quad (2)$$

と表示する．N はデータ数である．(2)式のデータから(1)式の指数型可能性分布を同定する．x_i の h_i による重みづけ平均として中心ベクトル α を次式とする．

$$\alpha^*=\sum_{i=1}^{N}(h_i x_i)/\sum_{i=1}^{N}h_i \quad (3)$$

中心ベクトルが零になるように，次のような線形変換を行う．

$$y_i=x_i-\alpha^* \quad (4)$$

次に，D_A が正定値行列であることを保証するために以下のことを行う．まず，主成分分析の手法よりデータの分散が大きくなるような直交軸を選び，直交軸方向にデータを回転する．すなわち，直交行列 $T^tT=I$ となる T によりデータを次のように回転さす．ただし，I は単位行列である．

$$z_i=T^t y_i \quad (5)$$

直交軸空間での可能性分布は次式と仮定する．

$$\Pi_A(z)=\exp\left(-\tfrac{1}{2}z_i^t C_A z_i\right) \quad (6)$$

ただし C_A は対角行列とし，これは次式によって表されると仮定している．

$$C_A=\begin{bmatrix}c_1 & & 0\\ & \ddots & \\ 0 & & c_n\end{bmatrix}\triangleq T^t D_A^{-1}T \quad (7)$$

正定値行列 C_A を求める問題は，次のLP問題に帰着できる．

$$\begin{aligned}\max_{C_A}\quad & \sum_{i=1}^{n} z_i^t C_A z_i\\ \text{subject to}\quad & z_i^t C_A z_i\le -2\ln h_i \quad i=1,...,N\\ & c_i\ge\varepsilon \quad i=1,...,n\end{aligned} \quad (8)$$

ただし，ε は十分小さな正数である．(8)式のLP問題の解 C_A^* から(7)式より D_A^* が求められるので(1)式の可能性分布が同定できる．

3. 可能性測度

可能性分布 A とファジィ事象 B とが指数型関数で与えられたときの可能性測度 $\Pi_A(B)$ は次式で与えられる[1].

$$\Pi_A(B)=\max\Pi_A(x)\,\Pi_B(x)=\exp\{\tfrac{1}{2}[(D_A^{-1}a+D_B^{-1}b)^t (D_A^{-1}+D_B^{-1})^{-1}(D_A^{-1}a+D_B^{-1}b)-a^tD_A^{-1}a-b^tD_B^{-1}b]\} \quad (9)$$

4. 可能性測度による特徴ベクトルの抽出

2つの可能性分布 $\Pi_A(x)$,$\Pi_B(x)$ をよく分離するような特徴ベクトルを求める．まず，2つの可能性分布を一次元上に射影するために，次の線形変換 $y=v^tx$ を用いる．ただし v は特徴ベクトルである．Y 上の可能性分布 $\Pi_{Y_A}(y)$ が拡張原理によって $\Pi_A(x)$ から誘導できる．このことをファジィベクトル A とファジィ数 Y_A によって $Y_A=v^tA$ と表す．拡張原理から $\Pi_{Y_A}(y)$ は次のようになる．

$$\Pi_{Y_A}(y)=\exp\left\{-\tfrac{1}{2}(y-v^ta)^2(v^tD_Av)^{-1}\right\} \quad (10)$$

ただし，拡張原理はmax積で定義されている．

ここでの問題は，Y 上で $\Pi_{Y_A}(y)$ と $\Pi_{Y_B}(y)$ とが最大に分離するような特徴ベクトル v を，可能性測度を最小にすることで求める．すなわち次のような最適化問題になる．

$$\min_{v}\ \Pi_{Y_A}(Y_B)=\exp\left\{\frac{-v^t(aa^t-ab^t-ba^t+bb^t)v}{2v^t(D_A+D_B)v}\right\} \quad (11)$$

これは，次の最大化問題になる．

$$\max_{v}\ \frac{v^t(aa^t-ab^t-ba^t+bb^t)v}{v^t(D_A+D_B)v} \quad (12)$$

v^* は，方向だけが決まるので $\|v^*\|^2=1$ となる v^* を最適解とする．(12)式の最適化問題は固有値問題であるので容易に v^* を求めることができる．

5. 数量化Ⅱ類

数量化手法とは，数値表現されていない人間の判断や評価データを量的に把握し，理解するための手段のことである．人間の判断の元にある評価構造を知るためには，質的な表現を数値表現に変換すれば，構造を明確にすることが容易になる．ファジィ数量化Ⅱ類とは，外的基準が分類で与えられており，質的な判断を［0.1］上のファジィ概念に基づいたデータの数量化分析である．目的としては，各カテゴリ$A_i(i=1,...,K)$のカテゴリウェイトa_iの線形式

$$y(\omega)=\sum_{i=1}^{K} a_i \mu_i(\omega)\ ;\ \omega=1,...,n \qquad (13)$$

によって，ファジィ外的基準の構造を実軸上に最もよく表すようなカテゴリウェイトa_iを決めることである．

表1　ファジイ数量化理論Ⅱ類で扱うデータ

番号	ファジィ外的基準		カテゴリ				
ω	B_1	B_2	A_1	…	A_i	…	A_K
1	$\mu_{B_1}(1)$	$\mu_{B_2}(1)$	$\mu_1(1)$	…	$\mu_i(1)$	…	$\mu_K(1)$
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
ω	$\mu_{B_1}(\omega)$	$\mu_{B_2}(\omega)$	$\mu_1(\omega)$	…	$\mu_i(\omega)$	…	$\mu_K(\omega)$
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
n	$\mu_{B_1}(n)$	$\mu_{B_2}(n)$	$\mu_1(n)$	…	$\mu_i(n)$	…	$\mu_K(n)$

6. 可能性数量化Ⅱ類

ここでは，本研究で提案する可能性分布による可能性数量化Ⅱ類を述べる．ファジィ外的基準μ_{B_1}，μ_{B_2}は，カテゴリデータ$\mu_i(\omega)\ (i=1,...,K)$が群$B_1$，$B_2$に属している可能性値とみなす．すなわちデータを

$$(\mu(\omega),\mu_{B_1}(\omega),\mu_{B_2}(\omega)),\ \omega=1,...,n \qquad (14)$$

と表示する．ここで，$\mu(\omega)=(\mu_1(\omega),...,\mu_K(\omega))'$であり，$n$はデータ数である．ただし$K$はカテゴリ数である．このデータから各外的基準ごとに可能性分布$\{\Pi_{B_r}(\mu)\},r=1,2$を同定し，同定された可能性分布を一次元上に射影する．射影された$\Pi_{Y_{B_1}}(y)$，$\Pi_{Y_{B_2}}(y)$をよく分離するような特徴ベクトルν^*を可能性測度を最小化することにより求める．

7. 数値例

データは，文献［2］で用いられている電気剃刀の購買意欲調査結果を用いた．数値例のデータでは，外的基準の値に複数1があるために可能性分布を同定することができないので，値を半分にするスケール化を行った．また変数間の相関が非常に高いものがあるので以下の4つの変数を用いて可能性分布の同定を行った．

価格：考慮する
外観：考慮する
性能：十分検討する，検討しない

図1はデータを可能性分布で同定し，これを一次元上に射影した結果である．表2，表3は，解析結果として得られたカテゴリウェイトおよび偏相関係数である．このような解析結果を用いることにより，消費者のA社とB社に対する選好度を推定することが可能である．たとえば，ある消費者の回答が表4であったとすると，この標本値は(13)式から$y=0.054$となる．可能性分布による手法では，外的基準の値を半分にしたために推定可能性値を購買意欲の程度として使うことができないが，A社の推定可能性値をB社の推定可能性値で割ることで何倍程度反応があるかがわかる．表4の例は$\Pi_A(y)/\Pi_B(y)=0.46$であるので，約2倍B社の製品の方に購買意欲を持つと推定できる．

8. おわりに

本研究では，可能性分布による可能性数量化Ⅱ類の定式化を行った．その結果，製品を好む層を分布として求めることができ，また判別することができた．本研究は，指数型可能性分布による可能性データ解析の一手法と考えられる．

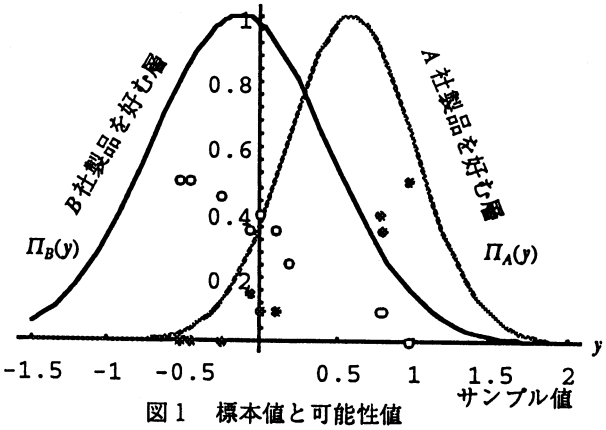


図1　標本値と可能性値

表2　電気カミソリに関する調査における
カテゴリウェイト

アイテム		カテゴリウェイト	
価格	考慮する	a_{11}	0.37
外観	考慮する	a_{21}	-0.07
性能	十分検討する	a_{31}	0.80
	検討しない	a_{33}	-0.46

表3　偏相関係数

アイテム	外的基準
価格	0.167
外観	-0.029
性能	0.447

表4　新たな被験者のデータ

アイテム		データ
価格	考慮する	0.1
外観	考慮する	0.9
性能	十分検討する	0.1
	検討しない	0.0

参考文献

[1]　田中，石渕，吉川：指数型可能性判別分析，日本ファジイ学会誌 Vol.5，No.6，pp.1147-1160(1994)

[2] 多和田，田中，浅居：ファジイ数量化Ⅱ類，行動計量学，9，2，pp.22-32(1982)

連絡先

〒593　大阪府堺市学園町1－1
大阪府立大学工学部経営工学科
田中英夫
TEL　0722-52-1161 (内) 2376
FAX　0722-59-3340(工学部共通)

WE1-3

ファジィデータの主成分分析法の構成

Construction of Principal Component Analysis for Fuzzy samples

山内 建二*, 藪内 賢之*, 和多田 淳三*, 中森 義輝**
Kenji YAMAUCHI*, Yoshiyuki YABUUCHI*, Junzo WATADA*, Yoshiteru NAKAMORI**

大阪工業大学*, 甲南大学**
Osaka Institute of Technology*, Konan University**

Abstract —The objective of principal component analysis is to abstract, from data defined various correlated varients, a several influential characteristics without mutual correlation. The aim of this paper is to model a principal component analysis on data defined by fuzzy numbers. Already fuzzy principal component analysis is proposed by J. Watada et al. to deal with data defined by real numbers in a fuzzy set, where vagueness included in considered objects considered is taken into account in the analysis. The main stress in discussion on the principal component analysis of fuzzy data is placed on that the principal component and its variance are calculated using fuzzy numbers.

1 はじめに

多変量解析法とは，互いに相関のある多変量データのもつ特徴を要約し，かつ所与の目的に応じて総合するための手法である．ファジィ概念に基づく多変量解析については多くの研究がなされており，またそれらの手法による分析が行われている [3, 4]．ファジィ主成分分析法は，サンプルが分析対象に帰属する度合いをファジィ数で表現することにより，分析対象の特徴を抽出する方法である．

本研究では，ファジィデータを対象とする主成分分析法の構成について提案する．

2 ファジィ統計量の概念

ファジィデータの主成分分析の定義で用いるファジィデータについて説明する．本研究で用いるデータは，上限，中心，下限をそれぞれ x_r，x_c，x_l とする．

標本 $\mathbf{X}$ を次の p 変量で特徴づけられた n 個のデータとする．

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

平均 $\bar{x}$ は，

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}$$

ファジィ分散共分散行列 $\mathbf{V}$ は，

$$V_{ij} = \frac{1}{n}\sum_{k}^{n}\sum_{l}^{n}(x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{lj} - \bar{x}_j) \qquad (i, j = 1, 2, \cdots, p)$$

ここで，ファジィ分散共分散行列の各成分 V_{ij} は，$V_{ij} = (V_{ij}^l, V_{ij}^c, V_{ij}^u)_{LR}$ の記号で表現するものとする．

3 ファジィデータの主成分分析

3.1 対象とするデータ

ファジィデータの主成分分析に用いられるデータは，n 個のサンプルについて測られた p 種類の属性値である．その属性値は，実数の幅（区間）を持っており中心値 a_c と上限値 a_r，下限値 a_l を用いて $(a_l, a_c, a_r)_{LR}$ と表される．これを表 1 に示す．これらの属性値の測定単位は混在しても良いが，この場合にはすべての測定値を標準化し，X'_{ki} として用いることが適当である．実数値データの場合には，この X'_{ki} の分散共分散行列は，もとの測定値 X_{ki} の相関行列に一致する．

一方，すべての属性値が共通の単位をもつ場合には，その測定値をそのまま用いることも，標準化して用いることも可能である．

3.2 主成分の求め方

データがファジィ数で与えられる場合，それらのデータの主成分を決定するときにあいまいさの取り扱い方が問題となる．このとき，次の 3 つの方法が考えられる．

1. あいまいさを固有値 (主成分の分散) で表す
2. あいまいさを主成分で表す
3. あいまいさを主成分及び固有値で表す

表1　ファジィデータ

標本番号	変量					
k	X_1	X_2	$\cdots$	X_i	$\cdots$	X_p
1	$\{a_{11}^L, a_{11}^C, a_{11}^R\}$	$\{a_{12}^L, a_{12}^C, a_{12}^R\}$	$\cdots$	$\{a_{1i}^L, a_{1i}^C, a_{1i}^R\}$	$\cdots$	$\{a_{1p}^L, a_{1p}^C, a_{1p}^R\}$
2	$\{a_{21}^L, a_{21}^C, a_{21}^R\}$	$\{a_{22}^L, a_{22}^C, a_{22}^R\}$	$\cdots$	$\{a_{2i}^L, a_{2i}^C, a_{2i}^R\}$	$\cdots$	$\{a_{2p}^L, a_{2p}^C, a_{2p}^R\}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
k	$\{a_{k1}^L, a_{k1}^C, a_{k1}^R\}$	$\{a_{k2}^L, a_{k2}^C, a_{k2}^R\}$	$\cdots$	$\{a_{ki}^L, a_{ki}^C, a_{ki}^R\}$	$\cdots$	$\{a_{kp}^L, a_{kp}^C, a_{kp}^R\}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\cdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n	$\{a_{n1}^L, a_{n1}^C, a_{n1}^R\}$	$\{a_{n2}^L, a_{n2}^C, a_{n2}^R\}$	$\cdots$	$\{a_{ni}^L, a_{ni}^C, a_{ni}^R\}$	$\cdots$	$\{a_{np}^L, a_{np}^C, a_{np}^R\}$

本研究では，特にデータのあいまいさを固有値で表す方法を用いる．ファジィ分散共分散行列の各成分$\mathcal{V}_{ij}$は，$\mathcal{V}_{ij} = (V_{ij}^l, V_{ij}^c, V_{ij}^u)_{LR}$とする．ただし，上限を$V_{ij}^u$，下限を$V_{ij}^l$，中心を$V_{ij}^c$とする．

3.3　固有値の計算方法

ファジィデータによる分散共分散は，

$$\mathcal{V} = \left\{\mathbf{V}^l, \mathbf{V}^c, \mathbf{V}^u\right\}$$

$\mathcal{V}$の(i,j)要素の$V_{ij}^l, V_{ij}^c, V_{ij}^u$は，分散共分散の下限値，中心値，上限値である．

主成分分析およびファジィデータの主成分分析では，m個$(m \leq p)$の総合特性値（これを第1，第2，$\cdots$，第m主成分という）の係数を固有値問題に帰着して解くことができる．しかし，ファジィデータについては固有値問題を解くことが困難である．このため，ファジィデータに含まれるあいまいさを固有値で表現するために以下のLP問題に帰着させる．ただし，この特別な場合として，通常の実数値データについては通常の主成分分析と同じ解が得られる．

$$\begin{aligned} &\min \quad f_1 \\ &\quad\vdots \\ &\min \quad f_t \\ &\textit{subject to} \\ &\mathcal{V}\mathbf{l}_i \subseteq \overline{\lambda}\mathbf{l}_i \\ &\mathcal{V}\mathbf{l}_i \supseteq \underline{\lambda}\mathbf{l}_i \\ &\underline{\lambda} \leq \lambda \leq \overline{\lambda} \end{aligned} \tag{1}$$

$$(\mathbf{l}_i, \mathbf{l}_j) = \begin{cases} 1; & i = j \\ 0; & i \neq j \end{cases}$$

$$(i, j = 1, \cdots, p)$$

ここで，λは固有値の中心値，$\overline{\lambda}$，$\underline{\lambda}$は固有値の上限値および下限値，$\mathbf{l}$はλに対応する固有ベクトル，fは目的関数である．

このLP問題での目的関数fは固有値の中心値λの最大化と，上限の固有値と下限の固有値の差$(\overline{\lambda} - \underline{\lambda})$，つまり固有値の幅の最小化によりファジィ数の固有値を求めるものである．このため，問題に応じて

$$\begin{aligned} &\min \quad -\lambda \\ &\min \quad \overline{\lambda} - \underline{\lambda} \end{aligned} \tag{2}$$

などの目的関数が採用される．

この固有値の幅を使うことにより，データのあいまいさに応じた主成分の軸が求められる．

4　おわりに

本研究では，多変量解析において標本がファジィデータである場合のデータの扱い方を示した．さらに，主成分分析においてファジィデータの扱い方を示した．

また，2.データのあいまいさを主成分で表す3.データのあいまいさを主成分及び固有値で表す方法は，問題によって有効な取り扱いである．

参考文献

[1] 奥野 忠一，芳賀 敏郎，久米 均，吉澤 正：多変量解析法，日科技連，1977

[2] 河口 至商：多変量解析入門，森北出版，1973.

[3] 藪内賢之，和多田淳三，辰巳憲一：「誤差データのファジィ回帰分析」，日本ファジィ学会，Vol.6, No.6, pp.1161–1170, 1994

[4] 和多田淳三：第6章ファジィ数量化理論，ファジィシステム入門（寺野，浅居，菅野 編），オーム社，pp.99–118, 1987

[5] J. Watada and Y. Yabuuchi : "Fuzzy Principal Component Analysis And Its Applicatino to Company Evaluation," *The Brazil–Japan Joint Symposium on Fuzzy Systems*, in Campinas and Manaus, Brazil, July 19–27, 1994

連絡先

〒535 大阪市旭区大宮 5-16-1
大阪工業大学経営工学科
和多田 淳三
TEL : 06-954-4327(dial in)
FAX : 06-952-6197
E-Mail : watada@nak101.dim.oit.ac.jp

WE1-4

ファジィ係数を伴う多目的最小コストフロー問題の一解法

Algorithm for Solving Multicriteria Minimum Cost Flow Problems with Fuzzy Coefficients

井田 憲一　　玄 光男
Kenichi IDA　　Mitsuo GEN

足利工業大学経営工学科
Department of Industrial and Systems Engineering
Ashikaga Institute of Technology

Abstract　In this paper, we expand the network simplex algorithm for solving network structured linear programming problems. This algorithm performs the simplex operations directly on the graph or network itself. We expand this algorithm by means of a fuzzilize and multiplize of objective functions. And we apply this expanded algorithm to minimum cost network flow problems with multiple objective functions such as cost, time and so on. The numerical example is also given, and it shows that the algorithm is very effective with respect to the real-world network problems under the computer configurations.

1. はじめに

最小コストフロー(minimum cost flow)問題は各ノード(node)に需要と供給が与えられているとき，それらの条件を満たす最小コストを求める問題であり，代表的なネットワーク(network)問題の一つである．この種の問題はその応用範囲も広く，各種の解法[1]-[5]が提案されているが，その中でもTardos法[6]やネットワーク・シンプレックス(network simplex)法[7]が有名である．その際の判断基準としては，コストだけでなく，所要時間，あるいは走行距離も挙げることができよう．これら従来の手法ではこのようなコストや所要時間を確定値として取り扱ってきたが，現実にはこれらの値を確定値で表現するよりむしろ，「だいたいこれくらい」というようなあいまいな値で表現するほうが適切な場合が多い．

このようなあいまいさを表現する手段としてファジィ数や区間を用いる方法[8]があるが，最近，ネットワーク最短経路問題の係数に対して楽観値と悲観値からなる区間を導入する試みや，アーク(arc)の重みがファジィ数であるネットワークの最も活動的なアーク(most vital arc)を求める手法が報告されている．

一方，現実の問題として，複数の目的関数を同時に扱う多目的計画問題(multiple objective programming problem)が存在し，種々の解法が提案されている[9],[10]．この最小コストフロー問題においても単に単一目的関数である最小コストを求めるだけでなく，到達時間や走行距離なども同時に考慮する，いわゆる多目的計画問題を取り扱う必要性が生じることを無視できない．

このような状況の中で，最短経路問題であいまいさを表現するために三角型ファジィ数を導入し，時間とコストのような二つの目的関数を考慮して最良な妥協経路を求める方法が提案された[11]．この方法[11]は，ネットワーク・シンプレックス法[7]をファジィ係数を伴う二目的最短経路問題に適用できるように拡張したものである．

本論文では，まずこのファジィ係数を伴う二目的最短経路問題を解くために提案されたファジィ二目的ネットワーク・シンプレックス法[11]を最小コストフロー問題に適用できるように拡張する．次に，拡張されたファジィ二目的ネットワーク・シンプレックス法を利用することにより，本論文で提案するファジィ係数を伴う多目的最小コストフロー問題のための新しい解法を示す．更に，数

値例を用いて提案する手法の有効性を確認する.

2. ファジィ二目的ネットワーク・シンプレックス法

ここでは本論文で提案する解法の基礎として, 文献[11]で提案されたファジィ係数を伴う二目的最短経路問題のための二目的ネットワーク・シンプレックス法を目的関数がファジィ係数をもつ場合のファジィ最小コストフロー問題へ適用できるように拡張したネットワーク・シンプレックス法の計算法を示す.

m個のノードをもち, 二つの目的関数の係数がファジィ数で表されるようなファジィ二目的最小コストフロー問題は, 次のように定式化される.

$$\min \quad \tilde{z}_1 = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} \tilde{c}_{1ij} x_{ij} \qquad (1)$$

$$\min \quad \tilde{z}_2 = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} \tilde{c}_{2ij} x_{ij} \qquad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{m} x_{ij} - \sum_{j=1}^{m} x_{ji} = \begin{cases} b_i ; & i=1 \\ 0 ; & i=2, 3, \cdots, m-1 \\ -b_i ; & i=m \end{cases} \qquad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i, j = 1, 2, \cdots, m \qquad (4)$$

ここで, $\tilde{c}_{1ij}$, $\tilde{c}_{2ij}$はアーク(i,j)のそれぞれ第1目的関数と第2目的関数の三角型ファジィ係数を表している. また, b_iは総フロー量である.

次に, ファジィ二目的最小コストフロー問題に適用するために拡張を行った解法の計算手順を示す.

[ステップ1] 初期解の設定

単一目的関数のためのファジィネットワーク・シンプレックス法[11]を用いて, 第1目的関数のみのファジィ最小コストフロー問題を解く. 得られた解を第1および第2目的関数に代入したときの関数値をそれぞれ次のように記録する.

$$\tilde{f}_{11} = \tilde{z}_1, \quad \tilde{f}_{21} = \tilde{z}_2$$

更に, 反復回数をt=1とする.

[ステップ2] リデューストコストの計算

ステップ1での解の情報(基底および非基底アークの集合I_B, I_N, 第1目的関数のリデューストコスト$\tilde{c}_{1ij}$)を基に, 第2目的関数のリデューストコスト$\tilde{c}_{2ij}$を次式により計算する.

$$\tilde{c}_{2ij} = \tilde{z}_{2ij} - \tilde{c}_{2ij} \qquad (i,j) \in I_N \qquad (5)$$

ここで, $\tilde{z}_{2ij}$は(サイクルに与えられた方向と順方向である基底アークの第2目的関数の和)−(サイクルに与えられた方向と逆方向である基底アークの第2目的関数の和)で与えられる.

[ステップ3] 最適性テスト

第2目的関数のリデューストコストの代表通常数$\tilde{c}_{2ij}$ $(i,j) \in I_N$が零に等しいか小さいならば, v=tとおいて, ステップ7へ行く. そうでないなら, t=t+1とおいて, 式(6)より, 基底に入るアーク(p,q)を決める.

$$-\frac{\tilde{c}_{1pq}}{\tilde{c}_{2pq}} = \min_{i,j} \left\{ -\frac{\tilde{c}_{1ij}}{\tilde{c}_{2ij}} \mid \tilde{c}_{2ij} > 0, \ (i,j) \in I_N \right\} \qquad (6)$$

[ステップ4] 最小比テスト

非基底アーク(p,q)を基底に加え, それによって最初に零となる基底変数(基底から出るアークに対応) x_{rs}を決定する.

$$x_{rs} = \min_{i,j} \{ x_{ij} \mid (i,j):\text{1をもつサイクル上にある基底アーク} \} \qquad (7)$$

[ステップ5] 基底変換

制約式(3)の右辺に関して実行可能性を維持するために, 基底変数の値を調整する. 基底アーク(r,s)に対応する値を△とする.

$$x_{pq} = \triangle, \quad x_{ij} = x_{ij} \pm \triangle, \quad (i,j) \neq (r,s)$$

ただし, (i,j)はサイクル上にある基底アークで, ±の符号はそのアークの符号をとる.

また, 基底アークの集合I_B, 非基底アークの集合I_Nもそれぞれ次のように更新する.

$$I_B = I_B - \{(r,s)\} + \{(p,q)\}$$
$$I_N = I_N + \{(r,s)\} - \{(p,q)\}$$

[ステップ6] リデューストコストの更新

第1および第2リデューストコスト$\tilde{c}_{1ij}$, $\tilde{c}_{2ij}$をそれぞれ次式により更新する.

$$\tilde{c}_{1ij} = \tilde{z}_{1ij} - \tilde{c}_{1ij} \qquad (i,j) \in I_N \qquad (8)$$

$$\tilde{c}_{2ij} = \tilde{z}_{2ij} - \tilde{c}_{2ij} \qquad (i,j) \in I_N \qquad (5)$$

得られた解を第1および第2目的関数に代入したときの関数値をそれぞれ

$$\tilde{f}_{1t} = \tilde{z}_1, \tilde{f}_{2t} = \tilde{z}_2$$

とおいて, 非優越解として記録し, ステップ3に戻る.

[ステップ7] 最良な妥協解の決定

MDI(method of displaced ideal)法により, 次のように最良な妥協解を決定する. ただし, $\tilde{f}_{kt}$は得られたt番目の非優越解の第k目的関数値$\tilde{f}_{kt}$の代表通常数, $\tilde{z}_k^*$と$\tilde{z}_k^-$はそれぞれ第k目的関数における$\tilde{f}_{kt}$の中の最小値と最大値とする.

(7.1) Lp-metricの計算

$$L_{rt} = \left\{ \sum_{k=1}^{2} \left(\frac{\tilde{z}_k^* - \tilde{f}_{kt}}{\tilde{z}_k^* - \tilde{z}_k^-} \right)^r \right\}^{\frac{1}{r}}, \quad r = 1, 2, \ t = 1, 2, \cdots, v \qquad (9)$$

$$L_{rt}=\max\left\{\frac{\tilde{z}_k^*-\tilde{f}_{kt}}{\tilde{z}_k^*-\tilde{z}_k^-}\mid k=1,2\right\},$$

$$r=\infty,\quad t=1,\ 2,\ \cdots,\ v \qquad (10)$$

(7.2) 最良な妥協解の決定

$$L_{\cdot t}^*=\min_t\left\{\sum_r L_{rt}\mid t=1,\ 2,\ \cdots,\ v\right\} \qquad (11)$$

3. ファジィ係数を伴う多目的最小コストフロー問題

m個のノードをもち，q個の目的関数の係数がファジィ数で表されるようなファジィ多目的最小コストフロー問題は，次のように定式化される．

$$\min \quad \tilde{z}_k=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\tilde{c}_{kij}x_{ij},$$

$$k=1,\ 2,\ \cdots,\ q \qquad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{m}x_{ij}-\sum_{j=1}^{m}x_{ji}$$

$$=\begin{cases} b_i; & i=1 \\ 0; & i=2,\ 3,\ \cdots,\ m-1 \\ -b_i; & i=m \end{cases} \qquad (3)$$

$$x_{ij}\geq 0,\ i,\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ m \qquad (4)$$

4. 計算法

ここでは，三角型ファジィ係数を伴う多目的最小コストフロー問題を解くための手法として，2節で拡張を加えたファジィ二目的ネットワーク・シンプレックス法の考え方を用い，最良な妥協解(best compromise solution)を見つけるためのMDI法と組み合わせた多目的ネットワーク・シンプレックス法を提案する．この手法は，複数の目的関数に一対比較を導入し，2節で拡張を加えたファジィ二目的ネットワーク・シンプレックス法のパッケージを活用して，多目的計画問題より得られる多くの非優越解(nondominated solution)の中から最良な妥協解を求めるもので，非優越解を順序づけすることにより，意思決定者の満足できる解を容易に見つけることができる特徴をもっている．

次にこの手法の計算手順を示す．

[ステップ1] 単一目的関数のファジィネットワーク・シンプレックス法を用いて，q個の単一目的のファジィ最小コストフロー問題を解き，得られた解から各目的関数の最小値と最大値を求める．

[ステップ2] q個の目的関数の中から任意の2個を選んだq(q-1)個の二目的計画問題を，それぞれ2節で拡張を加えたファジィ二目的ネットワーク・シンプレックス法のパッケージを用いて解き，各目的関数値と妥協解を求める．

[ステップ3] 前段階で得られたq(q-1)個の妥協解の中から，MDI法を用いてファジィ多目的最小コストフロー問題の最良な妥協解を決定する．

5. 数値例

例えば，図1に示すような8個のノードをもつネットワークにおいて，ノード1からノード8へ20単位の物品を移動させるときの最良な経路を提案する手法を用いて求めることにする．なお，各アークにはコスト，所要時間および距離が表1に与えられているとする．

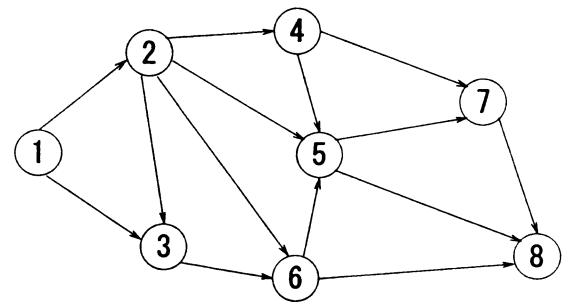


図1 ネットワーク

表1 コスト/時間/距離のファジィデータ

i-j	$\tilde{c}_{1ij}$	$\tilde{c}_{2ij}$	c_{3ij}	i-j	$\tilde{c}_{1ij}$	$\tilde{c}_{2ij}$	c_{3ij}
1-2	(10,12,14)	(12,15,16)	11	4-5	(9,11,12)	(7,9,12)	9
1-3	(14,17,19)	(3,6,7)	8	4-7	(10,11,12)	(4,5,7)	7
2-3	(7,11,12)	(8,10,11)	13	5-7	(11,13,14)	(8,9,11)	14
2-4	(11,13,15)	(9,9,10)	6	5-8	(15,18,20)	(5,8,10)	19
2-5	(15,16,18)	(13,14,15)	12	6-5	(13,15,17)	(3,4,5)	7
2-6	(11,14,16)	(12,13,19)	16	6-8	(18,19,21)	(8,11,12)	21
3-6	(14,16,18)	(7,9,12)	14	6-7	(13,14,17)	(10,11,16)	7

図1のネットワークは，次のようなファジィ係数を伴う三目的最小コストフロー問題として定式化できる．

$$\begin{aligned}\min \tilde{z}_1=&(10,12,14)x_{12}+(14,17,19)x_{13}\\&+(7,11,12)x_{23}+(11,13,15)x_{24}\\&+(15,16,18)x_{25}+(11,14,16)x_{26}\\&+(14,16,18)x_{36}+(9,11,12)x_{45}\\&+(10,11,12)x_{47}+(11,13,14)x_{57}\\&+(15,18,20)x_{58}+(13,15,17)x_{65}\\&+(18,19,21)x_{68}+(13,14,17)x_{78}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\min \tilde{z}_2=&(12,15,16)x_{12}+(3,6,7)x_{13}\\&+(8,10,11)x_{23}+(9,9,10)x_{24}\\&+(13,14,15)x_{25}+(12,13,19)x_{26}\\&+(7,9,12)x_{36}+(5,7,9)x_{45}\\&+(4,5,7)x_{47}+(8,9,11)x_{57}\\&+(5,8,10)x_{58}+(3,4,5)x_{65}\\&+(8,11,12)x_{68}+(10,11,16)x_{78}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\min Z_3=&11x_{12}+8x_{13}+13x_{23}+6x_{24}+12x_{25}+16x_{26}\\&+14x_{36}+9x_{45}+7x_{47}+14x_{57}+19x_{58}+7x_{65}\end{aligned}$$

$$+21x_{68}+7x_{78}$$

s.t. $x_{12}+x_{13}=20$

$$-x_{12}+x_{23}+x_{24}+x_{25}+x_{26}=0$$
$$-x_{13}-x_{23}+x_{36}=0$$
$$-x_{24}+x_{45}+x_{47}=0$$
$$-x_{25}-x_{45}-x_{65}+x_{57}+x_{58}=0$$
$$-x_{26}-x_{36}+x_{65}+x_{68}=0$$
$$-x_{47}-x_{57}+x_{78}=0$$
$$-x_{68}-x_{68}-x_{78}=-20$$
$$x_{ij}\geqq 0,\ \text{for all } i,j$$

この三目的最小コストフロー問題に対して，本論文で提案する手法を適用すると，それぞれの二目的関数の組合せから表2に示すような三つの経路（非優越解）が得られる．

MDI法から，

$L_{11}=0.892,\ L_{12}=0.537,\ L_{13}=0.576$

$L_{21}=0.611,\ L_{22}=0.394,\ L_{23}=0.459$

$L_{\infty 1}=0.486,\ L_{\infty 2}=0.343,\ L_{\infty 3}=0.438$

$L_{\cdot t}^{*}=\min\{1.999,\ 1.274,\ 1.473\}=1.274$

となり，t=2の経路，E_2が最良な妥協解として選ばれる．すなわち，①→③→⑥→⑧が最良な経路となる．そのときの目的関数値はそれぞれ次のようになる．

$\tilde{Z}_1=(920,1040,1160)$,

$\tilde{Z}_2=(360,520,620)$,

$Z_3=860$

意思決定者がこの解に満足しなかった場合には，提案する手法では次善の解としてE_3の経路を選ぶこともできる．すなわち，意思決定者はMDI法によって順序付けられた経路を順に追うことにより，自分に最も適した経路を選ぶことが可能となっている．

7．おわりに

多目的最小コストフロー問題にファジィ数を導入した結果，得られた経路に対応する非優越解は十分に現実味のある値となった．すなわち，これは意思決定者が判断を下すためのデータに柔軟性をもたせるという目的を果たしていることになる．

提案する手法はネットワーク・シンプレックス法という最小コストフロー問題の解法としては，実用上最も高速と考えられているアルゴリズムをベースにしているとともに，他のネットワーク問題へも柔軟に対応できる利点がある．

さらに，提案する手法のステップ3では，本論文で採用したMDI法の他に，他の最良解決定手法を利用することもでき，意思決定者の指向をより反映させた解を選択できる利点がある．

参考文献

[1] 古林隆：ネットワーク計画法，培風館(1984).

[2] Plane, D.R. and McMillan, C.Jr.:Discrete Optimization, Prentice-Hall(1971).（黒田他共訳:整数計画法入門，培風館(1976).）

[3] 一森哲男:数理計画法，共立出版(1994).

[4] Ignizio, J.P. and Cavalier, T.M.:Linear Programming, Prentice-Hall(1994).

[5] 茨木俊秀，福島雅夫:FORTRAN 77最適化プログラミング，岩波書店(1991).

[6] 茨木俊秀，福島雅夫:最適化の手法，共立出版(1993).

[7] Bazaraa, M.S., Jarvis, J.J. and Sherali, H.D.: Linear Programming and Network Flows, 2nd ed., Wiley(1990).

[8] Kaufmann, A. and Gupta, M.M.:Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science, Van Nostrand Reinhold(1988).（田中英夫監訳，松岡浩訳：ファジィ数学モデル，オーム社(1992).）

[9] Martins, E.Q.V.:"On a Multi-Criteria Shortest Path Problem", Eur. J. Opl Res., Vol.16, pp.236-245(1984).

[10] Lee, H. and Pulat, P.S.:"Bicriteria Network Flow Problems: Integer Case", Eur. J. Opl Res., Vol.66, pp.148-157(1993).

[11] 井田憲一，玄光男:"ファジィ係数を伴う二目的最短経路問題の一解法"，日本ファジィ学会誌，Vol.7, No.1, pp.142-152(1995).

［問い合わせ先］

〒326 足利市大前町268

足利工業大学経営工学科

井田 憲一

Tel: 0284-62-0605(内線)377

Fax: 0284-64-1071

E-mail: ida@genlab.ashitech.ac.jp

表2 実行可能経路のペイオフテーブル

	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{36}	x_{45}	x_{47}	x_{57}	x_{58}	x_{65}	x_{68}	x_{78}	$\tilde{Z}_1$	$\tilde{Z}_2$	Z_3
E_1	1					1							1		(780,900,1020)	(640,780,940)	960
E_2		1					1						1		(920,1040,1160)	(360,520,620)	860
E_3	1			1				1						1	(880,1000,1160)	(700,800,980)	620

WE2-1

ファジィ容量制約をもつファジィ整数シェアリング問題
Fuzzy Integer Sharing Problem with Fuzzy Capacity Constraints

石井 博昭 Hiroaki Ishii
伊藤 健 Takeshi Itoh

大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract

In this paper, we consider a fuzzy version of the sharing problem by introducing fuzzy capacity constraints and a membership function designating a degree of satisfaction for the flux to each sink node. Further, we propose an efficient algorithm for the problem by making full use of its feature, that is, we deal with the integer flow case.

1 はじめに

Brown[1] によって提案されたシェアリング問題は、資源の最適配分を求めるというものである。その定式化における概念とは、各シンク点に流れ込むフロー値によって表される「トレードオフ関数」の最小値をできる限り大きくすることであった。我々は [4] において、各シンク点への資源流量に対する満足度を扱うため、メンバシップ関数を導入することによりシェアリング問題のファジィ化を試み、その問題の効果的な解法アルゴリズムを提案した。一方、**Chanas & Kolodziejczyk**[2] はファジィ容量制約を考えることにより最大フロー問題のファジィ化を提案し、さらに整数フローに対するモデルへと拡張した [3]。

本研究では上述の結果を融合一般化することにより、ファジィ容量制約をもつファジィ整数シェアリング問題を提案する。本モデルは 2 目的モデルであり、すべてのファジィ容量制約の最小満足度、および資源流量に対する全シンク点間の最小満足度を最大化するものである。

2 定式化

ノード（中継点）集合 N，アーク集合 A の分布状態を表すグラフを $G(N,A)$ とする。N はソース点，シンク点と呼ばれる特殊なノードを含んでいるが、それらの集合をそれぞれ S,T とする。さらに、スーパーソース s とそこから各ソース点へ接続するアーク，スーパーシンク u とそこに各シンク点から接続するアークを G に付け加え、$G'(N',A')$ とする。また、各アーク $(i,j)\in A$ には次のようなメンバシップ関数をもつファジィ容量 $\tilde{C}(i,j)$ が設定されている。

$$\mu_{ij}(f_{ij})=\begin{cases}1 & (f_{ij}<c_{ij})\\ \dfrac{\bar{c}_{ij}-f_{ij}}{\bar{c}_{ij}-c_{ij}} & (c_{ij}\le f_{ij}\le \bar{c}_{ij})\\ 0 & (f_{ij}>\bar{c}_{ij})\end{cases}$$

ただし、f_{ij} はアーク (i,j) を流れるフロー（流量）値であり、$c_{ij},\bar{c}_{ij}$ は整数である。アーク $(s,s_i),s_i\in S$ の容量については ∞ とし、一方アーク $(t,u),t\in T$ の容量については一つの重要なポイントとなるのだが、第 2 番目の判定基準を最大化することにより決定更新されるものとする。その基準とはシンク点 $t\in T$ に流れ込むフロー f_t に対する満足度関数 $\mu_t(f_t)$ であり、次のようなものとして与えられる。

$$\mu_t(f_t)=\begin{cases}1 & (f_t<a_t)\\ \dfrac{b_t-f_t}{b_t-a_t} & (a_t\le f_t\le b_t)\\ 0 & (f_t>b_t)\end{cases}$$

ただし、a_t,b_t は整数とし、フロー値 f_{ij}, f_{ss_i}, f_t もまた整数とする。以上のことより、次のような 2 目的シェアリング問題 **BSP** を提案する。

BSP:

$$\begin{aligned}&\text{Maximize} && \min_{(i,j)\in A}\mu_{ij}(f_{ij})\\ &\text{Maximize} && \min_{t\in T}\mu_t(f_t)\\ &\text{s.t.} && \sum_{i\in N'-\{u\}}f_{i*}=\sum_{k\in N'-\{s\}}f_{*k}\\ & && f_{ij}:\text{非負整数},\ (i,j)\in A\end{aligned}$$

ここで、本研究で用いる表現の定義をおこなう。フローパターン $\mathbf{f}$ について、フローパターンベクトルを

$$(f^1,f^2)\triangleq\left(\min_{(i,j)\in A}\mu_{ij}(f_{ij}),\min_{t\in T}\mu_t(f_t)\right)$$

とし、

$$f_b^1\le f_a^1,\ f_b^2\le f_a^2 \text{ かつ } (f_a^1,f_a^2)\ne(f_b^1,f_b^2)$$

が満足されるとき $\mathbf{f}_a$ が $\mathbf{f}_b$ を優越しているものとする。もし、$\mathbf{f}$ を優越するようなフローパターン $\mathbf{f}'$ が存在しなければ、$\mathbf{f}$ を非劣フローパターンと呼ぶ。一般的に、両方の目的関数を最大化するフローパターンは存在しないため、非劣フローパターンを求める手続きを次節で考える。

3 BSP の解法手続き

すべてのフロー値 f_{ij}, f_{ss_i}, f_tは整数であるので、整数値容量のみ対象とすればよい。先ず、[4] におけるアルゴリズムを用いて次に示す通常のファジィシェアリング問題 **BSP**(1) を解く。

BSP(1):

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} && \min_{t\in T} \mu_t(f_t) \\ &\text{s.t.} && \sum_{i\in N'-\{u\}} f_{i*} = \sum_{k\in N'-\{s\}} f_{*k} \\ & && 0 \le f_{ij} : \text{非負整数} \le c_{ij},\ (i,j) \in A \end{aligned}$$

つまり、$G'(N',A')$ 中のアーク容量を $C_{ij} = c_{ij}$, $C_{ss_i} = \infty$, $C_{tu} = \infty$ $((i,j) \in A,\ s_i \in S,\ t \in T)$ とした場合の s から u へ流れる最大フロー値 $v(1)$ を求め、フローパターンベクトルの第1成分が1となる非劣フローパターン $\mathbf{f}(1)$ を最初に求めるのである。**BSP**(1) の最適値を $f(1)^2$ とし、2番目の手続きとして以下に示すファジィシェアリング問題 **BSP** (0) を解く。

BSP(0):

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} && \min_{t\in T} \mu_t(f_t) \\ &\text{s.t.} && \sum_{i\in N'-\{u\}} f_{i*} = \sum_{k\in N'-\{s\}} f_{*k} \\ & && 0 \le f_{ij} : \text{非負整数} \le \bar{c}_{ij},\ (i,j) \in A \end{aligned}$$

勿論 **BSP**(1) のときと同様、$G'(N',A')$ 中のアーク容量を $C_{ij} = \bar{c}_{ij}$, $C_{ss_i} = \infty$, $C_{tu} = \infty$ $((i,j) \in A,\ s_i \in S,\ t \in T)$ とした場合の s から u へ流れる最大フロー値 $v(0)$ をあらかじめ求めておく必要がある。**BSP**(0) において得られた最適フローパターンおよび最適値をそれぞれ $\mathbf{f}(0)$, $f(0)^2$ とする。ここで、異なる $\mu_{ij}(k)$, $k \in (c_{ij}, \bar{c}_{ij})$, $(i,j) \in A$ についてソートをおこない、その結果を $\mu^0 \equiv 1 > \mu^1 > \cdots > \mu^l > \mu^{l+1} \equiv 0$ (l : 異なる $\mu_{ij}(k)$ の個数) とすることにより、次のような解法アルゴリズムを考えることができる。

Algorithm

Step 0 : $q = 1$, $DS = \{\mathbf{f}(1)\}$, $DV = \{(1, f(1)^2)\}$ とし、**Step 1** へ。

Step 1 : [4] における方法を用いて、次のファジィシェアリング問題 **BSP**(μ^q) を解く。

BSP(μ^q):

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} && \min_{t\in T} \mu_t(f_t) \\ &\text{s.t.} && \sum_{i\in N'-\{u\}} f_{i*} = \sum_{k\in N'-\{s\}} f_{*k} \\ & && 0 \le f_{ij} : \text{非負整数} \le C^q_{ij},\ (i,j) \in A \end{aligned}$$

ただし、$C^q_{ij} = (1-\mu^q)\bar{c}_{ij} + \mu^q c_{ij}$, $C_{ss_i} = \infty$, $s_i \in S$ とする。**BSP**(μ^q) の最適フローパターンと最適値をそれぞれ $\mathbf{f}(\mu^q)$, $f(\mu^q)^2$ としたとき、$\mathbf{f}(\mu^q)$ を優越するフローパターンが DS 中に存在すれば **Step 2** へ、そうでなければ $DS = DS \cup \{\mathbf{f}(\mu^q)\}$, $DV = DV \cup \{(\mu^q, f(\mu^q)^2\}$ として **Step 2** へ。

Step 2 : $q = q+1$ とする。$q \neq l+1$ なら **Step 1** へ、そうでなければ $\mathbf{f}(0)$ を優越するフローパターンが DS 中に存在するかどうかを調べ、存在すれば終了、そうでなければ $DS = DS \cup \{\mathbf{f}(0)\}$, $DV = DV \cup \{(0, f(0)^2)\}$ として終了。

上記のアルゴリズムから得られる集合 DS, DV が最適フローパターンおよびそのフローパターンベクトルである。

4 まとめ

整数フローに対するシェアリング問題にファジィ容量制約と満足度を導入することにより2目的モデルを提案し、解法の妥当性を明らかにした。また、その計算オーダーについては、$n = |N|$, $m = |A|$ における最大フロー問題の最悪実行時間を $cf(n,m)$ とすれば、$O(|T|mcf(n,m))$ である。

参考文献

[1] J.R.Brown, The Sharing Problem, Operations Research, vol.27, pp.324-340, 1979.

[2] S.Chanas & W.Kolodziejczyk, Maximum Flow in a Network with Fuzzy Arc Capacities, Fuzzy Sets Syst., vol.8, pp.139-151, 1982.

[3] S.Chanas & W.Kolodziejczyk, Integer Flows in Network with Fuzzy Capacity Costraints, Networks, vol.16, pp.17-31, 1986.

[4] M.Tada, H.Ishii, T.Nishida & T.Masuda, Fuzzy Sharing Problem, Fuzzy Sets Syst., vol.33, pp.303-313, 1989.

連絡先

〒565 大阪府吹田市山田丘2-1
大阪大学大学院工学研究科
応用物理学専攻
伊藤 健
TEL 06-877-5111 (Ext. 3641)
FAX 06-878-1385

WE2-2

遺伝的アルゴリズムによるファジィ処理時間を伴うフローショップ・スケジューリング

Flow-shop Scheduling with Fuzzy Processing Time Using Genetic Algorithms

辻村泰寛　玄　光男　久保田えりか
Yasuhiro TSUJIMURA　Mitsuo GEN　Erika KUBOTA

足利工業大学　経営工学科
Dept. of Industrial & Systems Engg., Ashikaga Institute of Technology

Abstract

Flow-shop Scheduling Problem (FSP) is known as one of extremely hard problem because it belongs to *NP*-hard class in nature. The Genetic Algorithm (GA) is known as one of the most powerful tools for solving this kind of combinatorial optimization problems, especially it is more useful for large-scale real problems.

Generally, the data of real-world problems are imprecise, vague or uncertain. Then, the input data can be only estimated as within uncertainty, this uncertainty may be represented by a fuzzy number, and so reduce errors of imprecision.

In this paper, we propose a new method for solving FSP integrating GA in which processing time is represented by a fuzzy number. The representation of the schedules is a list that means a job sequence occurs on machines. The proposed genetic operators, crossover and mutation, for this representation always produce the legal schedule. Further, we show numerical experiments using some FSPs to demonstrate good performance of the proposed method.

1　はじめに

フローショップ・スケジューリング問題 (Flow-shop Scheduling Problem:FSP) は，m 台の機械で n 個の仕事を処理する上で，最大完了時間を最小にするもので，NP 完全な組合せ最適化問題の一つである．このような問題に対して，これまで分岐限定法などの種々の解法が提案されているが，それらの解法は計算量の点から大規模な問題になると，高速な計算機を使用しても莫大な時間を要するという問題点がある．したがって，このような大規模な問題に対して，効率的な解法が必要とされる．

一方，現実の問題では，さまざまな入力データは一般的に多くのあいまいさを含むことが多く，これらを無視することは現実性の希薄な解を導き出すことにつながる．このような入力データのあいまいさを比較的容易に表現する方法としては，ファジィ数を用いる方法がよく用いられる [1]．ここでは，FSP の処理時間に対して，三角型ファジィ数 (Triangular Fuzzy Number:TFN) を用いることにより，より現実的なモデル化を行う．

本稿では，最近，効率的な組合せ最適化手法として注目されている，遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms:GA) を用いて FSP を解くための手法を報告する．すなわち，FSP の制約条件を考慮した遺伝子表現と遺伝的操作を検討し，それらを組み入れた GA を提案する．さらに，数値例により提案する手法の有用性を示す．

2　ファジィ数とその比較法

前述したように，ここではファジィ数として三角型ファジィ数 (TFN) を用いる．TFN $\tilde{A}$ を三項対 (a_1, a_2, a_3) で表すものとし，TFN 同士の四則演算は，次のように計算するものとする [1]．ただし，$\tilde{A} \geqq 0$，$\tilde{B} \geqq 0$ とする．

$$\tilde{A} + \tilde{B} = (a_1 + b_1,\ a_2 + b_2,\ a_3 + b_3)$$
$$\tilde{A} - \tilde{B} = (a_1 - b_3,\ a_2 - b_2,\ a_3 - b_1)$$
$$\tilde{A} \cdot \tilde{B} = (a_1 \cdot b_1,\ a_2 \cdot b_2,\ a_3 \cdot b_3)$$
$$\tilde{A} \,/\, \tilde{B} = (a_1/b_3,\ a_2/b_2,\ a_3/b_1)$$

特に

$$\tilde{A}^{-1} = 1/\tilde{A} = (1/a_3,\ 1/a_2,\ 1/a_1)$$

TFN $\tilde{A}_i$ $(i = 1,2,\cdots,n)$ を要素とする集合 G を考える．ここで，集合 G において $\tilde{A}_i$ の中で最も大きい TFN を $\tilde{A}^*$（最も小さい TFN を $\tilde{A}_*$）と定義する．すなわち，$\tilde{A}^* = \max G$ ($\tilde{A}_* = \min G$) とする．$\tilde{A}^*$（あるいは $\tilde{A}_*$）を求めるために TFN 同士を比較する必要があるが，この比較には，次の三つの比較基準を用いる [1]．

基準１：代表通常数

$$\tilde{\tilde{A}} = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4}$$

を用いて比較する．

基準２：基準１により大小関係が確定しない場合には，モード（すなわち，a_2）を用いて比較する．

基準３：基準２により大小関係が確定しない場合には，広がり（すなわち，$a_3 - a_1$）を用いて比較する．

例えば，$G = \{\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \tilde{A}_3, \tilde{A}_4\}$，$\tilde{A}_1 = (2,5,8)$，$\tilde{A}_2 = (3,4,9)$，$\tilde{A}_3 = (3,5,7)$，$\tilde{A}_4 = (4,5,8)$ に対して，基準１～３を適用すると，$\tilde{A}_4 > \tilde{A}_1 > \tilde{A}_3 > \tilde{A}_2$ となるので，$\tilde{A}^* = \tilde{A}_4$ が得られる．

3 遺伝子表現と評価関数

3.1 遺伝子表現

FSP を GA を用いて解く場合，その制約条件により，遺伝子表現および実行可能なスケジュールが得られるような交叉方法を定義することが難しい [5]-[8]．フローショップ・スケジューリングとは，各機械での処理時間が与えられ，各機械で全てのジョブが同じ順番で処理されることであるので，ジョブが処理される順，すなわち先着順序にしたがって染色体 V_i (i = 1,2, $\cdots$, $popsize$) を作成し，それによりスケジュールを表現すればよい．ただし，$popsize$ は集団サイズである．例えば，染色体 (5 4 3 6 1 2) は，ジョブ が 5, 4, 3, 6, 1, 2 の順番で処理されることを示している．

3.2 評価関数

ここでは，染色体 V_i で表されるスケジュールのファジィ最大完了時間 $\tilde{FT}$ の逆数

$$\tilde{eval}(V_i) = 1/\tilde{FT}$$

をその染色体の評価関数とする．また，ジョブはいつでも処理できる状態にあるとし；準備時間は考えない．

ここでは，良い染色体が生成されても交叉と突然変異により破壊されてしまう危険性があるので，次式のように各世代で最も良い染色体と，それ以前の全ての世代において現れた最も良い染色体とを比較し，良い方を次世代に残すことにより最終的に最も良い染色体が得られるようにしている．

$$V^* = \arg\tilde{\max}_{V_i}\{\tilde{eval}(V_i)\}$$

ここで，arg$\tilde{\max}$の arg は argument の省略形であり，比較基準 1 ～ 3 に基づいて $\tilde{eval}(V_i)$ が最大となったとき（最大なものを求める方法は，$\tilde{\max}$に準じる）の V_i を採用することを意味する．

4 遺伝的操作

4.1 交叉

ここでは，交叉した後のスケジュールに同じ遺伝子 (ジョブ) が現れたり，遺伝子が足りなかったりしないように交叉を行う必要がある．まず，交叉確率にしたがって選ばれた染色体の中から 2 つの親を選び，それぞれの一部分を選んで互いに交換する．生成された 2 つの子染色体には致死遺伝子が発生するが，双方の致死遺伝子同士を交換することで，それぞれの子染色体から致死遺伝子を取り去る．

以下に，交叉の例を示す．

例） 親 V_1 と親 V_2 が選ばれたとする．

$V_1 = 21 \mid 564 \mid 73$ 　 $\mid$ $\mid$は交換する部分を示す．
$V_2 = 62 \mid 471 \mid 35$

$V_1' = 21 \mid 471 \mid 73$ 　 致死遺伝子 1, 7 が発生する．
$V_2' = 62 \mid 564 \mid 35$ 　 致死遺伝子 6, 5 が発生する．

$V_1' = 26 \mid 471 \mid 53$ 　 1 と 6, 7 と 5 を入れ換えて
$V_2' = 12 \mid 564 \mid 37$ 　 致死遺伝子を取り去る．

4.2 突然変異

ここでの突然変異は，突然変異確率にしたがって選ばれた染色体において，任意の 2 つの遺伝子座を選び，その間で遺伝子を交換する方法を用いる．

以下に，突然変異の例を示す．

例） 染色体 V が選ばれたとする．

$V = 3561427$ 　 5 と 2 の遺伝子を入れ換える
$V' = 3261457$ 　 と新しい個体が生成される．

4.3 選択

ここでは，ルーレット選択法 [4] により選択を行う．

5 提案するアルゴリズム

提案するアルゴリズムを，以下に示す．

ステップ 0：パラメータの設定
ジョブ数 (n)，機械数 (m)，集団サイズ ($popsize$)，最大世代数 ($maxgen$)，交叉確率 (p_c)，突然変異確率 (p_m) を設定する．$\tilde{max\_eval} = (0,0,0)$，$gen = 0$ とする．

ステップ 1：初期集団の生成
初期集団の染色体 V_i (i=1, 2, $\cdots$, $popsize$) を生成する．

ステップ 2：評価関数の計算
各染色体 V_i の評価関数を計算する．
$\tilde{P}_j(k)$ = 機械 j の k 番目のファジィジョブ処理時間
$\tilde{C}_j(k)$ =機械 j で k 番目のファジィジョブ完了時間
$\tilde{FT} = V_i$ のファジィ最大完了時間

$$\begin{aligned}
&\tilde{C}_1(1) = \tilde{P}_1(1)\\
&\tilde{C}_j(1) = \tilde{C}_{j-1}(1) + \tilde{P}_j(1), \qquad j = 2,3,\cdots,m\\
&\tilde{C}_1(k) = \tilde{C}_1(k-1) + \tilde{P}_1(k), \qquad k = 2,3,\cdots,n\\
&\tilde{C}_j(k) = \tilde{max}\{\tilde{C}_{j-1}(k), \tilde{C}_j(k-1)\} + \tilde{P}_j(k),\\
&\qquad\qquad j = 2,3,\cdots,m \quad , \quad k = 2,3,\cdots,n\\
&\tilde{FT} = \tilde{C}_m(n)\\
&\tilde{eval}(V_i) = 1/\tilde{FT}
\end{aligned}$$

そして，現世代の集団に対して，比較基準に基づいて

$\tilde{max\_eval} < \tilde{\max}_i\{\tilde{eval}(V_i)\}$ ならば，

$$\begin{cases} \tilde{max\_eval} = \tilde{\max}_i\{\tilde{eval}(V_i)\} \\ V^* = \arg\tilde{\max}_{V_i}\{\tilde{eval}(V_i)\} \end{cases} \text{とする．}$$

ここで，$gen = maxgen$ ならば，最良のスケジュール V^* とそのファジィ最大完了時間 ($\tilde{max\_eval}^{-1}$) を出力して，終了する．

次いで，評価関数の合計 F，選択確率 p_i，累積確率 q_i を計算する．

$$F = \sum_{i=1}^{popsize} \hat{eval}(V_i)$$

$$p_i = \hat{eval}(V_i)/F, \qquad i = 1,2,\cdots,popsize$$

$$q_0 = 0,$$

$$q_i = q_{i-1} + p_i, \quad i = 1,2,\cdots,popsize$$

ステップ　3：選択

乱数 $r_j(0 \le r_j \le 1)(j = 1,2,\cdots,popsize)$ を発生させ，ルーレット選択法により環境に適応した集団を選択する．

$$r_j \le q_1 \quad \rightarrow \quad V_j = V_1$$

$$q_{i-1} < r_j \le q_i \quad \rightarrow \quad V_j = V_i$$

ステップ　4：交叉

乱数 $r_j(0 \le r_j \le 1)(j = 1,2,\cdots,popsize)$ を発生させ，$r_j < p_c$ となる V_j を交叉させる親染色体として選ぶ．範囲 $\{1,2,\cdots,n\}$ で整数乱数 $pos1$, $pos2$ を発生させ，染色体の $pos1$ から $pos2$ の間の部分を交換する．交換されていない部分の致死遺伝子をもう 1 つの親の致死遺伝子と入れ換える．

ステップ　5：突然変異

乱数 $r_j(0 \le r_j \le 1)(j = 1,2,\cdots,popsize)$ を発生させ，$r_j < p_m$ となる V_j を突然変異させる染色体として選ぶ．範囲 $\{1,2,\cdots,n\}$ で整数乱数 $pos1$, $pos2$ を発生させ，染色体の $pos1$ と $pos2$ の間で遺伝子を交換する．

ステップ　6：次世代の集団の生成

$gen = gen + 1$ とし，ステップ　2へ戻る．

6　数値例

［数値例　1］

3機械－10ジョブのファジィFSP を考える．各ジョブのファジィ処理時間は，表1で与えられる．

表1　3機械－10ジョブのファジィ処理時間

	1	2	3	4	5
機械1	(1,3,5)	(5,9,10)	(1,4,8)	(7,11,12)	(14,19,20)
機械2	(3,9,11)	(11,19,20)	(3,4,5)	(1,9,13)	(1,9,13)
機械3	(7,9,12)	(4,7,11)	(11,14,17)	(3,9,11)	(3,9,11)
	6	7	8	9	10
機械1	(1,4,7)	(4,7,13)	(7,9,11)	(11,12,13)	(5,6,7)
機械2	(12,19,20)	(11,15,16)	(8,11,12)	(1,5,11)	(7,9,12)
機械3	(6,7,9)	(10,12,14)	(2,4,6)	(3,4,9)	(5,6,11)

各パラメータは，次のように設定する．

集団サイズ ($popsize$)=10
最大世代数 ($maxgen$)=1000
交叉確率 (p_c)=0.6
突然変異確率 (p_m)=0.1

結果：

提案する手法を用いてこの問題を解くと，次のような結果が得られた．

ファジィ最大完了時間 ($\tilde{FT}$) ： (61,116,144)
最良解が得られた世代 ： 92
V^* ： 1 7 4 2 9 10 3 6 5 8

また，世代の進行に対する，ファジィ最大完了時間の変化を図1に示す．ただし，これは 20 回の実験結果の平均を取ったものである．

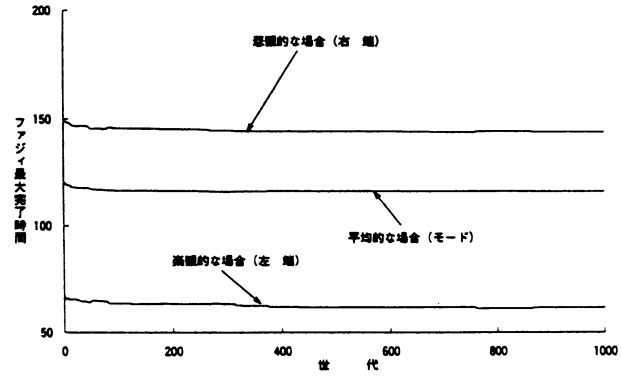


図1　世代の進行に対するファジィ最大完了時間の変化

図1は，各世代の最良なスケジュールのファジィ最大完了時間の左端，モード，および右端の挙動を示している．この場合，問題の特性上，左端を楽観的な場合，モードを平均的な場合，右端を悲観的な場合と考えることができる．例えば，平均値だけを用いて，すなわちクリスプな FSP に対して GA を適用すると，最良なスケジュールの最大完了時間は 116 ではなく，114 になる．これはファジィ数を用いたことの特徴を如実に表すもので，平均値だけではなく，悲観的な場合から楽観的な場合まで，解析者の主観に応じた柔軟な解が得られる．

［数値例　2］

7機械－17ジョブのファジィFSP を考える．各ジョブのファジィ処理時間は，表2で与えられる．

各パラメータは，次のように設定する．

集団サイズ ($popsize$)=40
最大世代数 ($maxgen$)=5000
交叉確率 (p_c)=0.6
突然変異確率 (p_m)=0.1

結果：

提案する手法を用いてこの問題を解くと，次のような結果が得られた．

ファジィ最大完了時間 ($\tilde{FT}$) ： (386,450,489)
最良解が得られた世代 ： 4171
V^* ： 9 6 10 5 16 11 17 8 7 13 2 15 1 4 14 3 12

また，世代の進行に対する，ファジィ最大完了時間の変化を図2に示す．ただし，これは 20 回の実験結果の平均を取ったものである．

表2　7機械－17ジョブのファジィ処理時間

	1	2	3	4	5
機械1	(1,3,5)	(5,9,10)	(1,4,8)	(7,11,12)	(14,19,20)
機械2	(3,9,11)	(11,19,20)	(3,4,5)	(1,9,13)	(1,9,13)
機械3	(7,9,12)	(4,7,11)	(11,14,17)	(3,9,11)	(3,9,11)
機械4	(4,6,7)	(5,8,10)	(21,23,25)	(14,16,19)	(22,23,24)
機械5	(11,13,15)	(1,2,3)	(5,6,8)	(41,45,48)	(14,16,18)
機械6	(14,18,19)	(11,12,13)	(31,35,36)	(11,12,13)	(4,5,6)
機械7	(5,6,8)	(6,9,11)	(5,6,8)	(1,4,5)	(25,26,28)
	6	7	8	9	10
機械1	(1,4,7)	(4,7,13)	(7,9,11)	(11,12,13)	(5,6,7)
機械2	(12,19,20)	(11,15,16)	(8,11,12)	(1,5,11)	(7,9,12)
機械3	(6,7,9)	(10,12,14)	(2,4,6)	(3,4,9)	(5,6,11)
機械4	(1,4,5)	(9,11,13)	(5,8,9)	(11,14,17)	(3,5,7)
機械5	(22,23,24)	(1,2,3)	(5,8,9)	(4,5,6)	(15,18,19)
機械6	(4,5,8)	(1,3,5)	(11,13,15)	(47,48,49)	(3,5,7)
機械7	(47,48,49)	(11,12,13)	(25,26,28)	(24,25,28)	(11,12,13)
	11	12	13	14	15
機械1	(3,6,9)	(15,17,18)	(11,15,16)	(45,48,49)	(14,15,16)
機械2	(2,5,6)	(52,56,59)	(38,35,36)	(1,5,8)	(18,19,20)
機械3	(21,25,26)	(54,58,59)	(14,15,16)	(45,48,49)	(5,7,8)
機械4	(23,24,28)	(21,22,23)	(1,3,5)	(15,16,18)	(25,26,28)
機械5	(11,13,14)	(25,26,28)	(3,6,9)	(4,8,9)	(24,25,26)
機械6	(15,16,18)	(14,15,16)	(23,25,27)	(15,17,18)	(35,36,38)
機械7	(14,16,17)	(7,8,9)	(13,14,20)	(19,20,23)	(14,15,16)
	16	17			
機械1	(1,3,4)	(45,48,54)			
機械2	(5,8,9)	(4,7,9)			
機械3	(45,48,49)	(58,59,60)			
機械4	(21,22,23)	(25,26,27)			
機械5	(25,26,27)	(13,17,19)			
機械6	(58,59,61)	(16,18,19)			
機械7	(14,15,17)	(58,59,60)			

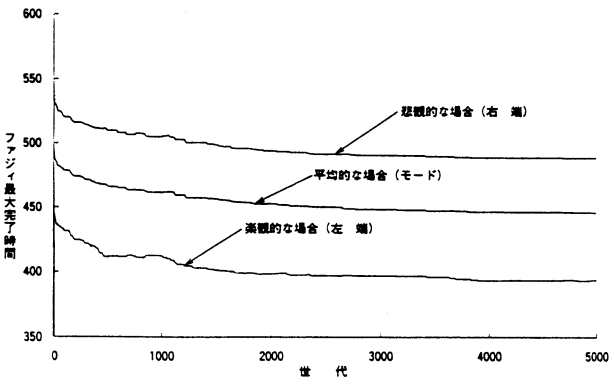


図2　世代の進行に対するファジィ最大完了時間の変化

この問題は，分岐限定法のような従来法を適用して解くと（当然，ファジィ数を扱えるようにする必要がある），最適スケジュールを得るためには非常に多くの時間を要する．したがって，このことよりGAは大規模な問題に対する効率的な近似解法として十分に機能するといえる．

7　おわりに

本稿では，より現実的なモデル化のためにジョブの処理時間にファジィ数を適用したFSPをGAにより解くための手法を提案し，数値例を用いてその有用性を検討した．

その結果，入力データにファジィ数を用いることにより，スケジュールに対し，その最大完了時間を悲観的な場合と楽観的な場合の両側面から検討することができ，より実際的で柔軟な解を得ることができる．また，ファジィFSPに対し，GAは特に大規模な問題に有効な手法であると考えられ，十分に効率的な解法として実用性があるといえる．

参考文献

[1] Kaufmann, A., and M. M. Gupta : *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, Van Nostrand Reinhold, 1988.

[2] Cleveland,G.A. and Smith S.F.Smith : Using Genetic Algorithms to Schedule Flow Shop Releases, *Proc. of the 3rd ICGA*. San Mateo, Calif. Morgan Kaufmann, 1989.

[3] 西川，玉置：ジョブショップ・スケジューリング問題に対する遺伝的アルゴリズムの一構成法，計測自動制御学会論文集，Vol.27，No.5，pp.593-599，1991.

[4] Michalewicz,Z. : *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* 2nd eds., Springer-Verlag, 1994.

[5] Bagchi, S., S.Uckun, Y.Miyabe and K.Kawamura : Exploring Problem-Specific Recombination Operators for Job Shop Scheduling, *Proc. of the 4th ICGA*. San Mateo, Calif., 1991.

[6] 西川：GAのスケジューリング問題への応用，計測と制御，Vol.32，No.1，1993.

[7] Yamada, T and R.Nakano : A Genetic Algorithm Applicable to Large-Scale Job-shop Problems, *Parallel Problem Solving from Nature* 2, Manner and Manderick(eds.), 1992.

[8] 辻村，玄，久保田，張，横田：遺伝的アルゴリズムによるジョブショップ・スケジューリング問題の一解法，日本経営工学会 平成5年度秋季大会予稿集，pp.43-44，1993.

問合せ先：　〒326 栃木県足利市大前町２６８
足利工業大学　経営工学科
辻村泰寛
Tel：0284-62-0605 ext.378
Fax：0284-64-1071
E-mail: tujimr@genlab.ashitech.ac.jp

WE2-3

ポートフォリオ選択問題へのファジィ数理計画法の適用に関する一考察

A Note on Application of Fuzzy Mathematical Programming to Portfolio Selection Problems

乾口 雅弘
Masahiro Inuiguchi
広島大学工学部
Faculty of Engineering,
Hiroshima University

坂和 正敏
Masatoshi Sakawa
広島大学工学部
Faculty of Engineering,
Hiroshima University

Abstract : This paper deals with a portfolio selection problem with fuzzy expected returns. The invalidity of applying the previous fuzzy programming approach is revealed. A new approach to treat the fuzzy portfolio selection problem is introduced and a solution algorithm is proposed. The new approach is quite different from the wellknown Markowitz's approach. Whereas the expected return and the risk play an important role in Markowitz's model, the admissible regret and the robustness play an important role in the proposed model. A shortcoming of the proposed model is described and three countermeasures are proposed.

1. はじめに

各種証券への投資配分問題として，Markowitz [1] により提案されたポートフォリオ選択問題がある．この問題では，確実に予測できない証券の収益を確率分布で表現し，総収益の期待値（リターン）と分散（リスク）の二つの評価基準を用い，期待値はできるだけ大きく，分散はできるだけ小さくするような解が求められる．一般に，期待値を最大化すると同時に分散を最小化するような完全最適解は存在しないので，二つの評価基準に基づくパレート最適解が合理的な解と考えられている．

確率計画法に類似した手法としてファジィ数理計画法があり，Markowitz のポートフォリオ選択モデルが確率計画法を応用したモデルであることから，ポートフォリオ選択問題へのファジィ数理計画法の適用が期待できる．ファジィ数理計画法の適用の利点は，専門家の経験的知識や勘を加味して，証券の予想される収益をファジィ数（可能性分布）として表現できる点と，帰着問題が確率計画法より取り扱い易い点とにある．しかし，単純に確率変数の期待値，分散をそれぞれ，ファジィ数の中央値（最尤値），幅に置き換えて，従来提案されてきたファジィ数理計画法を適用すると，各証券の収益間に負の相互関係がなければ，いずれかの証券に全額投資する解が最適となり，リスクの意味で安全な解が得られない．これは，ファジィ数理計画法では，収益の可能性を考慮しているため，生起しうる範囲での最大の収益や最小の収益に解が依存することによる．したがって，複数の証券が同時に最大や最小の収益を取る可能性が中程の値を取る可能性に比べ小さくなるモデルを用いれば解決できるが，ファジィ数理計画問題の取り扱い易さは損なわれてしまう場合が多い．

田中ら [2] は，ポートフォリオ選択問題へのファジィ数理計画法を適用するため，複数の証券が同時に最大や最小の収益を取る可能性がいずれも中程の値を取る可能性に比べ小さくなる正規可能性分布を用いて定式化している．この方法では，問題は2次計画問題に帰着され，問題の取り扱い易さはそれほど損なわれていない．しかし，Markowitz のモデルと極めて類似しており，大きな相違は平均ベクトルと分散共分散行列の推定にしかない．

本研究では，従来提案されてきたファジィ数理計画法をポートフォリオ選択問題へ適用する場合の問題点を明らかにした上で，新たな取り扱い方法を提案する．この提案法は，Markowitz のモデルとは大きく異なり，不明確さに対する頑健性（ロバストネス）と許容リグレットとに基づき，解を議論しようとするものである．この考え方に基づき定式化した問題の解法が議論される．また，提案法の問題点が述べられ，それに対する三つの改善法が考察される．

2. ファジィポートフォリオ選択問題

各証券の収益が既知のとき，投資する証券の選択問題は次のようになる．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad \boldsymbol{cx} \\ &\text{sub. to} \quad \boldsymbol{ex}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0 \end{aligned} \tag{1}$$

ただし，$\boldsymbol{c}=(c_1,c_2,\ldots,c_n)$，$\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\ldots,x_n)6\mathrm{t}$ であり，c_i は1単位投資したときの収益で，x_i は投資割合を示す決定変数である．また，$\boldsymbol{e}$ は $\boldsymbol{e}=(1,1,\ldots,1)$ なる n 次元ベクトルである．(1) 式の実行可能領域を X と記すことにする．

各 c_i が正確にわからず不明確であるとき，$\boldsymbol{c}=(c_1,c_2,\ldots,c_n)$ の可能な値をファジィ集合（可能性分布）C で表すと，(1) 式は次の可能性計画問題になる．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad \boldsymbol{\gamma x} \\ &\text{sub. to} \quad \boldsymbol{ex}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0 \end{aligned} \tag{2}$$

ただし，$\boldsymbol{\gamma}=(\gamma_1,\gamma_2,\ldots,\gamma_n)$ はファジィ集合 C に制限された可能性変数ベクトルである．本研究では，(2) 式の問題をファジィポートフォリオ選択問題ということにする．

ファジィ集合（可能性分布）C のメンバシップ関数を μ_C とするとき，可能性変数 γ_i を制限する周辺ファジィ集合（周辺可能性分布）C_i は次のメンバシップ関数で定義される．

$$\mu_{C_i}(r)=\sup_{c_1,\ldots,c_{i-1},c_{i+1},\ldots,c_n}\mu_C((c_1,\ldots,c_{i-1},r,c_{i+1},\ldots,c_n)) \tag{3}$$

C_i の h-レベル集合 $[C_i]_h$ の上下限をそれぞれ，$c_i^{\mathrm{R}}(h)=\sup\{r\mid \mu_{C_i}(r)\geq h\}$，$c_i^{\mathrm{L}}(h)=\inf\{r\mid \mu_{C_i}(r)\geq h\}$ とする．このとき，任意の $h\in(0,1]$ について，$\mu_C(c_1^{\mathrm{R}}(h),\ldots,c_n^{\mathrm{R}}(h))\geq h$ かつ $\mu_C(c_1^{\mathrm{L}}(h),\ldots,c_n^{\mathrm{L}}(h))\geq h$ となるとき，可能性変数 γ_i，$i=1,\ldots,n$ には，負の相互関係がないという．

3. 従来の定式化の問題点

従来，さまざまなファジィ数理計画問題の定式化法が提案されてきた [3]．これらの大半は，満足水準最適化モデル，様相性最適化モデル，あいまいさ最適化モデルおよびこれらを混合したモデルに分類できる [4,5]．ここでは，(2) 式のファ

ジィポートフォリオ選択問題にこれらのモデルを適用した際の問題点について述べる．

(a) 満足水準最適化モデル

目的関数が z 以上である必然性の度合が与えられた水準 h 以上のもとで，z を最大化するという解釈に基づき定式化すると，(2) 式は次の問題に帰着される．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad z \\ &\text{sub. to} \quad \inf_{\mu_C(\boldsymbol{c})>1-h} \boldsymbol{cx} \geq z \\ &\qquad\quad \boldsymbol{ex}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0 \end{aligned} \tag{4}$$

ただし，μ_C はファジィ集合 C のメンバシップ関数である．

(b) 様相性最適化モデル

目的関数に対し，だいたい z 以上というファジィ目標 G を与え，ファジィ目標を満足する必然性の度合 h を最大化するように定式化すると，(2) 式は次の問題に帰着される．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad h \\ &\text{sub. to} \quad \mu_G\left(\inf_{\mu_C(\boldsymbol{c})>1-h} \boldsymbol{cx}\right) \geq h \\ &\qquad\quad \boldsymbol{ex}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0 \end{aligned} \tag{5}$$

ただし，μ_G はファジィ目標 G のメンバシップ関数で，上半連続であると仮定する．

(c) あいまいさ最適化モデル

ファジィ集合 C の代表値 $\boldsymbol{d}=(d_1,d_2,\ldots,d_n)$ を一つ選び，$\boldsymbol{dx}$ がある定められた値 z 以上で，目的関数値のファジィ集合 $C\boldsymbol{x}$ の h-レベル集合の幅 r を最小にするように定式化すると，(2) 式は次の問題に帰着される．

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad r \\ &\text{sub. to} \quad \sup_{\mu_C(\boldsymbol{c}^1)\geq h,\ \mu_C(\boldsymbol{c}^2)\geq h} |\boldsymbol{c}^1\boldsymbol{x}-\boldsymbol{c}^2\boldsymbol{x}| \leq r \\ &\qquad\quad \boldsymbol{dx}\geq z,\ \boldsymbol{ex}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0 \end{aligned} \tag{6}$$

また，目的関数に対し，だいたい z 以上というファジィ目標 G を与え，ファジィ目標を満足する必然性の度合が h 以上のもとで，目的関数値のファジィ集合 $C\boldsymbol{x}$ の h-レベル集合の幅 r を最大にするように定式化すると，(2) 式は次の問題に帰着される．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad r \\ &\text{sub. to} \quad \sup_{\mu_C(\boldsymbol{c}^1)\geq h,\ \mu_C(\boldsymbol{c}^2)\geq h} |\boldsymbol{c}^1\boldsymbol{x}-\boldsymbol{c}^2\boldsymbol{x}| \geq r \\ &\qquad\quad \mu_G\left(\inf_{\mu_C(\boldsymbol{c})\geq 1-h} \boldsymbol{cx}\right) \geq h \\ &\qquad\quad \boldsymbol{ex}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0 \end{aligned} \tag{7}$$

以上のモデルのうち，(5)，(6) 式は Markowitz のモデルに対応しており，リターンとリスクの観点からの定式化になっている．これらのモデルについて，以下の定理が成立する．

[定理 1] 可能性変数 $\gamma_i, i=1,\ldots,n$ に，負の相互関係がないとき，(4)〜(7) 式の最適解の中に，ある i に対して，$x_i=1$ となる解が存在する．

定理 1 より，可能性変数 $\gamma_i, i=1,\ldots,n$ に，負の相互関係がないとき，(4)〜(7) 式の最適解が唯一でれば，その解は，ある i に対して，$x_i=1$ となる．すなわち，いずれかの一つの証券に全額投資するという解しか得られない．一つの証券に全額投資することは，可能性変数 $\gamma_i, i=1,\ldots,n$ に，完全に正の相互関係がある場合は納得できるが，完全に正の相互関係がない場合（たとえば，相互関係が全くない場合）には，一か八かの賭のようで合理的とは考えにくい．このような一証券への全額投資は，可能性変数の相互関係が可能性変数の値の組合せが論理的に不可能と考えられる部分だけを除外するという意味で定義されているため生じる．

4. 新たな定式化とその解法

(4)〜(7) 式を定式化する際，用いた評価基準は，一つの実行可能解が与えられると，他の実行可能解に関係なく，評価値が得られるような絶対的な基準であった．ここでは，実行可能解に対する評価値が，他のいくつかの実行可能解と比較しなければ求められないような相対的な評価基準を導入し，ファジィポートフォリオ選択問題を定式化する．

ある配分割合 $\boldsymbol{x}^0$ でいくつかの証券へ投資した後，可能性変数ベクトル $\boldsymbol{\gamma}$ の実現値 $\boldsymbol{c}$ を知ったとき，もし $\boldsymbol{cx}$ を最大化するような配分割合 $\boldsymbol{x}^*$ で投資していれば，$(\boldsymbol{cx}^*-\boldsymbol{cx}^0)\times$(全投資額) だけ多く収益が得られたのに... と後悔することがある．この場合のリグレットは $\boldsymbol{cx}^*-\boldsymbol{cx}^0=\max_{\boldsymbol{y}\in X}\boldsymbol{cy}-\boldsymbol{cx}^0$ と定義できる．ポートフォリオ選択問題では，$\boldsymbol{x}^0$ を決定する前に，可能性変数ベクトル $\boldsymbol{\gamma}$ の実現値 $\boldsymbol{c}$ を知ることはできないので，リグレットも確定的ではなく，不明確さを伴う．すなわち，リグレットは $\rho=\max_{\boldsymbol{y}\in X}\boldsymbol{\gamma y}-\boldsymbol{\gamma x}^0$ と $\boldsymbol{\gamma}$ で表現され，可能性変数 ρ となる．この可能性変数 ρ を制限する可能性分布 R は，拡張原理より，$r\geq 0$ に対して，

$$\mu_R(r|\boldsymbol{x}^0)=\sup_{r=\max_{\boldsymbol{y}\in X}\boldsymbol{cy}-\boldsymbol{cx}^0} \mu_C(\boldsymbol{c}) \tag{8}$$

と定義される．(8) 式により，選択する解 $\boldsymbol{x}^0$ に応じてリグレットの可能性分布が得られる．これにより，リグレット最小化という概念により，ファジィポートフォリオ選択問題を定式化することができる．たとえば，リグレットがだいたい r^0 以下というファジィ目標 G を与え，必然性測度最大化問題として，

$$\max_{\boldsymbol{x}\in X} \inf_{r\geq 0} \max\left(1-\mu_R(r|\boldsymbol{x}), \mu_G(r)\right) \tag{9}$$

と定式化できる．この問題はファジィポートフォリオ選択問題に対する最良必然的ファジィ最適解を求める問題 [6] と等価である．

(9) 式の解の計算方法について議論しよう．(9) 式は次の問題と等価になる．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad h \\ &\text{sub. to} \quad \sup_{\substack{\boldsymbol{c} \\ \mu_C(\boldsymbol{c})>1-h}} \max_{\boldsymbol{ey}=1,\ \boldsymbol{y}\geq 0} (\boldsymbol{cy}-\boldsymbol{cx}) \leq \mu_G^*(h) \\ &\qquad\quad \boldsymbol{ex}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0 \end{aligned} \tag{10}$$

ただし，μ_G^* は μ_G の擬逆関数で次式で定義される．

$$\mu_G^*(h)=\sup\{r \mid \mu_G(r)\geq h\} \tag{11}$$

$\max_{\boldsymbol{y}\in X}\boldsymbol{cy}$ の最適解は必ず集合 $\mathcal{O}=\{\boldsymbol{\delta}^i=(\delta_i(1),\ldots,\delta_i(n)),\ i=1,\ldots,n\}$ にある．ただし，δ_i は $i=j$ のときに限り，$\delta_i(j)=1$ となり，他は 0 となるクロネッカのデルタ関数である．このことに注意すると，(10) 式は次のように書き換えることができる．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad h \\ &\text{sub. to} \quad \max_{\boldsymbol{c}\in \mathrm{cl}\,(C)_{1-h}} (\boldsymbol{c\delta}^i-\boldsymbol{cx}) \leq \mu_G^*(h), \\ &\qquad\qquad\qquad\qquad i=1,2,\ldots,n \\ &\qquad\quad \boldsymbol{ex}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0 \end{aligned} \tag{12}$$

ただし，$\mathrm{cl}\,D$ は集合 D の閉包を表す．可能性変数 $\gamma_i, i=1,\ldots,n$ に相互関係がないとき，(12) 式は線形計画問題に帰

着されるが，ここでは，一般の場合を考える．(12) 式は二分法と緩和法に基づく次のアルゴリズムにより解くことができる．なお，C が正規かつ凸であると仮定し，$\mu_C(\boldsymbol{c}^0)=1$ なる $\boldsymbol{c}^0$ を任意に定める．$\boldsymbol{c}^j \neq \boldsymbol{c}^0$ について，関数 $\boldsymbol{c}^j:[0,1]\to\mathbf{R}^n$ を $\boldsymbol{c}^j(h)=(1-k^j(h))\boldsymbol{c}^0+k^j(h)\boldsymbol{c}^j$ と定める．ただし，$k^j(h)=\sup\{k \mid \mu_C((1-k)\boldsymbol{c}^0+k\boldsymbol{c}^j)\geq h\}$ である．

Step 1. $h^{\mathrm{L}}=0$, $h^{\mathrm{U}}=1$, $k=1$, $\boldsymbol{x}^0=\boldsymbol{\delta}^1$ とおく．

Step 2. $h=\frac{1}{2}(h^{\mathrm{L}}+h^{\mathrm{U}})$ として，すべての $\boldsymbol{\delta}^i \in \mathcal{O}$ について，

$$\mu_G\left(\max_{\boldsymbol{c}\in \mathrm{cl}\,(C)_{1-h}}(\boldsymbol{c}\boldsymbol{\delta}^i-\boldsymbol{c}\boldsymbol{x}^0)\right)$$

を算出する．その中で最小のメンバシップ値 h^k を与える $\boldsymbol{\delta}^i$ を $\boldsymbol{z}^k$ とし，その最適解を $\boldsymbol{c}^k$ とする．

Step 3. $k=1$ ならば，$k=2$, $\boldsymbol{x}^0=\boldsymbol{z}^k$ として，Step 2 へ戻る．

Step 4. $h^k \geq h$ ならば，$h^{\mathrm{L}}=h$ として，Step 3 へ戻る．

Step 5. $h^{\mathrm{U}}-h^{\mathrm{L}}<\varepsilon$ ならば，終了する．このとき，最適解は $\boldsymbol{x}^0$ である．

Step 6. $\boldsymbol{z}^k=\boldsymbol{z}^j$ かつ $\boldsymbol{c}^k=\boldsymbol{c}^j$ なる $j\in\{1,2,\ldots,k-1\}$ が存在すれば，$k=k-1$ とする．

Step 7. $h=\frac{1}{2}(h^{\mathrm{L}}+h^{\mathrm{U}})$ として，次の線形計画問題を解き，最適解を $(\boldsymbol{x}^*,r^*)$ とする．

$$\begin{aligned}&\text{minimize} && r\\ &\text{sub. to} && \boldsymbol{c}^i(h)\boldsymbol{x}^i-\boldsymbol{c}^i(h)\boldsymbol{x}\leq r,\quad i=1,2,\ldots,k\\ &&& \boldsymbol{e}\boldsymbol{x}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0\end{aligned}\qquad(13)$$

Step 8. $\mu_G(r^*)<h$ ならば，$h^{\mathrm{U}}=h$ として，Step 7 へ戻る．そうでなければ，$\boldsymbol{x}^0=\boldsymbol{x}^*$ として，Step 3 へ戻る．

特に，C が基準型ファジィ数 [7] の場合には，Step 2 の問題は，シンプレックス法と再最適化手法を適用して比較的容易に解くことができる．また，(9) 式の最適解の中に，可能性変数 $\gamma_i, i=1,\ldots,n$ に，負の相互関係がない場合にも，ある i に対して，$x_i=1$ となる解が存在するとは限らない．通常，いくつかの証券に分散投資するという解が得られる．

5. 頑健性–許容リグレット分析

ファジィ目標 G を単純に r^0 以下とクリスプに与えた場合，(10) 式の解 $(\boldsymbol{x}^0,h^0)$ について，

> $\boldsymbol{c}$ が $\mu_C(\boldsymbol{c})>1-h^0$ を満たす範囲でどのような値を取ろうとも，リグレット $\max_{\boldsymbol{y}\in X}\boldsymbol{c}\boldsymbol{y}-\boldsymbol{c}\boldsymbol{x}^0$ は r^0 以下になる．

が成立する．このことより，r^0 はどれくらいまでのリグレットを許容できるかを示す許容リグレットを表しており，h^0 は証券の収益の変動をどの程度まで考慮するかを示す頑健性の指標を表していると考えることができる．r^0 は小さいほど好ましく，h^0 は大きいほど安全である．許容リグレットと頑健性の二つの指標を用いると，決定は次の 2 目的計画問題のパレート最適解集合（パレート境界面）からなされなければならない．

$$\begin{aligned}&\text{minimize} && r\\ &\text{maximize} && h\\ &\text{sub. to} && \sup_{\substack{\boldsymbol{c}\\ \mu_C(\boldsymbol{c})>1-h}}\ \max_{\boldsymbol{e}\boldsymbol{y}=1,\ \boldsymbol{y}\geq 0}(\boldsymbol{c}\boldsymbol{y}-\boldsymbol{c}\boldsymbol{x})\leq r\\ &&& \boldsymbol{e}\boldsymbol{x}=1,\ \boldsymbol{x}\geq 0\end{aligned}\qquad(14)$$

このように，許容リグレットと頑健性という二つの評価基準で考えることは，Markowitz のモデルにおいて，期待値（リターン）と分散（リスク）で考えることに対応している．本提案モデルの頑健性と Markowitz のモデルの分散（リスク）は，いずれも不明確さに対する評価基準で対応づけ易い．一方，本提案モデルの許容リグレットと Markowitz のモデルの期待値は，前者が他の実行可能解との比較により求められるのに対し，後者は与えられた解だけで求められ，相対的な評価と絶対的な評価の相違を示している．

(14) 式のパレート最適解集合の中から一つの解を選択するとき，意思決定者が許容リグレットと頑健性の度合とに関する効用関数をもつと仮定し，その効用関数を最大にする解が選ばれるが，参考点法などの対話型多目的計画法により，陽に効用関数を求めることなく意思決定者の選好解を求めることもできる．

6. 問題点とその対処法

Markowitz の基本モデルでは，バラツキが小さい収益分布をもつ他の証券より，バラツキは大きいが全体的にかなり右に（大きい方に）収益が分布する証券が存在した場合，期待値の制約を緩く（期待値を小さく）設定しておくと，分散を最小化するため，合理的な解が得られないという問題点がある（実際問題においてこのような状況は極めて稀であろう）．本提案モデルでは，この状況は問題とならないが，別の問題点がある．

その問題点は，次のようなものである．右にも左にも極めてバラツキが大きい収益分布をもつ証券，すなわち，極端に高収益となる可能性はあるが極めて危険性の高い証券が存在する場合，本提案モデルでは，すべての可能性を考慮しているため，その証券の高収益の可能性から，その証券へ極端に多く投資する解が得られてしまうという問題点である．ここでは，この問題点を避ける方法について議論する．

(a) プレセレクション

上述の問題点を克服する一つの方法として，(9) 式のモデルを適用する前に投資の候補とする証券を予め選定しておくことが考えられる．すなわち，危険な証券は，この段階で投資の候補から除外する方法である．この操作をプレセレクションという．プレセレクションの評価基準としては，次の二つが考えられる．

1. $h\in(0,1]$ を予め定め，収益の周辺ファジィ集合（周辺可能性分布）の h-レベル集合の下限値と幅を求める．下限値が予め定められた値より小さく，幅が定められた値より大きければ，その証券を投資の候補から除外する．
2. 必然性の度合 $h\in(0,1]$ を予め定め，最低限得たい収益をだいたい z^0 以上というファジィ目標 Z^0 で与え，収益の周辺ファジィ集合（周辺可能性分布）に基づき，ファジィ目標 Z^0 を満たす必然性の度合を計算する．計算された必然性測度の値が h より小さければ，その証券を投資の対象から除外する．

(b) 制約条件の導入

プレセレクションとは異なった問題点の対処方法として，(2) 式の問題を考える際，危険な解を実行可能解とみなさないようにすることが考えられる．すなわち，(2) 式の問題に不明確さに対して安全な解だけを考えるように制約条件を追加する方法である．追加する制約条件としては，次のものが考えられる．

- 必然性の度合 $h^0\in(0,1]$ を予め定め，最低限得たい収益をだいたい z^0 以上というファジィ目標 Z^0 で与え，選択する解の収益がファジィ目標 Z^0 を満たす必然性が h^0 以上でなければならないという制約条件を

加える．

$$\inf_{\mu_C(\boldsymbol{c})>1-h^0} \boldsymbol{cx} \geq \mu^*_{Z^0}(h^0) \tag{15}$$

ただし，μ_{Z^0} はファジィ目標 Z^0 のメンバシップ関数で，$\mu^*_{Z^0}$ はその擬逆関数で次式で定義される．

$$\mu^*_{Z^0}(h) = \inf\{r \mid \mu_{Z^0}(r) \geq h\} \tag{16}$$

なお，この場合，(2) 式の問題は，

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \boldsymbol{\gamma x} \\ \text{sub. to} \quad & \inf_{\mu_C(\boldsymbol{c})>1-h^0} \boldsymbol{cx} \geq \mu^*_{Z^0}(h^0) \\ & \boldsymbol{ex} = 1 \\ & \boldsymbol{x} \geq 0 \end{aligned} \tag{17}$$

となり，4 で述べた解法アルゴリズムにおける $\mathcal{O}$ の代わりに次の ΠB^0 を用いなければならない．すなわち，(17) 式の実行可能集合を X_1 と記すと，C の台（強 0–レベル集合）C_0 を用いて，集合 ΠS^0 を

$$\Pi S^0 = \left\{ \boldsymbol{x} \in X \;\middle|\; \boldsymbol{cx} = \max_{\boldsymbol{y} \in X_1} \boldsymbol{cy} \right. \\ \left. \text{なる } \boldsymbol{c} \in \text{cl } (C)_0 \text{ が存在する} \right\} \tag{18}$$

と定め，次式の ΠS^0 のすべての端点集合 ΠB^0 を用いる．

$$\Pi B^0 = \{\boldsymbol{y}^1, \boldsymbol{y}^2, \ldots, \boldsymbol{y}^p\} \tag{19}$$

なお，ΠB^0 はシンプレックス法と再最適化手法により容易に求められることが知られている [8]．

(c) リグレット関数の変更

4 で定義したリグレット関数 $r(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c})$ は，$\boldsymbol{c}$ が与えられたとき，$\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{c}) = \arg\max_{\boldsymbol{y} \in X} \boldsymbol{cy}$ と定義すると，$r(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c}) = \boldsymbol{c}(\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{c}) - \boldsymbol{x})$ と表せる．このリグレット関数は，解 $\boldsymbol{x}$ を選択した後に可能性変数ベクトル $\boldsymbol{\gamma}$ の実現値 $\boldsymbol{c}$ を得たとき，もし $\boldsymbol{c}$ に対する最適解 $\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{c})$ に従い投資していれば，単位投資金額当たりどれだけ多くの収益が得られていたかを示している．投資する前には，もちろん可能性変数の実現値がわからないので，仮に $\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{c})$ に従って投資したとしても，良い解が得られるとは限らず，リスクを伴っている．したがって，もし $\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{c})$ に従うと，選択した解 $\boldsymbol{x}$ に比べリスクの大きな決定になっていたのであれば，たとえいま偶然に $\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{c})$ を最適とする $\boldsymbol{\gamma}$ の実現値 $\boldsymbol{c}$ が得られたとしても，解 $\boldsymbol{x}$ を選んだことに対する後悔の度合は，$\boldsymbol{c}(\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{c}) - \boldsymbol{x})$ より小さくなると考えられる．そこで，$\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{c})$ と $\boldsymbol{x}$ とのリスクの差，すなわち，最悪値の差を考慮に入れると，リグレット関数を次のように定義することができる．

$$r(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c}) = \boldsymbol{c}(\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{c}) - \boldsymbol{x}) + \min_{\mu_C(\boldsymbol{d}) \geq \mu_C(\boldsymbol{c})} \boldsymbol{dx}^*(\boldsymbol{c}) - \min_{\mu_C(\boldsymbol{d}) \geq \mu_C(\boldsymbol{c})} \boldsymbol{dx} \tag{20}$$

このリグレット関数を用いると，C が正規かつ凸ファジィ集合であれば，(2) 式の問題は，(12) 式に対応して，次のようになる．

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & h \\ \text{sub. to} \quad & \max_{\boldsymbol{c} \in \text{cl } (C)_{1-h}} (\boldsymbol{c\delta}^i - \boldsymbol{cx}) + \min_{\boldsymbol{d} \in \text{cl } (C)_{1-h}} \boldsymbol{d\delta}^i \\ & - \min_{\boldsymbol{d} \in \text{cl } (C)_{1-h}} \boldsymbol{dx} \leq \mu^*_G(h), \\ & \qquad i = 1, 2, \ldots, n \\ & \boldsymbol{ex} = 1, \ \boldsymbol{x} \geq 0 \end{aligned} \tag{21}$$

したがって，4 で述べたアルゴリズムの Step 3 を次のように変更して，(20) 式のようにリグレット関数を変更した場合も解を求めることができる．

Step 2. $h = \frac{1}{2}(h^{\mathrm{L}} + h^{\mathrm{U}})$ として，すべての $\boldsymbol{\delta}^i \in \mathcal{O}$ について，次の三つの最適化問題を解き，最適値 r^i_1, r^i_2, r^i_3 を求める．

$$\begin{aligned} r^i_1 &= \max_{\boldsymbol{c} \in \text{cl } (C)_{1-h}} (\boldsymbol{c\delta}^i - \boldsymbol{cx}^0) \\ r^i_2 &= \min_{\boldsymbol{c} \in \text{cl } (C)_{1-h}} \boldsymbol{c\delta}^i \\ r^i_3 &= \min_{\boldsymbol{c} \in \text{cl } (C)_{1-h}} \boldsymbol{cx}^0 \end{aligned}$$

r^i_1, r^i_2, r^i_3 を用いて，$h^i = \mu_G(r^i_1 + r^i_2 - r^i_3)$ を算出する．n 個の μ^i の中で最小のメンバシップ値 h^k を与える $\boldsymbol{\delta}^i$ を $\boldsymbol{z}^k$ とし，その最適解を $\boldsymbol{c}^k$ とする．

7. おわりに

本研究では，各証券の収益がファジィ集合として与えられるポートフォリオ選択問題を取り上げ，ファジィ数理計画法の適用について議論した．従来のファジィ数理計画法におけるモデルを用いたのでは，分散投資を示す合理的な解が得られない場合が多いことを明らかにした．そこで，新たなファジィ数理計画問題の取り扱い方を導入し，分散投資を示す合理的な解が得られることを述べ，その一般的な解法を提案した．また，本提案モデルが，Markowitz のポートフォリオ選択モデルのようにリターンとリスクという概念ではなく，許容リグレットと頑健性という概念で構成されていることから，頑健性と許容リグレットの 2 基準問題としても取り扱えることを示した．最後に，本提案モデルの問題点を述べるとともに，それに対する三つの対処法を議論した．本研究により，ファジィ係数をもつポートフォリオ選択問題が Markowitz のモデルとは異なった観点から取り扱えることが明らかになり，ポートフォリオ選択問題の新しい分析手法が与えられたと考えられる．

参考文献

1. H. M. Markowitzs: Portfolio Selection – Efficient Diversification of Investiment, John Wiley, (1959).
2. 田中，中山，石渕：可能性ポートフォリオ選択，第 10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，739–740 (1994).
3. M. Inuiguchi, H. Ichihashi and H. Tanaka: Fuzzy Programming: A Survey of Recent Developments, in R. Słowinski and J. Teghem (eds.), Stochastic versus Fuzzy Approaches to Multiobjective Mathematical Programming under Uncertainty, Kluwer Academic Publishers, 45–68 (1990).
4. M. Inuiguchi, H. Ichihashi and Y. Kume: Relationships between Modality Constrained Programming Problems and Various Fuzzy Mathematical Programming Problems, Fuzzy Sets and Systems, Vol.49, 243–259 (1992).
5. 乾口：ファジィ数理計画問題の可能性理論に基づく体系的定式化法，大阪府立大学博士論文 (1991).
6. 乾口，坂和：ファジィ線形計画問題におけるロバストでソフトな最適化、第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 (1995).
7. J. Ramík and K. Nakamura: Canonical Fuzzy Numbers of Dimension Two, Fuzzy Sets and Systems, Vol.54, 167–180 (1993)
8. R. E. Steuer: Algorithms for Linear Programming Problems with Interval Objective Function Coefficients, Mathematics of Operations Research, Vol.6, No.3, 333–348 (1981).

[問い合わせ先] 〒 739 東広島市鏡山 1 丁目 4 − 1
広島大学工学部第二類（電気系）
乾 口 雅 弘
TEL : 0824-24-7695, FAX : 0824-22-7195
e-mail : inuiguti@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

WE2-4

ファジィ設備レイアウト問題のＧＡによる一解法

Fuzzy Facility Layout Problem Using Genetic Algorithms

Runwei Cheng† Mitsuo Gen‡ Tatsumi Tozawa†

†Graduate School of Engineering
Utsunomiya University, Utsunomiya 321, Japan

‡Department of Industrial and Systems Engineering
Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga 326, Japan
Email: gen@genlab.ashitech.ac.jp

Abstract – In this paper, we introduce the concept of fuzzy interflow into facility layout design problem and address fuzzy facility layout problem, where the material flows among facilities are represented as trapezoidal fuzzy number. Genetic algorithms are applied to such hard fuzzy combinatorial problem. Simulation results demonstrate that genetic algorithm and fuzziness approach can be efficient tools for layout design problems.

1 Introduction

Facility layout design problems are usually viewed as optimization problem and the best layout is found out by optimizing some measure of performances subject to a set of constraints.

Most traditional formulations have assumed that the volume of flow between facility pairs is a known fixed quantity and facility layout is treated as a static problem over the planning horizon. However changes in product mix, machine breakdowns, seasonal fluctuations and demand are uncertainty in nature. Under these circumstances, such a static assumption is not suitable for modern manufacturing systems.

One way of modeling such uncertainties is to take flexible approach or probabilistic approach[1]; another way is to take robustness approach[2]. If we adopt the flexible approach, we need to specify probability distribution for material flow; if we adopt the robustness approach, we must provide several demand scenarios and the optimal solutions for each scenario. As we know that the optimal design of the physical layout must be resolved in the early stage of manufacturing system design, and the product mix is highly uncertainty during design phase. Giving an exact probability distribution or giving precise demand scenarios are as difficult as the optimal design of facility layout itself. The estimation of interflow among facilities highly depends on the subjective judgments and/or preference of manager or designer, which are of imprecision in nature. In such case, the interflow can be naturally represented with a fuzzy number. In this paper, we propose a fuzziness approach to handling such uncertainties[3]. The practical merit of fuzziness approach is that there is no need to force the manager or designer to give a precise product mix nor a probability distribution.

Because the combinatorial nature of facility layout problem, heuristic approach is the most promising way for solving practical size layout problem. Recently, the interesting in application of genetic algorithms to facility layout design has been growing rapidly. In this paper, we apply genetic algorithms to fuzzy facility layout problem. Polish expression is adopted as the coding scheme of chromosome. A penalty to the violation of aspect ratios for facilities is used to guild genetic search towards to promising part of solution space. The possibility theory and fuzzy integral are used to meaningfully interpret the fuzzy results. Simulation results demonstrate that genetic algorithm and fuzziness approach can be efficient tools for layout design problems.

2 Fuzzy Facility Layout Problem

2.1 Facility layout problem

Facility layout design problem is formulated as follows[4]: there is a set of m facilities, denoted by $\{M_i\}$, $i = 1, 2 \cdots, m$. Each facility is restricted to be rectangular and characterized by a triple (A_i, l_i, u_i), where A_i is the area of the facility, l_i and u_i are lower and upper bounds, respectively. The aspect ratio is defined as the ratio of the height h_i to width w_i of the facility. This specification leads to following relationship:

$$w_i h_i = A_i, \; i = 1, 2 \cdots, m \tag{1}$$

$$l_i \leq \frac{h_i}{w_i} \leq u_i,\ i = 1, 2 \cdots, m \qquad (2)$$

The aspect ratio can also be defined as the inverse. Figure 1 shows the relationship of the height, width and aspect ratio for a facility.

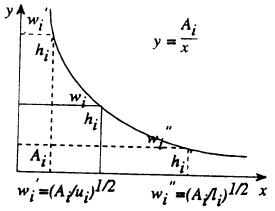


Figure 1: The relationship of the height, width and aspect ratio for a facility

A facility layout for the given m facilities consists of a bounding rectangular, R, partitioned by horizontal and vertical line segments into m nonoverlapping rectangle regions, denoted $\{r_i\}$, $i = 1, 2, \ldots, m$. Each region r_i, with width x_i and height y_i, must be large enough to accommodate its facility M_i.

2.2 Slicing tree and Polish expression

A facility layout can be represented as a slicing structure constructed by recursively partitioning a rectangular R. Let the operations of a horizontal cut and a vertical cut be denoted by the operators + and *, respectively. Slicing structures comprising the m given facilities (called operands) can be represented by slicing trees or Polish expressions over the alphabet $\sum = \{1, 2, \ldots, m, *, +\}$. In a slicing tree operators are internal nodes and operands are leaves. An example of slicing structure is shown in Figure 2(a) and its slicing tree and Polish expression are shown in 2(b).

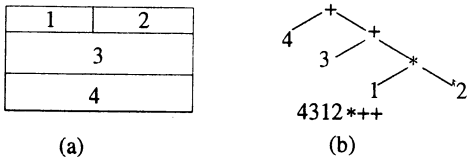


Figure 2: A slicing structure and its representations

We use Polish expression as the coding scheme of chromosome in our genetic algorithms.

2.3 Fuzzy interflow

The subjective or preference information can be usually represented as a convex fuzzy number. Here, we use a trapezoidal fuzzy number (TrFN) to represent the uncertainty of interflow[5]. A TrFN can be defined by a quadruple (a, b, c, d) and shown in Figure 3.

Since a fuzzy number represents many possible real numbers that have different membership values, it is not

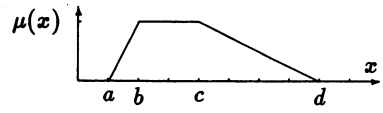


Figure 3: Trapezoidal fuzzy number

easy to compare the final ratings to determine which alternatives are preferred. Many fuzzy ranking methods have been proposed to compare fuzzy numbers[6]. In this study, we adopt Lee and Li's approach, which suggest the use of generalized mean and standard deviation based on the probability measures of fuzzy events to rank fuzzy number[7]. When fuzzy number $\tilde{M}$ is a TrFN, the generalized mean value with a uniform density is calculated as follows:

$$m(\tilde{M}) = \frac{-a^2 - b^2 + c^2 + d^2 - ab + cd}{3(-a - b + c + d)} \qquad (3)$$

The standard deviation is defined as follows:

$$\sigma(\tilde{M}) = [\frac{1}{b-a}(\frac{b^4}{4} - \frac{ab^4}{3} + \frac{a^4}{12}) + \frac{1}{3}(c^3 - b^3) + \frac{1}{d-c}(\frac{d^4}{12} - \frac{c^3 d}{3} + \frac{c^4}{4})] / [\frac{1}{2}(-a - b + c + d)] - m(\tilde{M})^2 \qquad (4)$$

3 Genetic Algorithms

3.1 Initialization procedure

A chromosome must have m different operands and $(m-1)$ operators and the permutation of operands and operators must meet certain requirement to result a legal Polish expression. Because random way may yields an illegal chromosome, we need to check the legality for a generated chromosome. The legality condition is detailed in[3].

3.2 Genetic operators

We use the crossover proposed by Cohoon *et al.*[8]. It performs with two steps: 1) get operands from one parent and 2) get operators from the other parent. Suppose we have two parents p_1 and p_2. Crossover operator copies the operands from parent p_1 into the corresponding positions in the offspring o; and then copies operators from p_2, by making a left-to-right scan, to complete o. Crossover performed in this way can guarantee to generate legal offspring. Figure 4 gives an illustration of crossover operation.

We use random *swapping*, *inverting* and *altering* as our mutation, that is, swapping two adjacent operands or two adjacent operators as shown in Figure 5(a), inverting a sequence of adjacent operators or a sequence of adjacent operands as shown in Figure 5(b), altering a operator to the opposite one as shown in Figure 5(c). Mutation performed in this way can also guarantee to generate legal offspring.

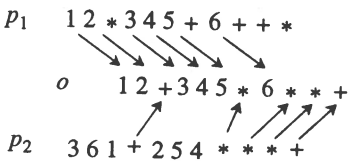


Figure 4: Crossover operator

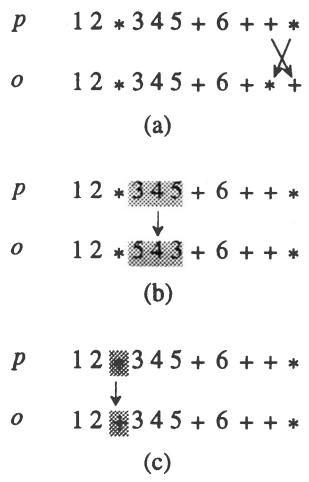


Figure 5: Mutation operator

3.3 Evaluation and selection

When evaluating each chromosome, we firstly convert it to a slicing structure. This is done in a top-down fashion starting from the root of the slicing tree and passing down to the children nodes recursively[3]. Then each layout of the enlarged population (parents and offspring) is evaluated by an objective function of total traffic cost and assigned a fitness value. Let v_k denote the kth chromosome in the enlarged population, $\tilde{C}_k(v_k)$ be the total cost, $d_{ij}(v_k)$ be a real number to denote the Manhattan distance between the centers of each pair of facilities i and j, and $\tilde{c}_{ij}(v_k)$ be a trapezoidal fuzzy number to denote the fuzzy traffic flow between the facilities i and j. The overall evaluation of a particular layout is given as follows:

$$\tilde{C}_k(v_k) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} \tilde{c}_{ij}(v_k) d_{ij}(v_k) \qquad (5)$$

The total cost is a trapezoidal fuzzy number. We use Lee and Li's ranking approach to calculate the generalized mean values for each layout. Because we treat with a minimization problem, we must convert this mean value into fitness value, such that a fitter chromosome has a larger fitness value. The conversion can be simply done by the inverse of the mean value.

As there is aspect ratio constraint for each facility, a layout generated in this way may be illegal. A penalty approach is adopted to handle the illegitimation[9]. Let $m(\tilde{C}_k(v_k))$ denote the generalized mean value, λ_k denote the total number of facilities which violate the aspect ratio constraints within the kth chromosome, and P be a big penalty value. We add the penalty term into the fitness function as follows:

$$eval(v_k) = \frac{1}{m(\tilde{C}_k(v_k)) + \lambda_k P} \qquad (6)$$

where $eval(v_k)$ is the fitness function for the kth chromosome.

We then make a roulette wheel with the fitness values to reproduce next generation. In our experiment, the *elitist way* was embedded within roulette wheel selection in order to enforce preserving the best chromosome in the next generation and overcome the stochastic errors of sampling.

4 Numerical Example

Because there is no standard test problem available for fuzzy facility layout problem, we make a test problem with 15 facilities. The area of each facility, its associated aspect ratio and the fuzzy interflows among facilities are given in [3]. The evolutionary environment of our experiment is given as that population size is 40, the ratio of crossover is 0.4, the ratio of mutation is 0.4, penalty value is 5000 and maximum generation is 200. We got the best chromosome as follows:

(13 1 + 2 6 8 3 + + 15 11 14 9 * + + * * 4 7 * 5 10 + 12 * * + *)

The layout is depicted in Figure 6 and the evolutionary process is shown in Figure 7.

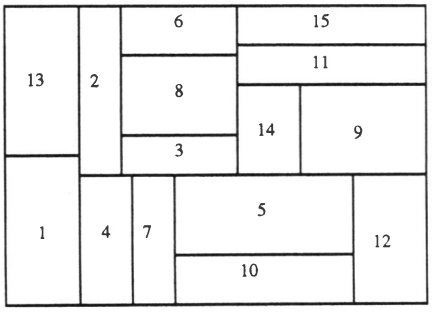


Figure 6: Layout for the best chromosome

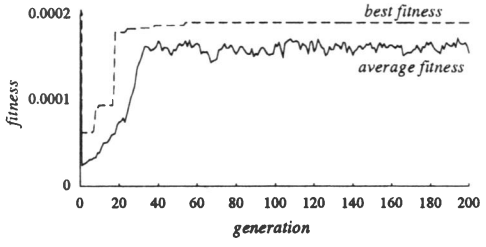


Figure 7: Evolutionary process

From the evolutionary process we can know that before the $10th$ generation, all chromosomes are illegal in

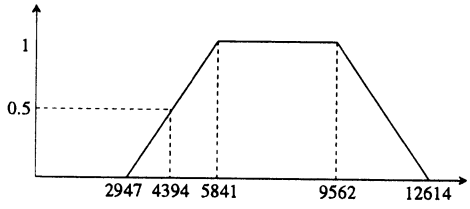


Figure 8: Possibility of $\tilde{C}$=4394

the sense of violating the aspect ratios. Penalty function guides the genetic search to feasible region. After entering the feasible region, penalty loses its function and natural selection forces chromosomes to evolve gradually. In the $63th$ generation the best solution is found.

The fuzzy cost measure of the best layout is $\tilde{C}$= (2946.91, 5841.40, 9561.81, 12613.53). We can use possibility theory and fuzzy integrals to interpret the fuzzy performance. The possibility of a member of the support set of a fuzzy number taking on a certain exact value is defined to be the degree of ease[10]. In most cases, the possibility is exactly the membership function value of that member. For example, the possibility that the layout will have total cost of 4394 units is 0.5, as illustrated in Figure 8. The concept of possibility may be difficult to understand in an absolute sense, but it can be very useful in a relative context. For example, when comparing one support set value to another, the manager can identify which value is more possible based on their possibilities. Genetic algorithms can provide a set of superior solutions to managers for their judgment.

Perhaps of more use to the managers is a proportional measure of the distribution to the density of the membership function. It is calculated by taking fuzzy integral over interest area and dividing it by the integral of fuzzy number over support set shown as follows:

$$\tilde{I}(x \leq \beta) = \frac{\int_a^\beta \mu(x)\mathrm{d}x}{\int_S \mu(x)\mathrm{d}x} \tag{7}$$

For example, the fuzzy integral $\tilde{I}$ of 4394 is 0.13 using Equation (7). The manager can interpret this result as the fuzzy expectation of the layout yielding total cost less than or equal to 4394 is 0.13. The fuzzy integral $\tilde{I}$ of 9562 is 0.91, so the fuzzy expectation of the layout yielding total cost less than or equal to 9562 is 0.91.

5 Conclusion

In this paper, we introduce the concept of fuzzy interflow into facility layout design problem and address fuzzy facility layout problem, where the material flows among facilities is represented as trapezoidal fuzzy number. The practical merit of the proposed fuzziness approach, comparing with conventional flexible approach and robustness approach, is that there is no need to force the designers to give a precise interflow nor a probability distribution. Genetic algorithms are applied to such hard fuzzy combinatorial problem. Simulation results demonstrate that genetic algorithm and fuzziness approach can be efficient tools for facility layout design problem.

References

[1] Shore, R. H. and J. A. Tompkins, Flexible facilities design, *IIE Transactions*, vol.12, pp.200–205, 1980.

[2] Rosenblatt, M. J. and H. L. Lee, A robustness approach to facilities design, *International Journal of Production Researches*, vol.25, pp.479–486, 1987.

[3] Cheng, C., Study on optimal design of fuzzy facility layout, Master's thesis, Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga, Japan, March 1995.

[4] Wong, D. F. and C. L. Liu, A new algorithm for floorplan design, In Oz, W. V. and M. Yannakakis, editors, *Proc. 23rd ACM-IEEE Design Automation Conf*, pp. 101–107, Boston, 1986.

[5] Kaufmann, A. and M. M. Gupta, *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, North-Holland, Amsterdam, 1988.

[6] Chen, S. J. and C. L. Hwang, *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making*, Springer-Verlag, Berlin, 1992.

[7] Lee, E. S. and R. L. Li, Comparison of fuzzy numbers based on the probability measure of fuzzy events, *Operations Research*, vol.15, pp.887–896, 1988.

[8] Cohoon, J. P., S. U. Hegde, and N. Martin, Distributed genetic algorithms for the floorplan design problem, *IEEE Tran. on Computer-aided Design*, vol.10, pp.483–491, 1991.

[9] Smith, A. E. and D. Tate, Genetic optimization using a penalty function, In Forrest, S., editor, *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 499–505, 1993.

[10] Zadeh, L. A., Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, vol.1, pp.3–28, 1978.

Corresponding to:
Prof. Mitsuo Gen
Dept. of Industrial and Systems Engg.
Ashikaga Institute of Technology
Ashikaga, 326 Japan
Tel: +81(284)62-2985
Fax: +81(284)64-1071
Email: gen@genlab.ashitech.ac.jp

WE3-1

n 人協力ファジィゲームにおける最小コア，関連する解および仁

The least core, its related solution, and the nucleolus in n-person cooperative fuzzy games

西崎　一郎
Ichiro Nishizaki
摂南大学経営情報学部
Faculty of Business Administration and Informatics, Setsunan University

坂和　正敏
Masatoshi Sakawa
広島大学工学部
Department of Industrial and Systems Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University

Abstract In this paper, we consider the least core, its related solution, and the nucleolus in n-person cooperative games with fuzzy coalitions. Since there are an infinite number of inequality constraints for fuzzy coalitions in the mathematical programming problem for obtaining the least core, it is difficult to directly solve the problem. We employ a computational method based on the relaxation method, which repeatedly solves mathematical programming problems with a part of the inequality constraints. The nucleolus is considered in the case where there are a finite number of fuzzy coalitions, and the nucleolus based on aggregated excesses is also examined.

Keywords n-person cooperative games, fuzzy coalitions, the least core, the nucleolus, the relaxation method

1．はじめに

協力ファジィゲームの解の概念として Aubin [1] や Butnariu [2] はコアやシャプレイ値を主として取り上げたが，経営や公共の意思決定問題における応用を考慮するならば，従来の協力ゲームにおいて必ず存在し，比較的限られた解集合をもつ最小コア や，必ず存在し，しかも唯一であるとういう特性をもつ仁 (nucleolus) [5] のような辞書式順序解は有用である．そのような観点から，西崎・坂和はプレイヤーの余剰を辞書式順序で最小にする解を提案し [3]，さらにファジィ提携をもつ n 人協力ゲームにおいてもその辞書式順序解を考察したが [4]，ファジィ提携をもつ n 人協力ゲームにおいて最小コアや仁の概念はその重要性にも関わらず研究されていなかった．

本論文では，Aubin の提案したファジィ提携をもつ n 人協力ファジィゲームの枠組みにおいて最小コア，関連する解および仁の概念について考察する．第２節では，ファジィ提携をもつ n 人協力ゲームにおいて，最小コアと関連する解について考察する．ファジィ提携は一般に無限個存在するが，そのうち有限個のファジィ提携を取り上げた緩和法に基づく解の計算のためのアルゴリズムを最小コアと関連する解に対して開発する．第３節では，ファジィ提携をもつ n 人協力ゲームにおける仁の概念を考察する．

2．n 人協力ファジィゲームにおける最小コアと関連する解

これまで考察してきた n 人協力ゲームでは，提携はすべてのプレイヤーの集合の非空の部分集合として定義され，提携の数は１人提携も含めて高々 2^n-1 であった．さらに，提携に属したプレイヤーは彼の意思決定の権利を完全に提携に委譲することを受け入れなければならなかった．

上記のような厳しい制限を緩めるために Aubin [1] や Butnariu [2] によってファジィ提携が n 人協力ゲームに導入され，そのことによって提携の形成におけるあいまい性が考慮できるようになった．ファジィ提携を含むゲームにおいてはプレイヤーは必ずしもすべての意思決定権をファジィ提携に委譲する必要はなく，そのファジィ提携への参加の度合に応じた行動をとることになる．そこで，ファジィ提携はすべてのプレイヤーの集合の非空のファジィ部分集合として定義される．

通常の特性関数型 n 人協力ゲーム (N,v) における提携は関数

$$\tau^S(i)=\begin{cases}1 & \text{if } i\in S\\ 0 & \text{if } i\notin S\end{cases} \tag{1}$$

によって表現できる．プレイヤー i の提携 S への参加は $\tau^S(i)$ で表現できる．すなわち，プレイヤー i が提携 S に参加しているのであれば，$\tau^S(i)=1$ であり，そうでなければ，$\tau^S(i)=0$ である．その結果，提携 S は n 次元ベクトル $\tau^S=(\tau_1^S,\tau_2^S,\ldots,\tau_n^S)$ で表現できる．ここで，簡単のために $\tau^S(i)$ を τ_i^S とした．また，これ以降も後者の表現を用いる．

提携への参加の率を参加するかしないかの二者択一的状況 $\tau_i^S\in\{0,1\}$ から部分的な参加を認めるという解釈から $\tau_i\in[0,1]$ に拡張することによってファジィ提携 $\tau=(\tau_1,\tau_2,\ldots,\tau_n)$ を次のように定義する．

定義1（ファジィ提携） すべてのプレイヤーの集合を $N=\{1,2,\ldots,n\}$ とする．そのとき N の任意の非空のファジィ部分集合をファジィ提携と呼ぶ．

定義2（ファジィ特性関数） 任意のファジィ提携 $\tau\in[0,1]^n$ と実数 $f(\tau)$ を関連づける関数 f をファジィ特性関数と呼ぶ．ここで，$f(0,0,\ldots,0)=0$ とする．

$f(\tau)$ はファジィ提携の参加率に基づくプレイヤーの協力によって獲得できる転移可能効用の総計を表わす値である．上の2つの定義からファジィ提携を含む n 人協力ゲームは (N,f) によって表現できる．(N,f) においても ゼロ正規化されているとする．

ファジィゲーム (N,f) におけるファジィ提携の余剰も非ファジィゲーム (N,v) と同様に考えることができる．n 人協力ファジィゲーム (N,f) において x を利得ベクトルとし，$\tau\in[0,1]^n$ をファジィ提携とする．そのとき，利得ベクトル x に対するファジィ提携の余剰は，

$$\tilde{e}(\tau,x)=f(\tau)-\tau x \tag{2}$$

である．ファジィ提携を含む n 人協力ゲームは従来のゲームを特別な場合として含む．それゆえ，非ファジィゲーム (N,v) における提携 S の利得ベクトル x に関する余剰も

$$e(S,x)=v(S)-\tau^S x \tag{3}$$

として表現できる．ファジィ提携の余剰 $\tilde{e}(\tau,x)$ を用いてファジィゲームのコアや ε-コアも同様に Aubin[1] によって定義されている．

定義3（ファジィゲーム (N,f) におけるコアと ε-コア） ファジィゲーム (N,f) において，コアは

$$\tilde{C}(N,f)=\{x\in X(N,f)\mid \tilde{e}(\tau,x)\leqq 0,\ \forall\tau\in[0,1]^n\} \tag{4}$$

であり，ε-コアは

$$\tilde{C}_\varepsilon(N,f)=\{x\in \tilde{X}(N,f)\mid \tilde{e}(\tau,x)\leqq \varepsilon,\ \forall\tau\in[0,1]^n\} \tag{5}$$

である．ここで，$X(N,f)$ と $\tilde{X}(N,f)$ は配分とプレ配分で

$$X(N,f)=\{x\in R^n\mid \tilde{e}(N,x)=0,\ \tilde{e}(\{i\},x)\leqq 0,\ i=1,2,\ldots,n\} \tag{6}$$

$$\tilde{X}(N,f)=\{x\in R^n\mid \tilde{e}(N,x)=0,\ x_i\geqq 0,\ i=1,2,\ldots,n\} \tag{7}$$

である．

さて，ファジィゲームにおいて，より解集合が限定された最小コアを新たに考察する．ファジィゲーム (N,f) において

$$\varepsilon_0=\min_{x\in\tilde{X}(N,f)}\ \max_{\tau\neq\tau^\phi,\tau^N}\tilde{e}(\tau,x) \tag{8}$$

とすると，ε_0 を用いて次のように最小コアは定義される．

定義4（ファジィゲーム (N,f) における最小コア） ファジィゲーム (N,f) の最小コアは空でない ε-コアの共通部分である．最小コアを $\tilde{LC}(N,f)$ で表わすと，

$$\tilde{LC}(N,v)=\tilde{C}_{\varepsilon_0}(N,f)=\{x\in\tilde{X}(N,f)\mid \tilde{e}(\tau,x)\leqq\varepsilon_0,\ \forall\tau\in[0,1]^n,\ \tau\neq\tau^\phi,\tau^N\} \tag{9}$$

である．

ファジィゲーム (N,f) における最小コア $\tilde{LC}(N,f)$ の計算方法を考える．最小コアは最大余剰の最小化問題を解くことによって求められるが，任意のファジィゲーム (N,f) に関して，$f(\tau^\phi)-\tau^\phi x=0$，$f(\tau^N)-\tau^N x=0$ であるので，$\tilde{e}(\tau,x)\leqq 0$，$\forall\tau\in[0,1]^n$，$\tau\neq\tau^\phi,\tau^N$ となるゲーム，すなわち $\min_x\max_\tau\tilde{e}(\tau,x)>0$ とならない場合，最小コアはコアに等しくなる．そこで，$\min_x\max_\tau\tilde{e}(\tau,x)>0$ となるゲームに対して最小コアを考える．

$$\left.\begin{array}{ll}\text{minimize} & \varepsilon\\ \text{subject to} & f(\tau)-\tau x\leqq\varepsilon,\ \forall\tau\in[0,1]^n,\\ & \qquad\tau\neq\tau^\phi,\tau^N\\ & x_1+x_2+\cdots+x_n=f(\tau^N)\\ & x_i\geq 0,\ \ i=1,2,\ldots,n\end{array}\right\} \tag{10}$$

の最適解を x^*,ε^* とすると，最小コアは x^* であり，ε^* は最大余剰の最小値となる．最小化問題 (10) の第1の制約式 $f(\tau)-\tau x\leqq\varepsilon$ は任意の $\tau\in[0,1]^n$ に関して成立しなければらず，この問題をこのまま解くことは困難であることがわかる．そこで，有限個のファジィ提携を取り上げた緩和法の手続きを導入する [6]．すなわち，最小化問題 (10) の第1の制約式を L 個の制約式に緩和した問題

$$\left.\begin{array}{ll}\text{minimize} & \varepsilon\\ \text{subject to} & f(\tau^\ell)-\tau^\ell x\leqq\varepsilon,\ \ell=1,2,\ldots,L\\ & x_1+x_2+\cdots+x_n=f(\tau^N)\\ & x_i\geq 0,\ \ i=1,2,\ldots,n\end{array}\right\} \tag{11}$$

を考える．この問題は $\ell=1,2,\ldots,L$ に対してファジィ提携の値 $f(\tau^\ell)$ が決定されるので，線形計画問題となる．緩和問題 (11) の最適解を $x^{L^*},\varepsilon^{L^*}$ とする．そのとき，$x^{L^*},\varepsilon^{L^*}$ が原問題 (10) の実行可能解であるならば，$x^{L^*},\varepsilon^{L^*}$ は原問題 (10) の最適解であり，したがって x^{L^*} はファジィゲーム (N,f) における最小コアである．さらに，この最適解 $x^{L^*},\varepsilon^{L^*}$ が原問題 (10) の唯一解でもあるならば，x^{L^*} はファジィゲーム (N,f) において唯一な最小コアである．

ファジィゲーム (N,f) の最小コアを求めるアルゴリズムを次のように整理する．

[Step 0] 原問題 (10) を定式化する．任意の初期点 $\tau^1\in[0,1]^n$，$\tau\neq\tau^\phi,\tau^N$ を決め，$L\leftarrow 1$ とする．

[Step 1] 緩和問題 (11) を解き，その最適解を $x^{L^*}, \varepsilon^{L^*}$ とする．

[Step 2] 緩和問題 (11) の最適解 $x^{L^*}, \varepsilon^{L^*}$ が原問題 (10) の実行可能解であるかどうか調べる．もし実行可能解でなければ，新たな制約式を加え $L \leftarrow L+1$ として，[Step 1] へ戻る．

このアルゴリズムを実行するためには，いくつかの問題を解決する必要がある．第1の問題は，[Step 2] において緩和問題 (11) の最適解 $x^{L^*}, \varepsilon^{L^*}$ が原問題 (10) の実行可能解であるかどうか調べるという問題である．これは原問題の第1の制約式が満足されているかどうかに依存し，$f(\tau) - \tau x^{L^*}$ の最大値が ε^{L^*} より小さければ，実行可能となる．したがって，最大化問題

$$\left.\begin{array}{ll} \text{maximize} & f(\tau) - \tau x^{L^*} \\ \text{subject to} & \tau \in [0,1]^n,\ \tau \neq \tau^{\phi}, \tau^{N} \end{array}\right\} \quad (12)$$

を解き，その最適解を τ^{L^*} とする．そのとき，

$$f(\tau^{L^*}) - \tau^{L^*} x^{L^*} \leqq \varepsilon^{L^*} \quad (13)$$

であれば，原問題 (10) に対して $x^{L^*}, \varepsilon^{L^*}$ が最適解となる．

第2の問題は緩和問題 (11) の最適解 $x^{L^*}, \varepsilon^{L^*}$ が原問題 (10) の実行可能でないとき，どのような制約式を加えるかである．緩和問題 (11) の最適解 x^{L^*} に対して原問題 (10) の制約を最も大きく侵害する制約式は最大化問題 (12) の最適解 τ^{L^*} に対応する制約式である．そこで，原問題 (10) の制約を最も大きく侵害する制約式を新たに制約に加えるという観点から，$\tau^{L+1} = \tau^{L^*}$ とし，緩和問題の1つ目の制約式 $f(\tau) - \tau' x \leqq \varepsilon$ の $L+1$ 番目の制約式として，

$$f(\tau^{L+1}) - \tau^{L+1} x \leqq \varepsilon \quad (14)$$

を加える．

第3の問題はこの緩和法の手続きが有限回のイテレーションで終了するかどうかである．Shimizu and Aiyoshi [6] は一般的な min-max 問題に対する緩和法において，そのアルゴリズムが有限回のイテレーションで終了することを次の定理で示している．

定理 1 (Shimizu and Aiyoshi [6]) min-max 問題

$$\left.\begin{array}{ll} \text{minimize} & \varepsilon \\ \text{subject to} & f(x,y) \leqq \varepsilon,\ \forall y \in Y \\ & x \in X \triangleq \{x \mid g(x) \leqq 0\} \end{array}\right\} \quad (15)$$

において，$f(x,y)$ は x および y に関して，$g(x)$ は x に関して微分可能で，導関数 $\nabla_x f(x,y)$, $\nabla g(x)$ は連続であり，X, Y が空でないコンパンクト集合であるならば，緩和法によるアルゴリズムは有限回のイテレーションで終了する．

この定理の系としてファジィゲームの最小コアを求めるための緩和法の手続きが有限回のイテレーションで終了することを示すことができる．

系 1 $f(\tau)$ が微分可能であり，$\min_x \max_\tau \tilde{e}(\tau, x) > 0$ であるならば，ファジィゲーム (N, f) の最小コアを求めるための緩和法のよるアルゴリズムは有限回のイテレーションで終了する．

最小コアが唯一であるかどうかは現実問題に適用する上で有用な情報である．まず，緩和問題 (11) は線形計画問題であるので，シンプレックス法における最適状態において費用係数がすべて正であるかどうかによって，緩和問題での唯一性は調べられる．

次に，最適解 $x^{L^*}, \varepsilon^{L^*}$ が緩和問題 (11) に対して唯一解であっても原問題 (10) に対して唯一解であるとは限らない．この問題は次の定理により明らかにされる．

定理 2 緩和問題 (11) の最適解 $x^{L^*}, \varepsilon^{L^*}$ が原問題 (10) において実行可能で，かつ

$$\tau x^{L^*} + \varepsilon^{L^*} = f(\tau) \quad (16)$$

が $[0,1]^n$ において解をもたないとき，$x^{L^*}, \varepsilon^{L^*}$ は原問題 (10) においても最適な唯一解である．

これまでの考察は，ファジィゲーム (N, f) において $\min_x \max_\tau \tilde{e}(\tau, x) > 0$ である場合に限定してきたが，そうでないゲームでは，場合によって最小コアはコアと等しくなり，コアから解の集合を減じることができない．そこで，次にこの条件が満たされないゲームに対する代替的な解の概念を考察する．非ファジィゲームにおいてもファジィゲームにおいても，任意の利得ベクトル x に対して，$\sum_{S \in \mathcal{A}} e(S, x)$ と $\int_0^1 \cdots \int_0^1 \tilde{e}(\tau, x) d\tau_1 \cdots d\tau_n$ が一定であるので，余剰の総和は一定となる．したがって，最大余剰を最小にすれば，提携間の余剰の差を小さくすることになる．このような観点から，最大の余剰差を最小にする解を取り上げれば，同様な考察が可能である．

3．n 人協力ファジィゲームにおける仁

本節では，n 人協力ファジィゲームにおける仁を考察する．非ファジィゲームにおいて，仁は $2^n - 2$ 次元ベクトル値関数 $E(x) = (e(S_1, x), e(S_2, x), \ldots, e(S_{2^n-2}, x))$ の辞書式順序の最小解である．一方，前節で考察したようなファジィゲームでは，$[0,1]^n$ に属する任意のファジィ提携が許容されることを仮定した．そのようなファジィゲームでは，ファジィ提携 $\tau \in [0,1]^n$ に関して余剰 $\tilde{e}(\tau, x)$ は連続であるため，たとえば2つの利得ベクトル x, y 関する余剰 $\tilde{e}(\tau, x)$, $\tilde{e}(\tau, y)$ を辞書式順序で比較することはできない．そこで，最初に許容提携が有限個である場合の仁を考える．次に非ファジィ提携 $S \subset N$ に対して，S のメンバの部分的な S への参加を許した提携がファジィ提携であるという観点から，集

約された余剰を定義することによって，ファジィゲームにおける仁を考察する．

許容提携が有限個である場合には，仁は非ファジィゲームの場合とほぼ同様に定義できる．

定義5（有限個のファジィ提携をもつファジィゲームにおける仁） ファジィゲーム (N,f) に関して，ファジィ提携の個数をτ^ϕ と τ^N を含めて $m+2$ とし，ファジィ提携の集合を M で表わす．そのようなファジィゲームは $(N,f;M)$ で表現される．τ^ϕ と τ^N を除くファジィ提携の余剰の列 $\tilde{e}(\tau_1,x),\tilde{e}(\tau_2,x),\ldots,\tilde{e}(\tau_m,x)$ が非増加の順に並んでいるとする．そのとき，余剰の列を辞書式順で最小化する解

$$N(N,f;M)=\{x\in\bar{X}(N,f)\mid(\tilde{e}(\tau_1,x),\tilde{e}(\tau_2,x),\ldots,\tilde{e}(\tau_m,x))\leqq_L(\tilde{e}(\tau_1,y),\tilde{e}(\tau_2,y),\ldots,\tilde{e}(\tau_m,y)),\forall y\in\bar{X}(N,f)\} \tag{17}$$

をファジィゲーム $(N,f;M)$ における仁と呼ぶ．

ファジィゲーム $(N,f;M)$ における仁は，最小コアすなわち最大余剰の最小化問題

$$\left.\begin{array}{ll}\text{minimize} & \varepsilon\\ \text{subject to} & f(\tau)-\tau x\leqq\varepsilon,\\ & \qquad\forall\tau\in M,\ \tau\neq\tau^\phi,\tau^N\\ & x_1+x_2+\cdots+x_n=f(\tau^N)\\ & x_i\geq 0,\quad i=1,2,\ldots,n\end{array}\right\} \tag{18}$$

を解き，非ファジィゲームのときと同様に最適解が唯一でないときは，任意の最適解に対して活性となる不等式制約を等式制約に変換して，再び問題を解き，唯一解を得るまで繰り返すことによって最終的には唯一解として得ることができる．

次に，集約された余剰に基づく仁について考察する．非ファジィ提携 τ^S が$\tau^S=\{(\tau_1,\tau_2,\ldots,\tau_n)\mid\tau_i=1,\forall i\in S,\ \tau_j=0,\ \forall j\notin S\}$ で表現されるとき，次のファジィ提携 $\tau^{\tilde{S}}=\{(\tau_1,\tau_2,\ldots,\tau_n)\mid\tau_i\neq 0,\forall i\in S,\ \tau_j=0,\ \forall j\notin S\}$ を τ^S から派生したファジィ提携と呼ぶ．τ^S から派生したファジィ提携 $\tau^{\tilde{S}}$ に関して集約された余剰 $\tilde{e}(\tilde{S},x)$ を次のように定義する．

$$\begin{aligned}\tilde{e}(\tilde{S},x) &= \int_1^0\cdots\int_1^0(f(\tau^{\tilde{S}})-\tau^{\tilde{S}}x)d\tau_1d\tau_2\cdots d\tau_n\\ &= \int_1^0\cdots\int_1^0 f(\tau^{\tilde{S}})d\tau_1d\tau_2\cdots d\tau_n-\frac{1}{2}\sum_{i\in S}x_i\end{aligned} \tag{19}$$

派生したファジィ提携に関して集約された余剰を用いて仁を次のように定義することができる．

定義6（ファジィゲームにおける集約された余剰に基づく仁） ファジィゲーム (N,f) に関して，τ^ϕ と τ^N を除くすべての非ファジィ提携から派生したファジィ提携に関して集約された余剰の列 $\tilde{e}(\tilde{S}_1,x),\tilde{e}(\tilde{S}_2,x),\ldots,\tilde{e}(\tilde{S}_{2^n-2},x)$ が非増加の順に並んでいるとする．そのとき，余剰の列を辞書式順で最小化する解

$$N(N,f)=\{x\in\bar{X}(N,f)\mid(\tilde{e}(\tilde{S}_1,x),\tilde{e}(\tilde{S}_2,x),\ldots,\tilde{e}(\tilde{S}_{2^n-2},x))\leqq_L(\tilde{e}(\tilde{S}_1,y),\tilde{e}(\tilde{S}_2,y),\ldots,\tilde{e}(\tilde{S}_{2^n-2},y)),\forall y\in\bar{X}(N,f)\} \tag{20}$$

を集約された余剰に基づく仁と呼ぶ．

ファジィゲーム (N,f) における集約された余剰に基づく仁は最大余剰の最小化問題

$$\left.\begin{array}{ll}\text{minimize} & \varepsilon\\ \text{subject to} & \displaystyle\int_1^0\cdots\int_1^0 f(\tau^{\tilde{S}})d\tau_1d\tau_2\cdots d\tau_n\\ & \displaystyle-\frac{1}{2}\sum_{i\in S}x_i\leqq\varepsilon,\ \forall S\in\mathcal{A},\ S\neq N\\ & x_1+x_2+\cdots+x_n=f(\tau^N)\\ & x_i\geq 0,\quad i=1,2,\ldots,n\end{array}\right\} \tag{21}$$

を解き，最適解が唯一でないときは，非ファジィゲームにおける仁の計算方法と同様に問題 (21) を変形させながら唯一解を求める方法で計算できる．

4．おわりに

ファジィ提携をもつ n 人協力ファジィゲームにおいて最小コアとそれと関連する解および仁の概念について考察した．ファジィ提携は一般に無限個存在するが，そのうち有限個のファジィ提携を取り上げた緩和法に基づく最小コアとそれに関連する解の計算のためのアルゴリズムを開発した．仁に関しては，有限個のファジィ提携をもつ場合と集約された余剰に基づく仁を定義し，その計算方法を考察した．

参考文献

[1] Aubin, J.-P. *Mathematical Methods of Game and Economic Theory,* North-Holland (1979).

[2] Butnariu, D. "Stability and Shapley Value for an n-Persons Fuzzy Game," *Fuzzy Sets and Systems,* Vol. 4, pp. 63–72 (1980).

[3] 西崎一郎, 坂和正敏 "n 人協力ゲームにおけるプレーヤの余剰を用いた辞書式順序解," 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J75-A, No. 3, pp. 568-574 (1992).

[4] Sakawa, M and I. Nishizaki "A Lexicographical Solution Concept in an N-Person Cooperative Fuzzy Game," *Fuzzy Sets and Systems,* Vol. 61, pp. 265–275 (1994).

[5] Schmeidler, D. "The Nucleolus of a Characteristic Function," *SIAM Journal on Applied Mathematics,* Vol. 17, pp. 1163–1170 (1969).

[6] Shimizu, K. and E. Aiyoshi "Necessary Conditions for Min-Max Problems and Algorithm by a Relaxation Procedure," *IEEE Transaction on Automatic Control,* Vol. AC-25, pp. 62–66 (1980).

問合せ先: 572 大阪府寝屋川市池田中町 17-8

摂南大学経営情報学部 西崎一郎 TEL 0720-39-9269

WE3-2

ファジィ線形計画問題におけるロバストでソフトな最適化

Robust–Soft Optimization in Fuzzy Linear Programming Problems

乾口 雅弘
Masahiro Inuiguchi
広島大学工学部
Faculty of Engineering,
Hiroshima University

坂和 正敏
Masatoshi Sakawa
広島大学工学部
Faculty of Engineering,
Hiroshima University

Abstract : In this paper, we discuss a soft optimal solution which is robust against the fluctuations of the objective coefficient values in the setting of the linear programming problem. Here a soft optimal solution stands for a feasible solution whose objective function value is near the optimal value of the linear programming problem. The ambiguity of the objective coeffcient values is represented by possibility distributions. In order to express the nearness of the objective function value, we introduce a fuzzy goal defined on the deviation from the optimal value. A necessity measure is adopted for representing the robustness and a necessarily soft optimal solution set is defined. The solution having the highest membership value of the necessarily soft optimal solution set can be considered as the most reasonable solution and called the best necessarily soft optimal solution. A method of the best necessarily soft optimal solution is proposed.

1. はじめに

ファジィ線形計画法では,「だいたい a 以下」という形のソフトな制約を満たす解や，係数の取りうる範囲を考慮したロバストな解などが求められてきた．このようなソフト性やロバスト性は，ファジィ目的関数や区間目的関数の最適化にも導入されている．係数のすべての取りうる値に対して最適となる必然的最適解 [1] は，ロバストな性質をもった最も合理的な解といえる．しかし，区間目的関数の必然的最適解は存在しない場合が多いという欠点がある．これに対処するため，係数のどのような取りうる値に対しても，真の最適値からの隔たりが大きくない最大リグレット最小解 [2] や最悪達成率最適解 [3] が提案されている．これらは，ソフトな最適性規準に基づいたロバストな解である．ファジィ目的関数の必然的最適解についても，存在しても必然的最適性の度合いが低く，十分に係数値の可能性が考慮されていない場合が多いという欠点がある．

本研究では，ファジィ線形目的関数をもつ線形計画問題を取り上げ，この問題におけるソフトな最適性規準に基づいたロバストな解を定義し，一求解法について議論する．この解は，区間線形目的関数に対する最大リグレット最小解をファジィ線形目的関数の場合へ拡張した解であるとともに，必然的最適解における最適性を緩和したものである．また，この解は，目的関数の係数ベクトルが最も取りうると考えられる値付近で変動しても，真の最適解と比べてもそれほど遜色がないという性質をもつ．まず，必然的ファジィ最適解集合とその集合に帰属するメンバシップ値が最大となる最良必然的ファジィ最適解を定義する．次に，ファジィ目的関数が区間目的関数に退化したとき，最良必然的ファジィ最適解が最大リグレット最小解と等価になることを示す．最後に，二分法と緩和法に基づいた最良必然的ファジィ最適解の計算方法を提案する．

2. ファジィ線形目的関数をもつ線形計画問題

次のファジィ目的関数をもつ線形計画問題を考える．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad \boldsymbol{cx} \\ &\text{sub. to} \quad \boldsymbol{x} \in X = \{\boldsymbol{x} \mid \boldsymbol{Ax} \leq \boldsymbol{b}\} \end{aligned} \tag{1}$$

ただし，A は $m \times n$ 行列であり，$\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^t$, $\boldsymbol{c} = (c_1, c_2, \ldots, c_n)$, $\boldsymbol{b} = (b_1, b_2, \ldots, b_m)^t$ である．c_j は次のメンバシップ関数をもつ L-R ファジィ数 $\Gamma_j = (c_j^{\mathrm{L}}, c_j^{\mathrm{R}}, \alpha_j, \beta_j)_{L_j R_j}$ に制限された可能性変数である．

$$\mu_{\Gamma_j}(r) = \begin{cases} L_j\left(\dfrac{c_j^{\mathrm{L}} - r}{\alpha_j}\right); & r < c_j^{\mathrm{L}} \\ 1; & c_j^{\mathrm{L}} \leq r \leq c_j^{\mathrm{R}} \\ R_j\left(\dfrac{r - c_j^{\mathrm{R}}}{\beta_j}\right); & r > c_j^{\mathrm{R}} \end{cases} \tag{2}$$

ただし，型関数 L_j, $R_j : [0, +\infty) \mapsto [0, 1]$ は $L_j(0) = R_j(0) = 1$ なる上半連続な非増加関数である．なお，実行可能集合 X は有界と仮定する．以後，次のファジィ集合 $\boldsymbol{\Gamma}$ を用いる．

$$\mu_{\boldsymbol{\Gamma}}(\boldsymbol{c}) = \min_{j=1,2,\ldots,n} \mu_{\Gamma_j}(c_j) \tag{3}$$

3. 必然的ファジィ最適解

$\boldsymbol{c}$ を目的関数の係数ベクトルとする通常の線形計画問題 (1) 式を考える．最適値との差が大きくない目的関数値をもつ実行可能解は準最適解と考えることができる．このようなソフトな最適性の観点から，最適値との差に応じてメンバシップ値を与えることにより，次のファジィ最適解集合 $Opt(\boldsymbol{c})$ が定義できる．

$$\mu_{Opt(\boldsymbol{c})}(\boldsymbol{x}) = \min(\mu_{Dif}(\max_{\boldsymbol{y} \in X} \boldsymbol{cy} - \boldsymbol{cx}), \chi_X(\boldsymbol{x})) \tag{4}$$

ただし，$\mu_{Dif} : \mathbf{R} \mapsto [0, 1]$ は非増加関数とする．また，χ_X は X の特性関数である．

ファジィ最適解集合をファジィ目的関数をもつ線形計画問題の場合へ拡張することを考えれば，可能性測度に基づくものと必然性測度に基づくものとの 2 種類のものが定義できる．本研究では，ロバストでソフトな最適解を論じるので，必然性測度に基づくものを取り上げる．必然的ファジィ最適解集合 $\Box Opt$ は次のように定義される．

$$\mu_{\Box Opt}(\boldsymbol{x}) = \inf_{\boldsymbol{c}} \max\{(1 - \mu_{\boldsymbol{\Gamma}}(\boldsymbol{c})), \mu_{Opt(\boldsymbol{c})}(\boldsymbol{x})\} \tag{5}$$

いま，擬逆関数 μ_{Dif}^* を

$$\mu_{Dif}^*(h) = \sup\{r \mid \mu_{Dif}(r) \geq h\} \tag{6}$$

とし，$h^0=\mu_{\square Opt}(\boldsymbol{x})$ と定義すると，

$\mu_{\boldsymbol{\Gamma}}(\boldsymbol{c})>1-h^0$ ならば，
任意の$\boldsymbol{y}\in X$ について，$\boldsymbol{cy}-\boldsymbol{cx}\le\mu^*_{Dif}(h^0)$ (7)

が成立する．これより，メンバシップ値が $1-h^0$ より大きい$\boldsymbol{c}$ が実現すれば，必ず最適値との差が $\mu^*_{Dif}(h^0)$ 以下になることがわかる．

必然的ファジィ最適性に基づくと，最も合理的な解は，

$$\underset{\boldsymbol{x}\in X}{\text{maximize}}\ \mu_{\square Opt}(\boldsymbol{x}) \tag{8}$$

と与えられる．以後，(8) 式の最適解を最良必然的ファジィ最適解と呼ぶ．

[定理 1] L-R ファジィ数 Γ_j が区間に退化したとき，最良必然的ファジィ最適解は最大リグレット最小解と一致する．

[定理 2] $h^0=\mu_{\square Opt}(\boldsymbol{x})$ とするとき，最良必然的ファジィ最適解は，度合 $1-h^0$ の可能的最適解である．

4. 最良必然的ファジィ最適解の計算方法

最良必然的ファジィ最適解の計算方法について考察する．(8) 式の最適化問題は，補助変数 $h\in[0,1]$ を導入することにより，次のように変形できる．

$$\begin{aligned}&\text{maximize}\quad h\\ &\text{sub. to}\quad \sup_{\substack{\boldsymbol{c}\\ \mu_{\boldsymbol{\Gamma}}(\boldsymbol{c})>1-h}}\ \max_{\boldsymbol{y}\in X}(\boldsymbol{cy}-\boldsymbol{cx})\le\mu^*_{Dif}(h)\\ &\qquad\quad \boldsymbol{Ax}\le\boldsymbol{b}\end{aligned} \tag{9}$$

ここで，$\boldsymbol{\Gamma}$ の台（強 0-レベル集合）$(\boldsymbol{\Gamma})_0$ を用いて，集合 ΠS^0 を

$$\Pi S^0=\left\{\boldsymbol{x}\in X\ \middle|\ \boldsymbol{cx}=\max_{\boldsymbol{y}\in X}\boldsymbol{cy}\right.$$
$$\left.\text{なる }\boldsymbol{c}\in\mathrm{cl}\,(\boldsymbol{\Gamma})_0\text{ が存在する}\right\} \tag{10}$$

と定め，ΠS^0 のすべての端点集合 ΠB^0 を

$$\Pi B^0=\{\boldsymbol{y}^1,\boldsymbol{y}^2,\ldots,\boldsymbol{y}^p\} \tag{11}$$

と表すことにする．(10) 式の cl D は集合 D の閉包を意味する．ΠB^0 は容易に算出することができる [3]．

ΠB^0 の要素 $\boldsymbol{y}^i$ を用いると，(8) 式はさらに次のように変形できる．

$$\begin{aligned}&\text{maximize}\quad h\\ &\text{sub. to}\quad \max_{\boldsymbol{c}\in\mathrm{cl}\,(\boldsymbol{\Gamma})_{1-h}}(\boldsymbol{cy}^i-\boldsymbol{cx})\le\mu^*_{Dif}(h),\\ &\qquad\qquad\qquad\qquad i=1,2,\ldots,p\\ &\qquad\quad \boldsymbol{Ax}\le\boldsymbol{b}\end{aligned} \tag{12}$$

ただし，$(\boldsymbol{\Gamma})_{1-h}$ はファジィ集合 $\boldsymbol{\Gamma}$ の強 $(1-h)$ -レベル集合である．型関数 L_j の擬逆関数 L^*_j を

$$L^*_j(h)=\inf\{r\mid\mu_L(r)\le h\} \tag{13}$$

と定義することにより（R_j についても同様に），閉包 cl $(\boldsymbol{\Gamma})_{1-h}$ は，

$$\begin{aligned}\mathrm{cl}\,(\boldsymbol{\Gamma})_{1-h}=\{&\boldsymbol{c}=(c_1,c_2,\ldots,c_n)\mid\\ &c^{\mathrm{L}}_j-\alpha_jL^*_j(1-h)\le c_j\le c^{\mathrm{R}}_j+\beta_jR^*_j(1-h),\\ &\qquad\qquad j=1,2,\ldots,n\}\end{aligned} \tag{14}$$

と表せる．$\boldsymbol{x}$ と $\boldsymbol{y}^i$ が与えられたとき，(12) 式の部分問題 $\max_{\boldsymbol{c}\in\mathrm{cl}\,(\boldsymbol{\Gamma})_{1-h}}(\boldsymbol{cy}^i-\boldsymbol{cx})$ の最適解 $\boldsymbol{c}^*(\cdot)=(c^*_1(\cdot),c^*_2(\cdot),\ldots,c^*_n(\cdot))$ は次のように求められる．

$$c^*_j(h)=\begin{cases}c^{\mathrm{L}}_j-\alpha_jL^*_j(1-h); & y^i_j-x_j<0\\ c^{\mathrm{R}}_j+\beta_jR^*_j(1-h); & y^i_j-x_j\ge0\end{cases} \tag{15}$$

以上より，二分法と緩和法に基づいた次のアルゴリズムにより，近似的に最良必然的ファジィ最適解が計算できる．

Step 1. ΠB^0 の中で$\boldsymbol{c}^{\mathrm{R}}\boldsymbol{y}^i$ が最大となる $\boldsymbol{y}^i$ を $\boldsymbol{z}^1$ とする．また，$c^1_j(h)=c^{\mathrm{R}}_j+\beta_jR^*_j(1-h)$, $j=1,2,\ldots,n$ として，$\boldsymbol{c}^1(\cdot)=(c^1_1(\cdot),c^1_2(\cdot),\ldots,c^1_n(\cdot))$ を定義する．

Step 2. $h^{\mathrm{L}}=0$, $h^{\mathrm{U}}=1$, $k=2$, $\boldsymbol{x}^0=\boldsymbol{z}^1$ とおく．

Step 3. $h=\frac{1}{2}(h^{\mathrm{L}}+h^{\mathrm{U}})$ として，すべての $\boldsymbol{y}^i\in\Pi B^0$ について，(15) 式に基づき，

$$\mu_{Dif}\left(\max_{\boldsymbol{c}\in\mathrm{cl}\,(\boldsymbol{\Gamma})_{1-h}}(\boldsymbol{cy}^i-\boldsymbol{cx}^0)\right)$$

を算出する．その中で最小のメンバシップ値 h^k を与える $\boldsymbol{y}^i$ を $\boldsymbol{z}^k$ とし，その最適解を$\boldsymbol{c}^k(\cdot)$ とする．

Step 4. $h^k\ge h$ ならば，$h^{\mathrm{L}}=h$ として，Step 3 へ戻る．

Step 5. $h^{\mathrm{U}}-h^{\mathrm{L}}<\varepsilon$ ならば，終了する．このとき，最適解は $\boldsymbol{x}^0$ である．

Step 6. $\boldsymbol{z}^k=\boldsymbol{z}^j$ かつ $\boldsymbol{c}^k(\cdot)=\boldsymbol{c}^j(\cdot)$ なる $j\in\{1,2,\ldots,k-1\}$ が存在すれば，$k=k-1$ とする．

Step 7. $h=\frac{1}{2}(h^{\mathrm{L}}+h^{\mathrm{U}})$ として，次の線形計画問題を解き，最適解を $(\boldsymbol{x}^*,r^*)$ とする．

$$\begin{aligned}&\text{minimize}\quad r\\ &\text{sub. to}\quad \boldsymbol{c}^i(h)\boldsymbol{z}^i-\boldsymbol{c}^i(h)\boldsymbol{x}\le r,\\ &\qquad\qquad\qquad i=1,2,\ldots,k\\ &\qquad\quad \boldsymbol{Ax}\le\boldsymbol{b}\end{aligned} \tag{16}$$

Step 8. $\mu_{Dif}(r^*)<h$ ならば，$h^{\mathrm{U}}=h$ として，Step 7 へ戻る．そうでなければ，$\boldsymbol{x}^0=\boldsymbol{x}^*$ として，Step 3 へ戻る．

5. おわりに

ファジィ数理計画法で取り扱えるソフト性とロバスト性とを同時に最適性の概念に適用した最良必然的ファジィ最適解とその計算方法について考察した．

本研究では，最大リグレット最小解の拡張として差に基づき最適値からのズレを評価し，必然的ファジィ最適解を定義したが，最悪達成率最適解の拡張として比に基づいて評価しても同様な議論ができる．また，予め ΠB^0 が得られたもとでの最良必然的ファジィ最適解の計算方法を議論したが，ΠB^0 が予め求められていない場合にも計算することができる．これらに関する議論は，今後の課題である．

参考文献

1. 乾口：ファジィ数理計画法，ファジィＯＲ（浅居，田中 (編)），日刊工業新聞社，41-90 (1993).
2. 乾口，久米：最大リグレット最小化に基づく区間目的関数をもつ線形計画問題の解の概念，日本経営工学会誌，Vol.42, No.3, 193-199 (1991).
3. 乾口，村田，坂和：区間目的関数をもつ線形計画問題における最悪達成率最適化，システム制御情報学会論文誌，Vol.6, No.1, 243-251 (1993).

[問い合わせ先] 〒739 東広島市鏡山 1 丁目 4 − 1
広島大学工学部第二類（電気系）
乾 口 雅 弘
TEL : 0824-24-7695, FAX : 0824-22-7195
e-mail : inuiguti@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

WE3-3

可能性多変量解析とその応用

Possibility Multivariate Analysis and Its Application

田中英夫
Hideo Tanaka
大阪府立大学工学部
College of Engineering, University of Osaka Prefecture

Abstract - This paper deals with possibility multivariate analysis based on possibility distributions such as possibility regression analysis, possibility descriminant analysis and possibility portfolio selection. Possibility distributions depend on importance grades of data given by an expert whereas probability distributions depend on the frequency of occurrences. Thus, possibility is more predictive in nature than probability.

1．はじめに

確率モデルから多変量解析が構成されているように，可能性モデルから可能性多変量解析[1]を定式化することがここでの目的である．まず，可能性モデルについて概略を述べ，次にエキスパートによる重み付きデータから可能性分布を同定する方法を示し，同定された可能性分布による可能性多変量解析を定式化する．

2．可能性分布モデル

多次元上の指数型可能性分布を次のように定義する．

$$\Pi_A(x)=\exp\{-(x-a)^t D_A^{-1}(x-a)\} \tag{1}$$

ただし，Aは可能性のラベルであり，aは中心ベクトル，D_Aは対称な正定値行列であり，これを$D_A>0$と表す．(1)式のパラメータ表示を$A=(a,D_A)_e$とする．

通常のベクトル関数$y=f(x)$とX上の可能性分布$\Pi_A(x)$とが与えられたとき，Y上の可能性分布$\Pi_{f(A)}(y)$を次のように定義する．

$$\Pi_{f(A)}(y)=\max_{\{x|y=f(x)\}}\Pi_A(x) \tag{2}$$

xの代わりに可能性分布Aが与えられたとし，ベクトル関数$y=f(x)$を拡張して

$$Y=f(A) \tag{3}$$

と表現する．ただしY上の可能性分布は(2)式である．

可能性分布を$A=(a,D_A)_e$，ファジィ事象を$B=(b,D_b)_e$とするとき，可能性測度$\Pi_A(B)$をmax・積で次のように定義する．

$$\Pi_A(B)=\max_x \Pi_A(x)\cdot\Pi_B(x) \tag{4}$$

条件付可能性分布は同時可能性分布$\Pi_A(x,y)$から次のように定義できる．

$$\Pi_A(x|y)=k\,\Pi_A(x,y) \tag{5}$$

ただし，kは正規化定数であり，次式を満足するものである．

$$\max_x \Pi_A(x|y)=1 \tag{6}$$

また周辺可能性分布は次のように定義できる．

$$\Pi_A(x)=\max_y \Pi_A(x,y) \tag{7}$$

以上の定義はすべて最適化問題であるが，この最適化問題は解析的に解けるので，容易に計算できる．たとえば，次の線形変換

$$y=Tx \tag{8}$$

を考え，xが確率変数のときと，xが可能性変数のときとを比較する．まず，xが確率変数であり，その平均ベクトルを$E(x)$とし，また共分散行列を$V(x)$とする．すなわち，xが

$$(E(x),V(x))=(\mu,\Sigma) \tag{9}$$

に従っているとすると，yは確率変数になり，その平均ベクトルと共分散行列は次のようになる．

$$(E(y),V(y))=(T\mu,T\Sigma T^t) \tag{10}$$

次に，xが可能性分布$\Pi_A(x)=(a,D_A)_e$に従っているとすると，(2)式から，yは可能性変数になり，その可能性分布は

$$\Pi_Y(y)=\max_{\{x|y=Tx\}}\Pi_A(x) \tag{11}$$

で定義されている．ただし，$Y=TA$と表し，Yはファジィベクトルと考えることができる．(11)式の最適化問題は容易に解くことができ，

$$\Pi_Y(y)=\exp\{-(y-Ta)^t(TD_AT^t)^{-1}(y-Ta)\} \tag{12}$$

となる．これをパラメータ表示すると，

$$Y=(Ta,TD_AT^t)_e \tag{13}$$

となる．(10)式と(13)式とを比較すると，変換に関して同じ形式になっているが，その計算方法は異なっている．すなわち，可能性計算は(2)式の拡張原理に依存している．

3．可能性分布の同定

指数型可能性分布の同定法[2]はすでに提案したが，そこでは(1)式のD_Aが正定値行列であるという性質を満足させるために直交条件という複雑な拘束条件を線形計画問題に導入した．直交条件をどのように選択するかという問題がある．直交条件を入れると，${}_nC_2=n(n-1)/2$個

の拘束条件を導入したことになり，D_A は $n\times n$ 行列で対称であるので，実際の自由決定変数は

$$(n+1)n/2-n(n-1)/2=n \tag{14}$$

となる．このことから対角行列だけでデータ点を表現できるようにn次元空間の直交軸を回転することを考える．

まず，与えられるデータは $(x_i,h_i), i=1,...,m$ とし，h_i はi番目のデータの可能性値であるとする．可能性分布の中心ベクトルは重み付き平均として

$$a=\sum_{i=1}^{m}(h_i x_i)/\sum_{i=1}^{m}h_i \tag{15}$$

とする．正定値行列 D_A を求めるために，線形変換

$$y_i=x_i-a \tag{16}$$

し，中心０の可能性分布 $\Pi_A(y)$ をデータ (y_i,h_i) から次のように求める．

$$\begin{aligned}&\min_{D_A}\Pi_A(y_1)\times\cdots\times\Pi_A(y_m)\\&\text{subject to }\Pi_A(y_1)\ge h_i\\&\qquad D_A>0\end{aligned} \tag{17}$$

(17)式の最適化問題において $D_A>0$ の拘束条件は非線形であるので，D_A を対角化して最適化問題を考える．すなわち，主成分分析により，データ $(y_i,h_i), i=1,...,m$ を線形変換

$$z_i=Ty_i \tag{18}$$

し，

$$TD_A^{-1}T^t=C_A=\begin{bmatrix}c_1 & & 0\\ & \ddots & \\ 0 & & c_n\end{bmatrix} \tag{19}$$

となると仮定する．ここで，行列 T として，T のたてベクトルが Σ の固有ベクトルである．ただし，Σ は次の重み付き共分散行列である．

$$\Sigma=\left[\gamma_{ij}\right],\ \gamma_{ij}=\left\{\sum_{k=1}^{m}(x_{ki}-a_i)(x_{kj}-a_j)h_k\right\}/\sum_{k=1}^{m}h_k \tag{20}$$

以上の説明をFig. 1に示す．空間 Z における最適化問題は次のようになる．

$$\begin{aligned}&\min\Pi_A(z_1)\times\cdots\times\Pi_A(z_m)\\&\text{subject to }\Pi_A(z_i)\ge h_i,\ c_i\ge\varepsilon,\ i=1,...,m\end{aligned} \tag{21}$$

ただし，ε は十分小さな正数である．(21)式を書き直すと，

$$\begin{aligned}&\max_{C_A}\sum_{i=1}^{m}z_i^tC_Az_i\\&\text{subject to }z_i^tC_Az_i\le-\log h_i,\ c_i\ge\varepsilon,\ i=1,...,m\end{aligned} \tag{22}$$

となり，C_A を求める問題は線形計画法により解を得ることができる．(19)式から，D_A は次のようになる．

$$D_A=(T^tC_AT)^{-1}=T^tC_A^{-1}T \tag{23}$$

以上の定式化は可能性という観点から $\Pi_A(z_i)\ge h_i$ という拘束条件を導入していた．しかし，$\min\Pi_A(z_i)\times\cdots\times\Pi_A(z_m)$ というように，尤度最大という意味ではない．したがって，尤度最大ということを考えて，次のように同定することもできる．

$$\begin{aligned}&\max_{c_A}\Pi_A(z_i)\times\cdots\times(z_m)\\&\text{subject to }\Pi_A(z_i)\le h_i\\&\qquad c_i\ge\varepsilon,\ i=1,...,m\end{aligned} \tag{24}$$

4．ポートフォリオ選択モデルへの応用

いま，証券を S_j で表し，$j=1,...,n$ とし，γ_j は S_j の収益率とする．証券 S_j の収益率 γ_j は時間によって変化するので，離散時間 k における収益率のベクトルを $\gamma_k=(\gamma_{1k},...,\gamma_{nk})^t, k=1,...,t$ とする．各期に重み $h_k(h_1\le h_2\cdots<h_t)$ を与えて，$(\gamma_k,h_k), k=1,...,t$ のデータを考える．γ は可能性変数として，データから可能性分布 $\Pi_A(\gamma)=(a,D_A)_e$ を同定する．

ポートフォリオ z の収益率は

$$z=\sum_{j=1}^{n}\gamma_j x_j \tag{25}$$

となり，γ_j は可能性分布 $\Pi_A(\gamma)$ に従っているとする．(12)式から z の可能性分布 $\Pi(z)$ は

$$\begin{aligned}\Pi(z)&=\exp\{-(z-a^tx)^2(x^tD_Ax)^{-1}\}\\&=(a^tx,\ x^tD_Ax)_e\end{aligned} \tag{26}$$

となる．したがってポートフォリオの平均収益を r とし，リスクを表す x^tD_Ax が小さくなるポートフォリオ x を求める問題になる．すなわち，

$$\begin{aligned}&\min\ x^tD_Ax\\&\text{subject to }a^tx=r,\ \sum_{j=1}^{n}x_j=1,\ \ x_j\ge0\end{aligned} \tag{27}$$

これは２次計画問題であり，容易に解が得られる．

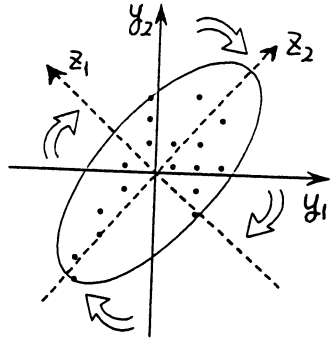


Fig.1 Illustration of the linear transform by principle component analysis.

参考文献

[1] 田中英夫：可能性回帰分析，日本ファジィ学会，Vol. 5, No. 6, pp. 1260-1272, 1993.

[2] 田中，石渕，吉川，指数型可能性判別分析，日本ファジィ学会，Vol. 6, No. 6, pp. 1147-1160, 1994.

連絡先　〒593 堺市学園町１－１
大阪府立大学工学部　田中英夫
Tel. 0722-52-1161内線2376
Fax. 0722-59-3340（工学部共通）

WE3-4

ファジィ区間データに基づくファジィ状態のベイズ識別

Bayesian Discrimination of Fuzzy States by Fuzzy Interval Data

吉川　伸一*　　稲田　晃穂**　　奥田　徹示**
Shinichi Yoshikawa*　Akio Inada**　Tetsuji Okuda**

*大阪府立大学　　**大阪工業大学
*University of Osaka Prefecture　**Osaka Institute of Technology

Abstruct:In this paper, we discriminate fuzzy states by fuzzy data which is obtained from a population distribution. Here, we call the data whose boundaries of intervals are vague fuzzy interval data , and investigate the methods of discrimination from the fuzzy interval data. Concretely , we propose the methods treating the middle points of membership functions as the representative points of fuzzy interval data to discriminate fuzzy states.

1．緒言

従来の統計学の分野では，一般に正確に計測が可能な事象を対象とし，それが何らかの確率分布に従うことを前提として処理が行われていた．しかし，人間の言語などには主観性や感性を含んでおり，そのような定性的な概念を正確に数量化するのは一般に困難である．このように技術的・能力的な問題で正確に数量化が実行できない場合に対しては，あいまいな対象はあいまいなまま，つまり区間の境界が明確でない状態で，人間の主観的なあいまいさを伴ってデータが得られると解釈する方がより現実的で妥当性があるであろう．

そこで，本研究では実用的な手法としてメンバシップ関数の中点を代表値として用いる手法を提案している．このような観点からの研究として，ベイズ論的な立場からは，ファジィ観測データに基づくベイズ推定の基礎的な議論［1］や，ファジィ区間データに基づくベイズ検定［2］が既に報告されている．今回の研究では，ファジィ状態が離散的にN個存在し，それをファジィ観測に基づいて識別する場合と，状態が連続的で，それをいくつかのファジィ区間で区切ってだいたいどの状態が生起しているかを識別する場合とについて考察する．

2．ファジィ区間データの形式とメンバシップ関数

通常の統計学では，観測値あるいは実現値は正確な値として取り扱われるが，この論文ではあいまいな状況の下で人間の主観的なあいまいさを伴ってデータが得られる場合を考える．このようなあいまいなデータを区間 $I_j=[x_j-h/2, x_j+h/2]$ 上で定義されるファジィ事象（ファジィ集合） μ_j として捉える．h は，あいまいさの幅を表しており，μ_j のメンバシップ関数を $\mu_j(x)$ とすると，この $\mu_j(x)$ は確率変数 x のファジィ事象 μ_j への帰属度を表している．このデータをファジィ区間データと呼び，その基本型として，$-h/2\leq x\leq h/2$ 上で定義される次の3種類のメンバシップ関数を定義しておく．

〔三角形型〕

$$\mu(x)=-\frac{2}{h}|x|+1 \qquad (1)$$

〔2次曲線型〕

$$\mu(x)=\frac{8}{h^2}\left(|x|-\frac{h}{2}\right)^2 Q+\left(1-\frac{8x^2}{h^2}\right)(1-Q) \qquad (2)$$

〔台形型〕

$$\mu(x)=\max\left\{0,\min\left(1,-\frac{1}{2q}|x|+\frac{h}{8q}+\frac{1}{2}\right)\right\} \qquad (3)$$

ただし，式（2）において，$Q=[2(|x|+h/4)/h]$ であり，$[A]$ は A の整数部を表す記号である．式（3）

のq は台形型メンバシップ関数の形状パラメータであり，$0<q\leq h/4$ である．

さて，このように定義されたファジィ区間データを統計的に処理するためには，ファジィ区間データμ_jの出現確率P_jを求める必要がある．この確率は，Zadehの定義により，

$$P_j=\int_{x_j-h/2}^{x_j+h/2}\mu_j(x)f(x)dx \qquad (4)$$

と表すことができる［3］．ここで$f(x)$ はファジィ区間データのメンバシップ関数が設定される母集団の確率密度関数である．すなわち，この確率密度関数 $f(x)$ を持つ母集団からあいまいなファジィ区間データ μ_j が発生してくると解釈している．具体的には，このμ_jの中心値x_jを代表値として，これをデータ処理に用いる．ここで，ファジィ区間データ μ_j のr 次のF-モーメントを，

$$d_r=\int_{x_j-h/2}^{x_j+h/2}\mu_j(x)(x-x_j)^r dx \qquad (5)$$

と定義すると，式（4）は，

$$\begin{aligned}P_j&=\sum_{r=0}^{\infty}\frac{d_r}{r!}f^{(r)}(x_j)\\&=d_0f(x_j)+\frac{d_2}{2!}f''(x_j)+\frac{d_4}{4!}f^{(4)}(x_j)\\&\quad+\cdots\cdots\cdots\\&\quad+\frac{d_{2n}}{(2n)!}f^{(2n)}(x_j)+\cdots\cdots\end{aligned} \qquad (6)$$

と表すことができる．

3．ファジィ区間データに基づく識別規則と平均誤識別率

状態空間θ を $\theta=\{\theta_1,\cdots,\theta_N\}$ とし，与えられた正確なデータx に基づいて複数の状態を識別する手法は以前より行われているが，ここではそれを参考にファジィ区間データ μ_j に基づく状態識別を行う．また，状態空間も正確にはN個の異なる状態が存在するが，それらを正確に識別するのでなく，だいたいの区間で区切られたどのファジィ状態が発生しているのかを識別する．そのファジィ状態空間を$F=\{F_1,\cdots,F_n\}(n\leq N)$ とする．

3.1 状態空間が離散的な場合

〔ファジィ区間データによるファジィ状態の識別〕

ファジィ区間データμ_jに基づく条件付確率 $P(\mu_j|F_i)$は，2章で述べたF－モーメントを用いて，

$$\begin{aligned}P(\mu_j|F_i)&=d_0P(x_j|F_i)+\frac{d_2}{2!}P''(x_j|F_i)\\&\quad+\frac{d_4}{4!}P^{(4)}(x_j|F_i)+\cdots\\&\quad+\frac{d_{2n}}{(2n)!}P^{(2n)}(x_j|F_i)+\cdots\end{aligned} \qquad (7)$$

となる．ここで，$P(x|F_i)$ は，

$$P(x|F_i)=\sum_{\theta}f(x,\theta_\theta)\mu_{Fi}(\theta_\theta)/P(F_i) \qquad (8)$$

で，

$$f(x,\theta_\theta)=f(x|\theta_\theta)\xi(\theta_\theta) \qquad (9)$$

であり，$f(x|\theta_\theta)$ と$\xi(\theta_\theta)$ とは与えられている．式（7）については，第2項までで十分であるとして，第3項以降は微小な値となるのでオーダの項とし，$O(h^5)$ とする．したがって，

$$P(\mu_j|F_i)=\frac{1}{P(F_i)}\left[\sum_{\theta}\mu_{Fi}(\theta_\theta)\xi(\theta_\theta)\left\{d_0f(x_j|\theta_\theta)+\frac{d_2}{2!}f''(x_j|\theta_\theta)+O(h^5)\right\}\right] \qquad (10)$$

となる．また，ファジィ事象の事前確率$P(F_i)$ も

$$P(F_i)=\sum_{\theta}\mu_{Fi}(\theta_\theta)\xi(\theta_\theta) \qquad (11)$$

となるので，

$$P(\mu_j|F_i)P(F_i)=\text{式 (10)}\cdot\text{式 (11)} \qquad (12)$$

と表される．そこで，このときの最適な識別規則は，

$${}_D\delta(\mu_j)=\{{}_D\delta_1(\mu_j),\cdots,{}_D\delta_n(\mu_j)\}$$

と書くとき，$k=1,\cdots,n$ に対してオーダの項を無視して近似的に，μ_jの代表値x_jを用いて，

$${}_D\delta_k^*(x_j)=\begin{cases}1,\ \max_i^*P(\mu_j|F_i)P(F_i)\\ \quad\fallingdotseq\sum_{\theta}\mu_{Fk}(\theta_\theta)\xi(\theta_\theta)\\ \quad\times\left\{d_0f(x_j|\theta_\theta)+\frac{d_2}{2!}f''(x_j|\theta_\theta)\right\}\\ 0,\ \text{その他のとき}\end{cases} \qquad (13)$$

と表される．そのときの平均誤識別率は，

$$\begin{aligned}Pe({}_D\delta_k^*)&=1-\sum_j\max_i^*\text{式 (10)}\cdot\text{式 (11)}\\&\fallingdotseq1-\sum_j\max_i^*\left[\sum_{\theta}\mu_{Fi}(\theta_\theta)\xi(\theta_\theta)\times\left\{d_0f(x_j|\theta_\theta)+\frac{d_2}{2!}f''(x_j|\theta_\theta)\right\}\right]\end{aligned} \qquad (14)$$

となる．ここで，$\overset{*}{\max}$ は近似式を用いて $\max$ をとることを意味している．

3.2 状態空間が連続的な場合

この節では，識別が行われる状態空間 θ が連続的な場合を考察する．

ファジィ区間データ μ_j の条件付確率 $P(\mu_j \mid F_i)$ とファジィ状態の事前確率 $P(F_i)$ との積より，

$$P(\mu_j \mid F_i)P(F_i)=P(F_i,\mu_j) \tag{15}$$

となる．これは θ および x の2変量の同時確率密度関数を $f(\theta,x)$ とすると，

$$P(F_i,\mu_j)=\int_{\theta_i-h_\theta/2}^{\theta_i+h_\theta/2}\int_{x_j-h/2}^{x_j+h/2}\mu_{Fi}(\theta)\mu_j(x)f(\theta,x)\,d\theta dx \tag{16}$$

と表され，m,n 次のF-モーメントを

$$d_{m,n}=\int_{\theta_i-h_\theta/2}^{\theta_i+h_\theta/2}\int_{x_j-h/2}^{x_j+h/2}(\theta-\theta_i)^m\mu_{Fi}(\theta)\,x(x-x_j)^n\mu_j(x)\,d\theta dx \tag{17}$$

と定義すると，状態空間が連続的な場合におけるファジィ状態の近似的な最適識別規則は，

$$C\delta_k^*(x_j)=\begin{cases}1, & \overset{*}{\max_i}P(\mu_j \mid F_i)P(F_i)\\ & =\overset{*}{\max_i}P(F_i,\mu_j)\\ & \fallingdotseq d_{0,0}f(\theta_k,x_j)+\dfrac{d_{2,0}}{2!}\dfrac{\partial^2 f(\theta_k,x_j)}{\partial\theta_k^2}\\ & \quad +\dfrac{d_{0,2}}{2!}\dfrac{\partial^2 f(\theta_k,x_j)}{\partial x_j^2}\\ 0, & \text{その他}\end{cases} \tag{18}$$

となり，平均誤識別率は，

$$Pe(C\delta_k^*)=1-\sum_j\overset{*}{\max_i}P(F_i,\mu_j)$$

$$\fallingdotseq 1-\sum_j\overset{*}{\max_i}\left[d_{0,0}f(\theta_i,x_j)+\frac{d_{2,0}}{2!}\frac{\partial^2 f(\theta_i,x_j)}{\partial\theta_i^2}+\frac{d_{0,2}}{2!}\frac{\partial^2 f(\theta_i,x_j)}{\partial x_j^2}\right] \tag{19}$$

と表される．ここで，h_θ はファジィ状態のあいまいさの幅を表している．

4. パソコンによるシミュレーション

シミュレーションを行うにあたり，以下のⅠ～Ⅳの手順により実行する．

Ⅰ．ファジィ状態の識別を行うにあたって，①状態空間 θ が離散分布となる場合と②状態空間 θ が連続分布となる場合の両方について検討する．離散分布の場合には，観測空間からのファジィ区間データがある正規母集団から得られ，そのデータに基づいて識別するものとする．連続分布となる場合には，状態空間の状態 θ と観測 x との同時分布が2変量正規分布をなしていると仮定して行う．このときのファジィ状態を表すメンバシップ関数および観測空間からのファジィ区間データは，ともに台形型メンバシップ関数とする．台形型メンバシップ関数は，幅 $h=20, h_\theta=30$，形状パラメータ $q=2.5, q_\theta=3.75$ とする．

Ⅱ．本シミュレーションは，台形型メンバシップ関数の形状パラメータをランダムに左右別々に変動させ，左右対称性を満たさない形状の変化したメンバシップ関数でファジィ区間データが得られるものとする．

Ⅲ．Ⅰで述べた各場合について，数値例を以下の〈1〉，〈2〉のように設定する．

〈1〉：状態空間での事前分布が $\xi(\theta_1)=\cdots=\xi(\theta_5)=0.0609$，$\xi(\theta_6)=0.0909$，$\xi(\theta_7)=\cdots=\xi(\theta_{11})=0.1209$ という離散分布で，ファジィ事象の条件付確率 $P(\mu_j \mid \theta_i)$ を求めるために，条件付確率密度関数 $f(x \mid \theta_i)$ を，それぞれ

$$\left.\begin{aligned}&N_1(\theta_1,\upsilon_1^2)=N_1(-30,15^2),\\ &N_2(\theta_2,\upsilon_2^2)=N_2(-20,20^2),\\ &N_3(\theta_3,\upsilon_3^2)=N_3(-10,25^2),\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\\ &N_{11}(\theta_{11},\upsilon_{11}^2)=N_{11}(140,160^2)\end{aligned}\right\} \tag{20}$$

に従う正規分布であるとする．なお，正確にこれらの状態を識別するのでなく，2個のファジィ状態 F_1, F_2 のファジィ識別を行う．つまり，11個の正確な状態 θ_1～θ_{11} 上にファジィ状態を表すメンバシップ値 $\mu_{F1}(\theta_i), \mu_{F2}(\theta_i)$ $(i=1,\cdots,11)$ を設定している．ここでは「ファジィ状態 F_1 が正しい」あるいは「ファジィ状態 F_2 が正しい」と仮定した上で，$P(\mu_j \mid F_1)$ からファジィ区間データ μ_j を発生させ，そのデータから正しくファジィ状態が識別されるかどうかを検討する．

〈2〉：2変量のファジィ事象 (F_i,μ_j) の出現確率 $P(F_i,\mu_j)$ を計算するために，θ と x の2変量同時確率密度関数 $f(\theta,x)$ を

$$f(\theta,x)=\frac{1}{2\pi 30\cdot 15\sqrt{1-0.6^2}}exp\left[-\frac{1}{2(1-0.6^2)}\right.$$

$$\times\left\{\left(\frac{\theta-80}{30}\right)-2\cdot0.6\left(\frac{\theta-80}{30}\right)\left(\frac{x-50}{15}\right)+\left(\frac{x-50}{15}\right)^2\right\}\Bigg] \qquad (21)$$

のような2変量正規分布とする.

〈1〉のときと同様にファジィ識別を行うが, ファジィ状態をメンバシップ関数で表しているので, 状態の方は離散分布$P(F_i)$となり, θが分布をなしているところまでメンバシップ関数を設定すると計11個のファジィ状態となった. シミュレーションでは「F_4が正しい」と仮定し, 得られたファジィ区間データμ_jに基づいて正しくF_4に識別されるかどうか検討する.

Ⅳ. ここでのシミュレーションは, Ⅰ, Ⅱで述べたファジィ区間データの取り扱いを次のような(a), (b), (c)の3種類とする.

(a)代表値のみ(補正なし)

(b)ファジィデータそのもの

(c)補正後

このように,(a), (b), (c)3種類それぞれについてファジィ状態の識別を行い,(a)では結果に偏りが生じるが,(c)では補正を行うのでその偏りがなくなり, ファジィ区間データに基づく最も正確な状態識別となる(b)に,どれほど近似されているかを検討する.

〔シミュレーション結果〕

〈1〉

(a)～(c)それぞれのデータを用いる識別規則に基づいて,確率$P(\mu_j|F_i)$に基づく200個のファジィ区間データにより識別を行った結果, 表1のような結果が得られた. ここでは一様乱数を用いているが, この乱数が偏った数値を発生させることも考えられるので, 念のために10回実験を繰り返し行い, 得られた誤識別率の平均値を求めている.

表1 誤識別率のシミュレーション結果(離散的)

設定条件	F_1が正しい	F_2が正しい
ケース1	(a) 0.2800 (b) 0.2495 (c) 0.2495	(a) 0.1935 (b) 0.1835 (c) 0.1835
ケース2	(a) 0.1555 (b) 0.1070 (c) 0.1070	(a) 0.3255 (b) 0.2960 (c) 0.2960
ケース3	(a) 0.1555 (b) 0.1440 (c) 0.1440	(a) 0.3220 (b) 0.3150 (c) 0.3150

〈2〉

ファジィ状態を表すメンバシップ関数は, 左右対称性を満たしているので, $\sum\mu_{Fi}(\theta)=1$を満足する. (a)～(c)それぞれのデータで識別を行った結果, 表2のようになった. これらについても10回実験を繰り返したので, 誤識別率の平均値を求めている.

表2 誤識別率のシミュレーション結果(連続的)

ケース1	ケース2	ケース3
(a) 0.1954 (b) 0.1719 (c) 0.1719	(a) 0.1946 (b) 0.1775 (c) 0.1775	(a) 0.1917 (b) 0.1703 (c) 0.1703

6. 結言

今回の研究では, 本手法が, メンバシップ関数が理想的な左右対称型はいうまでもなくうまくあてはまるが, その関数の形状がランダムに変化する左右非対称型についてもシミュレーションで良好な結果を示した. つまり, (a)のようにメンバシップ関数の代表値のみで処理を行うと, どうしても結果に偏りを生じ, ファジィ区間データの適正な処理にならないが, ここで提案した(c)による手法では,補正を施すということで偏りをほぼ修正でき, ファジィ区間データの適正な処理となることが分り, 本手法の実用性を示している.

〔参考文献〕

[1] 奥田, 浅野, 浅居:ファジィ観測データによるベイズ推定, 日本経営工学会秋季研究大会予稿集, pp.202～204, 1990.

[2] 吉川, 奥田, 浅居:ファジィ区間データに基づくベイズ検定について, 日本経営工学会誌, Vol.46, No.1, 1995.

[3] L.A.Zadeh: " Probability Measures of Fuzzy Events,"J.Math. Anal.Appl., 28, pp. 421/427, 1968.

【問い合わせ先】

〒593 大阪府堺市学園町1－1

大阪府立大学工学部経営工学科第3講座

吉川 伸一(博士後期課程3年)

TEL 0722-52-1161(代), FAX 0722-59-3340

WE4-1

ファジィモデリングのためのデータの分類と回帰の同時分析

Simultaneos Analysis of Data Classification and Regression for Fuzzy Modeling

領家 美奈* 田村 坦之* 中森 義輝**
Mina Ryoke Hiroyuki Tamura Yoshiteru Nakamori

*大阪大学 **甲南大学
Osaka University Konan University

Abstract- In this paper, we propose a fuzzy clustering techinuque which simultaneously deals with the classification and regression of the given data. It finds a fuzzy c-partition of the data set for the identification of the premise parts and c-regression models for the identification of the consequence parts when we are trying to build a fuzzy model. In addition, we develop a techinuque to determine the membership functions of the premise variables based on the partition matrix.

1 はじめに

分類と回帰を同時に分析するファジィクラスタリングについて提案する。これは、与えられたデータ集合から高木・菅野型ファジィモデルを同定する際、前件部同定のためのデータのファジィ分割と後件部同定のための回帰分析を調和的に実行する問題である。またファジィクラスタリングの結果のひとつである分割行列を用いて多次元メンバシップ関数を容易に決定する考え方を提案する。

2 ファジィモデリングへのアプローチ

高木・菅野型ファジィモデル [1] は前件部がファジィ命題、後件部が線形回帰モデルから成るルール群の集合である。各ルールの出力をメンバシップ関数により統合することで、全体として非線形な構造を記述することができる。複雑な構造を持つシステムを簡単なサブモデルを用いて記述できることに利点のひとつがあるが、多次元の観測データからサブモデルを発見、また精度の良いファジィモデルを求めるのはそれほど容易ではない。

そこで後件部を意識して部分線形構造を捉えることを目的としたデータ分割の規範とアルゴリズムが提案されている [2]。部分データ集合を用いて線形回帰モデルを構築し、それらをメンバシップ関数により統合することでファジィモデルを構築している。

データ分割と後件部同定をもっと積極的に結び付けることのできるファジィクラスタリングが Hathaway and Bezdek によって提案されている [3]。まず多次元観測データを c 個の線形回帰モデルから記述できると仮定する。それらの回帰変数をあらかじめ固定して近似誤差が小さくなるようにデータがどのクラスタに属しているかラベル付けと各回帰モデルのパラメータを同時に決定する。その手法は Fuzzy c-Regression Models (FCRM) と名付けられている。しかし、クラスタリングの規範は仮定した回帰モデルの同定誤差のみであるため、必ずしもデータの構造が反映されないし、また、データの分離能力に欠ける。これは予測モデルを構築する場合、クラスタリング結果をそのまま適応することを困難にしている。

そこで、FCRM を改良して、もっと積極的にデータが良く分離する変数空間をつくるファジィクラスタリング Adaptive Fuzzy c-Regression Models (AFCR) が提案されている [4]。ここでは、更に前件部のファジィ命題を記述するメンバシップ関数同定をある程度クラスタリングの実行と同時に行う考え方を提案する。

3 適応型ファジィクラスタリング

与えられたデータ $S=\{(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{y}_1),\cdots,(\boldsymbol{x}_n,\boldsymbol{y}_n)\}$ を用いて、c 個のスイッチング回帰モデル [5]:

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{f}_i(\boldsymbol{x};\boldsymbol{\beta}_i)+\boldsymbol{\epsilon}_i,\quad i=1,2,\cdots,c \tag{1}$$

を同定する。ここに、$\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{R}^t$ は目的変数、$\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{R}^s$ は入力変数、$\boldsymbol{\beta}_i\in\Omega_i\subset\boldsymbol{R}^{s'}$, $i=1,2,\cdots,c$ はパラメータである。以下、本稿では $t=1$ とする。

次のようなデータのファジィ分割を考える。

$$M_{fcn}=\{U\in\boldsymbol{R}^{c\times n}\} \tag{2}$$

ただし、$u_{ik}\in U$ は以下の条件を満たすものとする。

$$0\le u_{ik}\le 1,\quad {}^\forall i,\ k \tag{3}$$

$$0<\sum_{k=1}^{n}u_{ik}<n,\quad {}^\forall i \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{c}u_{ik}=1,\quad {}^\forall k \tag{5}$$

u_{ik} はモデルの値 $\boldsymbol{f}_i(\boldsymbol{x}_k;\boldsymbol{\beta}_i)$ の $\boldsymbol{y}_k$ への適合度と解釈できる。

AFCR の目的関数は以下のように与えられる。目的関数を最小にするような分割行列 U と回帰モデルのパラメータ $\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\beta}_2,\cdots,\boldsymbol{\beta}_c$

とクラスタのファジィ重心$\boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2, \cdots, \boldsymbol{v}_c$とを求める。

$$J(U, \boldsymbol{\beta}_1, \cdots, \boldsymbol{\beta}_c, \boldsymbol{v}_1, \cdots, \boldsymbol{v}_c) = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} (u_{ik})^m Z_{ik} \qquad (6)$$

ただしZ_{ik}は次のように定義される。

$$Z_{ik} = \alpha_i \; E_{ik}(\boldsymbol{\beta}_i) + (1 - \alpha_i) \; \eta \; D_{ik}(\boldsymbol{v}_i) \qquad (7)$$

上式の第1項は仮定した回帰モデルによる予測値と実測値との近似誤差である。ただし、モデルの値$f_i(\boldsymbol{x}_k; \boldsymbol{\beta}_i)$による$y_k$の近似誤差の尺度を$E_{ik}(\boldsymbol{\beta}_i)$は次で与えられる。

$$E_{ik}(\boldsymbol{\beta}_i) = (y_k - f_i(\boldsymbol{x}_k; \boldsymbol{\beta}_i))^2 \qquad (8)$$

第2項はクラスタのファジィ重心とデータの距離に関する項であり、次で与えられる。

$$D_{ik} = \sum_{p=1}^{s} (x_{pk} - v_{pi})^2 \qquad (9)$$

ただし、x_{pk}は前件部変数x_pのデータを表す。また、v_{pi}は第iクラスタのファジィ平均である:

$$v_{pi} = \frac{\sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^m x_{pk}}{\sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^m}, \quad i = 1, 2, \cdots, c \qquad (10)$$

第1項と第2項の重視度をパラメータα_iを用いて次のように適応的に変更する。クラスタごとにファジィ分散共分散行列を求め、その固有値を$\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \cdots$とし、

$$\alpha_i = 1 - \frac{\min_j \{\lambda_{ij}\}}{\max_j \{\lambda_{ij}\}} \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1 \qquad (11)$$

と定義する。この方法は文献[6]の方法を参考にしたものである。

またパラメータηは第1項と第2項の絶対値の大きさのバランスをとるものである。特に条件変数空間の次元と目的変数空間の次元は異なる場合が多いし、また距離と近似誤差に関してもその絶対値は異なる。パラメータηはいくつの条件変数を用いるかということ、あるいはデータ分布に大きく依存するため、現在では探索的に決定している。

4 多次元メンバシップ関数の同定

データの分類を目的としているのではなく予測モデルを構築する目的でAFCRを実行するとき、前件部で使用する変数についてよく分離されること、そして特に回帰モデルの変数に関しては回帰モデルの誤差を小さくすることに寄与すればよいことが考えられる。従って、第2項で使用する距離を考慮する変数を前件部変数とみなしクラスタリングを実行するアプローチが本稿の新たな提案である。

クラスタリング情報を利用して次のような多次元メンバシップ関数を求める。

$$\mu(\boldsymbol{x}) = Exp\{-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{v}_i)^t (S_i)^{-1} (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{v}_i)\} \qquad (12)$$

ただし、$\boldsymbol{v}_i$は第iクラスタのファジィ重心でS_iは第iクラスタのファジィ分散共分散行列である。このようなメンバシップ関数の同定は田中のアプローチ[7]により決定できるが、ファジィモデルの精度を向上するためにはチューニングが避けられない。多次元メンバシップ関数のチューニングパラメータは、メンバシップ関数の広がりを考慮して、分散共分散行列の対角要素にチューニングパラメータを設定する。

5 おわりに

適応型ファジィクラスタリングの結果のひとつである分割行列を用いて多次元メンバシップ関数を同定するファジィクラスタリングの発展形を提案した。なお、式(5)を緩和してメンバシップ関数を同定する手法Possibilistic c-means (PCM) [8]について試みたが、初期設定の難しさ等の問題点が発見され、直接利用することが困難であった。

今後の課題は、よりよいチューニングパラメータの設定と、更に後件部変数、前件部変数選択問題を同時に解決することがある。

参考文献

[1] T. Takagi and M. Sugeno: Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol.15, No.1, pp.116-132, 1985.

[2] Y. Nakamori and M. Ryoke: Identification of Fuzzy Prediction Models through Hyperellipsoidal Clustering. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol.24, No.8, pp.1153-1173, 1994.

[3] R.J. Hathaway and J.C. Bezdek: Switching Regression Models and Fuzzy Clustering. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.1, No.3, pp.195-204, 1993.

[4] M. Ryoke, Y. Nakamori and K. Suzuki: Adaptive Fuzzy Clustering and Fuzzy Prediction Models. Proc. FUZZ-IEEE/IFES'95, Vol.4, pp.2215-2220, 1995.

[5] D.W. Hosmer, Jr.: Maximum Likelihood Estimates of the Parameters of a Mixture of Two Regression Lines. Communications in Statistics, Vol.3, No.10, pp.995-1005, 1974.

[6] R.N. Dave: An Adaptive Fuzzy c-Elliptotype Clustering Algorithm. Proc. NAFIPS 90: Quarter Century of Fuzziness, Vol.I, pp.9-12, 1990.

[7] H. Tanaka: Possibility Multivariate Analysis. Proc. FUZZ-IEEE/IFES'95, Vol.4, pp.2083-2088, 1995.

[8] R. Krishnapuram and J. M. Keller: A Possibilistic Approach to Clustering. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.1, No.2, pp.98-110, 1993.

連絡先:
〒560 豊中市待兼山町1-1
大阪大学大学院 基礎工学研究科 領家美奈
Tel: 06-850-6375
Email: ryoke@tamlab.sys.es.osaka-u.ac.jp

WE4-2

ファジィ線形計画法における感度解析

Sensitivity analysis in fuzzy linear programming

渡辺則生* 杉江浩之* 今泉忠**
Norio Watanabe Hiroyuki Sugie Tadashi Imaizumi
*中央大学理工学部
Chuo University
**多摩大学経営情報学部
Tama Institute of Management and Information Sciences

Abstract - A method of sensitivity analysis in a flexible programming problem is proposed by a parametric approach. In this method,the fuzzy goal is expressed by some parametric function and varied. A simplified solving method is discussed and displaed by a numerical example.

1 はじめに

LP 問題にファジィ不等号を取り入れたフレキシブル計画法では、もともと目的関数であったものに目標値を与え制約化している。つまりフレキシブル計画法においてはファジィ目標とファジィ制約の間に差が無くなっている (対称形)。しかし、目的関数は本来、制約式によって構成される凸制約領域 (実行可能解) から解を一つに決めるためのものなので、単純に制約式として扱うのには疑問が残る。そこで本稿では、ファジィ目標のメンバシップ関数をパラメータを用いて表すことにより、制約化する際のパラメータの値が最適解 (最大グレード) にどのような影響を及ぼすかについて解析する方法について考察する。

2 定式化

フレキシブル計画問題

$$\text{(P1)} \quad \begin{array}{ll} \widetilde{\text{maximize}} & \boldsymbol{c}\boldsymbol{x} \\ \text{subject to} & \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \lesssim \boldsymbol{b} \\ & \boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{o} \end{array}$$

が与えられているとする。ただし、ファジィ目標はあるパラメータθの関数であるメンバシップ関数$\mu_g(x;\theta)$によって制約化されているものとする。このとき、各θに対し、通常のフレキシブル計画法の解法によりグレードの最適値$\lambda_{\max}(\theta)$が得られる。適当な$\mu_g(\theta)$を用いれば、θの関数$\lambda_{\max}(\theta)$によって目標の制約化が最適解に及ぼす影響を調べることができる。

3 数値例

数値例として次の問題を示す。

$$\begin{array}{lll} \widetilde{\text{maximize}} & 7x_1 + 9x_2 & (1) \\ \text{subject to} & 2x_1 + 3x_2 \lesssim 900 & (2) \\ & 6x_1 + 4x_2 \lesssim 1800 & (3) \\ & -60x_1 - 45x_2 \lesssim -17000 & (4) \\ & x_j \geq 0 \quad j = 1,2 & (5) \end{array}$$

ファジィ制約 (式 (2)～(4)) に対しては次のような線形メンバシップ関数を用いる。

$$\mu(a_i x) = \begin{cases} 1 & ; a_i x \leq b_i \\ 1 - \frac{a_i x - b_i}{w_i} & ; b_i \leq a_i x \leq b_i + w_i \\ 0 & ; a_i x \geq b_i + w_i \end{cases}$$

ただしパラメータ (b_i, w_i) は式 (2), (3), (4) の順に (900,100), (1800,100), (-17000,2000) とする。一方、ファジィ目標のメンバシップ関数は次のようなものとする。ただし、b^*は$\mu_g(b^*) = 0.5$

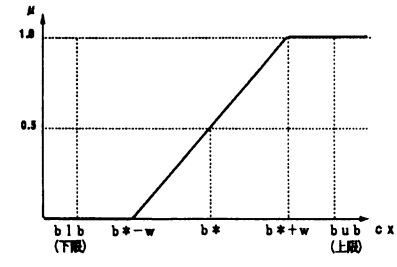


図 1: ファジィ目標のメンバシップ関数

となる点で、$b_{lb} \leq b^* \leq b_{ub}$である。また、上限値 ($b_{ub} = 3000$)・

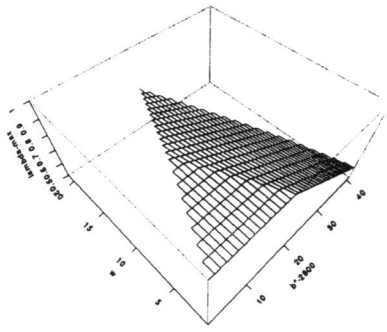


図 2: 3次元図

下限値 ($b_{lb} = 2800$) はまえもって与えておく。パラメータ$\theta = (b^*, w)$ の変化によって、$cx \geq b_{lb}$と$cx \geq b_{ub}$の間を連続的に変化させることになる。$(x, y, z) = (b^*, w, \lambda_{\max})$ としたときの3次元図を図2に示す。このような図によって解の安定性についての考察が行なえる。

4 解析方法

以下では、数値例に用いた形式のμ_gおよび線形なファジィ制約のメンバシップ関数を考える。パラメータ (b^*, w) の関数 $\lambda(b^*, w)$ の解析は一般には困難であるので、いくつかの w を選んでそれぞれを固定して考えるのが実際的であろう。wを固定した場合には、直接LP問題を解かずに制約化の影響を調べることができる。

フレキシブル計画問題を通常のLP問題に変換した際、パラメータ b^*の影響を受けるのはファジィ目標を表す制約式の右辺定数のみであり、シンプレックス乗数・最適性規準は変化しない。ここで、b^*がb_1^*からb_2^*に変化したとする。$b^* = b_1^*$における最適基底解を$\boldsymbol{x}_B = (x_1, x_2, \cdots, x_m)$、最適解を$\lambda = \lambda_1^*$とすれば、問題になるのは$b^* = b_2^* \geq b_1^*$において

$$\boldsymbol{x}_B^* = \boldsymbol{x}_B + \boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{\Delta b} \tag{6}$$

が非負条件を満たしているかである。ここで$\boldsymbol{B}$は最適基底行列であり$\boldsymbol{\Delta b}$はLP問題における各制約式の右辺定数の変化量を要素とする列ベクトルである。$\boldsymbol{x}_B^* \geq \boldsymbol{o}$であれば$\boldsymbol{x}_B^*$が最適基底解となり、あらたな最適解$\lambda_2^*$は次式で表せる。

$$\lambda_2^* = \lambda_1^* + \Delta\lambda = \boldsymbol{\pi}\boldsymbol{\Delta b} \tag{7}$$

ただし、$\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{c}_B\boldsymbol{B}^{-1}$である。一方、$\boldsymbol{x}_B^* \not\geq \boldsymbol{o}$であれば基底変数の入れ換えが行なわれる。

基底変数が代らなければ最適値の変化量$\Delta\lambda$は、$x_m = \lambda, \boldsymbol{B}^{-1} = [b]_{ij}$とすれば(7)式より

$$\Delta\lambda = (0, 0, \cdots, 1)\boldsymbol{B}^{-1}(\Delta b, 0, \cdots, 0)^T$$

$$= b_{m1}\Delta b = b_{m1}\frac{b_1^* - b_2^*}{2w}$$

となる。最適基底変数が入れ換わった場合も同様にパラメータb^*の変化分に比例する。

数値例において $(b^*, w) = (2810, 10)$ における最適解は$\lambda_{\max} = 1.0$、スラック変数を含めた最適基底変数は$\boldsymbol{x}_B = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_6)$ である。パラメータ wを固定したままでb^*を動かすと(6)式より

$$\boldsymbol{x}_B^* = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 189.23 + 3.077\Delta b \\ 166.15 - 4.615\Delta b \\ 1.00 + 2.482 \times 10^{-17}\Delta b \\ 0.23 + 0.0769\Delta b \\ 0.92 - 0.0115\Delta b \end{pmatrix}$$

となり、$\Delta b \leq 0$ であるので$\Delta b \approx -3.0$ において x_4が基底から出て x_8が基底に入ることになる。このとき $b^* = 2870$ である。$b^* > 2870$ の場合は

$$\boldsymbol{x}_B^* = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_6 \\ x_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 180.0 + 0.652\Delta b \\ 180.0 - 2.581\Delta b \\ 1.00 + 0.064\Delta b \\ 0.95 - 0.103\Delta b \\ 2.16 \times 10^{-7} - 0.065\Delta b \end{pmatrix}$$

となる。$b^* \leq 3000$ なので基底変数の入れ換えは起こらない。また最適値の変化量の b^*に対する比例係数は

$$\Delta\lambda = \begin{cases} -1.242 \times 10^{-18} & ;2800 \leq b^* \leq 2870 \\ -0.00323 & ;2870 < b^* \leq 3000 \end{cases}$$

となる。

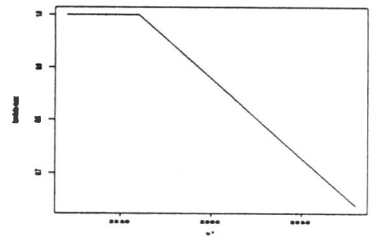


図 3: $b^*, \lambda_{\max}$プロット図

図3を見ると $2800 \leq b^* \leq 2870$ では$\lambda_{\max} \approx 1.0$ であるのに対し $2870 < b^* \leq 3000$ では完全には満足されていない制約式があり、その度合がb^*に比例していることが分かる。

このような操作をいくつかのパラメータ wについて行なえば図2と同様な解析結果を得ることができる。従って、本稿での方法は十分に実用的であると考えられる。

連絡先：〒112 東京都文京区春日 1 - 13 - 27
中央大学 理工学部 管理工学科
渡辺 則生
TEL : 03 - 3817 - 1949
FAX : 03 - 3817 - 1943

WE4-3

モデルフリーな適応的線形化法の最適レギュレータでの比較

A Comparative Study of Model Free Neuro-Fuzzy Linearization Method by Using Optimal Regulator

○三好哲也　市橋秀友
Tetsuya MIYOSHI and Hidetomo ICHIHASHI
大阪府立大学工学部
College of Engineering, University of Osaka Prefecture

Abstract : In this paper, we report computer simulation results of a model free method to linearize nonlinear systems. We design a linear controller by using a optimal regulator for a linear system and compare the performance of the proposed method with conventional one by using Taylor expansion.

1. はじめに

非線形システムに対する制御系の設計手法として非線形システムの状態方程式を平衡点まわりでテイラー展開することによって線形化する方法が一般に用いられている．また幾何学的アプローチと呼ばれる方法で座標変換と非線形フィードバックを用いて厳密に線形化を行う手法 [1, 2, 3] も提案されている．しかし，厳密な線形化法では対象の数学モデルが必要である．制御しようとする非線形システムの数学モデルが未知の場合，このような，解析的な線形化手法を用いることはできない．

我々は，制御対象の数学モデルが未知な場合に対して RBF (Radial Basis Function) ネットワーク [4] を用いる適応的線形化手法を提案した [5]．本研究では，テイラー展開によるモデルに基づく線形化法とモデルフリーな線形化法に対して，最適レギュレータを設計し制御結果の比較を行う．

2. 非線形システムの近似的線形化

状態ベクトルを，$\theta = (\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n)^T$，制御入力を$\delta$（スカラー）として，1 入力の非線形システムを，次の非線形状態方程式で表す．

$$\dot{\theta} = f_1(\theta) + f_2(\theta) f_3(\delta) \tag{1}$$

f_1，f_2 は微分可能な n 次元縦ベクトル値関数である．この非線形システムを厳密に線形化するための必要十分条件 [2] や具体的な座標変換とフィードバックの求め方が非線形システム理論（幾何学的アプローチ）により得られている [3]．線形化された状態方程式は

$$\frac{dx}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u \tag{2}$$

と表され可制御である．ただし，x は n 次元の状態ベクトル，u はスカラーの入力である．

本研究では，図 1 のように三輪車両がある直線（軸）に追従するような制御を考える．図 1 において，各パラメータはそれぞれψ：車体の角度，(η, ζ)：車両の位置，δ：前輪の操舵角，l：車体の長さとする．

三輪車両の状態方程式は未知であるが，(1) 式のように表されると仮定し，非線形システムの状態量を$\theta = (\psi, \eta)^T$とする．線形化されたシステムの状態方程式を (2) 式とし，非線形システムから線形システムへの座標変換を

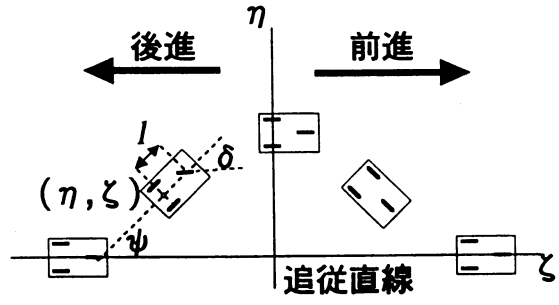


図 1 三輪車両

$$x = (x_1, x_2)^T \approx (g_1(\theta), g_2(\theta))^T \tag{3}$$

とする．また非線形システムの制御量である前輪の操舵角と線形システムの入力の間の関係を

$$u = g_3(\theta, \delta) \tag{4}$$

$$\delta = g_4(\theta, u) \tag{5}$$

とする．ただし，$g_m, (m = 1, 2, 3, 4)$ は RBF ネットワークであり，

$$g_m(z_1, z_2) = \sum_{k=1}^{K} \mu_k^m(z_1, z_2) w_k^m \tag{6}$$

$$\mu_k^m(z_1, z_2) = \exp\left(-\frac{(z_1 - a_{k1}^m)^2}{b_{k1}^m} - \frac{(z_2 - a_{k2}^m)^2}{b_{k2}^m} \right) \tag{7}$$

とする．u と δ の関係は全単射であるとし，(4)，(5) 式における θ は簡単のために ψ のみを採用する．g_m による線形システムへの座標変換は厳密な線形化ではなく，近似的な (ソフトな) 線形化である．この線形化の近似度合を表す評価関数を

$$E_1 = \sum \|\dot{g} - y\|^2 + k_1 \sum H(\varepsilon - \frac{\partial u}{\partial \delta})(\varepsilon - \frac{\partial u}{\partial \delta})^2 + k_2 \|x\|^2_{\theta=0} \tag{8}$$

とする．ただし，Hは単位ステップ関数であり，εは小さな正数である．Σは状態量 (ψ, η) と入力δの変域内において等間隔に選ばれた学習用データ点についての和をとる．$\dot{g_m}$は

$$\dot{g_m} = \frac{\partial g_m}{\partial \psi}\frac{d\psi}{dt} + \frac{\partial g_m}{\partial \eta}\frac{d\eta}{dt} \quad (m = 1, 2) \tag{9}$$

として求めることができる．三輪車両の状態方程式は未知であり，$d\psi/dt$，$d\eta/dt$ は車両を動かして計測されるものとする．(8) 式を最小とする各ＲＢＦネットワークの未知パラメータを最急降下

法により求める．非線形システムの入力を算出するための評価関数を

$$E_2 = \sum \{\delta - g_4(\psi, u)\}^2 \tag{10}$$

とする．(10) 式おけるΣは学習用データ点の和とする．この場合に使用するデータ点は，δに関しては定義域を，uについてはその変域を均等分割した値である．

3. 最適レギュレータの設計

三輪車両の状態方程式を前節の近似的線形化法を用いて線形化した線形システムの状態方程式は，

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$x = (x_1, x_2)^T \tag{11}$$

となる．この線形システムに対して

$$J = \int_0^x (x^T Q x + r u^2) dt \tag{12}$$

を評価関数とする最適レギュレータを設計する．ただし，Qは対角要素をq_1，q_2とする正値対称行列，rは正の定数とする．この評価関数における2次形式$x^T Q x$およびru^2は，それぞれ原点からの一種の距離を表しており，Q，rによる重み付きトレードオフ関係となっている．評価関数Jの最小化は，Q，rに対するトレードオフ関係を考慮して，入力量および状態量を所用の時間間隔内で最適にすることを意味する．この最適レギュレータ問題の解は

$$u(t) = -\frac{1}{r} B^T P x(t) \tag{13}$$

という状態フィードバックの形式で求められる．ここで行列Pは行列リカッチ方程式の対称な正定解である．行列リカッチ方程式を解くことによって最適なフィードバックゲイン$C = -1/rB^T P$が定まり，$u = Cx(t)$というフィードバックによって最適レギュレータシステムが構成される．

4. シミュレーション結果

提案のモデルフリーな適応的線形化法とモデルが既知である場合の原点まわりでのテイラー展開による線形化法に対してそれぞれ最適レギュレータを設計し，シミュレーションを行った結果を図2および図3に示す．テイラー展開を用いた場合は，q_1が大きくなるとq_2をどのように変化させても直線に追従させることはできない．提案のモデルフリーな線形化法では，q_1が大きい場合でもq_2を調整すれば直線追従することができた．このことからモデルが未知な場合でも，モデルに基づく制御と同程度以上の制御が可能であるといえる．

4. おわりに

本研究では，RBFネットワークによる近似的線形化手法を提案し，線形化された線形システムに対して最適レギュレータを設計し三輪車両の直線追従制御に適用した．また対象システムのテイラー展開による線形化手法との比較を行い，モデルに基づく制御と比べて同程度以上の制御が可能であることをシミュレーションにより示した．提案手法はモデルが未知で厳密な線形化が困難な場合に有効であると考えられる．

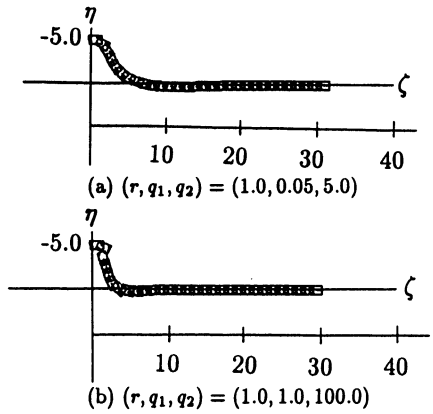


図 2 モデルフリーな線形化による制御結果

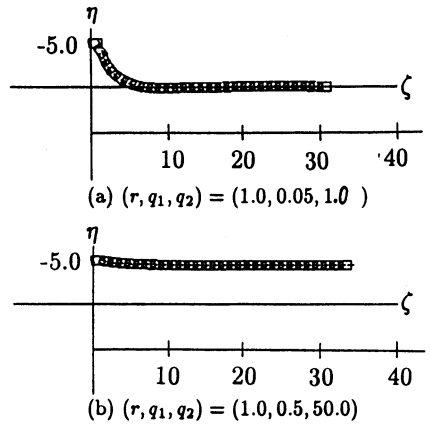


図 3 テイラー展開を用いた線形化による制御結果

参考文献

[1] M.Sampei,T.Tamura,T.Itoh and M.Nakamichi, "Path Tracking Control of Trailer-Like Mobile Robot", Proc. of IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (Osaka),pp.193-198(1991)

[2] R.Su, "On the Linear Equivalents of Nonlinear Systems", "Systems and Control Letters," Vol.2, No.1, pp.48-52(1982)

[3] 三平満司,"非線形システムの線形化", 機械設計, Vol.35, No.8, pp.80-85(1991)

[4] J.Moody and C.J.Darken, "Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Uints", Neural Computation, Vol.1, No.2, pp.281-294(1989)

[5] 市橋秀友，三好哲也，長坂一徳，"ニューロ・ファジィ線形化による非線形システムの安定化　一移動ロボットの軌道追従制御への応用一"，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.147-150(1994)

［問い合わせ先］

〒593　大阪府堺市学園町1－1

大阪府立大学工学部経営工学科

市橋 秀友

TEL：0722-52-1161

FAX：0722-59-3340

WE5-1

製品の主観評価に対するファジィモデリング

Fuzzy Modeling for Products Subjective Evaluation

南谷 峰子* 佐藤 和明* 林 浩之* 中森 義輝*
Mineko Nantani Kazuaki Satoh Hiroyuki Hayashi Yoshiteru Nakamori

野村 淳二** 今村 佳世** 長町 三生***
Junji Nomura Kayo Imamura Mitsuo Nagamachi

*甲南大学 **松下電工 ***広島大学
Konan University Matsushita Electric Works, Ltd. Hiroshima University

Abstract – This paper reports some techniques for "kansei" data processing in order to design system-kitchens with the aid of the technology of virtual reality. The existing methods in "kansei engineering" can be used to identify the interrelations between "kansei" words, and the relations between "kansei" words and the design elements. There are, however, limitations to process "kansei" words satisfactorily by the statistical methods only, because human "kansei" is vague, qualitative, and nonlinear. This paper first expalins these points, and then proposes some ideas of treating human "kansei" using the fuzzy sets theory.

1 はじめに

バーチャルリアリティを利用したシステムキッチン設計支援のための感性データ処理法と支援システムの開発について報告する。提案されている感性工学手法 [1] とアンケート調査データを用いれば，感性表現間の関係と，感性表現とデザイン要素との関係を抽出できる。しかし，因子分析や数量化理論などの統計手法のみでは，人間の曖昧で質的な感性データを巧みに扱うことは困難である。本稿では，これらの諸点を整理するとともに，感性データ処理に関するファジィ理論からのアプローチについて考察する。

2 感性工学手法と研究課題

感性工学とは，「人間の感性やイメージを物理的なデザイン要素に翻訳して，感性に合った商品を設計するテクノロジーである」[1] と定義されている。その一般的手順は以下の通りである [2]。

1. 感性表現の収集: 感性工学を適用する対象商品を決定する。その対象に関係があると思われる感性表現（主として形容詞）を，それに携わる専門家の話や関連雑誌などから収集する。それらを意味の重複する感性表現を除くなどの整理を行い，「かわいい－かわいくない」のような対語にまとめる。このとき，対になる感性表現が価値観に関連する形容詞の場合，反対語でなく否定語にしておく。つまり，純粋のＳＤ尺度 [3] を構成するわけではない。

2. 意味空間の把握: 多くの評定者を集め，対象商品のサンプルのスライドを見せながら，各感性表現を５段階あるいは７段階のＳＤ尺度で評価してもらう。このアンケートの結果を因子分析にかけて意味空間を把握し，感性表現を因子ごとに分類し，その中から代表感性表現を選定する。

3. デザイン要素の抽出: 対象商品をデザイン要素別にアイテム・カテゴリーに分ける。そして，それらを網羅するスライドを代表感性表現の数以上に作り，そのスライドを用いて代表感性表現のＳＤ尺度で評価する。次に，そのアンケートの結果を外的基準を代表感性表現とし，数量化理論１類にかける。その結果として出てきた重相関係数，偏相関係数，カテゴリースコアを知識ベースにインプリメントする。

4. 推論と結果のグラフィック化: 知識ベースと推論エンジンによって，顧客の感性によって選ばれた商品をモニターに表示する。

感性表現間の関係を抽出する従来の方法は，因子分析による分類と距離の同定である。これにより，代表感性表現を選定し，それらとデザイン要素との関係を抽出する数量化理論のステップに移る。その結果を用いて感性表現からデザイン要素の組み合わせを対応させるルールベースを構築する。その他の一般感性表現は代表感性表現との距離に応じてルールを準用する。ただし，感性表現間の距離の同定と，感性表現とデザイン要素間の関係の同定に対しては数学的アプローチの限界がある。

感性表現間距離の同定においては，感性表現に対応するデータマトリックス（標本×評定者）を評定者について平均したデータベクトル間の相関係数を用いるのが１つの考え方である。この方法では，標本によるデータの散布情報を平均値に集約することによる情報のロスがあり，また，感性表現に対する個人による意識のズレを取り扱えない。ファジィ数で記述されるデータの収集と，その解析法が研究テーマである。

これらの問題点を解決するために，以下のような研究開発を実施している。

1. 感性データの収集法と定量化法に関する研究
2. 感性表現の距離空間構成法に関する研究
3. 感性表現とデザイン要素との対応関係同定法に関する研究
4. 以上の研究成果をシステム化した感性情報処理システムの開発
5. 設計知識ベースと感性知識ベースを有した設計支援システムの開発

本稿では，主として上記 2 及び 3 について考察を行う。

表 1: 因子分析による感性表現の分類結果

第一因子	さわやかな	明るいイメージ
（明るさ）	浮き浮きした感じ	開放的な感じ
	華やかな雰囲気	親しみやすい
	居心地良さそう	ゆったりしている
	団らん的	にぎやかな感じ
	使いやすそう	社交的
	ナチュラルな	暖かみがある
	自然な	
第二因子	派手な雰囲気	変化に富んでいる
（個性的）	特色がある	個性的
	斬新な感じ	
	複雑な（シンプルな）	
	ごちゃごちゃしている（すっきりしている）	
	華やいだ感じ（落ちついた感じ）	
第三因子	シティ派	都会的
（都会的）	モダン調（アンティーク調）	
第四因子	高級感がある	格調がある
（豪華）	品がある	豪華そう
	渋い	しゃれてる
	洗練されている（素朴な）	

3 感性データの収集と分類

分析に用いた感性データは以下のように収集したものである。77 人の評定者（大学生）に対して，40 枚のシステムキッチンのスライドを見せ，33 個の感性表現対に対してＳＤ尺度により評定してもらった。同時に，デザイン要素推論の際に利用するために，嗜好に関する調査と，生活スタイルに関する調査を行ったが，現時点では有効利用するに至っていない。

本研究の最終的な目的は，顧客の感性表現から顧客の希望するデザイン要素の組み合わせを推測することである。その際，代表的な感性表現をいくつか選定し，それらとデザイン要素の組み合わせとを結びつける。そのため，感性表現間の距離の同定とグルーピングを行わねばならない。従来から因子分析結果が利用されているが，評定者の感性のバラツキをうまく考慮できない。

3.1 因子分析による分類

表 1 は因子分析により意味空間の把握を試みたものである。なお，データは評定者に関して平均したものを用いている。ところでアンケート調査においては，感性表現対を積極的な意味から消極的な意味へ向かって値が小さくなるように 7 段階による評価を依頼している。また，絶対的無意味を原点とし，対極性を持つように努めている。

3.2 ファジィクラスタリングによる分類

因子空間における感性表現間の距離，特に代表感性表現と一般の感性表現との距離を同定しておくことは，デザイン要素推論の段階で重要となる。ここでは，ファジィクラスタリング [4] によりこれらを明らかにすることを試みる。評定者に対して平均したデータを用い，クラスタ数を 5 ～ 10，べき指数を 1.1, 1.2, 1.3, 1.5 及び 2.0 の場合について実験を行った。表 2 はクラスタ数 10，べき指数 2.0 の場合の結果であり，直感的にうなずける結果であろう。

表 2: ファジィクラスタリングによる感性表現の分類結果

明るいイメージ	さわやかな	浮き浮きした感じ
華やかな雰囲気	派手な雰囲気	
居心地良さそう	使いやすそう	暖かみがある
親しみやすい		
団らん的	ゆったりしている	にぎやかな感じ
社交的	開放的な感じ	
すっきりしている	落ちついた感じ	シンプルな
個性的	斬新な感じ	特色がある
変化に富んでいる		
ナチュラルな	自然な	アンティーク調
素朴な		
シティ派	都会的	
豪華そう	高級感がある	格調がある
渋い	しゃれてる	品がある

ところで，他の感性表現対と相関が大きくない対，例えば

かわいい － 渋い
華やいだ感じ － 落ちついた感じ
洗練されている － 素朴な

は，べき指数が小さい場合，所属するグループが不安定であることがわかった。一方，べき指数の変化に対して比較的安定して同様のグループに属する対は以下のようであった。

都会的 － 田舎風
シティ派 － カントリー派
個性的 － 一般的
斬新な感じ － ありふれた感じ
特色がある － 平凡な
変化に富んでいる － 型にはまっている

これらは推論ルール構築の際，利用すべき情報である。

なお，評定者について平均しない場合も同様の結果を得ている。また，評定者の感性のバラツキを考慮する目的で，ファジィデータのファジィクラスタリング [5] を試みたが，ファジィデータの定義を工夫しないとうまく分類できない。

3.3 代表感性表現によるカバーリング

クラスタリングでは，クラスタの数と代表感性表現の選定を主観的に決定しなければならない。そこで，それらをある基準の下で数学的に決定するカバーリング手法を検討する。感性表現間の距離は，評定者に関して平均する場合としない場合の各々について，データベクトル間の相関をとるもの，あるいはユークリッド距離をとるものなどが考えられるが，ここでは評定者の意識の分布を考慮する意味で次を用いる。

$$d_{ij} = \max \|y_{ip} - y_{jq}\|$$

$i, j \in \{1, 2, \cdots, n\}$ は感性表現を表す添字，$p, q \in \{1, 2, \cdots, m\}$ は評定者を表す添字であり，y_{ip}, y_{jq} はサンプル数の次元を有する評定ベクトルである。

代表感性表現の選定にあたって，感性表現間の関係をグラフ $G = (V, E_\alpha)$ で表現する。グラフ $G = (V, E_\alpha)$ において，頂点集合 $V = \{1, 2, \ldots, n\}$ は感性表現を表し，枝集合

$$E_\alpha = \{(i, j) \mid i, j \in V; d_{ij} \geq \alpha\}$$

は感性表現間の 2 項関係を表す。

表 3: 代表感性表現とカバーリングの例

代表感性表現	被覆される感性表現	
華やかな雰囲気	明るいイメージ	にぎやかな感じ
	ナチュラルな	居心地良さそう
	社交的	さわやかな
	浮き浮きした感じ	暖かみがある
	開放的な感じ	親しみやすい
開放的な感じ	団らん的	ゆったりしている
	にぎやかな感じ	ナチュラルな
	居心地良さそう	社交的
	浮き浮きした感じ	華やかな雰囲気
	暖かみがある	親しみやすい
ナチュラルな	居心地良さそう	自然な
	社交的	浮き浮きした感じ
	華やかな雰囲気	アンティーク調
	使いやすそう	暖かみがある
	開放的な感じ	親しみやすい
シンプルな	すっきりしている	
変化に富んでいる	斬新な感じ	豪華そう
	特色がある	派手な雰囲気
特色がある	個性的	斬新な感じ
	変化に富んでいる	
シティ派	都会的	
格調がある	豪華そう	アンティーク調
	高級感がある	しゃれてる
	品がある	
落ちついた感じ	渋い	
素朴な		

以下の隣接行列 $A = (a_{ij})$，整数変数集合 $\{x_i\}$ を導入する。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (i,j) \in E_\alpha \\ 0, & (i,j) \notin E_\alpha \end{cases} \qquad x_i = \begin{cases} 1, & i \in D \\ 0, & i \notin D \end{cases}$$

ただし，D は代表感性表現の集合であり，次の整数計画問題を解くことにより求める。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{j \in V} c_j x_j$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j \in V} a_{ij} x_j \geq 1, \qquad \forall i \in V$$

ここで，c_j は各感性表現に対する重みとして，r（サンプル数）次元ユークリッド空間 R^r での各感性表現に対する m 人の評定者が与えたデータを覆う最小の超楕円体の体積を用いている。これは，できるだけ感性のバラツキが小さい感性表現を選定しようという意図からである。

まず，各感性表現の評定値集合を全て包むような距離を用いて分析を行った結果，代表感性表現が他の感性表現をカバーしすぎてしまうため，納得のいく結果が得られなかった。そこで，代表点（平均）による分析を行い，納得のいく結果を得た。表 3 は $\alpha = 4.5$ の場合の代表感性表現とカバーリング結果である。代表感性表現の右の欄に示された感性表現が代表感性表現にカバーされる感性表現である。なお，それらの間の距離は表示していない。今後の課題として，各感性表現の評定値のバラツキを考慮した距離の同定方法の開発が必要となる。

表 4: 選択された希望デザイン要素の例

アイテム	カテゴリー
ユニット扉の色	パステル
カウンタートップ	白い
窓の数	1個
照明	シーリング
レイアウト	ペニンシュラ，1型
テラス扉	ない
壁の色	目立つ色，または　ベージュ
カウンターテーブル	ある
壁の素材	タイル
窓の大きさ	小
取っ手の色	同色
スタイル	セミオープン，またはオープン
床	フローリング以外
台所の広さ	狭い
ハッチ	ない
対面	オープン
ガラス扉	ある

4 感性表現とデザイン要素の関係

代表感性表現とデザイン要素との対応関係の同定は設計支援におけるメインテーマである。従来は数量化理論が用いられているが，筆者らは，評価や嗜好のダイナミックスあるいは曖昧さなどを取り扱うべく，ファジィ理論を応用してモデル化することを試みている。

4.1 数量化理論 1 類による関係の同定

図 1 は開発しているシステムによる数量化理論 1 類の適用結果例である。デザイン要素の推論においては，ある感性表現に対してアイテムごとに，カテゴリーウェイトの最も大きいカテゴリーを選択する。例えば，「明るいイメージ」という感性表現にマッチするデザイン要素の組み合わせの候補は表 4 のように選ばれる。

このようなデザイン要素の推定には問題がないわけではない。すなわち，評価の高いサンプルでも，デザイン要素を 1 つ変更するだけで台無しになることもあれば，逆に，1 つのデザイン要素の変更で見違えるようになるなど，評価は不連続である。

数量化理論 1 類の結果を何らかの方法でルールベース化し，デザイン要素推論に用いることについては，ファジィ制御のような内挿が必ずしも適切ではないことから，現在は，データ収集に用いたサンプルをいくつか提示するようなシステムとしている。従って，新たな感性データが追加され，それを利用しようとする場合，分析を最初からやり直すという不便な状態にある。

4.2 ファジィ理論からのアプローチ

バーチャルリアリティ技術を援用する設計支援システムにおいては，顧客の希望するであろうデザインを初期状態として提示し，部分的に変更を加え，最終的に満足するデザインを得ることが原理的に可能である。そういった現場でのデータを収集することにより，実験で用いたサンプルにおけるデザイン要素の組み合わせ以外のものについて，それらの感性表現による評価データを得ることができる。ここでは，そういう将来の学習機能を備えた支援システムの基礎を与えるために，ファジィ 2 部グラフを導入する。

評定データを $x_{ijk} \in \{1,2,\cdots,L\}$ とする。$i \in \{1,2,\cdots,I\}$ はサンプル，$j \in \{1,2,\cdots,J\}$ は感性表現，$k \in \{1,2,\cdots,K\}$ は評定者を表す添字である。各サンプルはアイテム $r \in \{1,2,\cdots,R\}$，カテゴリー $c_r \in \{1,2,\cdots,C_r\}$ で表現されるデザイン要素に分解できるものとする。次の記号を導入する。

$$d_{ir} \in \{1,2,\cdots,C_r\}, \quad i = 1,2,\cdots,I$$

$$d_i = (d_{i1}, d_{i2}, \cdots, d_{iR}), \quad d_i \neq d_j,\ i,j \in \{1,2\cdots,I\}$$

サンプル i に対する感性表現 j による評定の平均を以下のように定義する。

$$e_{ij} = \frac{1}{KL}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk}, \quad 0 < e_{ij} \leq 1$$

アンケート調査によるファジィ2部グラフは以下のように構成される。

$$G = (D \cup V, E),\ D = \{d_1, d_2, \cdots, d_I\},\ V = \{1,2,\cdots,J\}$$

ここに，E は $D \times V$ 上のファジィ集合で，メンバシップ関数

$$\mu_E : D \times V \ \rightarrow\ [0,1]$$

は e_{ij} の値を用いる。

さて，課題はバーチャルリアリティ技術を援用して，可能なデザイン要素の組み合わせについてのファジィ2部グラフ

$$\bar{G} = (X \cup V, \bar{E}), X = \{\dot{d_1}, d_2, \cdots, d_I\}, \bar{I} = C_1 \times C_2 \times \cdots \times C_R$$

を求めることである。だだし，すべての組み合わせについて求めることは容易ではなく，その必要もない。そこで，対応の特徴をいくつか抽出し，適切な規模のファジィモデルを構成することが必要である。

5 おわりに

感性表現とデザイン要素との関係についての従来のモデルは，多数のデザイン要素から個々の感性表現への線形写像である。その際，デザイン要素間の相互効果は加法的であると仮定される。相互効果を取り扱える，あるいは少なくとも表現できる手法を用いなければ，有効なモデルあるいはルールは構築できない。また同時に，デザイン要素の組み合わせによる製品の満足度を取り扱うために，ファジィ測度の使用を考えるべきであろう。ただし，カテゴリーデータを扱う以上，前節で述べたように，内挿を行うことは危険である。ここでも新たな発想を必要とする。ファジィ理論を用いて感性をどこまで表現できるか，あるいは，どのレベルでバーチャルリアリティ技術との共同作業を実現するかの見極めが今後の課題である。

参考文献

[1] 長町三生: 感性工学. 海文堂, 1989.

[2] 長町三生: 感性工学とその手法. 経営システム, Vol.1, No.2, pp.97-105, 1992.

[3] 岩下豊彦: SD法によるイメージの測定. 川島書店, 1983.

[4] J. C. Bezdek: Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum Press, New York, 1981.

[5] M. Sato and Y. Sato: Fuzzy Clustering Model for Fuzzy Data. Proc. 4th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp.2123-2128, Yokohama, Japan, March 20-24, 1995.

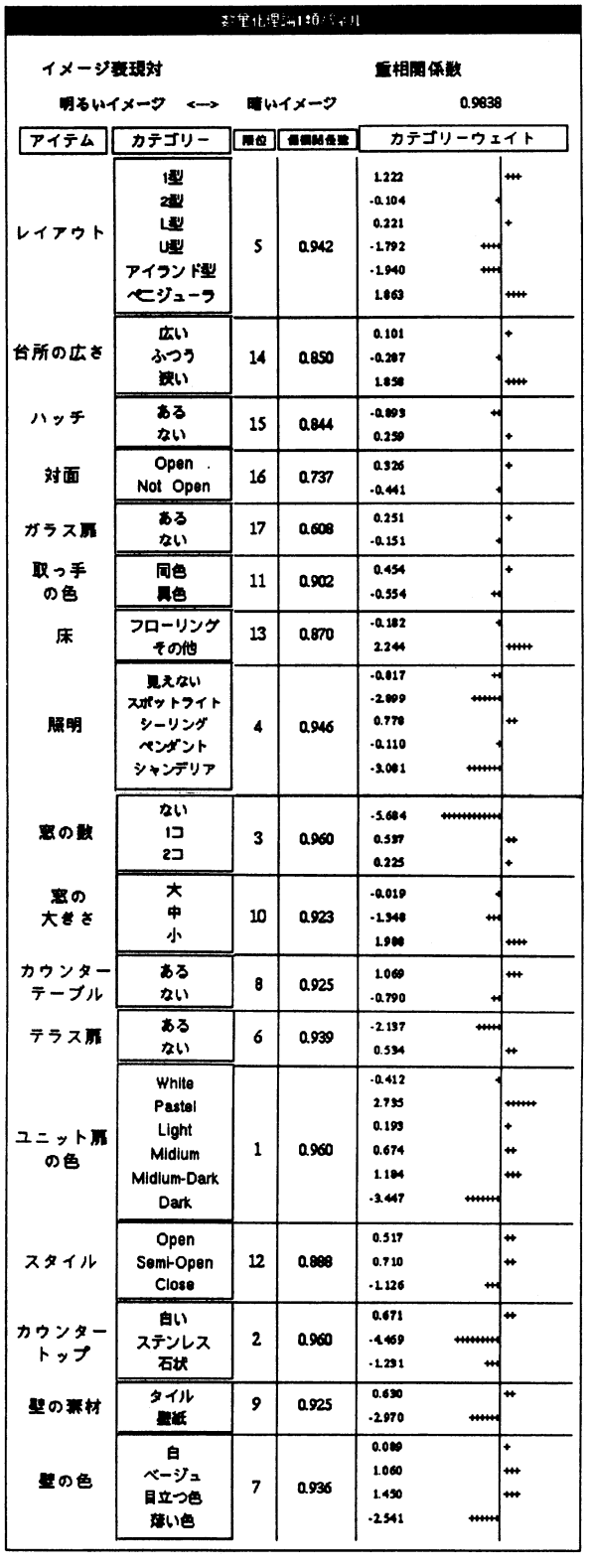


図1: 数量化理論1類による分析結果

連絡先: 〒658 神戸市 東灘区 岡本 8-9-1
甲南大学 理学部 応用数学科 南谷 峰子
Tel. 078-435-2533 Fax. 078-452-5507

WE5-2

ファジィ構造モデルを用いた快適な公園の分析について

Analysis of Amenity Park by Fuzzy Structural Modeling

河野大輔　　椎塚久雄
Daisuke Kono　　Hisao Shiizuka

工学院大学
Kogakuin University

Abstract　In order to analyze the city amenity, we proposed CFSM(Causal relation Fuzzy structural modeling). The city amenity is analyzed with form of the fuzzy structural model. In this parper, we propose a new method for more exact analysis of the fuzzy structural model. We make the fuzzy structural model of amenity park and compare with the results of new method and old one.

１．まえがき

これまで，ファジィ構造モデルを用いて都市アメニティを分析するためにＣＦＳＭ法を提案し，ＣＦＳＭ構造モデルより快適な都市を分析する方法を提案してきた[1][2]．ＣＦＳＭ構造モデルは，ある問題を解決することに関係している多くの問題との因果関係をモデル化したもので，そのモデルからある問題を解決すると，他のどのような問題が発生し，また解決されるのかが分析可能である．さらに，最終的な問題に対する関係の数などから，各問題の重要度を大まかに分析することが可能である．

本稿では，さらに詳しい分析を行うために各要素項目の重要度を具体的な数値として計算する簡単な方法をする．そして「公園・広場の快適性」についてのアンケートをとり，構造モデルを作成し，従来の分析方法の結果との比較を行う．

２．ＣＦＳＭ構造モデルによる分析

従来の方法による評価項目の重要度の分析方法は，おおよそ次のようにまとめることができる．

(1) しきい値Ｐの値を大きくしたときにでも，目的の項目に関係が残っている項目は重要度が大きい．
(2) 間接的な関係よりも直接的な関係によって関係している項目の方が重要度が大きい．
(3) 目的の項目に対し，より多くの関係をもつ方が重要度が大きい．

以上のことから重要度の計算方法は次のように考えられる．まず(1)より，しきい値Ｐの値を大きくしたときに残る関係ほど重み（関係の重要度）を大きくする．次に(2)より間接的な関係における重みの合成は，間接的な関係に含まれるどの関係の重みよりも大きくなってはいけないといえる．そして(3)より，複数の関係の合成における重みの合成は，どの関係の重みよりも大きくなければならないといえる．これらのことから関係の重みの和と積の計算について次の二通りの方法が考えられる．

(1) 単純に加算，乗算を用いる方法．
(2) 関係の計算と同様に論理和，論理積を用いる方法．

３．モデルの関係に重みをつける方法

モデルの関係（矢線）に付ける重みの値として考えられるものには次のようなものがある．

(1) ファジィ従属行列での値
(2) 修正行列の値
(3) レギュラー行（列）を消去するときの行列の値

しかしこの中で，完成したモデルでの要素の関係を表したものは(3)であるので，関係の重みは(3)の値とすることにする．

４．「公園・広場の快適性」の構造モデル

次に「公園・広場の快適性」に関するアンケートをとり，各々の構造モデルを作成し，計算した結果について述べる．

4.1 アンケートの方法

まずこのアンケートでは，５つの公園に対して，表１に示す「公園・広場の快適性」に関する13個の項目に対する評価点を付けてもらう．

表１「公園・広場の快適性」に関する13個の項目

「落ちつき」	「広々としたスペース」
「清潔感」	「照明装置の工夫」
「公園全体の芸術性」	「遊技施設の数」
「周囲の環境」	「オブジェ等の数」
「自然とのふれあい」	「ベンチの数」
「年齢層広い対応」	「樹木の数」
「子供が遊べる」	

またアンケートにより「公園・広場の快適性」と，この13個の項目に対するファジィ従属行列を作成し，構造モデルを作成する．そしてまず従来のように，しきい値Ｐの値を変化させたときの構造モデルの形の変化からこの人の理想の公園を分析する．次に，構造モデルから各項目の重要度を計算し，各公園の評価点を計算しその人の理想の公園を計算する．ただしこの計算は，Ｐの値を変化させた

数個の構造モデルに対し行う．そして最後に，５つの公園の写真からどの公園が最も理想であるか答えてもらい分析した結果と比較する．このアンケートを本大学の学生50人に対して行った．

4.2 対象となる５つの公園について

対象となる公園はいずれも本大学から近いところにあり，学生にもよく知られている公園である．公園１は一般的で個性の無い普通の公園で，公園２，公園３は都会的な公園，公園４，公園５は自然に囲まれ少し個性的な公園である．

公園１（新宿区立大久保公園）・・・・・背の高い木が公園内に立っているため，広々としたスペースはない．ブランコや砂場などの遊技施設も少しある．周囲はホテルやゲームセンターであまり良いイメージはない．全体的に，普通の公園である．

公園２（三井ビル５５広場）・・・・・新宿三井ビルの前にあり，ハンバーガーショップやパン屋があり，食事をするための広場である．広場には白い丸テーブルと椅子がありまわりには木が立っている．そして，季節により木がライトアップされることもある．特に変わったオブジェはないが，人工的な滝があり水が流れている．

公園３（ふれあいモール）・・・・・新宿都庁第一庁舎と第二庁舎の間にある広場で，噴水と様々な形をしたオブジェがある．まわりには花壇がありつつじなどの背の低い植物が植えられている．花壇はライトで照らされており，また夜になると周囲のビルのライトが非常に美しい．

公園４（新宿中央公園内ちびっこ広場）・・・・・３ｍ以上の背の高い木によって囲まれおり，中央には子供が遊べる広いスペースがある．また，少し変わった大きな遊技施設がいくつかある．全体的に，自然に囲まれた広い公園という印象を受ける．

公園５（新宿中央公園内ジャブジャブ池）・・・・・中央に人工の広い池があるが，夏以外は水が無い．池の底やまわりの地面はアスファルトで，水の無い池を利用してスケボーで遊ぶ子供が多い．まわりには背の高い木が多く生えているが，アスファルトと落書きのために，自然に囲まれているという印象が少し薄い．

4.3 従来の分析方法による結果

従来の方法によって分析可能な範囲は，都会的な公園を望んでいるのか，それとも自然に囲まれた公園を望んでいるのかというところまでで，公園２と公園３，公園４と公園５の判別はたいへん困難であった．

また，アンケートの対象となった学生は，ファジィ構造モデルについて何も知らないということもあり，分析不能となることが多かった．特にどうすれば快適になるかという質問に対し，自分の主観だけで答えて欲しかったのが，一般的な快適性を考えたために，構造モデルでは自然に囲まれた公園が快適であるという結果が出たが，本人は都会的な公園が快適であるという答えをした学生が多かった．

4.4 計算による分析結果

計算による分析では，しきい値Ｐをいくつか変化させ数個の構造モデルを作成し，それぞれの構造モデルからどの公園が理想の公園かを計算し，最も多くあげられた公園を分析結果とした．また，強連結集合などにより形がきたない構造モデルから得られた結果より，形のきれいな構造モデルから得られた結果の方がより有効であるとした．

4.5 結果の比較

構造モデルによる分析結果と計算による分析結果を表２に示す．

表２からわかるように，構造モデルにより分析可能なものはすべて計算からも分析可能であり，構造モデルにより分析不能なものは計算でもすべて分析不能という結果になっている．しかし，構造モデルでは都会派か自然派かしか分析できなかったものでも，この計算を用いることでおおかた分析可能になっている．

表２　結果の比較（人）

計算＼モデル	選択された公園と一致	都会派か自然派かが分析可能	分析不能	合計
選択された公園と一致	7	24	0	31
都会派か自然派かが分析可能	0	6	0	6
分析不能	0	0	13	13
合計	7	30	13	50

５．むすび

本稿では，ＣＦＳＭ構造モデルをさらに詳しく分析するための，簡単な計算方法を提案し，「公園・広場の快適性」の構造モデルについて結果の比較を行った．その結果から，この計算方法を用いることで，従来の分析方法より詳しい分析が可能であることがわかる．

今後の課題としては，パラメータλの値が結果にどのように関係するのか考察必要があろう．

参考文献

[1] 河野大輔・椎塚久雄：“因果関係によるファジィ構造モデルの構築法”，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.259-262，(1994年6月)．

[2] 椎塚久雄・河野大輔：“因果関係に基づいたファジィ構造モデルによる都市アメニティ評価について”，システム制御情報学会，(1994年6月)

連絡先

〒163-91　東京都新宿区西新宿１－24－２
工学院大学電子工学科　椎塚研究室
河野　大輔
TEL 03-3342-1211 EXT 2649
(shiizuka@sin.cc.kogakuin.ac.jp)

WE5-3

ファジィGMDHを用いたたて糸糊付工程のファジィモデリング
Fuzzy Modeing of Warp Sizing using Fuzzy GMDH

松下聖一 黒宮明 山岡充昌 高木久弥 古橋武 内川嘉樹
Seiichi Matsushita Akira Kuromiya Michimasa Yamaoka Kyuya Takagi Takeshi Furuhashi Yoshiki Uchikawa

名古屋市工業研究所
Nagoya Municipal Industrial Research Institute

名古屋大学
Nagoya University

Abstract - Fuzzy modeling is a method to describe the characteristics of coomplex systems using fuzzy inference. The method has a distinguishing feature in that it can express complex nonlinear systems linguistically. However in the case where the systems has multi-inputs, the acquired fuzzy rules through some sorts of learning are hard to understand. The authors have proposed a new fuzy GMDH. The new fuzzy modeling method, having the features of the hierarchical fuzzy modeling mehtod, expands the exploratory space for fuzzy models. This proposed method allows multiple submodels in a lager and increases the possibility to obtain appropriate fuzzy division of input space.

This paper presents an application of the proposed fuzzy GMDH to fuzzy modeling of warp sizing machines. The obtained fuzzy models were sufficiently precise, and the acquired rules were easy to comprehend.

1 はじめに

たて(経)糸糊付工程は織布時に生じる張力、摩擦に充分耐えるように糊で糸を補強する準備工程で、高品質で効率の良い織布を行うために不可欠である。しかし、たて糸糊付工程には数多くの設定項目がある[3]。使用する原糸の素材・番手(太さ)、織布工程で使用する織機の種類・速度、作成する織物の組織、コストなどの前提条件を考慮の上、適切な設定を行うには、熟練や経験が必要であった。適切な設定により糊付された糸の強度、伸度等の物性値は織布に必要かつ充分な値にすることができる。熟練者は勘と経験により糊付機の設定と物性値との関係を把握しており、それによって適切な設定を導き出しているが、経験のない素材や新しい状況下では試行錯誤を繰り返す必要があった。また、経験の浅い作業者が教育を受ける場合にも、勘や経験に基づく各設定項目と物性値との相関関係を学ぶことは難しかった。

従来、多変数間の相関関係を知るために回帰分析、ファジィモデリング等様々な手法が提案されている。中でもファジィモデリングは非線形システムのモデルを精度良く同定でき、かつルールが言語で表わされるため定性的で理解しやすい[2]。ファジィニューラルネットワーク(FNN)[3]はファジィルールの同定やメンバシップ関数の調整をニューラルネットワークの学習機能により自動化しており、ファジィモデリングに有効である[4]。そこで、筆者らはファジィニューラルネットワークを用いて、たて糸糊付工程のファジィモデリングを行ってきた[5]。得られたファジィモデルは、十分な精度を持ち、熟練者が持つ経験則を良く表わすものであった。また、熟練者が明確には意識していなかったルールもルール表から読み取ることが可能であった。しかし、文献[5]で用いたファジィモデリングの手法では、入出力データの全くないファジィ部分領域を作ってしまい、必ずしも十分なファジィモデリングができなかった。

筆者らはこのような問題をファジィルールの階層化により解決する階層化ファジィモデリングの手法を提案してきた[6]。さらに、階層化ファジィモデリングを発展させたファジィGMDHを提案してきた[7]。多くのモデルの可能性を探ることのできる新しいファジィGMDHは、得られたファジィモデルの意味を言語的に把握できる点に特徴がある。

本稿では、ルールが明示化され、しかも、多くのモデルの可能性を探ることのできる新しいファジィGMDHを用いて、たて糸糊付工程のファジィモデリングを行う。糊付機の設定値と糊付けの結果である糊付糸の物性値等との相関関係を明らかにするファジィモデリングを行うことにより、たて糸糊付工程の運転支援システムの構築に役立てることができる。本稿で提案したファジィGMDHを用いることにより、精度が良く汎化性に優れたモデルを得ることができ、また、得られたルールは把握のしやすいものであった。

2 ファジィGMDH[7]

本稿ではファジィモデルの作成にあたってファジィニューラルネットワーク(FNN)のtype I [3]を使用する。本FNNはファジィ推論に用いるメンバシップ関数のパラメータおよび後件部定数をニューラルネットワークの結合荷重に対応づけ、BP法による学習で調整・同定する。用いたメンバシップ関数は学習データの入力値の［最小値、最大値］を台集合とした。学習開始時には後件部定数を全て0とした。学習は同定用データを一通り提示した後に結合荷重を更新し、これを1回と数える。収束判定はあらかじめ設定した回数または出力誤差の2乗和の変化量によって行う。

ファジィGMDHによるファジィモデルの構成手順は以下の通りである。

①入出力データを統計的性質が異ならないようにA群、B群に分割する。A群のデータより得られたモデルをモデ

ルA、B群のデータのものをモデルBと呼ぶ。

②変数増加法[4]により評価規範Cの最も良いモデルを選択する。このモデルをモデル1-1とし、その出力推定値を$y^{1\text{-}1^*}$とする。モデルh-kと表現した時、hは層番号を表わし、kは同じ層内のモデル番号を表わす。評価規範C[4]は次式で表わされる。

$$C=\sqrt{\sum_{i=1}^{n_A}\left(y_i^A-y_i^{AA}\right)^2+\sum_{i=1}^{n_B}\left(y_i^B-y_i^{BB}\right)^2}+\sqrt{\sum_{i=1}^{n_A}\left(y_i^{AB}-y_i^{AA}\right)^2+\sum_{i=1}^{n_B}\left(y_i^{BA}-y_i^{BB}\right)^2}\quad\cdots(1)$$

ここで、n_A、n_BはA群・B群のデータ数、y_i^A、y_i^BはA群・B群の出力データ、y_i^{AA}、y_i^{BA}はモデルAにそれぞれA群・B群データを使用した場合の出力推定値、y_i^{AB}、y_i^{BB}はモデルBにそれぞれA群・B群データを使用した場合の出力推定値である。(1)式は第1項がモデルA・Bの精度を表わし、第2項は汎化性を表わしている。

③モデルh-1で用いられなかった入力変数が2個以上あった場合、この未使用の入力変数だけを用いて、変数増加法により評価規範Cの最も良いモデルを選択する。これをモデルh-2とする。さらに残った入力変数を用いて、評価規範の最も良いモデルh-3を求め、未使用入力変数が1つ以下になるまでモデルを順次作成する。ここで、モデルh-1は基本モデルとして以下の計算に必ず用い、モデルh-2以降の出力は次層の入力変数の1つとして扱う。

④前件部構造を決定した後に、A群のデータを同定用、B群のデータを評価用としてモデルh-1, h-2, h-3, …の詳細学習を行う。

⑤モデルh-1の出力を入力変数の1つとし、これとモデルh-2, h-3, …の出力、およびモデルh-1で使われていない入力変数を用いて、変数増加法により、評価規範Cの最も良いものを選択する。これをモデル(h+1)-1とする。モデルh-1とモデル(h+1)-1の評価規範を比較し、後者の方が良ければhを1つ増加した後、③の手順に戻り、そうでなければモデリングを終了する。なお、次層以後のモデリングに際して、一旦同定が終了した層のモデルを再学習することはあえてしない。これは計算量の増大を防ぐとともに、各層のモデルの出力の意味が異なってしまい、ファジィルールが不明確になることを防ぐためである。

3 シミュレーション

本ファジィGMDHのアルゴリズムを用いて、たて糸糊付機のファジィモデリングを行った。表1にモデリングに用いた入出力データを示す。入力変数として、糊付機の設定値の中でも経験的に重要であると考えられている、濃度・粘度・絞圧・速度を与え、出力として着糊量（糊付糸の糊の重量と全重量との比）、糊付糸の物性値である強度・伸度および毛羽数1、毛羽数3を与えた。ここで毛羽数1は1㎜以上の毛羽数を表し、毛羽数3は3㎜以上の毛羽数を表す。A群・B群のデータとしてそれぞれ48個を、統計的な偏りがないように2分割して与えた。

ステップ②、③の前件部構造探索では、最初前件部のメンバシップ関数を固定して後件部のみの学習を行った後に、この学習によって得られた後件部定数を初期値として前件部・後件部の調整・同定を行い、モデルを得た。FNNを

表1 入出力データ

	No.	濃度	粘度	絞圧	速度	着糊量	強度	伸度	毛羽数1	毛羽数3
A群	1	9.915	31.16	400	40	20.65	317.4	5.05	415	22.3
	3	9.931	33.36	700	40	17.64	320.2	5.17	418	25.9
	6	9.962	32.63	550	55	19.44	332.2	5.14	447	32.1
	8	9.946	32.63	850	55	17.16	329.3	5.23	439	34.3
	10	9.951	34.09	550	70	19.35	324.6	5.16	333	29.6
	12	9.899	34.09	850	70	17.94	333.8	5.10	409	28.0
	13	9.794	32.63	400	85	21.50	325.8	5.27	253	17.5
	15	9.846	33.60	700	85	18.44	330.3	5.13	303	23.3
	18	9.102	25.30	550	40	17.15	314.0	5.25	446	39.8
	20	9.195	25.30	850	40	15.64	298.2	5.23	577	49.0
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	94	7.658	28.96	550	85	14.42	312.3	4.89	411	39.5
	96	7.668	28.96	850	85	13.21	294.0	4.83	598	58.6

	No.	濃度	粘度	絞圧	速度	着糊量	強度	伸度	毛羽数1	毛羽数3
B群	2	9.923	34.09	550	40	18.26	323.1	5.38	538	28.5
	4	9.938	32.63	850	40	17.05	311.5	5.05	436	34.9
	5	9.970	32.63	400	55	20.69	324.9	5.30	289	20.1
	7	9.954	32.63	700	55	17.92	325.4	5.23	449	32.9
	9	9.978	34.09	400	70	20.92	316.5	5.10	372	22.4
	11	9.925	34.09	700	70	18.95	337.0	5.12	390	26.3
	14	9.820	33.12	550	85	20.02	333.4	5.04	265	21.1
	16	9.873	34.09	850	85	18.14	321.5	5.18	265	27.1
	17	9.055	25.30	400	40	18.82	308.3	5.11	457	28.4
	19	9.148	25.30	700	40	16.13	296.4	4.98	540	41.1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	93	7.653	28.96	400	85	16.11	322.7	5.13	364	39.3
	95	7.663	28.96	700	85	13.61	309.4	5.03	386	48.0

表2 モデル1-1の前件部構造同定

step	前件部構造	*Ja*	*Jb*	*UC*	*C*	
1	濃度 [2]	9.65	9.15	1.10	14.39	○
	粘度 [2]	15.40	15.25	1.07	22.74	
	絞圧 [2]	16.68	16.44	0.85	24.27	
	速度 [2]	18.52	18.05	0.42	26.28	
2	濃度 [3]	9.68	9.22	1.26	14.63	
	濃度 [2] 粘度 [2]	9.49	9.18	1.57	14.77	
	濃度 [2] 絞圧 [2]	3.48	3.54	1.93	6.89	◎
	濃度 [2] 速度 [2]	9.58	9.05	1.11	14.30	
3	濃度 [3] 絞圧 [2]	3.69	3.69	2.01	7.23	
	濃度 [2] 絞圧 [2] 粘度 [2]	3.64	3.77	1.68	6.92	
	濃度 [2] 絞圧 [3]	3.57	3.58	1.96	7.02	
	濃度 [2] 絞圧 [2] 速度 [2]	3.26	3.43	2.15	6.89	○

表3 モデル1-2の前件部構造同定

step	前件部構造	*Ja*	*Jb*	*UC*	*C*	
1	粘度 [2] 速度 [2]	15.29	15.13	1.50	23.01	○
2	粘度 [3] 速度 [2]	13.82	13.48	1.70	21.01	◎
	粘度 [2] 速度 [3]	15.23	15.03	4.00	25.39	
3	粘度 [4] 速度 [2]	12.51	12.23	5.16	22.65	○
	粘度 [3] 速度 [3]	13.58	12.70	8.39	26.99	

表4 モデル2-1の前件部構造同定

step	前件部構造	*Ja*	*Jb*	*UC*	*C*	
1	濃・絞 [2] 粘度 [2]	2.57	3.06	1.99	5.99	
	濃・絞 [2] 速度 [2]	2.87	3.16	2.02	6.29	
	濃・絞 [3]	3.46	3.61	2.00	7.00	
	濃・絞 [2] 粘・速 [2]	2.51	2.94	2.06	5.93	◎
2	濃・絞 [3] 粘・速 [2]	3.06	3.81	2.43	7.31	
	濃・絞 [2] 粘・速 [3]	2.64	3.24	1.75	5.93	○

表5 一層のファジィモデルの前件部構造同定

前件部構造	*Ja*	*Jb*	*UC*	*C*
濃度 [3] 粘度 [2] 絞圧 [2] 速度 [2]	2.78	3.00	2.35	6.44

用いたモデル同定についての詳細は文献[6]を参照されたい。

出力が着糊量である場合についてのモデリングを代表例として以下に説明を行う。表2～4に本ファジィＧＭＤＨによる前件部構造同定の過程を示す。表中、前件部構造の欄の濃度[2]は入力変数濃度について入力空間を2つにファジィ分割していることを表わす。○印はそのstepで選択された構造、◎印は最終的に選択された構造を表わす。表2ではstep１で濃度[2]が選択され、変数を追加したstep２では濃度[2],絞圧[2]が選ばれている。さらに変数を取り込んだstep３で濃度[2],絞圧[2],速度[2]が選択されているが、前stepより評価規範Cが改善されていないのでモデル1-1として前件部構造濃度[2],絞圧[2]が最終的に選ばれている。次に表3においてモデル1-1で取り込まれなかった粘度,速度のみを用いてモデル1-2の前件部構造を選択する。その際にはこれらの入力変数のうち、表2のstep1で最も評価規範の良かった粘度に他の変数を組合せてモデルを作成する。ここでは変数を組合せたモデルを得ることを目的としているので、最初のstepでは粘度自身の分割数を増やしたモデルは考慮に入れない。粘度の分割数のみを増やすことに意味があるならば、粘度をそのまま次層のモデルの入力として用いれば良いことになる。その結果モデル1-2として前件部構造粘度[3],速度[2]が得られた。

表4では、モデル1-1の出力濃度・絞圧（濃・絞と略記する。以下同様）に加え、モデル1-1で使われていない粘度,速度およびモデル1-2の出力粘・速を入力変数の候補として、変数増加法により最適な前件部構造を同定する。この時に１つの入力変数が２度使われることのないようにしている。これはルールの把握のしやすさという観点から前件部構造を複雑にしないためである。また、最初のstepにおいて濃・絞の分割数を増やすモデルについてはあえて考慮しない。これは前層の出力である濃・絞のみを分割することはルールの把握を困難にし、また、場合によっては他の変数を取り込まず濃・絞の分割ばかりが進んでしまい、探索の範囲を狭める可能性があるからである。結果として前件部構造濃・絞[2],粘・速[2]が選択された。得られたファジィモデルを図1に示す。

表5にはファジィＧＭＤＨによって取り込まれた入力変数が重要なパラメータであるとあらかじめ分かっているとして、一層のファジィモデルを同定した結果を示す。この時、濃度が経験的に重要であるとして、濃度については入力空間を３分割、他の変数については２分割してモデリングを行った。図2はそのモデルである。

表6にファジィＧＭＤＨと一層のファジィモデリングの結果をそれぞれ示す。同定用データおよび評価用データによる平均相対誤差と評価規範は、いずれもファジィＧＭＤＨの方が一層のファジィモデリングより若干良くなっている。さらに得られたファジィルールはファジィＧＭＤＨでは表7～9に表わされるように計14個となっている。一層のファジィモデリングでは表10のように$3\times2^3=24$個である。表10でルールの後件部定数が異常に小さいものが見られるが、これはこれらのファジィ部分領域にデータがないことによる。ファジィＧＭＤＨを用いることにより、一層のファジィモデリングと同等以上の精度と汎化性を持ち、か

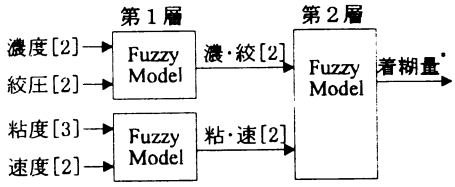


図1　ファジィＧＭＤＨによるファジィモデル（出力が着糊量の場合）

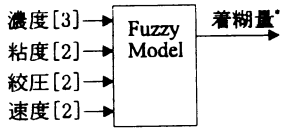


図2　一層のファジィモデル（出力が着糊量の場合）

表6　各手法の比較（出力が着糊量の場合）

		ファジィＧＭＤＨ	一層
平均相対誤差	同定	2.51	2.78
	評価	2.94	3.00
評価規範C		5.93	6.44
ルール数		14	24

表7　モデル1-1のルール表（出力が着糊量の場合）

モデル 1-1		絞圧 Small	絞圧 Big
濃度	S	15.02 [S]	12.38 [S]
	B	23.26 [B]	18.85 [B]

表8　モデル1-2のルール表（出力が着糊量の場合）

モデル 1-2		速度 Small	速度 Big
粘度	S	14.80 [S]	15.19 [S]
	M	17.41 [S]	18.01 [B]
	B	19.74 [B]	20.63 [B]

表9　モデル2-1のルール表（出力が着糊量の場合）

モデル 2-1		濃・絞 Small	濃・絞 Big
粘・速	S	12.55	21.38
	B	11.97	23.04

表10　一層のファジィモデルのルール表（出力が着糊量の場合）

一層のファジィモデル				絞圧 Small 濃度 Small	絞圧 Small 濃度 Medium	絞圧 Small 濃度 Big	絞圧 Big 濃度 Small	絞圧 Big 濃度 Medium	絞圧 Big 濃度 Big
速度	S	粘度	S	15.22	18.38	20.60	12.45	15.29	17.15
			B	0.31	14.35	21.94	0.21	13.12	18.00
	B	粘度	S	15.44	18.44	20.48	13.14	15.61	17.45
			B	0.18	13.28	23.33	0.19	11.80	18.49

表11 ファジィＧＭＤＨによって得られたモデルの展開されたファジィルール（出力が着糊量の場合）

濃度、絞圧	濃・絞	粘度、速度	粘・速	後件部定数
(S,S),(B,S)	S	(S,S),(S,B),(M,S)	S	12.55
		(M,B),(B,S),(B,B)	B	11.97
(S,B),(B,B)	B	(S,S),(S,B),(M,S)	S	21.38
		(M,B),(B,S),(B,B)	B	23.04

つ入力空間の適切な分割によりルール数の少ないモデルを得ることができた。

入力変数が出力に及ぼす影響を直接把握しやすくするために、ファジィGMDHによって得られたファジィルールの展開を行った。表7および表8には各ルールの後件部定数が示されているが、各モデルの後件部定数の最小値と最大値を台集合として2分割した場合のファジィラベルを便宜上付記してある。このラベルを用いることにより、表7～9のルールを表11のルール表に展開することが可能となる。このように中間変数を用いずに直接入力変数と出力の関係を見ることができるので、対象の特性がより把握しやすい。

図3～6に出力が糊付糸の物性値である強度・伸度・毛羽数1・毛羽数3である場合について、それぞれモデリングを行った結果得られた前件部の構造を示す。いずれのモデルも濃度を中心として、他の変数を逐次取り込む形でモデリングが行われた。毛羽数1・毛羽数3では一層の構造となっている。しかし、図示したモデルよりは若干劣るもののとほぼ同程度の評価規範の値を持った階層モデルも得られており、実際に現場で用いる場合はルール数の少ないモデルの方が応用しやすいと期待できる。なお、用いたデータは、その測定方法のため、着糊量に比べて誤差がかなり大きい。そのため、適切な前件部構造が単純な変数増加法によっては、一意に定まりにくいと考えられる。

4 考察

ファジィGMDHは階層化ファジィモデリングの探索の範囲を広げたものとなっており、対象システムをより良く表わすモデルを見つける可能性を増している。もちろん対象システムによっては（例えば文献[6]シミュレーション1）階層化ファジィモデリングで十分良好なモデルが得られる。本ファジィGMDHでは出力に及ぼす影響が類似した入力変数や影響の大きい入力変数をまとめて複数の部分表現として用いているため、全体にルール数が減る傾向にあり、ルールの把握がより容易となっている。

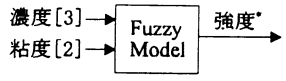


図3 得られたファジィモデルの前件部構造（出力が強度の場合）

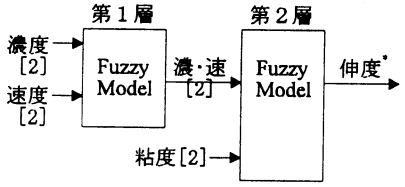


図4 得られたファジィモデルの前件部構造（出力が伸度の場合）

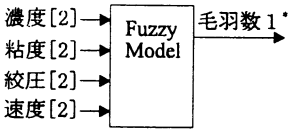


図5 得られたファジィモデルの前件部構造（出力が毛羽数1の場合）

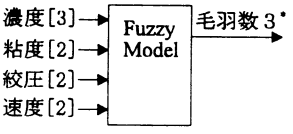


図6 得られたファジィモデルの前件部構造（出力が毛羽数3の場合）

5 まとめ

本報告では階層化ファジィモデリングを一般化した新しいファジィGMDHを用いて、たて糸糊付工程のファジィモデリングを行った。得られたモデルは対象の構造を良く反映したものであった。また、入力空間の適切なファジィ分割により、同定精度や汎化性が一層のファジィモデリングと同等以上でありながら、ルール数の少ないモデルが得られた。さらに本ファジィGMDHはファジィルールを中間変数を用いずに展開することができ、例えば濃度などの入力変数と出力である着糊量との関係がより把握しやすくなった。

参考文献

[1]中部機織サイジング研究会編：製織、No.26,(1992)

[2]管野：ファジィ制御、日刊工業新聞社、1988

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

[4]S.Horikawa,T.Furuhashi,Y.Uchikawa,and T.Tagawa, "A Study on Fuzzy Modeling Using Fuzzy Neural Networks", Proc. of IFES '91, pp562-573, 1991

[5]松下、黒宮、高木、古橋、堀川、内川：ファジィニューラルネットワークによるたて糸糊付工程のファジィモデリング,電気学会論文誌D,114巻10号,pp1012-1017,1994

[6]中山,古橋,内川:階層化ファジィモデリング手法の一提案,日本ファジィ学会誌,Vol.5,No.5,pp.1151-1168,1993

[7]松下、黒宮、山岡、古橋、内川：ファジィGMDHに関する一考察、第10回ファジィシステムシンポジウム,pp383-386,1994

[8]長坂,市橋:ニューロファジィGMDHとその研削加工特性のモデル化への応用,第9回ファジィシステムシンポジウム,pp.449-452,1993

[9]田中,横出,石渕:ファジィIF-THENルールによるGMDH,第9回ファジィシステムシンポジウム,pp.237-240,1993

連絡先 〒456 名古屋市熱田区六番三丁目4-41
名古屋市工業研究所 機械部
松下聖一
TEL 052-654-9885
FAX 052-652-6776

WF3-1

ファジィ推論による電気部品の寿命推定
Life Estimation of Electric Part with Fuzzy Inference

波多野　伸次　　大森　成暁　　村田　忠
Shinji HATANO　Shigeaki OHMORI　Tadashi MURATA

沖縄振興開発金融公庫　TOA（株）　琉球大学工学部
The Okinawa Development Finance Corporation,　TOA Co.,　University of the Ryukyus

Abstract —In this paper, we described a reliability test (accelerated life test) on carbon film resistor as test piece. we made test time short using fuzzy inference and we proposed a life calculating method to take MTTF(Mean Time To Failure) as same as reliability life.

1. 緒　言

新しく開発された電子機器や部品の製品を市場に出す場合,製品の設計寿命は工場で信頼性試験（寿命試験）により確認された後,製品は市場に出荷される。しかし,その製品の設計寿命に比べ,実際の寿命は初期のころ,著しく小さいのが普通である[1]。また実際の使用環境と全く同じ状態を作って試験を行うことは,時間やコストの問題からあまり現実的な考えとはいえない。

本研究では,製品の信頼性試験（寿命試験）を行い,その評価において,ファジィ理論を導入し,より短時間で,実際寿命に近い平均寿命MTTF(Mean Time To Failure)の値が求められるように信頼性（寿命）試験時の寿命計算法を新しく提案する。

2. 寿命の計算式

単純ストレスによる劣化のモデルとして,加速係数のモデルが作られている[2]。電球の寿命やコンデンサ等の寿命は,印加電圧のn乗に反比例するといわれ,次の式で表わされる。

$$L_1=\left(\frac{V_1}{V_0}\right)^{-n}L_0 \tag{1}$$

ここでL_0は定格寿命,L_1は加速寿命,V_0は定格電圧,V_1は加速試験電圧である。

本試験で使用する抵抗器は,1/4Watt型,330Ω,許容誤差±5%の炭素皮膜抵抗器である。定格電圧は次式より,9.08Vになる。

$$P=\frac{V_0^2}{R} \quad \therefore V_0=\sqrt{PR}=\sqrt{\frac{330}{4}}=9.08 \ (V) \tag{2}$$

ここでPは定格電力,Rは抵抗値である。加速試験電圧V_1は27Vとした。これは定格電圧の2.97倍,定格電力の8.84倍となる。定格寿命L_0はアーレスの寿命表より14,500時間とした。Table 1にアーレスの寿命表を示す[2]。

Table 1　Earles's life table

品　目　名	期待寿命($\times 10^6$ h)		
	下限	平均	上限
炭素皮膜抵抗器	0.0135	0.0145	0.0600

本研究では寿命推定において次の式を提案する。

$$MTTF_{(\beta)}=\frac{1}{1+k_0}MTTF_{(\alpha)} \tag{3}$$

ここで$MTTF_{(\beta)}$は試験時間β時間後における平均寿命MTTFを表し,本試験ではβ=45とした。$MTTF_{(\alpha)}$は試験時間α時間後における供試品のMTTFを表す。k_0は修正係数(実測値)である。それぞれのMTTFは式(4)より求める。

$$L=T/r \tag{4}$$

ここで,LはMTTF(寿命),rは累積故障数(個),Tはコンポーネントアワー(総試験時間)(hour)であり,式(5)より求める。

$$T=\sum_{i=1}^{r}t_i+t_r(N-r) \tag{5}$$

ここで,t_iはi番目に故障した供試品の寿命(hour), Nは供試品の総数である。

3. 実験装置等

Fig.1に実験装置の概略図を示す。今回,信頼性(加速)試験で,試供品として1/4Watt型,330Ω,許容誤差±5%の炭素皮膜抵抗器を80個使用した。

4. 実験結果

Fig.2に故障率を示す。Fig.2は故障した抵抗器の数を全数(80個)で割ったものであり,%で算出している。またこの故障率は後述のファジィ推論においてメンバシップ関数の前件部M_3となる。Fig.3に抵抗値の変化率を示す。これは各抵抗値の変化量の平均値を%で算出したものである。またこの故障率は同様に,ファジィ推論においてメンバシップ関数の前件部M_4となる。Fig.4に平均寿命MTTFの結果を示す。これは、式(4),(5)より算出した。

5. ファジィ推論

今回のファジィ推論は二段階に分かれている。第一段階で色A_1,形状A_2,異臭A_3より外観(不具合程度)M_1を推論する。そして第２段階で,外観M_1,電流の制御の悪さM_2,抵抗器の不良率M_3,抵抗値の変化率M_4より,ファジィ推論による修正係数kを推論する。ここで外観M_1は第一段階の推論結果より決定し,抵抗器の不良率M_3はFig2より,抵抗変化量の平均値M_4はFig.3よりそれぞれ決定した。電流制御の悪さM_2は抵抗値5%誤差で0.25とした。Fig.5にメンバシップ関数形状を示す。ファジィ推論法はmin-max-重心法を用いた。Fig.6に修正係数k_0とファジィ推論による修正係数kを示す。Fig.7に推定寿命を示す。Fig.8に加速試験寿命からの誤差を示す。

6. 検　討

式(3)にファジィ推論により求めた修正係数kを代入し,推定寿命を求め

る。抵抗値の許容誤差が5%の場合において,定格寿命と推定寿命はかなりの近似が得られた。しかし試験時間が比較的初期の段階で定格寿命と推定寿命の差が開いているのは,故障数があまりに少ないためMTTFが実際のものとかけ離れ過ぎているためであると考えられる。

7. 結 言

本研究では実際寿命に近い寿命の値が求められるように信頼性（寿命）試験時の寿命計算法を新しく提案し,抵抗器の信頼性試験に適用して次の知見を得た。

(1) 寿命推定にファジィ推論の考えを適用することが可能である。
(2) ファジィ推論において2段階の計算方法を導入することで,ルール作成がより容易になった。
(3) 推論精度を上げるため,メンバシップ関数についてはその形状や合成法等については更なる検討が必要である。

参考文献

(1) 村田忠,小川幸成: 信頼性試験評価へのファジィ理論の応用,第23回日科技連信頼性・保全性シンポジウム,日科技連,pp.109-114,(1993)
(2) 植草源三: 機器・部品の寿命と超加速試験法,日刊工業新聞社(1991)

連絡先：〒903-01 沖縄県中頭郡西原町千原一番地
琉球大学工学部機械システム工学科
村田 忠
TEL: 098-895-2221 EXT 2719
FAX: 098-895-4377

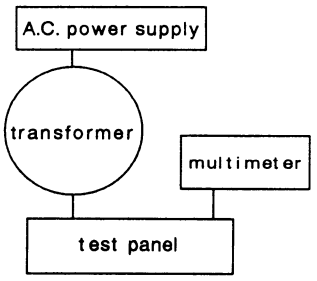


Fig.1 Experimental system

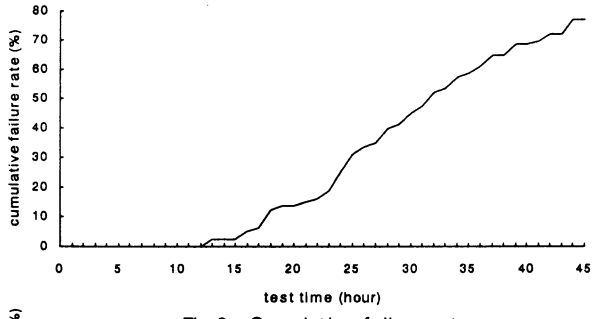


Fig.2 Cumulative failure rate

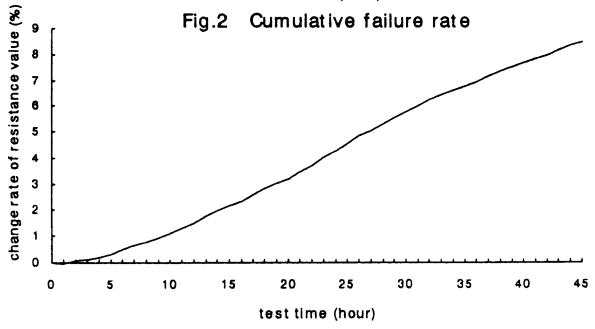


Fig.3 Change rate of resistance value

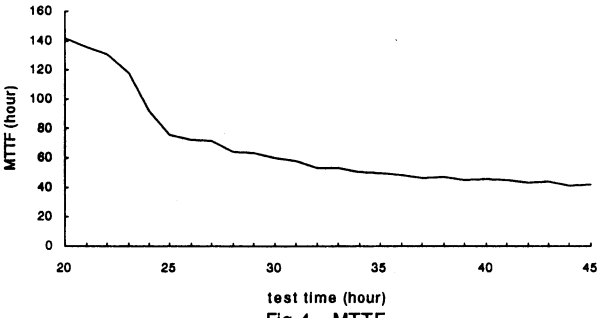


Fig.4 MTTF

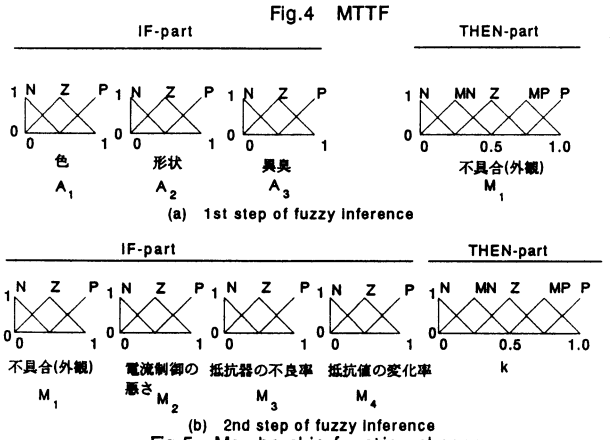


Fig.5 Membership function shapes

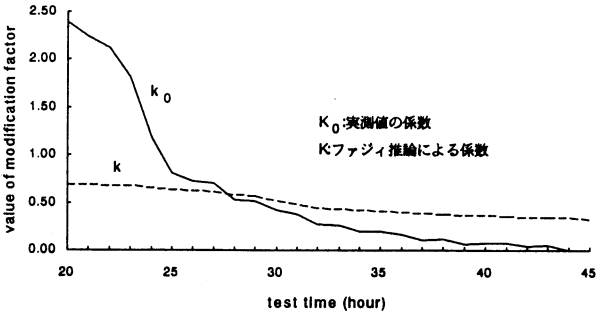


Fig.6 Value of modification factor

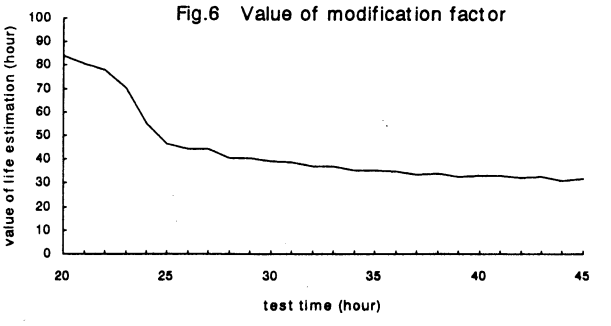


Fig.7 Value of life estimation

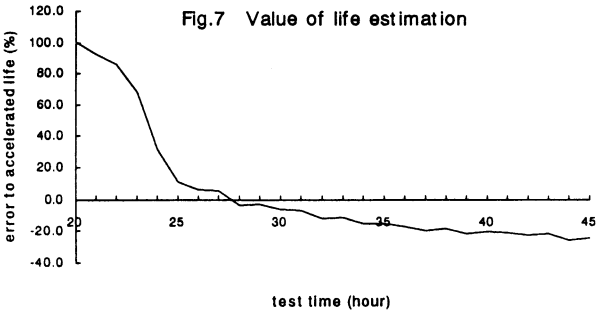


Fig.8 Error to accelerated life

WF3-2

区間データを伴う切換えが不完全なシステム信頼性最適化問題の遺伝的アルゴリズムによる解法

A Method for Interval Optimal Design of System Reliability with Incomplete FDS by Genetic Algorithms

横田 孝雄　玄 光男　李 銀秀
Takao Yokota　Mitsuo Gen　Yinxiu Li

足利工業大学 経営工学科
Dept. of Industrial & Systems Engg., Ashikaga Institute of Technology

Abstract

In this paper, we formulate an optimal design of system reliability problem as a nonlinear integer programming problem with interval coefficients, tansform it into a single objective nonlinear integer programming problem without interval coefficients, and solve it directly with keeping nonlinearity of the objective function by using Genetic Algorithms (GA). Also, we demonstrate the efficiency of this method with incomplete Fault Detecting and Switching (FDS) for allocating redundant units.

Keyword: Nonlinear integer programming, Interval coefficient, Genetic algorithms, Incomplete FDS

1 はじめに

製品の品質保証の面から [1]，従来信頼度を確定値として取り扱ってきたが，品質の精度と同様に，これを信頼区間として評価する必要がある．筆者らは，この観点から線形な制約条件のもとで，非線形な区間目的関数を最大にするような区間データを伴うシステム信頼性設計の最適化問題を改良遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）により解く手法を提案し，その有効性を明らかにした [2]-[4]．本稿では，非線形な制約条件のもとで，非線形な区間信頼度を最大にする，区間データを伴う切換えが不完全なシステム信頼性最適化問題を，区間係数を伴わない単一目的の非線形整数計画問題に変換して，これをＧＡにより解くことで，容易に最良解を求める手法を提案する．また，数値実験により，意思決定者による制約量の選考が信頼区間に及ぼす影響を検討する．

2 区間データを伴うシステム信頼性最適化問題

従来，確定値として与えられていた目的関数や制約条件の各係数，すなわち，信頼度，コスト，重量などは，経済的変動，技術革新，利用環境などを考慮すると区間データとして扱う必要がある．

本研究では，この区間係数を導入することにより，係数のあいまいさを区間によって表したシステム信頼性の最適設計問題を取り扱う．また，この問題は非線形で可分離な区間制約条件のもとで，非線形な区間信頼度関数を最大にする，いわゆる区間係数を伴う非線形整数計画 (NIP-I) 問題として次式のように定式化される．

NIP-I:

$$\max \quad R(\boldsymbol{m}) = \prod_{t=1}^{T} R_t(m_t) \tag{1}$$

$$\text{s. t.} \quad G_i(\boldsymbol{m}) = \sum_{t=1}^{T} A_{it}(m_t) \le B_i, \quad i = 1, \cdots, n \tag{2}$$

$$m_t \ge 0 : \text{integer}, t = 1, \cdots, T$$

$$m_t^L \le m_t \le m_t^U \tag{3}$$

ここで，$R(\boldsymbol{m})$ はシステムの区間信頼度，m_tはサブシステム t の冗長ユニット数，$R_t(m_t)$ はサブシステム t の区間信頼度，m_t^Lおよび m_t^Uはそれぞれ冗長ユニット数の下限値と上限値，Tはサブシステム数，$A_{it}(m_t)$ および B_iはそれぞれシステム t における資源 i の区間技術係数を伴う非線形関数と区間資源量であり，それぞれ $A_{it}(m_t) = [a_{it}(m_t)^L, a_{it}(m_t)^R]$, および $B_i = [b_i{}^L, b_i{}^R]$ である．

3 区間数の四則演算

ここでは，区間数を大文字 $A, B, \ldots$ で表し，また実数を小文字 $a, b, \ldots$ で表す．さらに，区間数 A の左端（下限）を a^L，右端（上限）を a^Rとすると，A は次のように表される（図 1 参照）．

$$A = [a^L, a^R] = \{x | a^L \le x \le a^R\}$$

ここで，a^Cは区間数 A の中心（中央）であり，次式で表される．

$$a^C = (a^L + a^R)/2$$

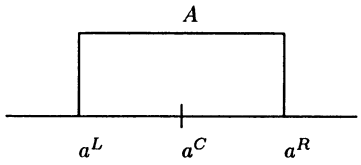


図 1: 区間 A の中心 a^C，左端 a^L と右端 a^U

任意の 2 つの区間数 $A=[a^L,a^R]$, $B=[b^L,b^R]$ に対して，その四則演算を次のように定義する [7].

$$A+B=[a^L+b^L,a^R+b^R] \tag{4}$$

$$A-B=[a^L-b^R,a^R-b^L] \tag{5}$$

$$kA=Ak=\begin{cases}[ka^L,ka^R], & \text{if } k\geq 0\\ [ka^R,ka^L], & \text{if } k<0\end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}A\times B &= [a^Lb^L\wedge a^Lb^R\wedge a^Rb^L\wedge a^Rb^R,\\ &\qquad a^Lb^L\vee a^Lb^R\vee a^Rb^L\vee a^Rb^R]\\ &= [a^Lb^L,a^Rb^R], \quad \text{if } a^L\geq 0,\ b^L\geq 0\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\frac{A}{B} &= [\frac{a^L}{b^L}\wedge\frac{a^L}{b^R}\wedge\frac{a^R}{b^L}\wedge\frac{a^R}{b^R},\ \frac{a^L}{b^L}\vee\frac{a^L}{b^R}\vee\frac{a^R}{b^L}\vee\frac{a^R}{b^R}]\\ &= [\frac{a^L}{b^R},\frac{a^R}{b^L}], \quad \text{if } a^L\geq 0,\ b^L\geq 0\end{aligned} \tag{8}$$

$$A^n=\begin{cases}[1,1], & \text{if } n=0\\ [(a^L)^n,(a^R)^n], & \text{if } a^L\geq 0\\ & \quad \text{or if } a^L\leq 0\leq a^R \text{ and } n \text{ is odd}\\ [(a^R)^n,(a^L)^n], & \text{if } a^R\leq 0\\ [0,\ \max\{(a^L)^n,\ (a^R)^n\}], & \text{if } a^L\leq 0\leq a^R\\ & \quad \text{and } n \text{ is even for } n=0,1,2,\cdots\end{cases} \tag{9}$$

4 単一目的の非線形整数計画問題への変換

区間係数を伴う非線形整数計画問題を直接に解くことは，一般には困難であるので，区間係数を伴わない計画問題に変換する必要がある．

いま，システム信頼度関数 (1) の両辺の対数を取ると，次のようになる．

$$\begin{aligned}Z(\boldsymbol{m}) &= \sum_{t=1}^{T}D_t(m_t)\\ &\equiv \ln R(\boldsymbol{m})\end{aligned} \tag{10}$$

ここで，$D_t(m_t)$ は目的関数の区間係数で，次式で表される．

$$\begin{aligned}D_t(m_t) &= \ln R_t(m_t)\\ &\equiv [d_t(m_t)^L,d_t(m_t)^R]\end{aligned} \tag{11}$$

また，$D_t(m_t)$ の左・右端は次式で表される．

$$d_t(m_t)^L=\ln r_t(m_t)^L \tag{12}$$

$$d_t(m_t)^R=\ln r_t(m_t)^R \tag{13}$$

石渕ら [5],[6] によって提案された区間係数とその実行領域の定義および区間順序関係に従う区間最大化／最小化問題は，区間の中心 $z(\boldsymbol{m})^C$ と右端 $z(\boldsymbol{m})^R$／左端 $z(\boldsymbol{m})^L$ を最大化／最小化する問題に帰着される．また，区間係数を伴う非線形整数計画 (NIP-I) 問題は，区間の不等式の成立つ度合い $h_i(0\leq h_i\leq 1,i=1,\cdots,n)$ を与えると，単調増加な目的関数であることから区間係数を伴わない単一目的の非線形整数計画 (NIP) 問題に変換される．

NIP:

$$\max \quad z(\boldsymbol{m})^C=\sum_{t=1}^{T}\{d_t(m_t)^L+d_t(m_t)^R\}/2 \tag{14}$$

$$\text{s. t.} \quad g_i(\boldsymbol{m})=\sum_{t=1}^{T}a_{it}(m_t)\leq b_i,\ \ i=1,\cdots,n \tag{15}$$

$$m_t\geq 0:\ \text{integer},\ \ t=1,\cdots,T$$

$$m_t^L\leq m_t\leq m_t^R$$

ここで，目的関数や制約条件の各係数は，次のとおりである．

$$a_{it}(m_t) \equiv h_ia_{it}(m_t)^R+(1-h_i)a_{it}(m_t)^L \tag{16}$$

$$b_i \equiv (1-h_i)b_i^R+h_ib_i^L \tag{17}$$

5 遺伝的アルゴリズムによる解法

5.1 遺伝子表現と初期化

ここでは，サブシステム t での冗長ユニット m_t を染色体 V_k (k=1, ···, pop_size) とすると，染色体 V_k を $V_k\equiv\boldsymbol{m}_k=[m_{k1}\cdots m_{kt}\cdots m_{kT}]$ で表現する．ここで，pop_size は集団サイズである．

本稿では，変数の取り得る領域内でランダムに染色体を生成する初期化方法を採用する．

5.2 評価関数

一般に，GAでは染色体の適合度を評価関数により評価するが，ここでは評価関数 $eval(V_k)$ を目的関数 $z(\boldsymbol{m})^C$ で定義する．ただし，システム制約条件を満たさない染色体の評価関数にはペナルティ $-M$ を付加する．

$$eval(V_k)=\begin{cases}z(m)^C, & g_i(m)\leq b_i \quad i=1,\cdots,n\\ -M, & \text{その他}\end{cases}$$

ここで，M は正の大きな数である．

次式により評価関数値が最大な染色体 V^* を求める．

$$V^*=\underset{V_k}{\text{argmax}}\{eval(V_k)\} \tag{18}$$

$$maxeval=\max\{eval(V_k)\} \tag{19}$$

ここで，argmax の arg は argument の省略形である．

5.3 遺伝的操作

5.3.1 交叉

ここでは，二つの染色体（ベクトル）の線形組合せとして定義される算術交叉を用いる [11]．世代 gen で交叉の対象としてランダムに選ばれた二つの染色体を V_j^{gen} と V_l^{gen} とすると，

$$V_j^{gen+1}=\lfloor cV_j^{gen}+(1-c)V_l^{gen}\rfloor$$

$$V_l^{gen+1}=\lfloor cV_l^{gen}+(1-c)V_j^{gen}\rfloor$$

$$j,l\in\{1,2,\cdots,pop\_size\}$$

ここで，$\lfloor x \rfloor$ は実数 x より小さい最大整数値を取る Gauss 記号である．

パラメータ c を次のように定義する．

$$c = \frac{eval(V_k)^{gen}_{\max}}{eval(V_k)^{gen}_{\max} + eval(V_k)^{gen}_{\min}}$$

ここで，$eval(V_k)^{gen}_{\max}$ と $eval(V_k)^{gen}_{\min}$ は，それぞれ世代 gen における染色体 V_k の最大と最小な評価関数値である．

5.3.2 突然変異

ここでの突然変異は，ランダムに選択された染色体 V_k の要素，例えば，m_{kt} を $[m_t^L, m_t^U]$ の範囲内で，ランダムに選んだ整数値と入れ換える．

5.4 アルゴリズム

ＧＡにより切換えが不完全なシステムの信頼性最適化問題を解く手順を以下に示す．

ステップ１：集団サイズ pop_size，交叉確率 p_c，突然変異確率 p_m，最大世代数 $maxgen$ を設定する．世代数 $gen = 0$，初期の評価関数 $maxeval = 0$ とする．

ステップ２：制約条件を満たすような T 個の要素をもつ初期染色体集団 V_k をランダムに作成する．ただし，解候補が制約条件を満足しないときは，実行可能解が存在しないものとして終了する．

ステップ３：$gen = gen + 1$ とおき，各評価関数 $eval(V_k)$ を計算する．

ステップ４：$gen < genmax$ ならば，ステップ４に進む．$gen = genmax$ ならば，$maxeval$ を出力して終了する．

ステップ５：算術交叉，突然変異およびエリート選択を行う．

ステップ６：式 (18) より，集団中の最良値 V^* を求め，そのときの信頼区間，および評価関数値を次式により計算し，それぞれの値を保存し，ステップ３へ戻る．

$$R(\boldsymbol{m}^*) = [r(\boldsymbol{m}^*)^L, r(\boldsymbol{m}^*)^R]$$
$$eval(V^*) = r(\boldsymbol{m}^*)^C = (r(\boldsymbol{m}^*)^L + r(\boldsymbol{m}^*)^R)/2 \quad (20)$$

ここで，下限／上限信頼度は次式で求められる．

$$r(\boldsymbol{m}^*)^L = \exp\{\sum_{t=1}^{T} d_t (m_t^*)^L\} \quad (21)$$

$$r(\boldsymbol{m}^*)^R = \exp\{\sum_{t=1}^{T} d_t (m_t^*)^R\} \quad (22)$$

6 数値例

ここでは，図２のように接続された不完全な FDS をもつシステム，すなわち，M-LSR，S-LSR，SR および M-LSR 型の四つのサブシステムを直列に接続したシステムの信頼度を最大にするような冗長ユニット配分問題を考える．

ここで四つのサブシステムは次のように定義される．

LSR: 負荷状態待機冗長 (Loaded Stanby Redundant) システム

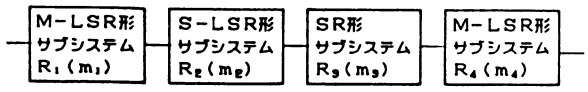


図 2: 直列システム構成図

S-LSR: S タイプで故障する場合の LSR システム
M-LSR: M タイプで故障する場合の LSR システム
SR: FDS が完全な場合のシステム

この例では特別な場合として，次のような非線形な信頼度関数と３種類の非線形なシステム制約をもつシステムで，次式で与えられる．

$$\max \quad R(\boldsymbol{m}) = \prod_{t=1}^{4} R_t(m_t) \quad (23)$$

$$\text{s. t.} \quad G_1(\boldsymbol{m}) = \sum_{t=1}^{4} A_{1t} m_t^2 \le B_1 \quad (24)$$

$$G_2(\boldsymbol{m}) = \sum_{t=1}^{4} A_{2t}(m_t + \exp(\frac{m_t}{4})) \le B_2 \quad (25)$$

$$G_3(\boldsymbol{m}) = \sum_{t=1}^{4} A_{3t}(m_t \times \exp(\frac{m_t}{4})) \le B_3 \quad (26)$$

ここで，$\boldsymbol{m} = [m_1\ m_2\ m_3\ m_4]$ は冗長ユニット数であり，また，各サブシステムの信頼度関数はそれぞれ次式で示される．

$$R_1(m_1) = 1 - Q_1((1-\beta_1)Q_1 + \beta_1)^{m_1 - 1} \quad (27)$$

$$R_2(m_2) = 1 - \frac{\beta_2 Q_2 + P_2 (Q_2)^{m_2}(1-\beta_2)^{m_2}}{P_2 + \beta_2 Q_2} \quad (28)$$

$$R_3(m_3) = 1 - (Q_3)^{m_3} \quad (29)$$

$$R_4(m_4) = 1 - Q_4((1-\beta_4)Q_4 + \beta_4)^{m_4 - 1} \quad (30)$$

ここで，β_t はサブシステム t の切換えスイッチの故障率，P_t と Q_t はサブシステム t の区間信頼度と区間不信頼度を表す．各サブシステムの区間係数は表 1 で与えられている．

表 1: 区間係数表

t	A_{1t} $[a_{1t}^L, a_{1t}^R]$	A_{2t} $[a_{2t}^L, a_{2t}^R]$	A_{3t} $[a_{3t}^L, a_{3t}^R]$	β_t	P_t $[p_t^L, p_t^R]$	Q_t $[q_t^L, q_t^R]$
1	[1, 1]	[5, 9]	[5, 9]	0.2	[0.90, 0.96]	[0.04,0.10]
2	[1, 3]	[5, 9]	[6, 10]	0.06	[0.90, 0.94]	[0.06,0.10]
3	[2, 4]	[4, 6]	[6, 10]	0.0	[0.92, 0.96]	[0.04,0.08]
4	[3, 5]	[5, 9]	[4, 8]	0.3	[0.88, 0.94]	[0.06,0.12]

$B_1 = [80, 120]$, $B_2 = [130, 170]$, $B_3 = [140, 180]$

したがって，この問題は目的関数が単調増加であることから，次のような区間係数を伴わない単一目的の非線形整数計画問題に再定式化される．

$$\max \quad z(\boldsymbol{m})^C = \sum_{t=1}^{4} \{d_t(m_t)^L + d_t(m_t)^R\}/2 \quad (31)$$

$$\text{s. t.} \quad g_1(\boldsymbol{m}) = \sum_{t=1}^{4} a_{1t} {m_t}^2 \le b_1, \quad (32)$$

$$g_2(\boldsymbol{m}) = \sum_{t=1}^{4} a_{2t}(m_t + \exp(\frac{m_t}{4})) \le b_2 \quad (33)$$

$$g_3(\boldsymbol{m}) = \sum_{t=1}^{4} a_{3t}(m_t \times \exp(\frac{m_t}{4})) \le b_3 \quad (34)$$

$$m_t \geq 0: \text{ integer}, \quad t = 1, \cdots, 4$$
$$m_t^L \leq m_t \leq m_t^R$$

式(31)の目的関数の各係数は区間四則演算式(4)-(9)により計算するが，ここでは省略する．また，制約条件の各係数は次のとおりである．

$$a_{it} \equiv h_i {a_{it}}^R + (1 - h_i){a_{it}}^L \tag{35}$$
$$b_i \equiv (1 - h_i)b_i^R + h_i b_i^L \tag{36}$$

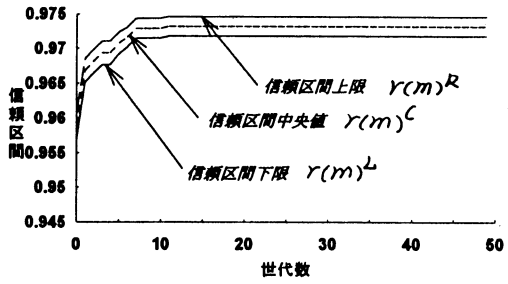


図 3: 評価関数値と信頼区間の収束過程

この数値例に対し，集団サイズを6，交叉確率を0.2，突然変異確率を0.1，最大世代数を50とし，また，区間の不等式の成り立つ度合いをh_1=0.5，h_2=0.5として，提案する手法を適用した結果，従来法[12]による冗長ユニット数と一致する解[3 3 2 3]を得ることができた．このときの評価関数値（中央値），信頼区間の収束過程を図3に示す（施行20回の平均）．

また，表2には従来法とＧＡによる解の比較結果を示す．

表 2: ＧＡと従来法による結果の比較

	ＧＡの結果	従来法の結果
m	[3 3 2 3]	[3 3 2 3]
$r(m^*)^C$	0.973687	0.974565
$R(m^*)$	[0.964263, 0.983112]	—
g_1	75	75
$G_1 = [g_1^L, g_1^R]$	[53, 97]	—
g_2	125.7	125.7
$G_2 = [g_2^L, g_2^R]$	[91.35, 160.05]	—
g_3	159.7	159.7
$G_3 = [g_3^L, g_3^R]$	[115.05, 204.45]	—

この結果から，提案した手法で求められた中央値と，従来の確定値として扱ってきた信頼度との誤差は1%程度であることが明らかとなった．このことは，数値例のような非線形で分離可能な区間制約条件のもとで，各サブシステムの信頼度が単調増加な区間信頼度関数であることを示している．よって，提案する手法は意思決定者（設計者）が区間不等式の成り立つ度合いを選考することで，資源量および信頼区間特性を求めることができ，システム信頼性向上に有効であることが確認された．

7 おわりに

本研究では，非線形な区間制約条件のもとで，非線形な区間目的関数を最大にする切換えスイッチが不完全なシステム信頼性最適化問題を，区間係数を伴わない単一目的の非線形整数計画問題に変換して，これを遺伝的アルゴリズムにより解くことで，容易に最良解を求める手法を提案した．また，数値実験により，意思決定者による制約量の選考が信頼区間に及ぼす影響を検討した．その結果，提案する手法の有効性を確認した．

参考文献

[1] Andrew Kusiak Edited:" *Concurrent Engineering, Automation, Tools and Techniques*", John Wiley & Sons. Inc., 1993.

[2] 横田孝雄，玄 光男，李 銀秀：" ＧＡによる区間係数を伴う０－１非線形計画問題の一解法"，日本経営工学会，平成６年度秋季大会予稿集，pp. 195-196, 1994.

[3] Yokota T., M. Gen, T. Taguchi & Y. X. Li: "A Method for Solving Interval 0-1 Nonlinear Programming Problem using a Genetic Algorithm" *17th Inter. Conf. on Comp. & Indust. Engg.*, March 5-8, Pheonix, USA, 1995.

[4] 玄 光男，横田孝雄：" 区間係数を伴う整数計画問題の遺伝的アルゴリズムによる一解法"，第33回 シンポジウム，「ファジィ数理計画とその応用」，pp. 17-24, 日本 OR 学会, 1995.

[5] 石渕久生，田中英夫:"区間0-1計画問題と製品選択", *J. Oper. Res. Soc. Jap.*, Vol. 32, No.3, pp.352-369, 1989.

[6] 石渕久生，田中英夫："区間係数をもつ線形計画問題の定式化とその解析"，日本経営工学会誌，Vol. 40, No. 5, pp. 320-329, 1989.

[7] Eldon Hansen:"*Global Optimization Using Interval Analysis*", Marcel dekker Inc., 1992.

[8] 中原陽三，佐々木正仁，井田憲一，玄 光男："区間係数を伴う 0-1 線形計画問題の効率的な一解法"，日本経営工学会誌，Vol.42, No.5, pp.345-351, 1991.

[9] 岡田真幸，玄 光男："区間係数を持つ 0-1 線形計画法によるシステム信頼性の最適化"，日本経営工学会誌，Vol.44, No. 4, pp.298-307, 1993.

[10] 中原陽三，玄 光男，井田憲一："区間係数を伴う混合整数計画問題の並列アルゴリズムとそのＵＮＩＸネットワーク上での実現"，日本経営工学会誌，Vol.44, No.2, pp.116-123, 1993.

[11] Michalewicz.Z. : *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 2nd ed. Springer-Verlag, 1994.

[12] 高崎，玄，奥野：" 0-1計画法による切換えが不完全なシステム信頼性の最適化"，電子通信学会論文誌，J60-D, 7, pp.515-523, 1977.

問合せ先：〒326 栃木県足利市大前町 268
足利工業大学　経営工学科
玄　光男
Tel: 0284-62-0605 ext.376
Fax: 0284-64-1071
E-mail: gen@genlab.ashitech.ac.jp

WF3-3

インテリジェントモータ回路の故障診断支援エキスパートシステムの試作
Expertsystems on Failure Diagnosis for Intelligent Motor Circuit

○瀧本　巌　　村田　忠
○Iwao TAKIMOTO　　Tadashi MURATA

琉球大学工学部
Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

Abstract : In this paper, we experimented Expertsystems on failure diagnosis for Intelligent Motor Circuit. In this study, we used Fuzzy Theory and FMEA table which is one of reliability design technique. FMEA table is used in order to collect some technical information. Fuzzy inference with some If-Then rules is used to research a failure part on the Motor's circuit. The failure part with a certainty factor (CF value) could be found through this inference method.

1. 緒　言

近年では，集積回路性能の向上によって制御機器のディジタル化，縮小化が著しく，OA，AV機器などで電子駆動が一般的になってきている。一方，このような半導体回路や電子回路が故障した場合，故障モードから故障箇所を予測し，その故障箇所を含むモジュール（プリント板）を交換するといった修復作業が技術者によって行われている。しかし，その故障しているモジュールはメーカに回収されるにとどまっている。それは故障診断が困難であり，詳細な故障箇所あるいは故障部品が判別できにくいことから，多くの不具合品が修理あるいは処分ができずにいる。

本研究において「エキスパートシステムとは，問題領域の専門家(エキスパート)から獲得された専門知識を用いて推論を行い，専門的に高度な現実の問題を専門家と同等のレベルで解決する知的システム」と定義する[1]。

本研究では，小型インテリジェントモータの電子回路を用いて故障診断を行う。初めに，研究対象となる電子回路における専門家の知識や経験の情報を信頼性工学の手法であるFMEA表に整理する。次いで，意図的に故障させた回路の電圧を用いてシステムのIF-THENルールを作成し，電子回路におけるシステムやサブシステムの故障，及び故障部品や故障原因発見の支援となるエキスパートシステムを構築し，その有用性を確認する。

2. 故障診断支援用エキスパートシステム

2.1 エキスパートシステム

エキスパートシステムは，従来のデータ処理(data processing)から発展してきたもので，人間が行っている情報処理のいくつかの側面をできる限り機械化しようという絶え間ない試みの結果生まれてきたものである[2]。　また，エキスパートシステムは専門家に代わって非専門家の仕事を支援したり，専門家自身の仕事を支援するために活用される。前者は能力を補うことが主な目的であり，後者は生産性や品質を高めることが主な目的である[1]。

この両者は対照的な問題領域を取り扱うが，共通な点はどちらもその問題領域のエキスパートが持つ知識と豊富な経験の獲得を必要とすることである。

2.2 ファジィ理論によるエキスパートシステム

エキスパート技術者が持つ知識と豊富な経験は，言語で表現されることが多く，その技術者のみにしか分からないものもある。そのため，言語表現に含まれる“曖昧さ”を避けることは不可能に近い。ファジィ理論を適用してエキスパートシステムを構築すれば，この問題点が存在しても専門家でないユーザ，あるいは経験の浅い専門家に情報がうまく伝わるものと考える。

今回の研究における大まかな手順は，次の通りである。

①専門家が持つ知識と経験(今回は実験による確認)を収集し，それらをFMEA表により整理する。
②それらの技術情報を基にしたプロダクションルールでのIF-THENルールを作成する。
③そのIF-THENルールを用い，ファジィ推論により故障部位を推論する。
④上記の手順により誘導された推論結果(故障部位)と実際の故障部位とを比較検討する。

3. FMEA表[3]

FMEAとは故障モード影響解析と言われ，システムの設計段階における不備や潜在的な欠点の発見のため，そのシステムを構成する要素（部品）がシステムやサブシステムに与える影響を解析する信頼性工学の手法である。今回の実験におけるFMEA表の一例を表1に示す。

表1　FMEA表(センサ部)

システム：インテリジェントモータ
サブシステム：センサ部

FMEA表
(故障モード影響解析)

日付　平成 7年 4月 8日
作成者　瀧本　巌
承認者

番号	対象品目	機能	故障モード	推定原因	影響		故障検知法	補償手段	故障等級	記事
					サブシステム	システム				
S1 S2	サーミスタ	抵抗値の温度変化による信号出力	断線	劣化	信号出力の不能	モータの回転制御不能	抵抗値の測定		(B) (2)	
S3 S4	抵抗器	温度・抵抗値のリニアライズ	抵抗値の変化(劣化) 断線 短絡	表面の汚れ	誤作動	モータの作動不良	抵抗値の測定 電圧測定		(C) (4)	
S5 S6	抵抗器	ブリッジの構成	抵抗値の変化(劣化) 断線 短絡	表面の汚れ	ブリッジの不平衡	モータの回転制御不能	抵抗値の測定 電圧測定		(C) (4)	
S7	増幅器	信号の増幅	増幅率の減少 増幅率の時間的変動 ノイズの過大	内部回路の劣化 外来ノイズ混入	出力過小	モータ回転せず 回転数上がらず	電圧測定		(B) (2)	

4. 実験回路及び実験方法

実験対象となる電子回路は，環境変化(急激な温度変化)を検知しインテリジェントモータを回転させる。実験模式図を図1に示す。実験方法では，まず時定数の異なる二つのサーミスタを氷水につけ，冷熱が伝わり安定した後，沸騰水に入れる。このとき，二つのサーミスタの反応速度の違いによるアンバランス出力がセンサ部に生じ，その信号が増幅されてモータが回転する。モータが回転している間に，各主要点間の電圧及び構成要素である素子（部品，部位）の電圧を測定する(IF-THENルール作成のための技術情報源)。

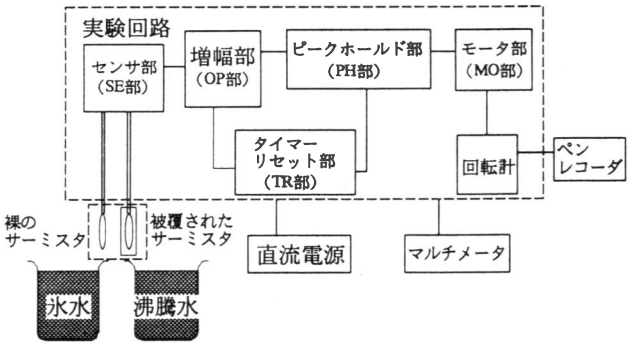


図1　実験模式図

5. ファジィ推論におけるIF-THENルール

実験結果からファジィ推論に用いるIF-THENルールを，実験により得られた電圧値（(1)式に代入して求められたノルマライズ化した電圧）とFMEA表から作成する。作成するIF-THENルールは図2に示すメンバシップ関数で表す。

$$\text{ノルマライズした電圧}=\frac{(\text{故障させた回路における測定電圧})-(\text{正規電圧})}{\text{正規電圧}} \quad \cdots (1)$$

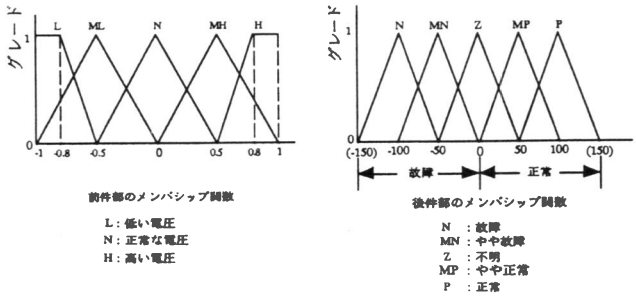


図2　メンバシップ関数

本研究では，ファジィ推論において二段階の推論方法を採用した。まず，第一段階で故障箇所を含むモジュールを推定し，続く第二段階でモジュール内の故障部品を推定する。この推論方法の一例を図3に示す。

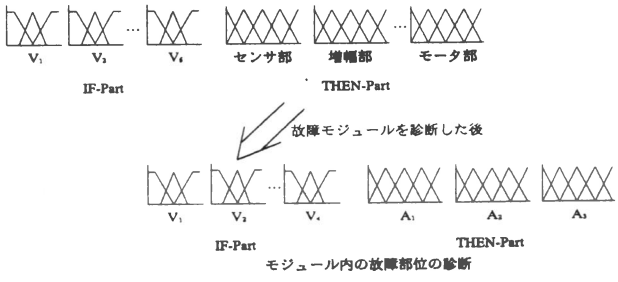


図3　二段階の推論方法

6. 推論結果

故障診断を行う入力値を表2，表3に示す。これは増幅部のICである部品番号OP5の側の可変抵抗器とタイマ部を故障させた場合の電圧をノルマライズした値である。表2におけるV_1からV_5までは各モジュールの出力を，V_6はモータの入力電圧をノルマライズした値で示す。表3におけるV_1，V_2，V_4は表2と同様であり，V_{A1}からV_{A3}は増幅部内の三つの点における電圧をノルマライズした値である。ファジィ理論を用いたエキスパートシステムによる推論結果を表4および表5に示す。表4は故障

表2　入力値（故障モジュール診断）

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
入力値（ノルマライズ値）	0.002	0.022	-0.651	-0.443	-0.426	-0.987

表3　入力値（故障箇所診断）

	V_1	V_2	V_{A1}	V_{A2}	V_{A3}	V_4
入力値（ノルマライズ値）	0.002	0.022	1.000	0.717	1.000	-0.443

モジュールを推論した結果，そして表5はモジュール内の故障箇所を推論した結果を示す。表5における故障箇所のOP3からOP5までは増幅部におけるICを示し（部品番号），推論では「故障部位は，このIC付近である」といった故障診断が得られた。

表4　推論結果（故障モジュール）

故障モジュール	センサ部	モータ部	増幅部	ピークホールド部	タイマリセット部	電　源
確信度(CF[%])	CF 100.0%で正常	CF 0.0%で不明	CF 77.1%で故障	CF 0.0%で不明	CF 25.2%でほぼ故障	CF 100.0%で正常

表5　推論結果（故障箇所）

故障箇所	OP 3	OP 4	OP 5
確信度(CF[%])	CF70.5%で故障	CF0.0%で不明	CF0.0%で不明

7. 考　察

本研究では，「故障した電子回路において数ヵ所の電圧データから，故障している部品を検出する」という目的で研究を行ない，次のような知見を得た。

(1) 故障診断ルールに故障の確信度（CF値）を用いて診断することにより，診断した故障箇所がほぼ認められた。
(2) 部品数が50を越える本研究の実験回路に対して故障モジュールを検出するのに6箇所の電圧，故障部品を検出するのに6箇所の電圧による確認が可能であった。
(3) 表4において，故障モジュールを診断させた結果，入力値における故意に故障させたモジュールとほぼ一致したが，増幅部の確信度に対してタイマリセット部の確信度がかなり低い結果となった。これはそれぞれのモジュールが故障した場合のIF-THENルールが互いに干渉しているためと考えられる。
(4) 表5において，故障箇所の誤診断が認められる。これは，電圧のノルマライズ値（診断における入力値）が1を越えたものは全て1として，また-1を越えたものは全て-1としてIF-THENルールの作成及び診断をさせたことによるものと考えられる。
(5) 電圧値の測定において，条件を統一するのは現状では困難である。

今後の課題として，以下の二点が上げられる。

(1) 入力値（ノルマライズ値）の範囲を広く取り，メンバシップ関数の数を増やす。
(2) 診断ルールの数を多くし，且つより適正な合成方法を検討する。

参考文献

1) 上野春樹，小山照夫：エキスパートシステム，オーム社（1988）
2) J.L.アルティ，M.J.クームス：エキスパート・システム，啓学出版（1987）
3) 越川清重，植草源三，村田忠：実務にすぐ役立つ信頼性技術，日刊工業新聞社（1982）

連絡先

〒903-01　沖縄県中頭郡西原町字千原1番地
琉球大学工学部機械システム工学科
村田　忠
TEL　098-895-2221（内線2719），FAX　098-895-4377

一般講演論文
7月13日（木）

A室

TA1	推論 (4)	司会：村上 周太 (九州工業大学)
TA2	推論 (5)	司会：中西 祥八郎 (東海大学)
TA3	推論 (6)	司会：増井 重弘 (法政大学)
TA4	推論 (学生)	【企画セッション】 司会：菊池 浩明 (東海大学)

B室

TB1	制御 (応用 5)	司会：上里 勝實 (琉球大学)
TB2	制御 (方法論 2)	司会：中津山 幹男 (秋田公立美術工芸短期大学)
TB3	制御 (方法論 3)	司会：山本 哲彦 (琉球大学)
TB4	画像処理	司会：山ノ井 高洋 (北海学園大学)

C室

TC1	ノンエンジニアリング (1)	【企画セッション】 司会：小田 哲久 (愛知工業大学)
TC2	ノンエンジニアリング (2)	【企画セッション】 司会：奥田 徹示 (大阪工業大学)
TC3	測度・積分 (1)	司会：高萩 栄一郎 (専修大学)
TC4	測度・積分 (2)	司会：室伏 俊明 (電気通信大学)

D室

TD1	エボルーショナリコンピューティング (I)(1)	【企画セッション】 司会：下原 勝憲 (ATR)
TD2	エボルーショナリコンピューティング (I)(2)	【企画セッション】 司会：下原 勝憲 (ATR)
TD3	エボルーショナリコンピューティング (II)	【企画セッション】 司会：古橋 武 (名古屋大学)
TD4	ハードウェア	司会：秋月 影雄 (早稲田大学)

E室

TE1	教育工学 (1)	【企画セッション】 司会：磯本 征雄 (名古屋市立大学)
TE2	教育工学 (2)	【企画セッション】 司会：矢鳴 虎夫 (九州工業大学)
TE3	教育工学 (3)	【企画セッション】 司会：宮武 直樹 (法政大学)
TE4	チューニング	司会：大北 正昭 (鳥取大学)

F室

TF3	土木応用	【企画セッション】 司会：秋山 孝正 (岐阜大学)

TA1-1

不完全記述多値クリーネ関数の一意性

Uniqueness of Incompletely Specified Multiple-valued Kleenean Function

菊池 浩明
Hiroaki Kikuchi
東海大学工学部
Faculty of Engineering, Tokai University

高木 昇
Noboru Takagi
富山県立大学工学部
Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University

中西 祥八郎
Shohachiro Nakanishi
東海大学工学部
Faculty of Engineering, Tokai University

向殿 政男
Masao Mukaidono
明治大学理工学部
School of Science and Technology, Meiji University

Abstract: A multiple-valued Kleenean function is a mapping $f_k : [0,1]^n \to [0,1]$, which is representable by a logic formula consisting n variables, three logical connectives, and any constant value of $[0,1]$. In this paper, some properties of the partially specified multiple-valued Kleenean functions by a subset A of $[0,1]$ are investigated and the identification problem of logic formula is solved. The main result is a necessary and sufficient condition that a mapping $f : A \to [0,1]$ to be a unique Kleenean function.

1 はじめに

ファジィ論理関数に基づき，人の知識を論理式の形で抽出する試みが 行なわれている [1, 2, 3, 4]. ファジィ論理関数とは，n 個の変数，定数 0, 1 と論理演算で 構成される論理式による写像であり， 知識の論理関係を表現する最も単純なモデルである. 最小値と最大値によって定義される論理演算は，否定演算と組合せることで，複雑な非線形な入出力関係を実現する. しかしながら， 実践的な知識獲得という観点に立てば， ファジィ論理関数には不十分な点がある. 意味づけの困難な相補項 $(x \wedge \overline{x})$ の存在， 連続だが円滑さのない演算定義， 同値な式が複数存在する時の簡単化の問題などである. 特に， 論理式として 0 と 1 の二種類の定数しか認められていないことが， 関数の表現能力を大きく制限していた. 例えば，論理式 f が，

$$f = (x \wedge y) \vee (\overline{x} \wedge z)$$

と与えられている時，項 $(x \wedge y)$ と $(\overline{x} \wedge z)$ の間には優劣を付けることが出来ない.

そこで， ファジィ論理関数では 0 と 1 しか許されていなかった定数を，$[0,1]$ の任意の値を取るように拡張が試みられた [6, 7, 8]. これを多値クリーネ関数 (Multiple-valued Kleenan Functions), あるいは単にクリーネ関数という. クリーネ関数を用いると，先の論理式 f は例えば 次のように表現することが出来る.

$$f' = (0.8 \wedge x \wedge y) \vee (0.4 \wedge \overline{x} \wedge z)$$

ここで，0.8 や 0.4 は定数であり，これにより， 積項間に重要度あるいは確信度を付加した表現が可能となる.

さて， 知識獲得の問題は，知識のモデルとしてクリーネ関数を考えると， 次のように定式化できる.

(不完全指定クリーネ関数の同定問題) $[0,1]^n$ の部分集合 $A = \{a_1, \ldots, a_m\}$ と， それに対する出力 f, すなわち，写像 $f : A \to [0,1]$ が与えられた時，

$$f(a_i) = F(a_i) \text{ for all } a_i \in A$$

を満たすクリーネ関数 F を求める.

本稿では， クリーネ関数のいくつかの基本性質を示し， それに基づいて同定問題を解くためのいくつかの集合の定義を行なう. 与えられた写像に対して，それを満たすクリーネ関数が存在することを 無矛盾性 (*consistency*), 更にクリーネ関数が一意的に定まることを 一意性 (*uniqueness*) という. ここでは，特に一意性について考察する. また，一意でない場合に，解の中から特徴的な要素を定め， 解の集合が分配束になることを示す. これは，入出力データが不十分である時にも 本質的な情報を与えるものであり，応用上意義のある概念である.

2 クリーネ関数

2.1 基本定義

定義 2.1 真理値の集合を $V = [0,1], V_2 = \{0,1\}$ $V_3 = \{0, 0.5, 1\}$ とする. 論理式とは，$[0,1]$ の任意の定数， n 個の変数 x_i $(i = 1, \ldots, n)$, 三種類の論理演算から成る式である. 論理演算は，$x_i \wedge x_j = x_i x_j = \min(x_i, x_j)$, $x_i \vee x_j = \max(x_i, x_j)$, and $\neg x_i = \overline{x_i} = 1 - x_i$ と定義する. クリーネ関数とは，論理式で表現される V^n から V への 写像である.

定義 2.2 V の元 a, b が， $0.5 \geq a \geq b$ または $b \geq a \geq 0.5$ である時，かつその時に限り， a と b はあいまいさの半順序関係にあるといい， $a \succeq b$ と書き表す.

V^n の n 元ベクトル $\boldsymbol{a}=(a_1,\ldots,a_n)$ と $\boldsymbol{b}=(b_1,\ldots,b_n)$ が，全ての i $(i=1,\ldots,n)$ について，$a_i \succeq b_i$ である時，かつその時に限り，$\boldsymbol{a} \succeq \boldsymbol{b}$ と書く．

$[0,0.5)$ の元 a と $(0.5,1]$ の元 b は，半順序 $\succeq$ に関して比較不能である．これを，$a \not\succeq b$ と書く．また，$a \succeq b$ かつ $a \neq b$ であることを，$a \succ b$ と示す．

定義 2.3 $\boldsymbol{a}$ を V_3^n の元，$\boldsymbol{b}$ を $V_3^n - V_2^n$ の元とする．$\boldsymbol{a}$ に対応する**単項** α^a と，$\boldsymbol{b}$ に対応する**相補項** β^b を次式で定める．

$$\begin{aligned}\alpha^a &= x_1^{a_1} \wedge \cdots \wedge x_n^{a_n} \\ \beta^b &= x_1^{b_1} \wedge \cdots \wedge x_n^{b_n}\end{aligned}$$

ここで，全ての i $(i=1,\ldots,n)$ について，

$$x_i^{a_i} = \begin{cases} x_i & \text{if } a_i = 1 \\ \overline{x_i} & \text{if } a_i = 0 \\ 1 & \text{if } a_i = 0.5, \end{cases} \qquad x_i^{b_i} = \begin{cases} x_i & \text{if } b_i = 1 \\ \overline{x_i} & \text{if } b_i = 0 \\ x_i\,\overline{x_i} & \text{if } b_i = 0.5 \end{cases}$$

2.2 基本性質

定理 2.1 (単調性) [7] $\boldsymbol{a},\boldsymbol{b}$ を V^n の元，f をクリーネ関数とする．

$$\boldsymbol{a} \succeq \boldsymbol{b} \;\Rightarrow\; f(\boldsymbol{a}) \succeq f(\boldsymbol{b})$$

定理 2.2 [7] f と g をクリーネ関数とする．V_3^n の全ての元 $\boldsymbol{a}$ について，$f(\boldsymbol{a})=g(\boldsymbol{a})$ である時，かつ，その時に限り，V^n の全ての元 $\boldsymbol{a}$ について，$f(\boldsymbol{a})=g(\boldsymbol{a})$ である．

定理 2.3 (表現定理) [8] 任意のクリーネ関数 f は，次の論理式 F により表現できる．

$$F(\boldsymbol{x}) = \bigvee_{a \in V_3^n} \left\{ \bigwedge_{a \succeq b} f(\boldsymbol{b})\alpha_a(\boldsymbol{x}) \vee f(\boldsymbol{a})\beta_a(\boldsymbol{x}) \right\}$$

ここで，α^a は $\boldsymbol{a}$ に対応する単項，β^a は相補項である．

系 2.1 [8] f をクリーネ関数，$\boldsymbol{a}=(a_1,\ldots,a_n)$ を V^n の元とする．全ての i $(i=1,\ldots,n)$ について，次が成立する．

$$f(\boldsymbol{a}) = F_0 \neg a_i \vee F_1 a_i \vee F_0 F_1 F_{0.5} \vee F_{0.5} a_i \neg a_i$$

ここで，F_0, F_1, $F_{0.5}$ は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} F_0 &= f(a_1,\ldots,a_{i-1},0,a_{i+1},\ldots,a_n), \\ F_1 &= f(a_1,\ldots,a_{i-1},1,a_{i+1},\ldots,a_n), \\ F_{0.5} &= f(a_1,\ldots,a_{i-1},0.5,a_{i+1},\ldots,a_n). \end{aligned}$$

3 不完全指定クリーネ関数

ここでは，定義域として，V^n の代わりにその部分集合 A が与えられるクリーネ関数，すなわち，不完全指定クリーネ関数の性質を考える．

3.1 量子化

定義 3.1 x と λ を V の元とする．x の λ による**量子化** $\overline{x}^\lambda$ とは，次式で定められる V の元である．

$$\overline{x}^\lambda = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \le x < \min(\lambda, 1-\lambda) \le 0.5,\ x \neq 0.5 \\ 0.5 & \text{if } \min(\lambda,1-\lambda) < x < \max(\lambda,1-\lambda) \\ 1 & \text{if } \max(\lambda,1-\lambda) < x \le 1 \\ \lambda & \text{otherwise.} \end{cases}$$

V^n の元 $\boldsymbol{x}=(x_1,\ldots,x_n)$ に対する量子化 $\overline{\boldsymbol{x}}^\lambda$ は，次式で定められる V_3^n の元である．

$$\overline{\boldsymbol{x}}^\lambda = (\overline{x_1}^\lambda,\ldots,\overline{x_n}^\lambda).$$

定理 3.1 [4] f を，$\boldsymbol{a}=(a_1,\ldots,a_n) \in V^n$ について $f(\boldsymbol{a})=b$ となるクリーネ関数とする．任意の a_i について，次が成立する．

$$f(a_1,\ldots,\overline{a_i}^b,\ldots,a_n) = b.$$

定義 3.2 f を，$\boldsymbol{a}=(a_1,\ldots,a_n) \in V^n$ と $b \in V$ について $f(\boldsymbol{a})=b$ とする写像とする．この時，次式で定まる V_3^n を $\boldsymbol{a}^*$ と書き表す．

$$\boldsymbol{a}^* = (a_1^*,\ldots,a_n^*)$$

ここで，

$$a_i^* = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \le a_i \le \min(b,1-b) \le 0.5,\ a_i \neq 0.5, \\ 1 & \text{if } 1 \ge a_i \ge \max(b,1-b) \ge 0.5,\ a_i \neq 0.5, \\ 0.5 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

同様に，$\boldsymbol{a}_*$ についても次のように定める．

$$\boldsymbol{a}_* = (a_{1*},\ldots,a_{n*})$$

ここで，

$$a_{i*} = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \le a_i < \min(b,1-b), \\ 1 & \text{if } \max(b,1-b) < a_i \le 1, \\ 0.5 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

系 3.1 f を $f(\boldsymbol{a})=b$ となるクリーネ関数とする．$\boldsymbol{c} \in V_3^n$ について，次が成立する．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{c} \succeq \boldsymbol{a}_* &\;\Rightarrow\; f(\boldsymbol{c}) \succeq b \\ \boldsymbol{c} = \overline{\boldsymbol{a}}^b &\;\Rightarrow\; f(\boldsymbol{c}) = b \\ \boldsymbol{a}^* \succeq \boldsymbol{c} &\;\Rightarrow\; b \succeq f(\boldsymbol{c}) \end{aligned}$$

定義 3.3 $A=\{\boldsymbol{a}_1,\ldots,\boldsymbol{a}_m\}$ を V^n の部分集合，f を写像 $f: A \to V$ とする．任意の $\boldsymbol{a} \in V^n$ について，$C_f(\boldsymbol{a})$ を次式で定まる V_3^n の部分集合とする．

$$C_f(\boldsymbol{a}) = \{\boldsymbol{c} \in V_3^n | \boldsymbol{a}^* \succeq \boldsymbol{c}\} \cup \{\boldsymbol{c} \in V_3^n | \boldsymbol{c} \succeq \boldsymbol{a}_*\}$$

また，A について次の様に記す．

$$C_f(A) = C_f(\boldsymbol{a}_1) \cup \cdots \cup C_f(\boldsymbol{a}_m).$$

(例 3.1) f を $\boldsymbol{a}=(0.3,0.4,0.9)$ について $f(\boldsymbol{a})=0.3$ となるクリーネ関数とする．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{a}^* &= (0,0.5,1), \\ \overline{\boldsymbol{a}}^b &= (0.3,0.5,1), \\ \boldsymbol{a}_* &= (0.5,0.5,1), \\ C_f(\boldsymbol{a}) &= \{\boldsymbol{a}^*, \boldsymbol{a}_*, (0,0,1), (0,1,1)\}. \end{aligned}$$

この結果をハッセ図で図 1に示す．

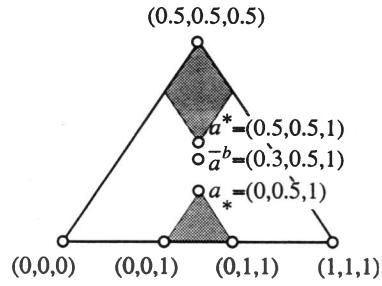


図 1: Hasse diagram of $C_f(\boldsymbol{a})$

定義 3.4 f を，$\boldsymbol{a} \in V^n$ について $f(\boldsymbol{a}) = b$ とする写像とする．任意の $\boldsymbol{c} \in C_f(\boldsymbol{a})$ について，$I_a(\boldsymbol{c})$ を次式で定義される V の部分集合とする．$\boldsymbol{a}^* \neq \boldsymbol{a}_*$ である時，

$$I_a(\boldsymbol{c}) = \begin{cases} \{x \in V | b \succeq x\} & \text{if } \boldsymbol{a}^* \succeq \boldsymbol{c}, \\ \{x \in V | x \succeq b\} & \text{if } \boldsymbol{c} \succeq \boldsymbol{a}_* \end{cases}$$

それ以外ならば，

$$I_a(\boldsymbol{c}) = \begin{cases} \{x \in V | b \succeq x\} & \text{if } \boldsymbol{a}^* \succ \boldsymbol{c}, \\ \{x \in V | x \succeq b\} & \text{if } \boldsymbol{c} \succ \boldsymbol{a}_*, \\ \{b\} & \text{if } \boldsymbol{c} = \boldsymbol{a}^* = \boldsymbol{a}_*. \end{cases}$$

定義 3.5 $A = \{\boldsymbol{a}_1, \ldots, \boldsymbol{a}_m\}$ を V^n の部分集合とする．$I_A(\boldsymbol{c})$ を次のように定める．

$$I_A(\boldsymbol{c}) = \bigcap_{\boldsymbol{a}_i \in C_f^{-1}(\boldsymbol{c})} I_{a_i}(\boldsymbol{c}),$$

ここで $C_f^{-1}(\boldsymbol{c})$ は $C_f^{-1}(\boldsymbol{c}) = \{\boldsymbol{a} \in V | \boldsymbol{c} \in C_f(\boldsymbol{a})\}$ で定められる V の部分集合である．

3.2 同定問題

定理 3.2 (Consistency) [4] $A = \{\boldsymbol{a}_1, \ldots, \boldsymbol{a}_n\}$ を V^n の部分集合，f を写像 $f : A \to V$ とする時，

$$F(\boldsymbol{a}) = f(\boldsymbol{a}) \quad \text{for all } \boldsymbol{a} \in A.$$

を満たすクリーネ関数 F が存在する必要十分条件は，次が成立することである．

$$I_A(\boldsymbol{c}) \neq \emptyset \quad \text{for all } \boldsymbol{c} \in C_f(\boldsymbol{a})$$

定義 3.6 f を V の部分集合 A から V への写像 $f : A \to V$ とする．論理式 F_L を次のように定める．

$$F_L = \bigvee_{\boldsymbol{a} \in A} \gamma_a$$

ここで，

$$\gamma_a = \begin{cases} f(\boldsymbol{a})\alpha_{a^*} & \text{if } f(\boldsymbol{a}) > 0.5, \\ f(\boldsymbol{a})\beta_{a_*} & \text{if } f(\boldsymbol{a}) \leq 0.5, \end{cases}$$

ただし，α_a, β_a は各々 $\boldsymbol{a}$ に対応する単項と相補項 とする．

論理式 F_G を次に定める．

$$F_G = \bigwedge_{\boldsymbol{a} \in A} \delta_a$$

ここで，

$$\delta_a = \begin{cases} f(\boldsymbol{a}) \vee \overline{\alpha_{a^*}} & \text{if } f(\boldsymbol{a}) < 0.5, \\ f(\boldsymbol{a}) \vee \overline{\beta_{a_*}} & \text{if } f(\boldsymbol{a}) \geq 0.5. \end{cases}$$

ただし，α_a, β_a は各々 $\boldsymbol{a}$ に対応する単項と相補項 とする．

(例 3.2) f を次のように定める．

$$\begin{aligned} f_1(\boldsymbol{a}_1) &= f_1(0.2, 0.3) = 0.3, \\ f_1(\boldsymbol{a}_2) &= f_1(0.8, 0.7) = 0.7. \end{aligned}$$

このとき，式 F_L と F_G は，次のように得られる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{a}_1^* &= (0,0), \quad \boldsymbol{a}_{1*} = (0, 0.5) \\ \boldsymbol{a}_2^* &= (1,1), \quad \boldsymbol{a}_{2*} = (1, 0.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_L &= f(\boldsymbol{a}_1)\beta_{\boldsymbol{a}_{1*}} \vee f(\boldsymbol{a}_2)\alpha_{\boldsymbol{a}_2^*} \\ &= 0.3\overline{x}\,\overline{y} \vee 0.7xy \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_G &= (f(\boldsymbol{a}_1) \vee \overline{\alpha_{a_1^*}}) \wedge (f(\boldsymbol{a}_2) \vee \overline{\beta_{a_{2*}}}) \\ &= (0.3 \vee \overline{x}\,\overline{y}) \wedge (0.7 \vee \overline{x \wedge y \wedge \overline{y}}) \\ &= (0.3 \vee x \vee y) \wedge (0.7 \vee \overline{x} \vee y \vee \overline{y}) \\ &= 0.3 \vee 0.7x \vee y \vee x\overline{y}. \end{aligned}$$

定義 3.7 f を V^n の部分集合 A について定まる写像 $f : A \to V$ とする．この時，任意の $\boldsymbol{a} \in A$ について $f(\boldsymbol{a}) = F(\boldsymbol{a})$ を満たす全てのクリーネ関数 F から成る集合を f- 同値類といい，$[f]$ と書き表す．すなわち，

$$[f] = \{F | f(\boldsymbol{a}) = F(\boldsymbol{a}) \text{ for all } \boldsymbol{a} \in A\}.$$

定理 3.3 論理式 F_L と F_G は，各々，同値類 $[f]$ の最小元と最大元である．

定義 3.8 A を V^n の部分集合，f を写像 $f : A \to V$ とする．$\boldsymbol{c} \in V_3^n$ について，$I_f^*(\boldsymbol{c})$ は次式で定められる V の部分集合である．

$$I_f^*(\boldsymbol{c}) = \begin{cases} I_f(A) & \text{if } \boldsymbol{c} \in C_f(A) \\ \{0.5\} & \text{if } B_c = \{0,1\}, \\ & \boldsymbol{c} \in V_3^n - C_f(A) \end{cases}$$

ここで，

$$B_c = \bigcup_{\boldsymbol{c} \succeq \boldsymbol{b} \in C_f(A)} I_A(\boldsymbol{b}).$$

定理 3.4 (Uniqueness) A を V^n の部分集合，f を写像 $f : A \to V$ とする．全ての $\boldsymbol{a} \in A$ について，$f(\boldsymbol{a}) = F(\boldsymbol{a})$ を満たすクリーネ関数が一意的に 定まるための必要十分条件は，次が成立することである．

$$|I_A^*(\boldsymbol{c})| = 1 \quad \text{for all } \boldsymbol{c} \in V_3^n$$

定理 3.5 f をクリーネ関数 $f : A \to V$ とする．全ての $\boldsymbol{c} \in V_3^n$ について次が成立する．

$$I_A^*(\boldsymbol{c}) = [F_L(\boldsymbol{c}), F_G(\boldsymbol{c})].$$

3.3 不完全指定関数による分配束

定義 3.9 A を V^n の部分集合，f を写像 $f : A \to V$ とする．この時，論理式 F_C と F_P を次のように定める．

$$\begin{aligned} F_C &= \mathrm{lub}_{\succeq}(\{F_G, F_L\}) \\ F_P &= \mathrm{glb}_{\succeq}(\{F_G, F_L\}) \end{aligned}$$

定理 3.6 写像 $f : A \to V$ によって作られる f- 同値類 $[f]$ と通常の算術的な順序関係 $\geq$ は，F_L を最小元，F_G を最大元とする分配束を満たす．

図 2は，f- 同値類 $[f]$ によって定まる分配束のハッセ図表現である．ここで，二種類の半順序関係 $\geq$ と $\succeq$ が図解されている．ただし，F_P は必ずしも存在するわけではない．

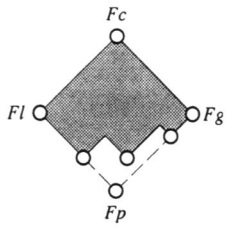


図 2: Distributive Lattice of $[f]$

命題 3.1

$$\begin{aligned} F_L = F_C &\Leftrightarrow F_G = F_P \\ F_L = F_P &\Leftrightarrow F_G = F_C \end{aligned}$$

(例 3.3) 次のように定義される写像 f がある．

$$\begin{aligned} f_2(0.2, 0.3) &= 0.3, \\ f_2(0.8, 0.7) &= 0.8, \\ f_2(0.2, 0.9) &= 0.3 \end{aligned}$$

この時，f- 同値類 $[f]$ は完備束となり，真偽とあいまいさの半順序関係についての 最小元，最大元は，次の論理式 F_L, F_G, F_C, F_P により与えられる．(図 3)

$$\begin{aligned} F_L &= 0.3\bar{x}y \vee 0.8x \\ F_G &= (0.3 \vee x \vee y)(0.8 \vee x \vee \bar{x} \vee y \vee \bar{y})(0.3 \vee x \vee \bar{y}) \\ &= 0.3 \vee x \vee y\bar{y} \\ F_C &= 0.8x \vee y\bar{y} \vee 0.3 \\ F_P &= x \vee 0.3\bar{x}y. \end{aligned}$$

4 おわりに

不完全指定クリーネ関数の同定問題を考察し，解が一意に定まるための必要十分条件を明らかにした．一意でない時にも，解の集合の中から最大値と最小値を求める アルゴリズムを示した．実際の知識獲得においては，一意性が満たされることはまれであり，それゆえに，最小値と最大値による区間が得られたことは意味がある．

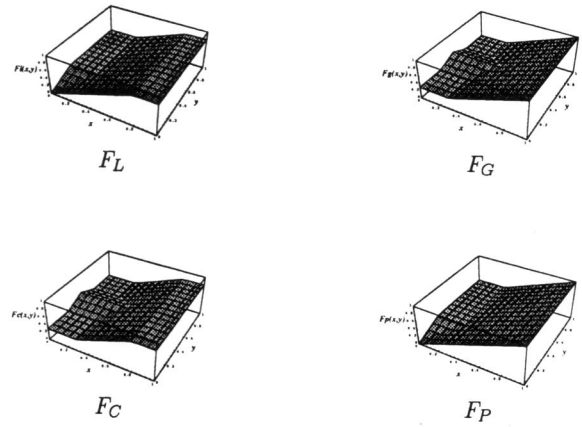


図 3: Elements of $[f]$

参考文献

[1] Kikuchi H., (1991) "Necessary and Sufficient Conditions for Restrictions to Be Fuzzy Switching Functions," *Proc. the Int. Fuzzy Engineering Symposium' 91*, vol.1, pp.91-102.

[2] Kikuchi H., Morishita T. and Mukaidono M., (1992) "Restrictions of P-Fuzzy Switching Functions ," *Proc. IEEE Int. Conference on Fuzzy Systems 1992*, IEEE, pp.169-176

[3] Kikuchi, H., (1993) "Fitting Fuzzy Switching Functions to Uncertain Knowledge," *Proc. IEEE Int. Conference on Fuzzy Systems 1993 (FUZZ-IEEE93)*, IEEE, pp.384-390.

[4] Kikuchi H., Takagi N. and Mukaidono M., "Identification of Fuzzy Logic Functions with Constants — Partially Specified Multiple-valued Kleenean Functions," *Proc. the Int. Joint Conference of the IEEE Int. Conference on Fuzzy Systems and the Second Int. Fuzzy Engineering Symposium FUZZ-IEEE/IFES'95*, pp.2165-2172, 1995

[5] 高木，菊池，中島，向殿，"不完全記述多値クリーネ関数について"，多値技報，vol. MVL-95, no.1, pp.19-28, 1995

[6] 畑，中島，三好，大和，"多値クリーネ関数の判定と論理式決定"，信学論，D-I, vol.J73, no.2, pp.183-192, 1990

[7] N.Takagi and M. Mukaidono, "Fundamental Properties of Multiple-Valued Kleenean Functions," IEICE Trans., Vol. J74-D-I, No. 12, pp. 797-804, 1991 (in Japanese)

[8] 高木，向殿，"多値クリーネ関数の論理式表現"，信学論，Vol. J75-D-I, No. 2, pp. 69-75, 1991

[9] Mukaidono M., (1979) "A Necessary and Sufficient Condition for Fuzzy Logic Functions," *Proc. the 9th Int. Symposium on Multiple-valued Logic*, IEEE, pp.159-166

連絡先

菊池 浩明　Email: kikn@ep.u-tokai.ac.jp
259-12 平塚市北金目 1117
東海大学工学部電気工学科
Tel: 0463-58-1211 ext. 4025　Fax: 0463-59-4014

TA1-2

多重ファジィ推論の並列推論可能性について

A Study on the Possibility of Parallel Reasoning in Multi-fold Approximate Reasoning

前田 博　　○信定 裕二
Hiroshi Maeda　　Yuji Nobusada

九州工業大学　工学部
Kyushu Institute of Technology, Faculty of Engineering

Abstract : In a multi-fold approximate reaoning, an inference result after aggregating rules is not bigger than an aggregation result after inference for each rule. In this paper,we study the method that the latter corresponds with the former.

1．はじめに

一般的な多重ファジィ推論では，複数ルールに対して各ルールを統合した後推論を行う場合と，各ルールに対して推論を行った後推論結果を統合する場合との２通りがあり[1]，前者の方が後者よりも推論結果は等しいか小さくなることがわかっている[2]．本論文では，統合がANDオペレータでなされるような多重ファジィ推論クラスにおいて，後者が前者と同じ結果を出すような推論手法を考察する．後者のような個々のルールでの推論によって前者と同じ様な推論を出せれば，多重ファジィルールに対して，マムダニのファジィ推論と同じく並列推論が可能となり推論計算効率の向上が期待できる．

2．多重ファジィ推論の設定

本研究で用いる，多重ファジィ推論のルールの前件，後件，事実のファジィ集合の定義を以下に示す．

1）ファジィ集合A'は正規強凸ファジィ集合であり，連続なメンバーシップ関数とする．

2）ファジィ集合A_i, B_iはそれぞれ前件，後件のi分割目のファジィ集合である．

3）任意のファジィ集合A_i，B_iは正規三角型メンバーシップ関数を持ち，それらのベース集合は，正規化された[0,1]区間である．

4）ベース集合上のファジィ集合Aの強αカット集合$\{x \in [0,1] \| \mu A(x) > 0\}$を$A$のサポートといい，supp[A]と書く．

5）ファジィ集合Aに対して，集合$\{x \in [0,1] \| \mu A(x) = 1\}$をコアといい，$co[A]$と書く．

6）ファジィ集合Aについて，$co[A]=[0,1]$のとき，Aを無知と呼ぶ．

7）ルールの前件，後件のファジィ集合が以下の条件を満たすとき，ベース集合は正規分割されているという．

7.1) $co[A_1]=co[B_1]=0$，$co[A_n]=co[B_n]=1$

7.2) $(2 \le j \le n-1)$に対して$\mathrm{supp}[A_j]=]co[A_{j-1}], co[A_{j+1}][$，$\mathrm{supp}[B_j]=]co[B_{j-1}], co[B_{j+1}][$．

8）ファジィ集合A_i，B_iの設定は前件，後件とも同形，正規分割とする．

9）ファジィ集合A,Bのメンバーシップ関数をそれぞれ，$\mu A, \mu B$とすると$A \to B$のルールを表すファジィ関係Rの定め方には様々な方法があるが，今回は多段ファジィ推論においてあいまいさの広がりを抑える性質を持つ[3]Rgを用いたファジィ推論について議論する．

$$Rg(x,y)=\begin{cases}1 & (\mu A(x) \le \mu B(y)) \\ \mu B(y) & (\mu A(x) > \mu B(y))\end{cases} \quad (2.1)$$

(Gödel)

10）推論の合成規則は，最も使用されるsup-min（論理積）に加え，sup-代数積合成，sup-限界積合成，sup-激烈積合成を用いる．

論理積(min) : $x \wedge y = \min(x,y)$ (2.2)

代数積 : $x \bullet y = xy$ (2.3)

限界積 : $x \odot y = (x+y-1) \vee 0$ (2.4)

激烈積 : $$x \wedge y = \begin{cases} y & (x=1) \\ x & (y=1) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.5)$$

11）後件と事実との間の位置関係は図１のようにする．つまり，コアの位置は，$co[B_i] \le co[A'] \le co[B_{i+1}] (i=1,\ldots,n-1)$とする．また，$\mathrm{supp}[A']=]y_1, y_2[$，$\mathrm{supp}[B_i]=]S_{B_iL}, S_{B_iR}[$，$\mathrm{supp}[B_{i+1}]=]S_{B_{i+1}L}, S_{B_{i+1}R}[$とする．

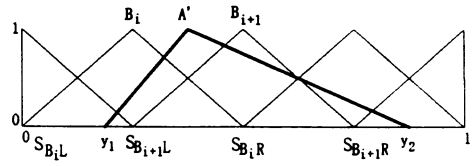


図１ 事実と後件部との関係

本稿では，式(2.6)のようにはじめに各ルールのファジィ関係の統合を行った後推論を行う場合を多重推論，

$$B' = A' \circ [\bigcap_{i=1}^{n} (A_i \to B_i)] \quad (2.6)$$

式(2.7)のように各ルールについて推論を行った後それらの結果を統合する場合を並列推論と呼ぶ．

$$B_p' = \bigcap_{i=1}^{n} [A' \circ (A_i \to B_i)] \quad (2.7)$$

3．並列推論における補正量

並列推論の推論結果は，多重推論の推論結果より大きくなる事がわかっているので，一致させるために補正を行う必要がある．しかも，事実の大きさや合成規則によって補正量が異なってくる．以下に多重推論と同じ結果を導く並列推論の手順について述べる．

詳しい証明については省略し，結果のみを示す．

Step1 : $\mu B_i(co[A']) = 0 \quad (i=1,\ldots,n)$

のとき，第i番目のルールの推論結果は無知になるので結果を用いなくてよい．

（証明）

$\mu B_i(co[A']) = 0 \quad (i = 1,\ldots,n)$のとき，図２のように事実のコアの値１に対して，ファジィ関係の値はすべて１になっているので推論結果は無知になることが分かる．並列推論は各ルールの推論結果のANDをとるので，このような無知になる結果は用いなくてよいことは明らかである．（証明終）

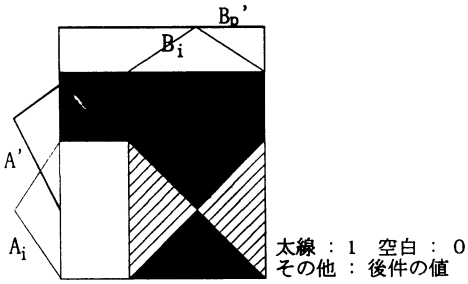


図２ 推論結果が無知になる場合の事実とファジィ関係との関係

Step2 ： $co[B_i] \le y_1, y_2 \le co[B_{i+1}]$
のとき，多重推論と並列推論の結果が一致するので，並列推論の結果をそのまま用いる．

（証明）

各ルールについての推論を行うとsupp$[B_i]=]S_{B_iL}, S_{B_iR}[$，supp$[B_{i+1}]=]S_{B_{i+1}L}, S_{B_{i+1}R}[$の範囲で０以外の値を持つ．各推論結果を統合すると区間$]co[B_i], co[B_{i+1}][$において０以外の値を持つ．そして，その区間で推論結果は，

$co[B_i] \le y \le co[A']$

$\mu B_p'(y) = \mu A'(y) \vee \mu B_{i+1}(y)$

$co[A'] \le y \le co[B_{i+1}]$

$\mu B_p'(y) = \mu A'(y) \vee \mu B_i(y)$

となり，これは多重推論結果と一致する．詳しい証明は省略する．（証明終）

Step3 ：

１）$co[B_i] \le y_1 \le co[B_{i+1}]$，$y_2 > co[B_{i+1}]$，つまり，図３(a)のとき，
論理積では
$\mu A'(p_1) \ge \mu A'(co[B_{i+1}])$
ならば，多重推論と並列推論の結果の違いはなく，並列推論結果をそのまま用いる．
上の条件を満たさない論理積とその他のt-normの場合では，
$y \in [co[B_{i+1}], 1]$についてのみstep4における補正を行う．

２）$co[B_i] \le y_2 \le co[B_{i+1}]$，$y_1 < co[B_i]$，つまり，図３(b)のとき，
論理積では，
$\mu A'(p_2) \ge \mu A'(co[B_i])$
ならば，多重推論と並列推論の結果の違いはなく，並列推論結果をそのまま用いる．
上の条件を満たさない論理積とその他のt-normの場合では，
$y \in [0, co[B_i]]$についてのみstep4における補正を行う．

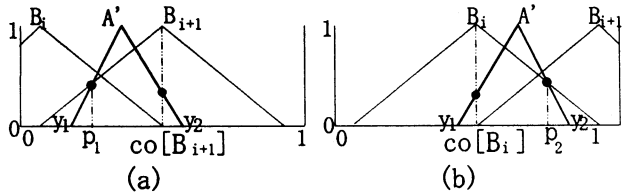


図３ 多重推論と並列推論の結果が一致する事実の例

Step4 ： Step2, Step3以外の場合，例えば，図１のような事実の場合，並列推論を行って区間$y \in [0, co[B_i]]$，$y \in [co[B_{i+1}], 1]$について補正を行う．区間$y \in [co[B_i], co[B_{i+1}]]$については並列推論も多重推論も推論結果は事実の値と一致するので補正は行わなくてよい．

次のように補正量B_cを求める．

論理積：

$y \in [0, co[B_i]]$において，
$co[B_{i-Q}] \le y_1 \le co[B_{i-Q+1}] (1 \le Q \le i-1)$のとき，
$y \in [co[B_{i-k}], co[B_{i-k+1}]] \quad (k = 1,\ldots,Q)$では，
$\mu B_c(y) = \mu A'(y) \vee [\mu A'(co[B_{i-k+1}]) \wedge \mu B_{i-k+1}(y)]$，
$y \in [0, co[B_{i-Q}]]$では，
$\mu B_c(y) = 0$，
となる．

$y \in [co[B_{i+1}], 1]$において，
$co[B_{i+R}] \le y_2 \le co[B_{i+R+1}] (1 \le R \le n-i-1)$のとき，
$y \in [co[B_{i+j}], co[B_{i+j+1}]] \quad (j = 1,\ldots,R)$では，
$\mu B_c(y) = \mu A'(y) \vee [\mu A'(co[B_{i+j}]) \wedge \mu B_{i+j}(y)]$，
$y \in [co[B_{i+R+1}], 1]$では
$\mu B_c(y) = 0$，
となる．

代数積：

$y \in [0, co[B_i]]$において，
$co[B_{i-Q}] \le y_1 \le co[B_{i-Q+1}] (1 \le Q \le i-1)$のとき，
$y \in [0, co[B_{i-Q}]]$では，
$\mu B_c(y) = 0$，
$y \in [co[B_{i-Q}], co[B_{i-Q+1}]]$では，
$\mu B_c(y) = \mu A'(y) \cdot \mu B_{i-Q+1}(y)$，
$y \in [co[B_{i-Q+1}], co[B_i]]$では，
$\mu B_c(y) = \mu A'(y)$，
となる．

$y \in [co[B_{i+1}], 1]$において，
$co[B_{i+R}] \le y_2 \le co[B_{i+R+1}] (1 \le R \le n-i-1)$のとき，
$y \in [co[B_{i+1}], co[B_{i+R}]]$では
$\mu B_c(y) = \mu A'(y)$，
$y \in [co[B_{i+R}], co[B_{i+R+1}]]$では
$\mu B_c(y) = \mu A'(y) \cdot \mu B_{i+R}(y)$，
$y \in [co[B_{i+R+1}], 1]$では
$\mu B_c(y) = 0$，

となる.

限界積：

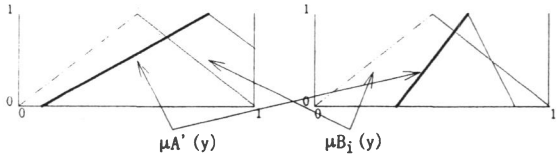


図4 後件と事実の傾きの違い

$y \in [0, co[B_i]]$において，
図4の左図のように
$y \in [co[B_{i-k}], co[B_{i-k+1}]](k = 1,\ldots,i-1)$で$\mu A'(y)$の傾きの絶対値が$\mu B_{i-k+1}(y)$の傾きの絶対値よりも小さい場合は

$$\mu B_c(y) = \mu A'(y),$$

逆に，図4の右図のように$\mu A'(y)$の傾きの絶対値が$\mu B_{i-k+1}(y)$の傾きの絶対値よりも大きい場合は

$$\mu B_c(y) = (\mu A'(y) + \mu B_{i-k+1}(y) - 1) \vee 0,$$

となる.

$y \in [co[B_{i+1}], 1]$において，
$y \in [0, co[B_i]]$と同様に，
$y \in [co[B_{i+j}], co[B_{i+j+1}]](j = 1,\ldots,n-i-1)$で$\mu A'(y)$の傾きの絶対値が$\mu B_{i+j}(y)$の傾きの絶対値よりも小さい場合は

$$\mu B_c(y) = \mu A'(y),$$

$\mu A'(y)$の傾きの絶対値が$\mu B_{i+j}(y)$の傾きの絶対値よりも大きい場合は，

$$\mu B_c(y) = (\mu A'(y) + \mu B_{i+j}(y) - 1) \vee 0,$$

となる.

激烈積：
$y \in [0, co[B_i]]$において，

$$\mu B_p(y) = \mu A'(y),$$

$y \in [co[B_{i+1}], 1]$において，

$$\mu B_p(y) = \mu A'(y),$$

となる.

Step5 ： 多重推論結果をB'，並列推論結果をB_p'，補正量をB_cとすると，

$$B' = B_p' \wedge B_c \tag{3.1}$$

が成り立ち，B_p'とB_cのANDをとることで多重推論と同じ結果を出すことができる.

4．並列推論の推論結果

sup-t-norm合成によって並列推論を行うとき，次の命題を得る.

並列推論はt-normによらず同じ推論結果になる.

（証明）

$\mathrm{supp}[A_i] =]S_{A_iL}, S_{A_iR}[$，$\mathrm{supp}[B_i] =]S_{B_iL}, S_{B_iR}[$とする.

*はt-norm演算を示す.

今回の設定では，i番目とi+1番目のルールのみ並列推論を行えばよい．各ルールの区間ごとの推論結果を次に示す.

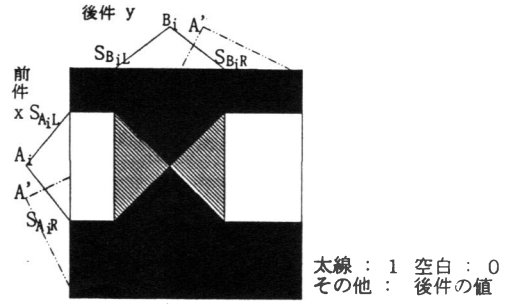


図5 i番目のルールにおける推論

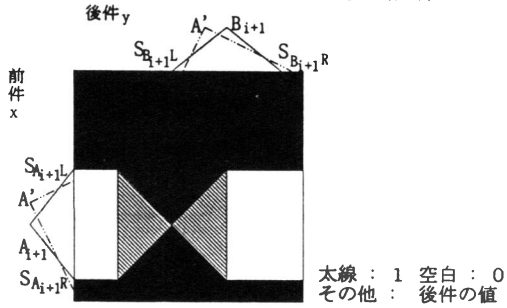


図6 i+1番目のルールにおける推論

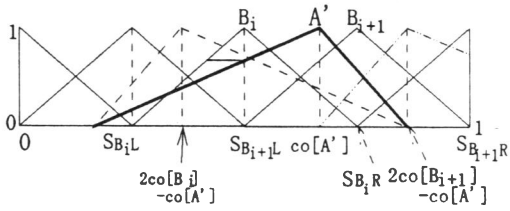


図7 各ルールの推論結果を表わすために用いた区間の位置

[i番目のルール]

$y \in [0, S_{B_iL}]$または$y \in [S_{B_iR}, 1]$のとき，

$$\mu B_i'(y) = \{\mu A'(S_{A_iR}) \vee \mu A'(S_{A_iL})\} * 1,$$

$y \in [S_{B_iL}, 2co[B_i] - co[A']]$または$y \in [co[A'], S_{B_iR}]$のとき，

$$\mu B_i'(y) = [\{\mu A'(y) \vee \mu A'(2co[B_i] - y)\} * 1] \vee \{\mu A'(co[A']) * \mu B_i(y)\}$$

$y \in [2co[B_i] - co[A'], co[A']]$のとき，

$$\mu B_i'(y) = \mu A'(co[A']) * 1,$$

となる.

[i+1番目のルール]

$y \in [0, S_{B_{i+1}L}]$または$y \in [S_{B_{i+1}R}, 1]$のとき，

$$\mu B_i'(y) = \{\mu A'(S_{A_{i+1}R}) \vee \mu A'(S_{A_{i+1}L})\} * 1,$$

$y \in [S_{B_{i+1}L}, co[A']]$または$y \in [2co[B_{i+1}] - co[A'], S_{B_{i+1}R}]$のとき，

$$\mu B_i'(y) = [\{\mu A'(y) \vee \mu A'(2co[B_{i+1}] - y)\} * 1] \vee \{\mu A'(co[A']) * \mu B_i(y)\}$$

$y \in [co[A'], 2co[B_{i+1}] - co[A']]$のとき，

$$\mu B_{i+1}'(y) = \mu A'(co[A']) * 1$$

となる.

i番目，i+1番目のルールとも5つの区間に分けて推論結果を表すことができる.

事実とファジィ関係との間にt-norm演算を用いるが，

各ルールの各区間の推論結果はファジィ関係の値と事実の値がどちらか1または，共に1の場合に現れる．これにより今回用いたt-norm演算ではファジィ関係の値または事実の値が推論結果として現れるので違いは見られない．
（証明終）

i番目とi+1番目のルールの結果を統合した並列推論の推論結果は以下に示す通りである．
［並列推論結果］
$y \in [0, S_{B_iL}]$では，

$$\mu B_p'(y) = \{\mu A'(S_{A_iR}) \vee \mu A'(S_{A_iL})\} \wedge \{\mu A'(S_{A_{i+1}R}) \vee \mu A'(S_{A_{i+1}L})\},$$

$y \in [S_{B_iL}, 2co[B_i] - co[A']]$では，

$$\mu B_P'(y) = \{\mu A'(y) \vee \mu A'(2co[B_i] - y) \vee \mu B_i(y)\} \wedge \{\mu A'(S_{A_{i+1}L}) \vee \mu A'(S_{A_{i+1}R})\},$$

$y \in [2co[B_i] - co[A'], S_{B_{i+1}L}]$では，

$$\mu B_P'(y) = \mu A'(co[A']) \wedge \{\mu A'(S_{A_{i+1}L}) \vee \mu A'(S_{A_{i+1}R})\},$$

$y \in [S_{B_{i+1}L}, co[A']]$では，

$$\mu B_P'(y) = \mu A'(co[A']) \wedge \{\mu A'(y) \vee \mu A'(2co[B_{i+1}] - y) \vee \mu B_{i+1}(y)\},$$

$y \in [co[A'], S_{B_iR}]$では，

$$\mu B_P'(y) = \{\mu A'(y) \vee \mu A'(2co[B_i] - y) \vee \mu B_i(y)\} \wedge \mu A'(co[A']),$$

$y \in [2co[B_{i+1}] - co[A'], S_{B_{i+1}R}]$では，

$$\mu B_p'(y) = \{\mu A'(S_{A_iR}) \vee \mu A'(S_{A_iL})\} \wedge \mu A'(co[A']),$$

$y \in [2co[B_{i+1}] - co[A'], S_{B_{i+1}R}]$では，

$$\mu B_P'(y) = \{\mu A'(S_{A_iL}) \vee \mu A'(S_{A_iR})\} \wedge \{\mu A'(y) \vee \mu A'(2co[B_{i+1}] - y) \vee \mu B_{i+1}(y)\},$$

$y \in [S_{B_{i+1}R}, 1]$では，

$$\mu B_p'(y) = \{\mu A'(S_{A_iR}) \vee \mu A'(S_{A_iL})\} \wedge \{\mu A'(S_{A_{i+1}R}) \vee \mu A'(S_{A_{i+1}L})\}.$$

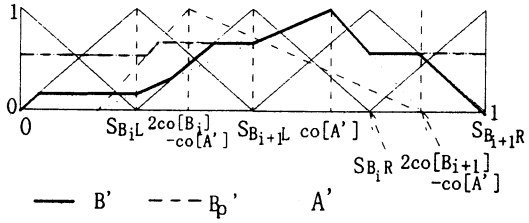


図8 sup-論理積での多重推論と並列推論の違い

各区間ごとの並列推論をまとめてみる．例えば，図8のような事実A'のとき，sup-論理積では次のような推論結果B', B_p'になる．

5．並列推論の計算効率性

n重ファジィ推論で，ベース集合$[0,1]$をm分割する．多重推論と並列推論の計算時間の違いについて調べる．
1）多重推論，つまり式(2.6)のとき，各ルールのANDで$m^2(n-1)$，合成規則で$m^2(m-1)$の計算時間がかかる．結局，

$$m^2(m-1) \cdot m^2(n-1) = (n-1)m^4(m-1) \qquad (5.1)$$

となる．
2）並列推論，つまり式(2.7)のとき，各ルールの推論で$m^4(m-1)$，今回の前後件の設定では2つのルールのみを用いればよいので，計算時間は

$$2m^4(m-1)$$

となる．並列推論における補正量を決める計算時間について考える．論理積における補正が一番計算時間がかかるので，これについて考える．

ルールのコア間の分割数 ： $\dfrac{m}{n-1}$，

コア間ことの補正計算時間 ： $\dfrac{2m}{n-1}$，

補正するコア間の数は最大 ： $n-2$個，

であるから，補正最大時間は，

$$\frac{2m(n-2)}{n-1},$$

である．結局計算時間は，

$$2m^4(m-1) + \frac{2m(n-2)}{n-1}, \qquad (5.2)$$

となる．
式(5.1)と(5.2)をくらべると，ルールの数が4以上になると並列推論の方が計算時間はかからない．つまり，ルールの数が多くなればなるほど並列推論の方が計算時間効率が良くなることがわかる．

6．おわりに

並列推論を多重推論と一致させるためには，各推論の結果の動きがどのようになっているのかを把握していなければならない．この動きを把握することで補正量を求めることができ，並列推論を可能にすることができる．しかも，ルール数や多重ファジィ推論を行う回数が増えてくると並列推論の方が計算効率がよくなることがわかった．今後の課題としては，他の環境設定やファジィ関係についても検討していく必要があると思う．

7．参考文献

[1]I.B.Turksen and Y.Tian : Combination of rules or their consequence in fuzzy expert systems, Fuzzy Sets and Systems, Vol.58, pp3-40(1993)
[2]Didier Dubois and Henri Prade : Fuzzy Sets in Approximate Reasoning,Part 1 : Inference with Possibility distrubutin,Fuzzy Sets and Systems, Vol.40,pp.143-202(1991)
[3]前田，井室，村上：多重多段ファジィ推論におけるあいまいさの広がりについて－三角型メンバーシップ関数を持つファジィ推論－，日本ファジィ学会誌，Vol. 7, No. 1, pp113-130(1995)

連絡先
〒804 福岡県北九州市戸畑区仙水町1－1
九州工業大学 工学部 情報工学教室
前田 博
TEL 093－871－1931（内）434
FAX 093－871－5835
E-mail : nobusada@mura.comp.kyutech.ac.jp

ルカシェヴィッツ含意を用いたファジィ論理における導出規則

The Resolution rule on Fuzzy Logic adopted Lukaiewicz's implication

○安井 浩之　　向殿 政男
Hiroyuki YASUI　　Masao MUKAIDONO

明治大学 理工学部 情報科学科
Dept. of Computer Science ,Meiji Univ.

Abstract:The resolution principle on fuzzy logic that is considered an effective inference method has been researched by Lee[2] and Mukaidono[3]. But, there are various implications on fuzzy logic and the most of them can't be expressed by clause (disjunction) formed formulae. This means the above method can't be applied to them.

In this paper, we propose the another inference method, Mathmatical inference, and define the derivation method on fuzzy logic adopted Lukasiewicz implication.

1 はじめに

ファジィ論理における推論については，導出原理の研究がLeeや向殿によって既になされてきた．それらは2値論理における節形式の推論法をファジィ論理に拡張したものである．
しかし，ファジィ論理においていくつも提案されている含意のうち，節形式に書き換えられるものはKleene-Dienes含意のみである．その他の含意演算を含んだ論理式における推論を考える場合は，Leeや向殿らによってなされた研究は適用できない．
本研究では含意演算を含んだ論理式における推論法の一つとして数理的推論を定義する．そして数理的推論の1つであるLukaiewiczの含意を用いたファジィ論理における推論を示し，ファジィPrologのためにこの推論に基づく導出規則を定義する．

2 ファジィ論理における数理的推論

ファジィ論理における推論に関しては，Lee[2]や向殿[3]らによってなされたファジィ論理における導出原理の研究がある．これらは，節形式の推論をファジィ論理に拡張するものであり，形式的な推論である．
しかし，含意演算を含んだ論理式における推論を考えた場合，節形式でも表現可能なKleene-Dienes含意以外のファジィ論理における多様な含意演算を扱うことはできない．
また，Leeは真理値0.5以上の解釈でのみ成立し，向殿も推論結果に相補項という項を含んでいて，具体的な推論結果の真理値を計算する上で問題が残っている．
さて，ファジィ論理における推論を考える上で，次の要請が広く認められている．[3]

ファジィ論理における推論のための要請1
前提がφ,ψ，その推論の帰結が$\Pi(\varphi,\psi)$であるということは，任意の解釈Iにおいて，

$$/\varphi/_I * /\psi/_I \leq /\Pi(\varphi,\psi)/_I$$

を満足することである．$*$は2つの前提を合成するための合成演算を意味しており，$/\varphi/_I$はある解釈Iにおいて命題φが取る真理値を表している．
この要請は，いかなる解釈においても推論の帰結は，前提を合成したものよりも，より確からしくなければならないことを主張している．
ファジィ論理における含意演算を含んだ論理式の推論が，Leeの立場と同様に形式的には2値論理の推論と同じと考えた場合，この要請から含意演算と合成演算が満たすべき条件を得ることができる．
ここで我々は，この要請とは異なるもう一つの要請を提案する．ただしこの要請は，ファジィ論理における推論は形式的には2値論理における推論と等しい，とする立場に基づくものである．

ファジィ論理における推論のための要請2
推論における前提は制約であり，その推論結果はその制約を満足しなければならない．
つまり，論理式を連立方程式としてとらえ，その解である推論の帰結の真理値を数学的に求めることになる，という要請である．前提を制約と見なして，そこから推論の帰結の真理値を求めることは，きわめて自然な発想といえる．
この場合，前提を合成する合成演算は存在しない．
この要請2に基づいて数理的推論を定義する．

定義 1 数理的推論
ファジィ論理における数理的推論とは，論理式を連立方程式としてとらえ，その解である推論の帰結の真理値を数学的に求める推論法であり，形式的には2値における推論と同じものである．

この2つの要請を満足するためには，要請2によって解かれた推論結果の真理値が，要請1の合成演算による計算結果と等しくなる必要がある．
その条件を満足する含意演算と合成演算の組合せを良く知られた演算の中から考慮した結果，Lukaiewicz含意とLukaiewicz積（限界積）がもっとも適した組合せであると判断した．

3 Lukaiewicz含意を用いたファジィ論理における推論

Lukaiewicz含意を用いたファジィ論理の推論を示す．
[0,1]の任意の値を取る変数α,βに関して，

定義 2 含意，合成演算

Lukaiewicz含意　$\alpha \rightarrow \beta = min\{1-\alpha+\beta, 1\}$

Lukaiewicz積　$\alpha \odot \beta = max\{\alpha+\beta-1, 0\}$

命題 modus ponens

$$\alpha \odot (\alpha \rightarrow \beta) \leq \beta$$

さらにこのmodus ponensを一般化した推論規則を示す．

定理 1 前提$\varphi \rightarrow \alpha$，$\alpha \wedge \psi \rightarrow \beta$から，$\varphi \wedge \psi \rightarrow \beta$が推論される．

$$(\varphi \rightarrow \alpha) \odot (\alpha \wedge \psi \rightarrow \beta) \leq \varphi \wedge \psi \rightarrow \beta$$

証明

$$\begin{aligned}
&(\varphi \rightarrow \alpha) \odot (\alpha \wedge \psi \rightarrow \beta) \\
&= ((\varphi \rightarrow \alpha) \odot (\alpha \rightarrow \beta)) \vee ((\varphi \rightarrow \alpha) \odot (\psi \rightarrow \beta)) \\
&\leq (\varphi \rightarrow \beta) \vee ((\varphi \rightarrow \alpha) \odot (\psi \rightarrow \beta)) \\
&\leq (\varphi \rightarrow \beta) \vee (\psi \rightarrow \beta) \\
&= \varphi \wedge \psi \rightarrow \beta
\end{aligned}$$

（証明終）

今，具体的な真理値を割り当てた論理式の集合（モデル）を考える．その時，この推論規則を用いて得られた推論結果の真理値は，前提として選んだ式に対するものに過ぎず，別の式を選ぶことによってより大きい真理値を得られる可能性も存在している．そこで，最大の答を得るためにモデル全体を考慮した推論法を考える．

ここではファジィPrologのために，Horn節の形に限った一階ファジィ述語論理について考える．
また普通のPrologと同様に，頭部だけの式を事実式，その他を規則式と呼ぶものとする．

定義 3 モデル
一階ファジィ述語論理における $Horn$ 節形式の論理式の集合 L におけるモデルとは，そのファジィ部分集合 A で定義される．ただし，A のサポートは有限である．このとき A の要素である論理式の取るべき真理値は，モデル A を定義する写像 $\mu_A : L \to [0,1]$ により，与えられる．

定義 4 妥当解釈，最小解釈
モデル A における妥当解釈 T とは L 上の全ての式 ε に対して，$/\varepsilon/_T \geq \mu_A(\varepsilon)$ を満たすような解釈をいう．また，ある式 χ における最小解釈 Mi とは $/\chi/$ を最小にするような妥当解釈をいう．

$$Mi^A(\chi) = \inf_T\{/\chi/_T\}$$

定義 5 帰結
モデル A の帰結とは，$Mi^A(\chi) > 0$ を満足する式 χ をいう．

つまり，最小解釈が 0 であるような式は公理系の帰結とは呼べない．

定義 6 導出規則
モデル A に対して A' を A から導出されたモデルと呼び $A \Rightarrow A'$ と表す．

- *I.* 事実式 ψ に関して
  - 事実式 $\pi \neq \psi$ の場合
    - $\mu_{A'}(\pi) = \mu_A(\pi)$
  - ψ の場合
    - $\mu_{A'}(\psi) = \max\{/\varphi/_A + \mu_A(\varphi \to \psi) - 1, \mu_A(\psi)\}$
- *II.* 規則式 $\rho \wedge \dot{\varphi} \to \psi$ に関して
  - 規則式 $\chi \neq \rho \wedge \varphi \to \psi$ の場合
    - $\mu_{A'}(\chi) = \mu_A(\chi)$
  - $\rho \wedge \varphi \to \psi$ の場合
    - $\mu_{A'}(\rho \wedge \varphi \to \psi) = \max\{\mu_A(\rho \to \pi) + \mu_A(\pi \wedge \varphi \to \psi) - 1, \mu_A(\rho \wedge \varphi \to \psi)\}$
- *III.* 代入 θ に関して
  - 式 $\chi' = \chi\theta$ の場合
    - $\mu_{A'}(\chi') = \max\{\mu_A(\chi), \mu_A(\chi')\}$

定義 7 最大導出，妥当モデル
式 χ に関して I,II,III によって A から導出される全てのモデル A' を考えたとき，

$$Md^A(\chi) = \sup\{A'(\chi) | A \Rightarrow A'\}$$

を最大導出と呼び，そのモデル A' を妥当モデルと呼ぶ．始めに与えられるモデル（原始モデル）は妥当モデルと見なす．

定義 8 無意味な導出
無意味な導出とは，導出結果として得られた式 χ が $Md^A(\chi) = 0$ である場合をいう．

ここで，$/\varphi/_A$ とは $\varphi = \psi_1 \wedge \cdots \wedge \psi_m$ であるとすると，原始モデル A において事実式 ψ_i が存在していて $(\mu_A(\psi_i) > 0)$ かつ ψ_i が導出されない場合は

$$/\varphi/_A = \mu_A(\psi_1) \wedge \cdots \wedge \mu_A(\psi_m)$$

また，A が事実式 ψ_i の妥当モデルである場合は

$$/\varphi/_A = Md^A(\psi_1) \wedge \cdots \wedge Md^A(\psi_m)$$

で与えられる．

問題はこの導出法がモデルに対して，完全かつ健全であるかという点である．

完全性 原始モデル A の任意の帰結 χ は，導出法により導出される．$(Mi^A(\chi) \leq Md^A(\chi))$

健全性 導出された任意の式 χ は，原始モデル A の帰結である．$(Md^A(\chi) \leq Mi^A(\chi))$

有限のモデルにおける導出法を I,III に限った場合の健全性は F.Klawonn, R.Kruse[1] によって示されている．また帰結が原始式（規則式）ψ に限った場合は完全性も示されいる．このとき，$Md^A(\varphi) = Mi^A(\varphi)$ である．我々はさらに，II の健全性と次の定理を示した．

II の健全性
証明 規則式 $\rho \wedge \varphi \to \psi$ の任意の妥当解釈 T において，定理 1 と妥当解釈の定義より

$$\begin{aligned} &/\rho \wedge \varphi \to \psi/_T \\ &\geq \max\{/\rho \to \pi/_T + /\pi \wedge \varphi \to \psi/_T - 1, 0, a(\rho \wedge \varphi \to \psi)\} \\ &\geq \max\{\mu_A(\rho \to \pi) + \mu_A(\pi \wedge \varphi \to \psi) - 1, \mu_A(\rho \wedge \varphi \to \psi)\} \\ &= \mu_{A'}(\rho \wedge \varphi \to \psi) \end{aligned}$$

よって，任意の妥当解釈による値が導出されたモデル A' での値より大きいのだから，$Md^A(\varphi) \leq Mi^A(\varphi)$ （証明終）

定理 2 導出可能な事実式を満足する最小解釈が存在する．

証明 導出可能な全ての事実式の集合を D とすると，原始モデル A はサポートが有限であることから，D も有限集合である．
いま，A から事実式 $\psi_1 \in D$ に関する妥当モデル A' が導出されたとする．この導出は健全であるから，A' から，さらに別の事実式 $\psi_2 \in D$ に関する妥当モデル A'' を得ることが出来る．この A'' は ψ_1 の妥当モデルでもある．
D は有限であるのだから，全ての事実式に共通の妥当モデル $A^{(|D|)}$ を得ることが出来る．
ここで，事実式に関してはこの導出は完全であるのだから，$Md^A(\varphi_i) = Mi^A(\varphi_i)$ $(i \in I_{|D|})$ より
全ての事実式を満足する最小解釈を得る． （証明終）

この定理は，ある事実式 ψ の最小解釈が別の事実式 π の最小解釈と矛盾しないものであるということを意味している．

4 まとめ

今回定義した Lukasiewicz 含意を用いたファジィ論理における推論法は，解釈の下限値を与えるものであり，必然性真理値と考えることが出来る．つまり今回与えた証明は，以前に提案した Lukasiewicz 含意に基づくファジィ Prolog[4, 5] の動作に論理的な保証を与えるものである．
今後は否定項の導入による部分的矛盾の取り扱いや，ファジィ推論を行うために明かにしなければならない点である，必然性真理値を与えるファジィ述語と普通のファジィ集合との関係について明白にしなければならない．

参考文献

[1] F.Klawonn,R.Kruse:A Lukasiewicz Logic Based Prolog.,Mathware & Soft Computing 1(1994)5-29

[2] R.C.T.Lee: Fuzzy logic and the resolution principle. J. of the Assoc. for Computing Machinery 19(1971)109-119

[3] M.Mukaidono: Fuzzy inference in resolution style. In: Fuzzy Sets and Possibility Theory - Recent Developments. Edited by R.R. Yager, Pergamon Press(1982)224-231

[4] H.Yasui, M.Mukaidono: Postulates and proposals on Fuzzy Prolog. Proceeding of EUFIT '94, Aachen, Germany

[5] H.Yasui,Y.Hamada,M.Mukaidono:Fuzzy Prolog Based on Lukasiewicz Implication and Bounded Product. FUZZ-IEEE/IFES95, vol.III (1995)949-955

連絡先

〒 214
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科
安井浩之
e-mail: yasui@cs.meiji.ac.jp

TA1-4

前提と結論の満たすべき関係によるインプリケーション関数のパラメータ化

Parameterization of an implication function using the relations to be satisfied between a premise and the conclusion

尾山　卓也
Takuya OYAMA
(株)インテック・システム研究所
INTEC Systems Laboratory Inc.

田野　俊一
Shun'ichi TANO
(株)日立製作所システム開発研究所
Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.

In this paper, we propose a parameterized implication function, defined to satisfy some desirable relations between the premise and the conclusion of rules used in fuzzy inference. The desirable relations are defined using some parameters indicating the nature of the implication. We also demonstrate some tuning simulations of the parameters used in the implication function using the tuning mechanism of a fuzzy inference tool named FINEST.

1. はじめに

筆者らは国際ファジィ工学研究所において、ことば(自然言語や記号)で表された知識に内在するあいまいさの処理方法／利用方法を明らかにすることを目標とし、FINEST (Fuzzy Inference Environment Software with Tuning)と呼ぶあいまい推論ソフトウエア環境を開発した[1,2]。FINESTは以下の研究に基づき設計されている：(a) ルール前件部の相関関係を表現する結合演算子[3]、(b) インプリケーション方法の一般化、(c) あいまいさの減少のありうるコンビネーション方法[4]、(d) あいまい後ろ向き推論の定式化[5]、(e) (a)から(d)の成果を含むファジィ推論における自動チューニング手法[6]。本稿は、研究テーマ(b)に関連するものである。

現在、多種多様なインプリケーション関数が提案され、その選択により様々な性質のファジィ推論を実現することができる。また、インプリケーション関数の分類は数多くなされてきた[7,8]。しかし実際の応用において、適切なインプリケーション関数の選択は非常に困難であった (e.g.[9])。そこで、パラメータを変化させることで色々なインプリケーション関数を表現できるようなパラメータ化インプリケーション関数を定義し、前述の(e)の手法により実際の応用に適するようにパラメータを自動的にチューニングすることで、インプリケーション関数の選択作業の軽減をはかることを考えた。

また、それぞれのパラメータがIF-THENルールの性質／意味を表わすようにインプリケーション関数を定義したとすれば、パラメータチューニングにより適切なインプリケーション関数を選択することによって、ルールの性質／意味を明確にすることができる。

本稿では、ファジィ推論における、満たすべき前提と結論の関係からインプリケーション関数の満たすべき制約を考え、パラメータ化インプリケーション関数を定義する。ここで、前提と結論の関係の表現には、インプリケーションの性質を表わすパラメータが用いられている。

2. 成立すべき前提と結論の関係

ルール "If x is A then y is B" と前提 "x is A' " から結論 "y is B' " を導く形式の推論方式の最も一般的な計算式は、式(1)で示される。深海らは、この形式の推論において、一般に成立すべきと考えられる前提と結論の関係を表1のように設定している[7]。

$$\mu_{B'}(y)=\sup_{x}\left\{\mu_{A'}(x)\wedge I\left(\mu_A(x),\mu_B(y)\right)\right\} \tag{1}$$

表1　前提と結論の成立すべき関係

		関係	
I		*x is A*	⇒ *y is B*
II	II-1	*x is very A*	⇒ *y is very B*
	II-2	*x is very A*	⇒ *y is B*
III		*x is more or less A*	⇒ *y is more or less B*
IV	IV-1	*x is not A*	⇒ *y is unknown*
	IV-2	*x is not A*	⇒ *y is not B*

表1において、"P⇒Q"は前提Pが与えられたとき結論はQであるべきことを示すものとする。

関係II-1と関係II-2、関係IV-1と関係IV-2は互いに相反するが、深海らはこれら相反する関係のいずれが成立するかにより、推論形態を表2の4つのタイプに分類し、それぞれのための4つのインプリケーション関数を提案している。

表2　推論形態の分類

	満たすべき関係	インプリケーション関数
タイプ1	I、II-1、III、IV-1	$I_s(a,b)=\begin{cases}1 & a\le b\\ 0 & a>b\end{cases}$
タイプ2	I、II-2、III、IV-1	$I_g(a,b)=\begin{cases}1 & a\le b\\ b & a>b\end{cases}$
タイプ3	I、II-1、III、IV-2	$I_{sg}(a,b)=\begin{cases}1-b & a<b\\ 1 & a=b\\ 0 & a>b\end{cases}$
タイプ4	I、II-2、III、IV-2	$I_{gg}(a,b)=\begin{cases}1-b & a<b\\ 1 & a=b\\ b & a>b\end{cases}$

3. 関係の拡張

本節では、前節で示したファジィ推論の満たすべき前提と結論の関係の拡張を考える。関係の拡張において、インプリケーションの性質を表わすいくつかのパラメータを用いた。

3.1 関係IIの拡張と制約

関係IIは、ルール前件部のファジィ集合 A にあいまいさを減少させる限定がなされた very A を前提にした場合の、望ましい結論について示したものである。関係II-1、関係II-2は、限定の強さを考慮すると、それぞれ関係II-1'、関係II-2'のように拡張できる。

関係II-1': $x\ is\ (very)^k A \Rightarrow y\ is\ (very)^k B \qquad k=1,2,\cdots$

関係II-2': $x\ is\ (very)^k A \Rightarrow y\ is\ B\ \left(=(very)^0 B\right) \quad k=1,2,\cdots$

$$(very)^k A = \overbrace{very(very(\cdots(very}^{k} A)\cdots))$$

関係II-1'は、前件部に加えられたあいまいさを減らす限定が、後件部に同じ強さだけおよぶ関係であり、関係II-2'は、その限定が後件部に全くおよばない関係である。

さらに、前件部の限定の強さが後件部にある程度だけおよぶ関係を考える。そのような関係は、限定の後件部におよぶ程度を表わすパラメータ α（$0 \leq \alpha \leq 1$）により次のように表現できる（ここでは、αkが非負整数の場合のみを考える）。

関係II-3: $x\ is\ (very)^k A \Rightarrow y\ is\ (very)^{\alpha k} B \qquad k=1,2,\cdots$

関係II-3は、$\alpha=1$、$\alpha=0$の場合においてそれぞれ関係II-1'、関係II-2'を含んでいる。

関係II-3において、αkが非負整数ではない場合、さらにはk≧0なるkの場合についても議論するために、$(very)^k$ A、$(very)^{\alpha k}$ Bを次のように表現し直す。

$$(very)^k A = very\left(very\left(\cdots(very\ A)\cdots\right)\right) = \left(\left(A^2\right)^{\cdots}\right)^2$$

$$= A^{\overbrace{2\times\cdots\times 2}^{k}} = A^{2^k} = A^m$$

$$(very)^{\alpha k} B = B^{2^{\alpha k}} = B^{m^\alpha}$$

$$\left(m = 2^k \geq 1,\quad \mu_{P^n}(p) = \left(\mu_P(p)\right)^n\right)$$

これにより、$m=2^k \geq 1$（k≧0）の場合へ関係II-3を拡張すると関係II-3'になる。関係II-3'はm＝1のとき関係Iを含んでいるため、関係Iの拡張ともみなせる。

関係II-3': $x\ is\ A^m \Rightarrow y\ is\ B^{m^\alpha} \quad (m \geq 1)$

式(1)を用いると、関係II-3'が成り立つためには式(2)が成り立たなければならず、任意のA, Bに対して式(2)が成り立つための十分条件として式(3)が考えられる。すべてのm（m≧1）について式(3)が成り立つための制約は、制約1で表わされる。

$$\left(\mu_B(y)\right)^{m^\alpha} = \sup_x\left\{\left(\mu_A(x)\right)^m \wedge I\left(\mu_A(x), \mu_B(y)\right)\right\} \tag{2}$$

$$b^{m^\alpha} = \sup_a\left\{a^m \wedge I(a,b)\right\} \tag{3}$$

制約1

when $a=b$

- *if* $\alpha=0$ *and* $b\neq 1$: $0 \leq I(a,b) \leq 1$
- *else* : $I(a,b) \geq b$

when $b<a\leq 1$

- *if* $\alpha=0$ *and* $a=1$: $I(a,b)=b$
- *else if* $\alpha=0$ *and* $a\neq 1$: $I(a,b)\leq b$
- *else if* $\alpha=1$ *or* $a=1$ *or* $b=0$: $I(a,b)=0$
- *else* : $I(a,b) = a^{(\log b/\log a)^{1/(1-\alpha)}}$

3.2 関係IIIの拡張と制約

関係IIIは、ルール前件部のファジィ集合 A にあいまいさを増加させる限定がなされた more or less A を前提にした場合の、望ましい結論について示したものである。関係IIの場合と同様に、限定の強さを考慮すると関係IIIはパラメータ δ（$1 \leq \delta$）を用いて次のように拡張できる(ただし、δkが非負整数の場合のみを考える）。

関係III': $x\ is\ (more\ or\ less)^k A \Rightarrow y\ is\ (more\ or\ lessy)^{\delta k} B \qquad k=1,2,\cdots$

ここで、δが大きくなれば結論はあいまいになるので、δはあいまいさの拡大の度合を表わしていると考えられる。$\delta=1$、k=1 の場合、関係III'は関係IIIと一致する。

関係III'において、δkが非負整数以外の場合、さらにはk≧0なるkの場合についても議論するために、(more or less)^k A、(more or less)$^{\delta k}$ Bを次のように表現し直す。

$$(more\ or\ less)^k A = more\ or\ less\left(\cdots(more\ or\ less\ A)\cdots\right)$$

$$= \left(\left(A^{1/2}\right)^{\cdots}\right)^{1/2} = A^{\overbrace{\frac{1}{2}\times\cdots\times\frac{1}{2}}^{k}} = A^{(1/2)^k} = A^m$$

$$(more\ or\ less)^{\delta k} B = B^{(1/2)^{\delta k}} = B^{m^\delta} \quad \left(0 < m = (1/2)^k \leq 1\right)$$

これにより、$0<m=(1/2)^k\leq 1$（k≧0）の場合へ関係III'を拡張すると関係III"になる。関係III"はm＝1のとき関係Iを含んでいるため、関係Iの拡張ともみなせる。

関係III": $x\ is\ A^m \Rightarrow y\ is\ B^{m^\delta} \quad (0 < m \le 1)$

関係II-3'と同様に、関係III"が成り立つための十分条件として式(4)が考えられる。

$$b^{m^\delta} = \sup_a \left\{ a^m \wedge I(a,b) \right\} \tag{4}$$

しかし、$\delta > 1$のとき、すべてのm（$0 < m \le 1$）について式(4)を成立させることはできない。m=m0での式(4)成立のためのI(a, b)の制約とm=m1（m1>m0）での制約は同時に成り立たないからである。$\delta = 1$のとき、すべてのmで成り立つことは可能で、そのための条件は、制約2である。そこで、パラメータδは値を1に固定した。

制約2

$when\ a = b \qquad I(a,b) = 1$

$when\ b < a \le 1 \quad I(a,b) \le b$

3.3 関係IVの拡張と制約

"If x is A then y is B" の形の知識には、"x is not A" の場合に関する情報を陽には含んでいないが、我々が日常この知識を使用する場合、暗黙のうちに"If x is A then y is B else y is not B" の意味で使用する場合も多い。その場合は、"x is not A" なる前提に対して "y is not B" などが導かれる（関係IV-2）。つまり、下に示すルール1が存在するとき、ルール2も同時に存在する場合がある。そこで、ルール2をルール1の裏ルールと呼び、ルール1が存在するときにその裏ルールであるルール2が成り立つ度合をパラメータγ（$0 \le \gamma \le 1$）で表わす。つまり、$\gamma = 1$のときルール1はルール2の意味も持っていると考えられる。逆に、$\gamma = 0$のときはルール1はルール3の意味を持っていると考えられる。

次に、γを用いてルール2とルール3を統合したルール4を考え、ルール1が存在するときルール4も同時に存在すると仮定し、議論を進める。

ルール1：If x is A then y is B
ルール2：If x is not A then y is not B
ルール3：If x is not A then y is unknown
ルール4：If x is not A
then y is γ (not B)+(1-γ)unknown

$$\mu_{\gamma(not\ B)+(1-\gamma)unknown}(y) = \gamma\mu_{not\ B}(y) + (1-\gamma)\mu_{unknown}(y)$$
$$= 1 - \gamma\mu_B(y)$$

ルール4は一つのルールであるので、ルール4に拡張関係（関係II-3'、関係III"）を適用する（関係IV-3,4）。

関係IV-3:

$$x\ is\ (not\ A)^m \Rightarrow y\ is\ \left(\gamma\ not\ B + (1-\gamma)unknown\right)^{m^\beta}$$
$$m \ge 1, 0 \le \beta \le 1$$

関係IV-4:

$$x\ is\ (not\ A)^m \Rightarrow y\ is\ \left(\gamma\ not\ B + (1-\gamma)unknown\right)^{m^\rho}$$
$$0 < m \le 1, \rho = 1$$

関係IV-3,4を関係IV-1,2を統合拡張した関係とする。関係IV-3,4による制約は、制約1、2を求めた手順と同様に導かれ、それぞれ制約3、制約4で表わされる。

制約3

$when\ 0 \le a < \gamma b$

$if\ \beta = 0\ and\ a = 0 \qquad I(a,b) = 1 - \gamma b$

$else\ if\ \beta = 0\ and\ a \ne 0 \quad I(a,b) \le 1 - \gamma b$

$else\ if\ \beta = 1\ or$

$a = 0\ or\ \gamma b = 1 \qquad I(a,b) = 0$

$else \qquad I(a,b) = (1-a)^{(\log 1-\gamma b / \log 1-a)^{1/(1-\beta)}}$

$when\ a = \gamma b$

$if\ \beta = 0\ and\ \gamma b \ne 0 \qquad 0 \le I(a,b) \le 1$

$else \qquad I(a,b) \ge 1 - \gamma b$

制約4

$when\ 0 \le a < \gamma b \quad I(a,b) \le 1 - \gamma b$

$when\ a = \gamma b \qquad I(a,b) = 1$

4. パラメータ化インプリケーション関数の定義

これまで、深海らの提案する関係をそれぞれ拡張した。拡張関係が要求するインプリケーション関数の制約は、制約1,2,3,4で示される。これらの制約により、インプリケーション関数を式(5)のように定義した。

$$I(a,b) = \begin{cases} \left.\begin{array}{ll} 1-\gamma b & if\ \beta = 0 \\ 0 & else\ if\ \beta = 1\ or \\ & a = 0\ or\ \gamma b = 1 \\ (1-a)^{(\log 1-\gamma b / \log 1-a)^{1/(1-\beta)}} & else \end{array}\right\} 0 \le a < \gamma b \\ \left.\begin{array}{ll} 1 & \end{array}\right\} \gamma b \le a \le b \\ \left.\begin{array}{ll} b & if\ \alpha = 0 \\ 0 & else\ if\ \alpha = 1\ or \\ & a = 1\ or\ b = 0 \\ a^{(\log b / \log a)^{1/(1-\alpha)}} & else \end{array}\right\} b < a \le 1 \end{cases} \tag{5}$$

ここで、αは前件部に加えられたあいまいさを減らす限定が後件部におよぶ程度、βは裏ルールにおける前件部に加えられたあいまいさを減らす限定が後件部におよぶ程度、γは裏ルールの成立の度合を表わす。もちろん、$\gamma = 0$のときはβは意味を持たない。図3に$\alpha = \beta = \gamma = 0.5$の場合の、2つの視点からのグラフを示す。

このインプリケーション関数は、表2に示すインプリケーション関数を特殊な場合として含んでいる（表3）。

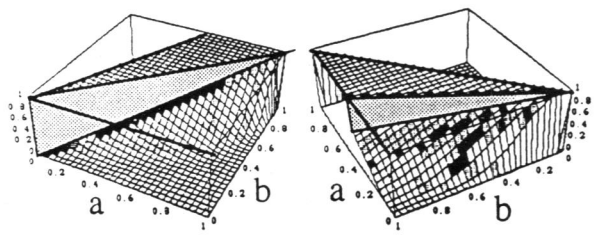


図3　提案インプリケーション関数のグラフ

表3　Is,Ig,Isg,Iggのためのパラメータの値

	α	β	γ
Is	1		0
Ig	0		0
Isg	1	0	1
Igg	0	0	1

5. パラメータチューニング

本節ではファジィ集合からなる教師データを用いたファジィ推論のチューニング方法[6]により、提案インプリケーション関数のパラメータチューニングを試みる。例題では、国際ファジィ工学研究所で開発した外国為替取引支援エキスパートシステムFOREX[9]で用いている、次の経済知識を扱う。

もし、　米長期金利(L-IR)の上昇圧力が強い(U-pre)
ならば　米住宅投資(HI)は下降圧力が強い(D-pre)

FOREXの開発の経験により、経済知識にはグラジュアル性[10,11]が存在する場合が多いことがわかった。そして、FOREXの開発においては、Gradual Equivalence [10,11]と呼ばれるグラジュアル性を有するインプリケーション関数（式(6)）を採用した。

$$I(a,b)=\begin{cases}1 & a=b\\ 0 & a\neq b\end{cases} \qquad (6)$$

提案インプリケーション関数は$\alpha=\beta=\gamma=1$とすることで、Gradual Equivalenceと等しくすることができる。したがって、パラメータチューニングの結果$\alpha=\beta=\gamma=1$となるのが望ましい。

表4に示す教師データを用いて提案インプリケーション関数のチューニングを行った。ルールのファジィ述語、教師データのメンバーシップ関数はそれぞれ図4、図5に示す。

チューニングの結果、$\alpha=0.988$、$\beta=0.991$、$\gamma=1.000$となり、適切にチューニングされている。

表4　教師データ

番号	1	2	3	4	5
入力	I1	I2	I3	I4	I5
希望出力	O1	O2	O3	O4	O5

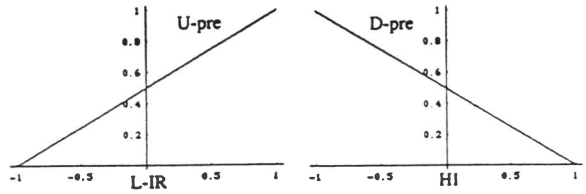


図4　ファジィ述語のメンバーシップ関数

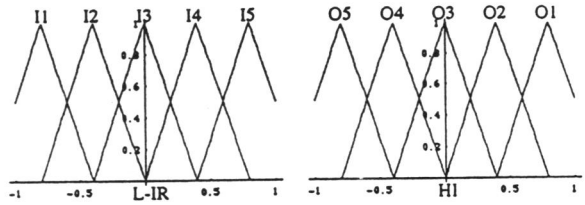


図5　教師データのメンバーシップ関数

6. おわりに

本稿では、深海らによって提案されている ファジィ推論における前提と結論の望ましい関係を、インプリケーションの性質を表わすパラメータを用いて拡張し、その関係を満たすためのインプリケーション関数の制約を示した。そして、その制約をみたす一つのパラメータ化インプリケーション関数を定義した。提案インプリケーション関数は深海らの分類した4つの推論形態のためのインプリケーション関数を特殊な場合として含んでいる。

さらに、既存のチューニング手法を用いて、与えられた入力に対して望ましい推論結果が導かれるようにパラメータをチューニングできることを実例をもって示した。

パラメータをチューニングすることは、ルールの性質を解釈すること考えられる。例えば、さきほどの例で、インプリケーション関数はGradual Equivalenceになった。つまり、対象としたルールはグラジュアル性を有していたと判断することができる。

参考文献

[1] S. Tano, T. Miyoshi, Y. Kato, T. Oyama, T. Arnould, A. Bastian, Fuzzy Inference Software - FINEST: Overview and Application Examples, Proceedings of FUZZ-IEEE/IFES'95(1995).
[2] T. Arnould, S. Tano, T. Miyoshi, Y. Kato, T. Oyama, A. Bastian, Algorithms for Fuzzy Inference and Tuning in the Fuzzy Inference Software FINEST, Proceedings of FUZZ-IEEE/IFES'95(1995).
[3] 加藤，田野，ルール前件部における相乗性の表現方法と相関関係表現への拡張，日本ファジィ学会誌，Vol 6, No. 3, pp. 549-561 (1994).
[4] 田野，アルヌー，尾山，あいまいさの減少がありうるコンビネーション関数とパラメータ学習，日本ファジィ学会誌，Vol. 7, No. 3 (1995).
[5] アルヌー，田野，区間ファジィ集合に基づく後向き推論の定式化，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 233-236 (1994).
[6] 尾山，田野，アルヌ，ファジィ入出力を持つファジィ推論に対するチューニング法，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 195-198 (1994).
[7] 深海，水本，田中，ファジィ推論について，電子通信学会論文誌，Vol. J61-D, No. 8, pp.44-53 (1978).
[8] D. Dubois and H. Prade, A typology of fuzzy "if... then..." rules, Proceedings of the Third IFSA World Congress, pp. 782-785 (1989).
[9] H. Yuize, T. Yagyu, M. Yoneda, Y. Katoh, S. Tano, M. Grabisch, and S. Fukami, Decision Support System for Foreign Exchange Trading - Practical Implementation -, Proceedings of IFES'91, pp. 971-982 (1991).
[10] Y. Katoh, H. Yuize, M. Yoneda, K. Takahashi, S. Tano, T. Yagyu, M. Grabisch, and S. Fukami, Gradual Rules in a Decision Support System for Foreign Exchange Trading, Proceedings of the second International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, Iizuka, pp. 625-628 (1992).
[11] D. Dubois and H. Prade, Gradual Inference Rules in Approximate Reasoning, Information Sciences, Vol.61, pp. 103-122 (1992).

連絡先
〒930 富山市下新町3-23（ISLビル）
インテック・システム研究所　AI研究部　尾山　卓也
Tel: 0764-44-1111　Fax: 0764-44-8126　e-mail:oyama@isl.intec.co.jp

TA2-1

学習型ファジィ知能システムとその医療への応用：知識の獲得と統合

Fuzzy AI System with a Learning Function and its Application to Medical Field: Knowledge Acquisition and Integration

前田　幹夫　　○原田　裕二　　村上　周太
Mikio MAEDA　　Yuji HARADA　　Shuta MURAKAMI

九州工業大学工学部
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: In this paper we propose a Fuzzy Artificial Intelligent System with a learning function, which is called "FAIS" short for. This system has functions which acquire new fuzzy knowledge from experiences under an unknown situation and solve some problems by deducing a new state through fuzzy inference. The purpose of constructing this system "FAIS" is also to make a system that can solve many kinds of problems in various fields. As an example, the FAIS is applied to a medical diagnosis and treatment advice system, and then the usefulness of the FAIS is discussed from the simulation results.

1　はじめに

学習型ファジィ知能システム[1]とは，学習によって知識を獲得し，知識ベースを構築し，それを適用して自主的に様々な行動を計画し，行動する人工知能システムである．また本システムが，他の一般的な知能システムと著しく異なる点は，全く未知なことにも対処するために，現実の世界で行動しながら，システムの内部で推論して(つまり仮想的な世界で)問題を解決するところである．つまり，知識が貧弱なために問題解決の方法が発見できないとき，行動を実際に起こし，それを知識として獲得し，新しい知識の獲得によって問題解決の糸口を見つけようというものである．これに対して，従来のＡＩエキスパートシステムの殆どは，学習によって獲得された知識や専門家によって教授された知識をすべて知識ベースに保存するように設計されている．その結果，知識ベースの許容量を超え，類似知識の検索時間はその知識量によって指数関数的に増大する．そこで我々は３つの知識統合手法[2]と５種類の知識に対応した知識統合アルゴリズムを考案し，ファジィ集合レベルでの知識の統合とルールレベルでの知識の統合を図り，効率的な知識ベースの構築を目指す．さらに適応事例として，医療診断・治療支援システム[3][5]への応用を試み，知識統合（又は消去）の効果を検証する．

2　システムの概要

学習型知能システムは，図１のように３つの部分で構成されている．

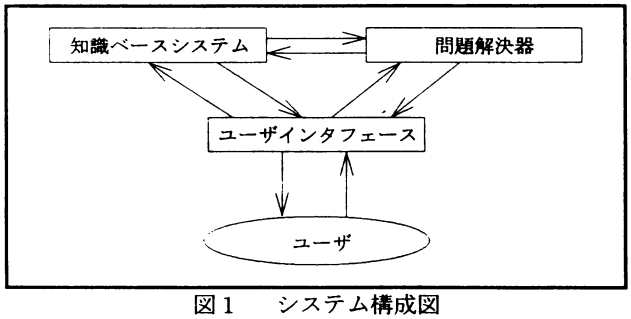


図１　システム構成図

知識ベースシステムは，知能システム(問題解決器)が学習した結果や，ユーザから教示された知識を整理して知識ベースに記憶し，獲得されたこれらの経験的な知識(ルール)を統合して，いくつかの一般的な知識を生成するという機能を持っている．また問題解決器は，知識ベースに類似知識の検索要求を出し，得られた知識を用いて学習を行いながら問題を解決し，その結果を解析した上で知識ベースに格納する．ユーザインタフェースは，ユーザによる問題の入力情報をシステムが理解できる情報に変換し，知識ベースに問い合わせを行う．また逆にシステム内部の情報をユーザが理解できる情報に変換し，ビジュアル化して出力する．

3　知識表現

システム内で獲得・生成される知識ルールは，式(3.1)～式(3.5)のような５種類の知識記述によって表される．またこれらの知識の前後件部における対象変数は，"and"又は"or"オペレータによって結合されている．ただし式(3.5)で表される知識の対象変数は，"Θ"オペレータによって結合されているので，その前後件部の論理演算子には，それぞれ"and"オペレータと"or"オペレータが混在して用いられている．

$$X_{1i} \text{ and } X_{2i} \text{ and } \cdots \text{ and } X_{mi} \rightarrow Y_{1i} \text{ and } Y_{2i} \text{ and } \cdots \text{ and } Y_{ki} \quad (3.1)$$

$$X_{1i} \text{ and } X_{2i} \text{ and } \cdots \text{ and } X_{mi} \rightarrow Y_{1i} \text{ or } Y_{2i} \text{ or } \cdots \text{ or } Y_{ki} \quad (3.2)$$

$$X_{1i} \text{ or } X_{2i} \text{ or } \cdots \text{ or } X_{mi} \rightarrow Y_{1i} \text{ and } Y_{2i} \text{ and } \cdots \text{ and } Y_{ki} \quad (3.3)$$

$$X_{1i} \text{ or } X_{2i} \text{ or } \cdots \text{ or } X_{mi} \rightarrow Y_{1i} \text{ or } Y_{2i} \text{ or } \cdots \text{ or } Y_{ki} \quad (3.4)$$

$$X_{1i} \,\Theta\, X_{2i} \,\Theta\, \cdots \,\Theta\, X_{mi} \rightarrow Y_{1i} \,\Theta\, Y_{2i} \,\Theta\, \cdots \,\Theta\, Y_{ki} \quad (3.5)$$

$X_{..}$	：前件部における対象変数
$Y_{..}$	：後件部における対象変数
m	：前件部における対象変数の数
k	：後件部における対象変数の数
i	：知識ルール番号
Θ	："and" 又は"or"を表すオペレータ

さらに式(3.1)～式(3.5)で表現される知識は，２種類の知識（経験知識と仮想知識）に分類される．つまり経験知識とは，システムが経験した“体験”に基づいて生成

される知識のことであり，仮想知識とは，複数の類似する経験知識を統合することによって生成される一般化された拡張知識のことである．

例えば式(3.6)のような経験知識が存在したとする．

$$\begin{aligned} X_{11} \text{ and } X_{21} &\rightarrow Y_{11}, \\ X_{12} \text{ and } X_{22} &\rightarrow Y_{12}, \\ X_{13} \text{ and } X_{23} &\rightarrow Y_{13} \end{aligned} \tag{3.6}$$

$\{ X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14} \} \rightarrow X_1$ ：前件部の対象変数１
$\{ X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24} \} \rightarrow X_2$ ：前件部の対象変数２
$\{ Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, Y_{14} \} \rightarrow Y_1$ ：後件部の対象変数１

このとき３つの類似する経験知識を統合することによって，式(3.7)のような拡張知識が獲得される．これを仮想知識と呼ぶ．

$$X_1 \text{ and } X_2 \rightarrow Y_1 \tag{3.7}$$

この知識が生成されたことにより，式(3.8)のような推論が可能になる．

$$X_{14} \text{ and } X_{24} \rightarrow Y_{14} \tag{3.8}$$

つまり仮想知識を用いた推論を行なうと，システムは未知の状況を推測し，その状況に早く適応することが可能になるが，この知識は拡張された知識なので，常に真である保証はない．また本システムにおいて仮想知識の生成を行う２つの方法がある．１つは継承概念を用いた仮想知識の生成で，もう１つは知識(ルール)の前後件部のファジィ集合の統合を用いた仮想知識の生成である．実際に，仮想知識を生成する方法は，２つの方法のハイブリッド方式であるが，以下では後者について言及する．

4　知識の統合と修正

知識の統合[2]とは，知識ベース内の複数の経験知識(ルール)を１つの一般知識(仮想知識)によって代替させることをいう．また知識の修正[4]とは，生成された仮想知識の信頼性をシステム自身が検証し，最終的に信頼性が確認されるまで，この知識を修正していく過程のことを指す．実際には，知識の統合は，経験知識の前後件部を統合することにより実現されるので，統合前後における知識の前後件部のファジィ集合を区別しておく必要がある．そこで我々は，本システムによって生成される２種類の知識（経験知識，仮想知識）の前後件部を表わすファジィ集合をそれぞれ経験知識ファジィ集合，仮想知識ファジィ集合と呼ぶことにする．例えば，図２のように仮想知識ファジィ集合は，熱が高い(*High*)，平常(*Normal*)，低い(*Low*)などのファジィラベルによって表されるファジィ集合のことである．

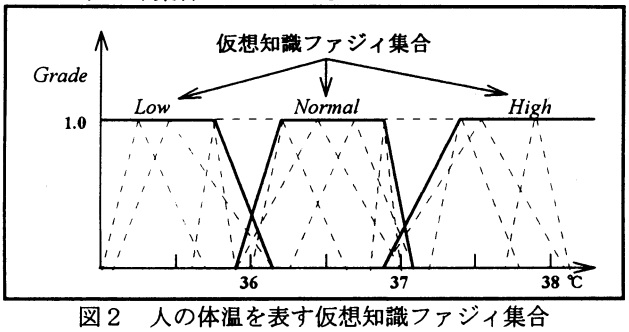


図２　人の体温を表す仮想知識ファジィ集合

ただし，図２中に点線で表現されているファジィ集合は経験知識ファジィ集合とする．このように１つの仮想知識ファジィ集合は複数個の経験知識ファジィ集合を統合することによって生成される．そこで我々は以下のような３つの知識統合手法[2]を提案した．

① 台形統合法：前後件部における複数個の経験知識ファジィ集合を１つの台形型のファジィ集合で統合する．
② ＭＡＸ統合法：前後件部における複数個の経験知識ファジィ集合の最大値からなるファジィ集合で統合する．
③ 局所統合法：コア間が狭く，密集している経験知識ファジィ集合を上記の２つの統合法を使って統合する．

これら３つの知識統合手法を用いることによって，５種類の知識(式(3.1)～式(3.5)参照)をそれぞれ異なるアルゴリズムで統合する．以下にその知識統合アルゴリズムを示す．

知識統合アルゴリズム

我々が先に定義した５種類の知識は，それぞれ記述形態が異なっているため，それらの異なる知識どうしの統合を行うことはできない．つまり，知識の統合とは同種の知識間においてのみ成立する．ただし，これらの知識には分配律，交換律，結合律が成立するため，式(3.5)の知識は式(3.1)～式(3.4)のいずれかの知識に変換される．

1) 前件部 ："and"結合　後件部： "and"結合の場合

$$\begin{aligned} &X_{11} \text{ and } X_{21} \text{ and } \cdots \text{ and } X_{m_1 1} \rightarrow Y_{11} \text{ and } Y_{21} \text{ and } \cdots \text{ and } Y_{k_1 1} \\ &X_{12} \text{ and } X_{22} \text{ and } \cdots \text{ and } X_{m_2 2} \rightarrow Y_{12} \text{ and } Y_{22} \text{ and } \cdots \text{ and } Y_{k_2 2} \\ &\qquad\vdots \\ &X_{1i} \text{ and } X_{2i} \text{ and } \cdots \text{ and } X_{m_i i} \rightarrow Y_{1i} \text{ and } Y_{2i} \text{ and } \cdots \text{ and } Y_{k_i i} \end{aligned} \tag{4.1}$$

式(4.1)のようなi個の経験知識(ルール)が存在している時，これらを統合するには，次の制約条件を満たさなければならない．

条件１：統合する経験知識間の前後件部における対象変数の数は，一致していなければならない．
即ち
$$m_1 = m_2 = \cdots = m_i$$
$$k_1 = k_2 = \cdots = k_i$$
を充足しているときである．

条件２：統合する経験知識間の前後件部における対象変数の種類は，同じでなければならない．

この種の知識は，これらの制約条件を満たす時にのみ統合される．実際には，上の２つの制約条件のもとに統合の対象となる経験知識が選出され，それらの後件部の各対象変数ごとに，クラスタリングが行われる．クラスタ化された後件部は，その１つのクラスタごとにファジィ集合レベルでの統合が図られ，そのそれぞれに対して後件部の仮想知識ファジィ集合が生成される．また後件部の統合によって生成された各仮想知識ファジィ集合に対して，その統合のもとになった経験知識の前件部を後件部と同様にして統合する．このようにして統合された前後件部の仮想知識ファジィ集合が，新たに生成される仮想知識の対象変数を表すファジィ集合となる．

2) 前件部 ："and"結合　後件部： "or"結合の場合

$$X_{11} \text{ and } X_{21} \text{ and } \cdots \text{ and } X_{m_1 1} \rightarrow Y_{11} \text{ or } Y_{21} \text{ or } \cdots \text{ or } Y_{k_1 1}$$
$$X_{12} \text{ and } X_{22} \text{ and } \cdots \text{ and } X_{m_2 2} \rightarrow Y_{12} \text{ or } Y_{22} \text{ or } \cdots \text{ or } Y_{k_2 2}$$
$$\vdots$$
$$X_{1i} \text{ and } X_{2i} \text{ and } \cdots \text{ and } X_{m_i i} \rightarrow Y_{1i} \text{ or } Y_{2i} \text{ or } \cdots \text{ or } Y_{k_i i} \quad (4.2)$$

式(4.2)のようなi個の経験知識(ルール)が存在している時，これらを統合するには，次の制約条件を満たさなければならない．

条件１：統合する経験知識間の前件部における対象変数の数は，一致していなければならない．
即ち
$$m_1 = m_2 = \cdots = m_i$$
を充足しているときである．

条件２：統合する経験知識間の前件部における対象変数の種類は，同じでなければならない．また後件部は対象変数として，同じ変数を１つ以上含まなければならない．

まずはじめに，提示した２つの制約条件を充足する経験知識(ルール)が選出され，それらの後件部の各対象変数ごとに，クラスタリングが行われる．このとき後件部における対象変数の数は各々の経験知識によって異なっていると考えられるので，後件部に同じ対象変数を持つ経験知識に関して，それらの後件部の対象変数をすべて網羅し，"or"結合させる．
例えば，後件部が以下のように表現されているとき，

$$Y_1 \vee Y_3 \vee Y_4 \vee Y_8, \quad Y_2 \vee Y_5 \vee Y_9, \quad Y_6 \vee Y_7 \vee Y_{10}$$

これらの後件部の対象変数は次のように"or"結合される．

$$Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 \vee Y_4 \vee Y_5 \vee Y_6 \vee Y_7 \vee Y_8 \vee Y_9 \vee Y_{10}$$

実際には，これを新たに生成する仮想知識の後件部とみなして，クラスタリングが行なわれる．これ以降は1)の知識統合アルゴリズムと同様にして行われるので省略する．

3) 前件部 ："or"結合　後件部： "and"結合の場合

$$X_{11} \text{ or } X_{21} \text{ or } \cdots \text{ or } X_{m_1 1} \rightarrow Y_{11} \text{ and } Y_{21} \text{ and } \cdots \text{ and } Y_{k_1 1}$$
$$X_{12} \text{ or } X_{22} \text{ or } \cdots \text{ or } X_{m_2 2} \rightarrow Y_{12} \text{ and } Y_{22} \text{ and } \cdots \text{ and } Y_{k_2 2}$$
$$\vdots$$
$$X_{1i} \text{ or } X_{2i} \text{ or } \cdots \text{ or } X_{m_i i} \rightarrow Y_{1i} \text{ and } Y_{2i} \text{ and } \cdots \text{ and } Y_{k_i i} \quad (4.3)$$

式(4.3)のようなi個の経験知識(ルール)が存在している時，これらを統合するには，次の制約条件を満たさなければならない．

条件１：統合する経験知識間の後件部における対象変数の数は，一致していなければならない．
即ち
$$k_1 = k_2 = \cdots = k_i$$
を充足しているときである．

条件２：統合する経験知識間の後件部における対象変数の種類は，同じでなければならない．また前件部は対象変数として，同じ変数を１つ以上含まなければならない．

後件部の統合は1)の知識統合アルゴリズムと同様なので省略する．以降，後件部統合後のアルゴリズムについて述べる．まずはじめに，後件部の統合によって生成された各仮想知識ファジィ集合に対して，その統合のもとになった経験知識(ルール)の前件部についてクラスタリングが行われる．このとき前件部における対象変数の数は各々の経験知識によって異なっていると考えられるので，前件部に同じ対象変数を持つ経験知識に対して，それらの前件部の対象変数をすべて網羅し，"or"結合させる．実際には，これを新たに生成する仮想知識の前件部とみなして，クラスタリングが行なわれる．クラスタ化された前件部は，その１つのクラスタごとにファジィ集合レベルでの統合が図られ，そのそれぞれに対して前件部の仮想知識ファジィ集合が生成される．このようにして統合された前後件部の仮想知識ファジィ集合が，新たに生成される仮想知識の対象変数を表すファジィ集合となる．

4) 前件部 ："or"結合　後件部： "or"結合の場合

$$X_{11} \text{ or } X_{21} \text{ or } \cdots \text{ or } X_{m_1 1} \rightarrow Y_{11} \text{ or } Y_{21} \text{ or } \cdots \text{ or } Y_{k_1 1}$$
$$X_{12} \text{ or } X_{22} \text{ or } \cdots \text{ or } X_{m_2 2} \rightarrow Y_{12} \text{ or } Y_{22} \text{ or } \cdots \text{ or } Y_{k_2 2}$$
$$\vdots$$
$$X_{1i} \text{ or } X_{2i} \text{ or } \cdots \text{ or } X_{m_i i} \rightarrow Y_{1i} \text{ or } Y_{2i} \text{ or } \cdots \text{ or } Y_{k_i i} \quad (4.4)$$

式(4.4)のようなi個の経験知識(ルール)が存在している時，これらを統合するには，次の制約条件を満たさなければならない．

条件１：統合の対象となる経験知識(ルール)は，互いにその前後件部に同じ対象変数を１つ以上含まなければならない．

まずはじめに，上述したの制約条件を充足する経験知識(ルール)が選出され，それらの後件部の各対象変数ごとに，クラスタリングが行われる．このとき後件部における対象変数の数は各々の経験知識によって異なっていると考えられるので，後件部に同じ対象変数を持つ経験知識に関して，それらの後件部の対象変数をすべて網羅し，"or"結合させる．実際には，これを新たに生成する仮想知識の後件部とみなして，クラスタリングが行なわれる．クラスタ化された後件部は，その１つのクラスタごとにファジィ集合レベルでの統合が図られ，そのそれぞれに対して後件部の仮想知識ファジィ集合が生成される．また後件部の統合によって生成された各仮想知識ファジィ集合に対して，その統合のもとになった経験知識の前件部を後件部と同様にして統合する．

5) 前後件部："or"と"and"結合が混在する場合

$$X_{11} \Theta X_{21} \Theta \cdots \Theta X_{m_1 1} \rightarrow Y_{11} \Theta Y_{21} \Theta \cdots \Theta Y_{k_1 1}$$
$$X_{12} \Theta X_{22} \Theta \cdots \Theta X_{m_2 2} \rightarrow Y_{12} \Theta Y_{22} \Theta \cdots \Theta Y_{k_2 2}$$
$$\vdots$$
$$X_{1i} \Theta X_{2i} \Theta \cdots \Theta X_{m_i i} \rightarrow Y_{1i} \Theta Y_{2i} \Theta \cdots \Theta Y_{k_i i} \quad (4.5)$$

式(4.5)に示されるような経験知識は，結合律，分配律，交換律が成立するので，上述した４種類の知識記述(式(4.1)～式(4.4))にすべて変換することが可能である．つまり，このように複雑な混合知識は，知識記述変換後の経験知識(分解された知識)に，上述した４つの知識統合アルゴリズムを適用して，知識の統合を図る．

5 シミュレーション結果

ここでは，式(5.1)～式(5.4)に示すような経験的な医療知識に対して，上述した知識統合アルゴリズムを適用し，知識の統合を行う．ただし，これらの知識の前後件部における対象変数は，クラスタリングによって幾つかのクラスタに分類されるが，これに関する説明は省略する．なお，このシミュレーションにおいては"and"結合又は"or"結合に使われる演算子をそれぞれ"∧"，"∨"としたが，各対象変数間の関係が分かっているような場合は別の演算子を用いるべきである．

(Fever(40.1) ∧Snivel(heavy)) ∨(Fever(about 38) ∧Cough(43))
→ Disease(Hong Kong flu A) ∨Disease(Soviet flu) (5.1)

(Fever(about 39) ∧Snivel(heavy)) ∨(Fever(39.5) ∧Cough(47))
→ Disease(Hong Kong flu A) (5.2)

(Snivel(heavy) ∨Cough(about 40)) ∧Fever(38.4)
→ Disease(Soviet flu) (5.3)

(Snivel(heavy) ∨Cough(about 45)) ∧Fever(39.2)
→ Disease(Hong Kong flu A) ∨Disease(Soviet flu) (5.4)

まずこれらの医療経験知識を式(3.1)～式(3.4)に示した基本的な知識記述に変換すると，以下のような８つの知識(式(5.5)～式(5.12))が生成される．従って，これらの知識ルールは，式(5.1)～式(5.4)の前件部に交換律，分配律，結合律を適用することによって分解された医療知識と捉えることができる．また式(5.5)と式(5.6)は，式(5.1)を分解することによって生成された知識であり，以下同様にして，式(5.2)～式(5.4)はそれぞれ２つの知識に分解・生成される．

(Fever(40.1) ∧Snivel(heavy)
→ Disease(Hong Kong flu A) ∨Disease(Soviet flu) (5.5)

(Fever(about 38) ∧Cough(43)
→ Disease(Hong Kong flu A) ∨Disease(Soviet flu) (5.6)

(Fever(about 39) ∧Snivel(heavy) →Disease(Hong Kong flu A) (5.7)

(Fever(39.5) ∧Cough(47) → Disease(Hong Kong flu A) (5.8)

(Fever(38.4) ∧Snivel(heavy) → Disease(Soviet flu) (5.9)

(Fever(38.4) ∧Cough(about 40) → Disease(Soviet flu) (5.10)

(Fever(39.2) ∧Snivel(heavy)
→ Disease(Hong Kong flu A) ∨Disease(Soviet flu) (5.11)

(Fever(39.2) ∧Cough(about 45)
→ Disease(Hong Kong flu A) ∨Disease(Soviet flu) (5.12)

次に，式(5.5)～式(5.12)で表される知識ルールの後件部を上述した知識統合アルゴリズムを用いて統合すると，後件部は"*Disease(Hong Kong flue A) ∨Disease(Soviet flu)*"のようになる．またこの後件部に対応する前件部に関して知識の統合を行うと，式(5.13)及び式(5.14)のような２つの仮想知識が生成される．

(Fever(high) ∧Snivel(heavy)
→ Disease(Hong Kong flu A) ∨Disease(Soviet flu) (5.13)

(Fever(high) ∧Cough(heavy)
→ Disease(Hong Kong flu A) ∨Disease(Soviet flu) (5.14)

最終的には，式(5.13)と式(5.14)で表される仮想知識を以上と同様に統合することによって，式(5.15)のような仮想知識が獲得される．またこの仮想知識は一般性のある知識として認識され，知識ベースに格納される．

Fever(high) ∧(Cough(heavy) ∨Snivel(heavy))
→ Disease(Hong Kong flu A) ∨Disease(Soviet flu) (5.15)

ただし，前(又は後)件部が"or"結合によって連結されている知識を統合する場合，知識ルールの信頼性が落ちる可能性がある．従って，仮想知識の各対象変数に知識ルールの信頼性を表す重みを持たせ，発火した前件部の対象変数によって，後件部における対象変数の重みを変化させている．つまりこのことは，仮想知識を用いた推論結果が，発火する前件部の対象変数に依存しているということを表している．

6 結論

今回我々は，本システムで用いられる５種類の知識ルールに対して，それぞれ異なる知識統合アルゴリズムを考案し，ルールレベルでの知識の統合と３つの知識統合手法を適用することによって，ファジィ集合レベルでの知識の統合を図った．このことにより，本知識ベースシステムは，その知識ベース内に保存されている複数の経験知識(ルール)から一般性のある知識を抽出することが可能になった．従って，一般に膨大な知識ルールが必要であると考えられていた知識ベースの負担を大幅に軽減することができ，知識ベース内のルールの効率化が図られるものと考えられる．

参考文献

[1] M.Maeda, R.Kuwamura and S.Murakami: Fuzzy AI system with a learning function, The Fifth IFSA World Congress, pp.159-162 (1993)

[2] M.Maeda, Y.Harada and S.Murakami: Design of fuzzy AI system with a learning function: Integration and elimination of knowledge, The Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.447-454 (1995)

[3] 前田，原田，桑村，村上：学習型ファジィ知能システムの開発とその医療分野への応用，第１０回ファジィシステムシンポジウム，pp.689-690 (1994)

[4] 前田，原田，村上：学習型ファジィ知能システムの医療への応用－医療知識の統合と消去－，バイオメディカル・ファジィ・システム学会第７回年次大会，pp.26-29 (1994)

[5] 前田，村上：医療ファジィエキスパートシステムとその応用，日本ファジィ学会誌，Vol.2, No.2, pp.143-153 (1990)

連絡先

〒804 福岡県北九州市戸畑区仙水町１番１号
九州工業大学工学部情報工学教室
前田　幹夫
TEL 093-884-3249
FAX 093-871-5835

TA2-2

ファジィ推論尺
Fuzzy inference ruler

上田 傑　　濱田 辰巳＊
Suguru Ueda　Tatsumi Hamada

近畿大学病院　＊近畿大学医学部

Kinki University Hospital　*Kinki University School of Medicine

Abstract : We propose a fuzzy inference ruler using d'Ocaone's nomography. We will be able to get the results of fuzzy inference by the ruler without computer. As the inside of the black box of fuzzy inference will be visible on the ruler, it is expected that the fuzzy theory will be generally accepted and utilized by most persons. In this paper we will first refer to the nomogram, then describe how to apply the ruler to fuzzy inference, and we will discuss about the fuzzy inference ruler made as a trial for deciding exposure parameters of radiography.

Key words: nomography , nomogram , fuzzy inference , fuzzy inference ruler

1．はじめに

L. A. Zadehがファジィ理論を１９６５年に発表して以来，ファジィ理論の応用研究は制御分野を中心にめざましい発展を遂げている．また，ファジィ制御におけるファジィ推論の計算には種々の方法が提案されているが，全てこれらの推論値計算にはコンピュータが使われるのが普通である．従ってそのためのハードウェアとソフトウェアが必要不可欠となる．一方，現場などである問題が発生した時，その問題に対して不慣れな場合などベテランの経験や勘に基づいたファジィ推論で解決したい場合がある．そのような時にコンピュータを必要としないでファジィ推論値を直接求められるような器具があれば，コンピュータシステムの制約を受けずにあらゆる場面でファジィ推論を行うことが可能になる筈である．

我々は，d'Ocaoneが用いた計算図表を用いてコンピュータを必要としないで推論値が得られる「ファジィ推論尺」なる器具を提案する．この器具によってL. A. Zadehが唱えて以来ファジィ推論時に必要だったコンピュータが要らなくなり，現場でいつでも必要なときにファジィ推論が可能となる．また，この器具を使えばファジィ理論そのものを理解することが容易でファジィ理論が使う側の人に広く受け入れられるであろう．

本稿では，まず計算図表 (nomogram) について述べ，ついでファジィ推論への応用方法を述べ，実際に「ファジィ推論尺」を試作し検討し考察する．

2．1．計算図表学 (nomography)

計算図表学とは，１８８４年フランスのエコール・ポリテクニクの教授で数学者，工学者であったモーリス・ドカーニュ (Maurice d'Ocaone) によって提案された公式の図示法を研究する応用数学の一分科である．例えば図１は医学の臨床の現場で用いられる体表面積を求めるWEST のノモグラムであるが，この計算図表では身長と体重とで結ばれる直線との交点がその人の体表面積となる．このように計算図表は一度つくれば永久的に反復使用できる便利さがあるので，当時理工学はもちろん医学や経済学など広範囲の分野で活用されたが，図表作成の手間や近似値しか得られないことなどで，最近では高精度の計算が可能なコンピュータにとってかわり使われる機会が少なくなってきている [1, 2, 3] ．

2．2．共点図表と共線図表

一般に２変数の間の関数関係はデカルト座標における曲線によって表される．すなわち

$$y = f(x) \qquad (1.\ 1)$$

の関係があり，f (x) が連続関数であれば(１．１）式は一つの連続曲線で表され，この曲線上の点(１．１）を満足するｘ，ｙを与える．３変数の間の関数関係が

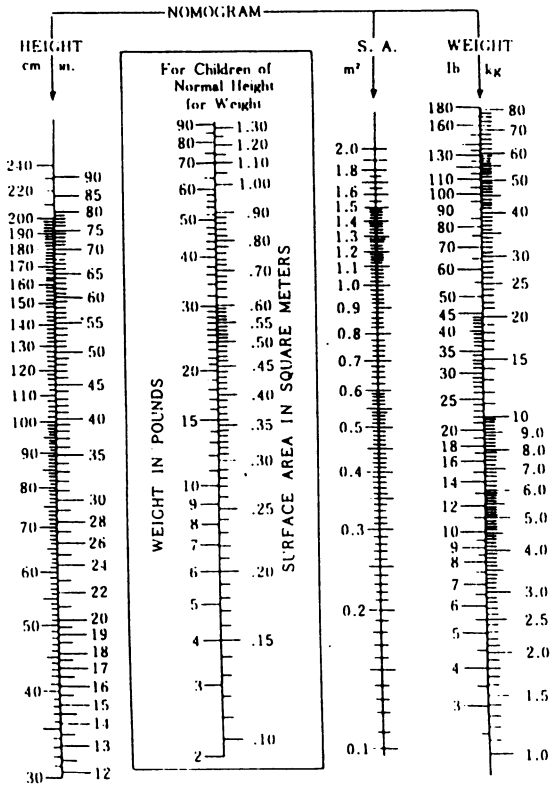


図１．ＷＥＳＴのノモグラム

$$y = f(x, p) \qquad (1.2)$$

の形の連続関数で表わされるときには，pをパラメータとしてx，yのデカルト座標上の曲線で表すと，pの少しずつ違った値p_1，p_2，・・・，p_nに対し，（1．2）式を満足する曲線がそれぞれ描かれる．このようにして作られた曲線群の上の1点から図2のように（1．2）式を満足するx，yおよびpを読み取ることができる．これは，共点図表と呼ばれる一種の計算図表である．これを改良した計算図表が共線図表である．

共線図表はどのような場合にもかけるというわけではなく，3変数u，v，wの間の関係式

$$F(u, v, w) = 0 \qquad (1.3)$$

を変形してたとえば次のような行列式

$$\begin{vmatrix} -\delta & u & 1 \\ \delta & v & 1 \\ \delta f_1(w) & f_2(w) & 1 \end{vmatrix} = 0 \qquad (1.4)$$

と書きかえられたとすると，図3のようにx＝－δの軸上にuを目盛り，x＝δの軸上にvを目盛り，

$$x = \delta \cdot f_1(w), \quad y = f_2(w)$$

で表わされる曲線上にwを目盛ったときに，（1．3）を満足するu，v，wはこの図表上では一直線上にある．ゆえにu，v，wの中の何れか二つを知れば，他の一つはこの図表に定規をあてることによって求められる．

2．3．簡略化ファジィ推論

ファジィ推論は，図4のような「MIN-MAX-重心法」とよばれる推論方法で提案され実用化されてきたが，最近では図5のような簡略化推論[4]がよく使われている．

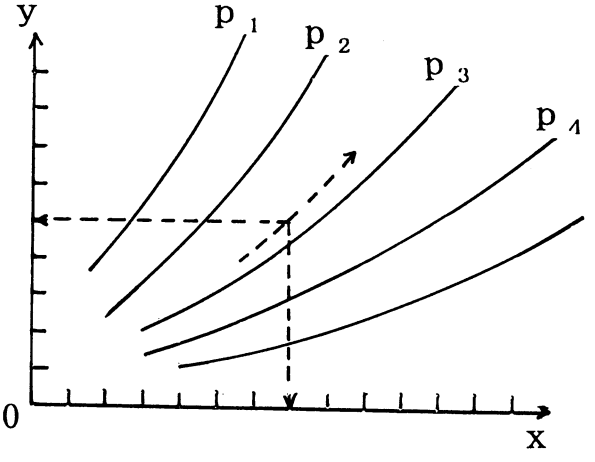


図2．共点図表

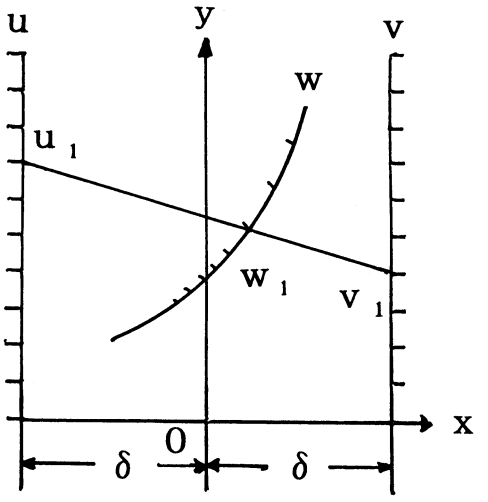


図3．共線図表

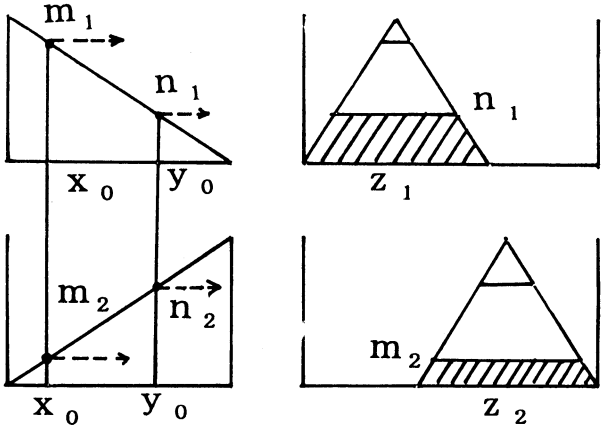
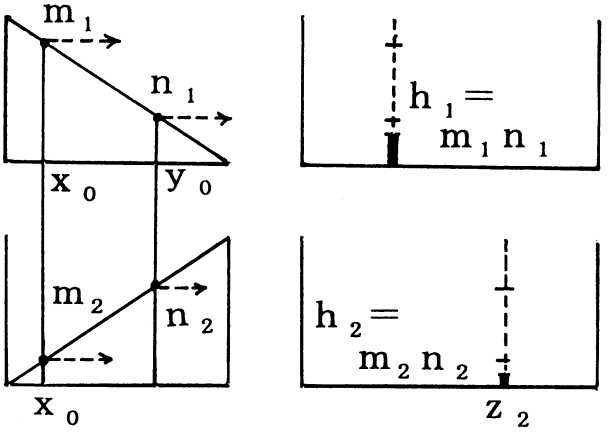


図4．ＭＩＮ－ＭＡＸ－重心法



$$Z = \frac{h_1 Z_1 + h_2 Z_2}{h_1 + h_2}$$

図5．簡略化ファジィ推論

今回の検討では，演算の単純性と計算図表に乗せやすい形にするためＭＩＮ演算での簡略化推論で行うこととした．ａｉを後件部の確定値，ｈｉを前件部との適合度とすると最終的な結論Ｚは，確定値a_1，a_2，・・，a_nと適合度h_1，h_2，・・・，h_nとで（２．１）式のように加重平均することによって得られる．

$$Z=\frac{\Sigma a_i \cdot h_i}{\Sigma h_i} \quad (i=1,2,\cdots,n) \qquad (2.1)$$

この加重平均の計算を共線図表から得ようというのである．共線図表の扱い易さや図表の単純化のためｎ＝２とし，図６に示されるように後件部の確定値を$a_1=-1$，$a_2=1$とすると，（２．１）式は

$$Z=\frac{h_2-h_1}{h_1+h_2} \qquad (2.2)$$

となる．この式のＺを求める計算図表を描き，この図表と前件部から適合度を求めるメンバーシップ関数と組み合わせることにより，ファジィ推論が一枚のボード上で可能となるのである．

３．ファジィ推論尺

３変数ｕ，ｖ，ｗの間の関係が

$$g(v)=f(u)\cdot h(w)$$

で表されるとき，これを行列式で書くと

$$D=\begin{vmatrix} -\delta & f(u) & 1 \\ \delta & -g(v) & 1 \\ \delta\dfrac{1-h(w)}{1+h(w)} & 0 & 1 \end{vmatrix}=0$$

となる．ここでｕおよびｖ尺に対する尺度係数をそれぞれｍおよびｎとすると，この式からｕ，ｖおよびｗの尺度の上の点の座標は次のように与えられる．

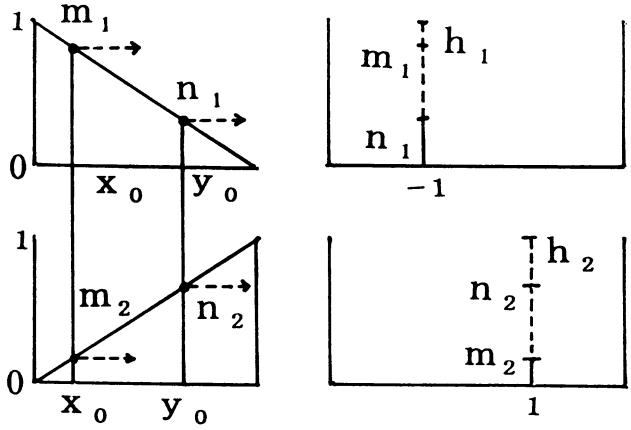
$$x_1=-\delta \ , \ y_1=mf(u)$$
$$x_2=\delta \ , \ y_2=-ng(v)$$
$$x_3=\delta\frac{m-nh(w)}{m+nh(w)} \ , \ y_3=0$$

これは図７のように３軸上の点が一直線にあることを示すもので，この形の共線図表をＺ字型共線図表という．

ここで，（２．２）式は

$$Z\cdot(h_1+h_2)=(h_2-h_1)$$

と書けることから計算図表学でいうＺ字型となり図８のような共線図表が得られる．



$$Z=\frac{m_2-n_1}{n_1+m_2}$$

図６．ＭＩＮ演算簡略化ファジィ推論

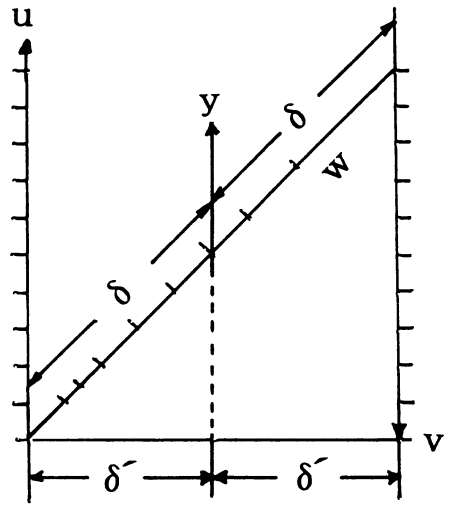


図７．Ｚ字型共線図表

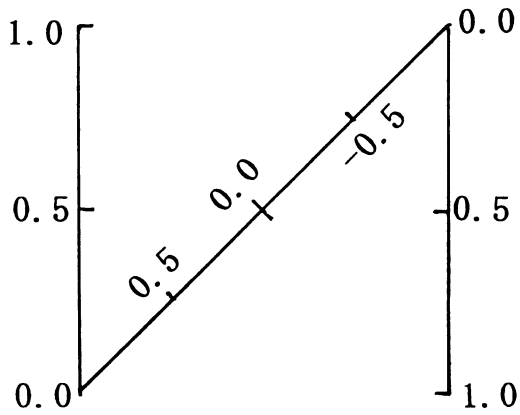


図８．ファジィ推論尺の共線図表

結果的にここに提案する「ファジィ推論尺」は，前件部のファジィ変数の適合度をもとめるメンバーシップ関数を上方に置き，下方にこの適合度に基づいて適合度の加重平均を計算図表を使って割り出しファジィ推論値を得るという構成とした（図９）　なお，メンバーシップ関数のチューニングは利便性と単純性を考慮し，パラメータスケールの種類や目盛の打ち方によって行い，関数そのものは同一とした．

使用法は，いたって原始的でメンバーシップ関数からそれぞれの適合度よりペンやマーカーなどで印をつけ，その最小値を読み，その最小値を下方の共線図表の左右の尺上に求め，それぞれの点を結び，斜線のファジィ推論尺上との交点の目盛りを読むことによりファジィ推論値が得られる．

４．まとめ

このファジィ推論尺は，ファジィ推論が必要なあらゆる場面において用いることが可能であり，使用法も簡単で，メンバーシップ関数のチューニングも直感的に即座に行うことも可能である．また，誰でもこの器具を作成することは容易で，自分なりの工夫を凝らすことも簡単である．

精度的には４変数にすべきであるが，４変数の場合にはメンバーシップ関数が３本になり計算図表も複雑になり推論値を割り出す過程も増えるため，使用者にとって４変数のファジィ推論尺は使い難いであろう．今後この精度的な問題も検討したい．

最後に，１００年以上も前に完成された計算図表学は近似値しか得られない等の理由で現代では主流ではなく，あまり使われなくなった．しかし，曖昧さをもったまま処理するファジィ理論にとってこの理由は逆に都合がよく，この二つの理論の取り合わせはとても合理的であった．そして，今回の提案は先人の学問を現在のコンピュータ社会に再び活用することが出来た．

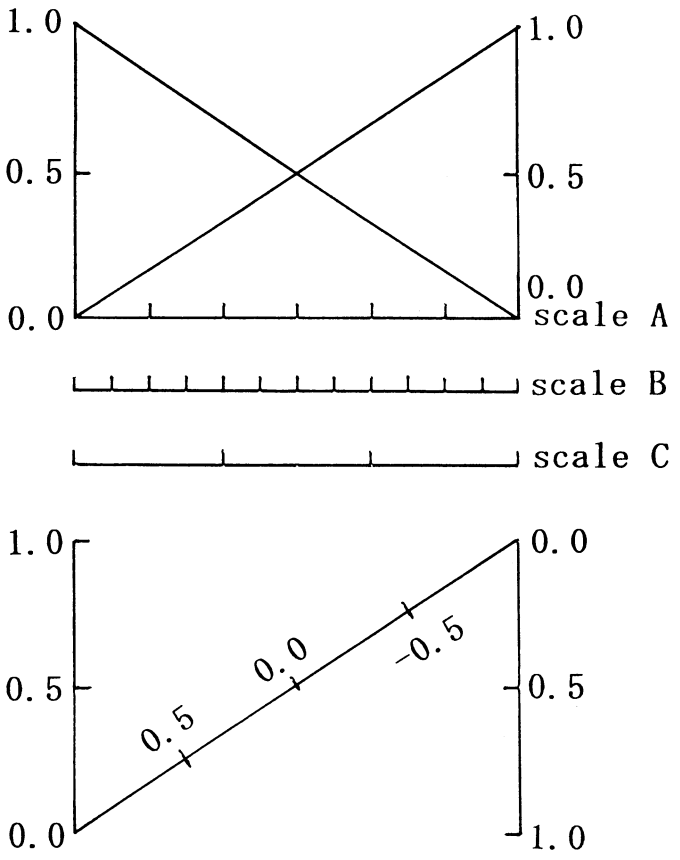


図９．ファジィ推論尺

参考文献

1)小倉金之助：計算図表（岩波全書），岩波書店，1940
2)守田勝彦：計算図表，東海書房，1951
3)本間仁，内田茂男：計算図表・図式計算法，コロナ社，1973
4)市橋秀友，渡辺俊彦：簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御，日本ファジィ学会誌 2-3, PP. 429-437, 1990

問い合せ先 〒589　大阪狭山市大野東377-2
近畿大学医学部附属病院中央放射線部
上田　傑
TEL　0723-66-0221　EXT. 2121
FAX　0723-66-0206

TA2-3

概念ベースによる類似性判別の「クロスワードパズル」への適用

An application of a method of measuring semantic similarity between words to crossword puzzles

松澤 和光* 金杉 友子** 石川 勉***
Kazumitsu Matsuzawa Tomoko Kanasugi Tsutomu Ishikawa

* NTTコミュニケーション科学研究所 NTT Communication Science Laboratories
** NTTアドバンステクノロジ株式会社 NTT Advanced Technology Corporation
*** 拓殖大学工学部 Takushoku University

Abstruct－We have previously proposed a method for measuring the semantic similarity between words using a large-scale knowledge base automatically constructed from machine-readable dictionaries. This paper describes experimental results that answers in cross-word puzzles are automatically determined based on similarity between hint-words and candidates using the proposed method.

1. はじめに

知識が不完全でも概略解を得ることを狙いに「アバウト推論」の研究[1]を進めている。この一環として「言葉」の意味を体系的に知識ベース化した「概念ベース」を構築し、これを用いて概念間の類似性を判別する方式を開発した[2]。この概念ベース／判別方式を評価するため、クロスワードパズルにおいてヒントの言葉との類似性等により解答を選定する実験を行なった。この結果について報告する。

2. 概念ベースと類似判別方式の概要

アバウト推論はファジィ推論と同様、実世界の曖昧な概念を取り扱うが、大きい／速い等の量的な概念だけでなく一般の概念を対象とする[1]。また、曖昧さはﾒﾝﾊﾞｼｯﾌﾟ関数として外から与えるのでなく、概念に関する知識として内蔵する。これが「概念ベース」であり、各概念は以下の形で表現する。

概念ｇ＝ $\{(p_1, q_1), (p_2, q_2), \cdots\}$ ・・・(1)

ここでp_iは概念ｇの特徴を表す属性、q_iはその重要度で、p_iの全体集合は概念ｇの全体集合と同一であるとする。

具体的な構築は、まず日常的な基本単語約４万語を選択し、国語辞典等の語義文中の独立語と頻度から、平均50属性を獲得した。さらに、概念相互の関係を利用した自己精錬化手法を用い、属性内容の「質」の向上を図った。

上記概念ベースを用い、そこに含まれる任意の概念間の類似性を、(1)式の表現をﾍﾞｸﾄﾙと見て比較（ノルム１で正規化して内積を計算）して判別する。この結果、例えば「馬」と言う概念に対し、よく似た「牛」「動物」等の概念から、全く無関係な「家具」「平和」等の概念まで、概念ベースに含まれる全概念との間の類似性を１～０の数値（類似度）として計算でき、良く似た概念の順に並べることが可能となる[2]。

3. クロスワードパズル解答アルゴリズム

3.1 問題の定式化

図１に示すようなｸﾛｽﾜｰﾄﾞﾊﾟｽﾞﾙを以下のように定式化する。

- 縦のﾋﾝﾄ T_i (i=1～t)、横のﾋﾝﾄ Y_j (j=1～y)に対応して、答の単語V_i、W_jを選ぶ。
- V_i、W_jの文字数は各々n_i、m_j。
- T_iに対しクロス$\{y_{ij}, a_j, b_i\}$が存在し、T_iに対応する単語V_iのa_j文字目と、横ヒントy_{ij}に対応する単語W_jのb_j文字目が一致する必要がある。（Y_jも同様）
- T_iに対し候補群$\{v_{ij}, e_j\}$が存在し、答V_iとしては評価値e_jが高い単語v_{ij}が望ましい。

なお、v_{ij}の文字数は各n_i。（Y_jも同様）

ここで「クロス」とは、クロスワードにおいて縦横で交叉するマス目の文字が一致しなければいけない絶対の制約である。これに対し「候補群」とは、ヒントと関連性がある単語集合であって、関連性の度合い等から評価値を付けるが、「ヒント」の性格上、評価値が高いものが正解とは限らない。

3.2 「先読みｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ」の提案

全節で述べた候補群を概念ベースから生成し、クロスワードに解答することを考える。こうした研究は、ノーヒントの場合の全解探索[3]がある程度なので、新たにｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑを考案した。

まず基本的な考え方として、各ヒントに対応する候補群の上位から順に単語を当てはめ、交叉するマス目の文字が一致したら単語を確定する方法をとる。

ただし、前述のように上位候補が正解とは限らないため、誤った単語が確定される場合があり得るが、これをﾊﾞｯｸﾄﾗｯｸ等で解消しようとすると処理量が爆発する。ここではクロスワードの解答を求めることでなく、概念ベースの評価を主眼としていることから、必ずしも全ての解答を求める必要はなく、どの程度解答が得られたかで概念ベースを評価することにする。

そこで、ヒントに対してある単語候補を選んだとき、これと交叉するヒントのマス目が文字制限されるが、この制限を満たす単語が候補群の何位に現れるかで、最初に選んだ単語候補の「良さ」を評価する。これが良い順に候補を確定して行く。

【一手先読みｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ】

①着目順位ｋ＝１、Ｓ＝ {} とする。
②全T_iに対し、各候補群から文字制約Ｓを満たす第ｋ位の候補K_iを選ぶ。
③各T_iのクロスが決めるy_{ij}に対し、その候補群から候補K_iに対しそのクロスおよびＳを満たす候補が第ｋ位以下に現れる順位p_jを調べる。これを全ｊで総合評価（平均値）しK_iの候補評価値ｆ$_i$とする。
④ｆ$_i$が最良のK_iを確定し、文字制約Ｓに入れる。

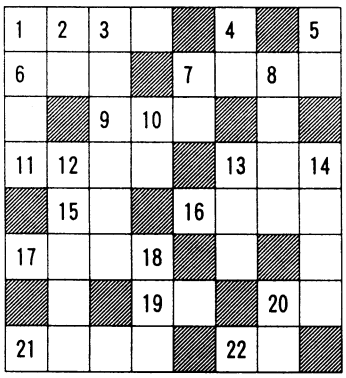


図1．クロスワードパズル例題

たて
1. 初冬、風、冷たい
2. 家畜、たてがみ、走る
3. 勝負、大穴、予想外
4. 第六感、胸騒ぎ、鋭い
5. 雨、軒、筒
7. 球、遊び、手
8. 家具、板、材料、
10. 賭事、投げる、丁半
12. 卒業、送別、宴
13. 借り、負担、恩
14. 黄昏、日没、暗い
18. 邪、歪む、変形
20. 罰、深い、悪事

よこ
1. 交替、おまわりさん、派出所
6. 忍耐、堪忍、根比べ
7. 演芸、二人、掛合い
9. 束縛、枷、犬
11. 文字、重要、事務
13. 粥、病人、上澄み
15. 面倒、お節介、手段
16. 飛行、際どい、地面
17. 師匠、医者、教師
19. 弦楽器、ばち、法師
20. 仲間、同伴、配偶者
21. 駅、切符、入り口
22. 壁、聞く、飾り



図2．本ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑによる解答例

⑤縦と横（ＴとＹ）を交代して②へ戻る。
⑥Ｓが増加しなくなったら、ｋ＝ｋ＋１で②へ戻る。

ここで文字制約Ｓは、クロスワードのマス目に確定した候補を書き込んだもので、次の選択はこの文字群で制約される。

なお上記ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑを再帰的に繰り返せば、同様に「Ｎ手先読みｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ」への拡張が可能である。

4. クロスワード解答の実験

4.1 実験条件

まずクロスワードの例題であるが、パズル専門誌に掲載のものはヒント／解に固有名詞が多い等の不都合があるため、概念ベースに含まれる４万単語だけを用いて、３ヒント形式８×８を新たに５題、無作為に作成した。１例を図１に示す。

ヒントは縦横５題合わせ 130問。これらの候補群として、次の４種を概念ベースから作成した。

(1)属性型：ヒントの各単語を式(1)の概念ｇとした場合、ｇに含まれる属性ｐを候補ｖ、重要度（頻度）ｑを評価値ｅとしこれを３ヒントで集計した候補群。

(2)精錬型：２章で述べた自己精錬化手法により質向上を図った概念ベースについて、(1)と同様に作成した候補群。

(3)反転型：ヒントの各単語を式(1)の属性ｐとした場合、ｐを属性として含む概念ｇを候補ｖ、ｐの重要度ｑを評価値ｅとし、これを３ヒントで集計した候補群。

(4)類似型：２章で述べた類似性判別方式により、ヒント単語との類似度が０より大きな概念ｇを候補ｖ、類似度を評価値ｅとし、これを３ヒントで集計した候補群。

なお、各候補は文字数の制約を満たす単語だけに絞った。

4.2 実験結果

まず４種の候補群について、正解の含まれ方を５例題で調べた（表１）。属性型、精錬型は正解を含む率が低いが、含まれる場合は順位が高い。正解が無い場合を最低順位とする等を行った規格化正解順位では、反転型、類似型、精錬型、属性型の順に、候補群として「良い」と判断される。これは、反転型が言わば「類似性」より「関連性」を重視した候補群であり、これがクロスワードのヒント－正解の関係に良くマッチしているためと思われる。

次に解答ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑの適用を想定して、単語中のある文字が確定した場合に、候補群が絞られて正解が１位となる率を評価（表２）した。ここで１文字制限は、仮に先頭文字が確定の場合、２文字制限はさらにどこか１文字確定の場合を示す。

表１．候補群の評価

	属性型	精錬型	反転型	類似型
解候補数の平均	26.0	42.2	69.5	7389.2
正解が含まれる率	46.9	76.9	100	100
正解が１位である率	29.5	27.0	36.2	26.2
正解の平均順位	5.1	9.8	10.5	117.7
規格化正解順位	55.5	30.6	9.9	21.8

表２．正解が１位である率

	属性型	精錬型	反転型	類似型
(制限なし：再掲)	29.5	27.0	36.2	26.2
１文字制限	88.5	78.0	84.6	71.5
２文字制限	100	100	100	99.2
３文字制限	100	100	100	100

２文字も決まればほとんどの正解が候補群中で１位になり、本ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑで解答できる可能性が高いことがわかる。実際、反転型の候補群を用い、一手先読みｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑでｋ＝１の場合について図１のパズルを解いたところ、図２のように48文字中38文字（79%）を埋めることが出来た。（Sun4/600のperlで約30秒）

以上のように、概念ベースを用いてクロスワードパズルの解答の大部分を選択できる。これは人間の「言葉」に対する感覚を、概念ベースが良く表現していることを示している。

5. おわりに

言葉の知識体系として構築した概念ベースを、クロスワードパズルへの解答に適用して良好な結果を得た。また、ここで提案したパズル解答ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑは、曖昧な制約の扱い、探索進行に伴って制約が変化する等、一般のファジィ的な制約探索としても興味深い。概念ベースの評価と共に、さらに研究を進めたい。

なお本ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑでﾃﾓ展示も行っているので、参考にされたい。

【参考文献】
[1] 松澤他「不完全な知識下でのｱｳﾄﾌﾟｯﾄ推論方式」本ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ
[2] 笠原他「精錬化に基づく概念ﾍﾞｰｽ 構成法」 ↖問合せ先
信学技報, DE95-7, 1995.5.
[3] 加部他「ｸﾛｽﾜｰﾄﾞﾊﾟｽﾞﾙ の作成手法」情処全大, 2-157, 1995.3.

TA3-1

ファジィ関係データベースを用いた法的推論システム
The Legal Reasoning System using Fuzzy Relational Database

栗栖 啓光† 廣田 薫†† 増井 重弘‡
Hiroteru KURISU Kaoru HIROTA Sigehiro MASUI

吉野 一‡‡ ペロ スバシッチ††
Hajime YOSHINO Pero Subasic

†法政大学大学院
Graduate School of Hosei University

††東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

‡法政大学
Hosei University

‡‡明治学院大学
Meiji Gakuin University

Abstract

Various realities are expressed as the combinations (relations) of the legal knowledges (legal concepts, articles of law, etc) in the world of law. But, as for the legal knowledge, all legal facts (events) can't be decided clearly. The legal judgement is performed in the legal inference from the resemblance of the legal knowledge and the legal fact. Vague knowledge was saved in the fuzzy relational database, and the legal inference performed between the vague knowledges was realized as the application of fuzzy inference method.Finally, the target law of this system is CISG (UNITED NATIONS CONVENTIONS ON CONTRACTS FOR THE INTERNATIONAL SALE OF GOODS)

1 はじめに

法律は，現実に起こりうる多様な現実を，法律の条文，法的概念，過去の判例などの法的知識の組み合わせ（関係）で規定する．法律が規定する世界は，裁判の判決が有罪か無罪，つまり「真」か「偽」の明確な結論を導き出すことから，曖昧さの存在を許さない，確定したものと考えられがちである．

しかし，実際問題として法律で行われる推論を考えると，時事刻々と変化する現実社会で発生する事件（事例）全てが，明確に定められている訳はなく，その上，過去の判例との照合（マッチング）においても，クリスプな対応がとれるはずがない．

つまり，推論過程には曖昧さが存在することが明らかである．そこで，これまで曖昧さを含む法的知識をファジィフレームで表現 [1] し，曖昧な法的概念間での法的推論をファジィ推論の応用として実現した [1].

これまでに作成した法的推論システムでは，判例を用いた推論（Case-Base Reasoning）は行っていなかったが，実際の法的推論では重要な役割を果たしている．そこで，判例の取り扱いとより複雑な法的なつながり（関係）を実現するために，法的データをファジィ関係データベースに格納し，ファジィ関係データベースを用いた法的推論システムを構築した．本システムで取り扱っている法律は，国際統一売買法（CISG）である．

2 法的推論（類推解釈）

まず，法律で行われる基本の推論方法である類推解釈について述べる．類推解釈の図式を，図 1に示す．

法規 : A(x) → X(x)
事件 : a
事件の記述 : B(a)

判決 : X(a)

A → X AとBは重要な点αで一致している

B → X

図 1: 類推解釈の図式

図 1に示したように，類推の論理とはAとBがαで一致して，かつ，法的規則A→Xが認められるのは実はAがαを含んでいるからにほかならず、いまBはそのαを含んでいるからBに対しても法的効果Xを認めてもよいとなる。

そこで，類推解釈を可能にするために，重要な点αになりえる要素（データ）を全てピックアップし，

その要素間でのマッチングを行う.

3 曖昧な表現を持つ法的知識

法律の条文内に表れる曖昧な表現の例を表 1に示す.

表 1: 法律の条文に表れる曖昧な表現例

条文番号	条文内容
16-2b	相手方が申込を取消不能のものであると了解したのが合理的であり，かつ，相手方がその申込に信頼を置いて行動している場合.

『合理的』,『信頼を置いて行動』は明確に規定すること事項は法律中には存在しない. しかし，法的推論においてこれらの曖昧な表現が果たす役割は大きい.

そこで，法律の条文やその他の知識を membership 概念及び vagueness 概念 [2]，可能性分布等を用いて曖昧さを考慮した上で，ファジィ関係データベースに格納する.

4 ファジィ関係データベースを用いたファジィ推論

本システムでは，CISG における契約成立について，法的関係を表 2のようなスキーマに分解し表現し，図 2に示すような推論の流れにそって推論を進めていく. 但し，図 2の Y，N はファジィYes と No を意味している.

表 2: ファジィ関係スキーマ

申込 (agent, 内容)	agent(一又は特定の者, 不特定の者)
申込の誘引 (agent)	内容 (物品, 数量, 価格, 付加事項)
十分明確 (物品, 数量, 価格)	.....
.....	

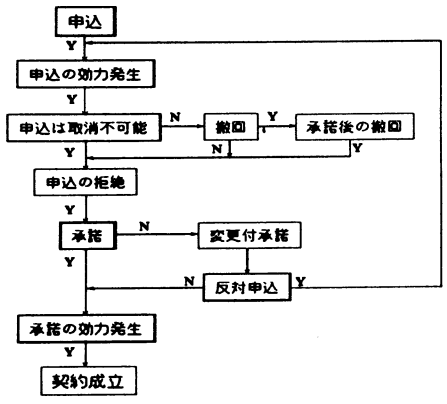


図 2: ファジィ関係に基づく推論の流れ

5 推論シミュレーション

実際に，事例を入力してシステムに推論シミュレーションした結果を図 3に示す. 推論の結果は，クリスプに真か偽で求め，推論途中にあったファジィ性についてはファジィ判断として推論結果に付加した.

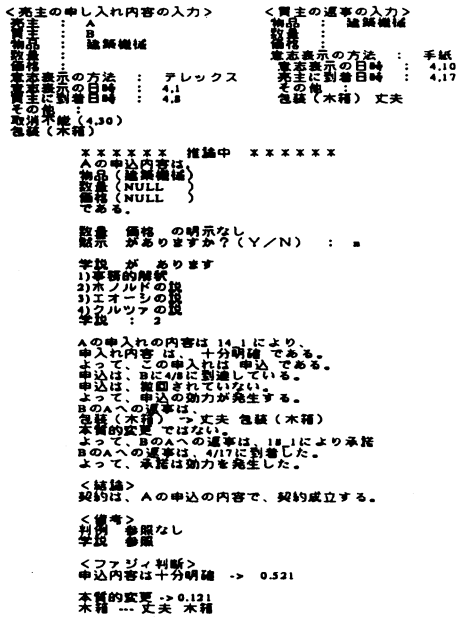


図 3: 法的推論シミュレーション結果

6 おわりに

曖昧で複雑な関係を持つ法的知識をファジィ関係データベースに格納し，ファジィ関係データベースを用いた法的推論システムを構築した. 本研究は，文部省科学研究費重点領域研究『法律エキスパートシステム』の一部である.

参考文献

[1] 廣田，吉野，栗栖: ファジィ推論とファジィ知識表現の法的推論システムへの応用，計測自動制御学会大 21 回知識工学シンポジウム論文集，pp191/194,1995 年 3 月

[2] K.Hirota: Extended Fuzzy Expression of Probabilisitic Sets,Advances in Fuzzy Set Theory and Applications,M.M.Gupta et al.eds,North Holland,pp.201/214,1979

【連絡先】

〒 184 東京都小金井市梶野町 3-7-2
法政大学工学部システム制御工学科増井研究室
栗栖 啓光 (Hiroteru Kurisu)
TEL : 0423-87-6384 (内線 7100)
E-mail : kurisu@sghr.sc.hosei.ac.jp

TA3-2

ファジィ制御用規則生成支援ツール
A support tool of rule generation for fuzzy control

右田 博久* 伊藤 修* 宮本 章広* 後藤 賢治* 新貝和照**
Hirohisa Migita Osamu Itoh Akihiro Miyamoto Kenji Goto Kazuteru Shinkai

富士ファコム制御株式会社*
FUJI FACOM CORPORATION

富士電機株式会社**
Fuji Electric Co., Ltd.

Abstract--Until now, the plant operation have been largely dependent on the experience or intuition of skilled operators. At present, however, the automation of operations, promoted as fuzzy control, is becoming increasingly popular. When fuzzy control is adopted in a plant, the planning designing and adjustment of the control rules and membership functions are required. Further, plant engineering must be well-acquainted with fuzzy control. Therefore, we have developed the rules generation method characterized by interactive input and organization of operators' operational knowledge. We herein introduce a system which is capable of automatically establishing control rules based on actual plant data.

1 はじめに

ファジィ制御の普及により、熟練オペレータの経験や勘に頼っていた操作の自動化が進められている。ファジィ制御をプラントに適用する際には制御規則とメンバーシップ関数の設計・調整作業が必要となる。ファジィ制御の適用時に問題となる規則の作成について、通常

- プラントの特性を理解し、特性の知識からの作成
- オペレータからの聞き取り調査による作成
- ファジィ制御の知識を有する人間によるプラントの実運用データからの作成

が挙げられる。これらの手法を用いる場合、どうしてもファジィ制御に精通している必要がある。また、オペレータの操作知識を対話的に入力・調整する手法が挙げられるが、これも多少のファジィ及び計算機に関する知識を必要とする。今回、プラントの実データを用いて自動的に制御規則を作成するツールを開発したので報告する。[1][2][3]

2 ファジィ制御規則生成支援ツール概要

2．1 ツールの機能

本ツールは図1に示す画面で構成されている。

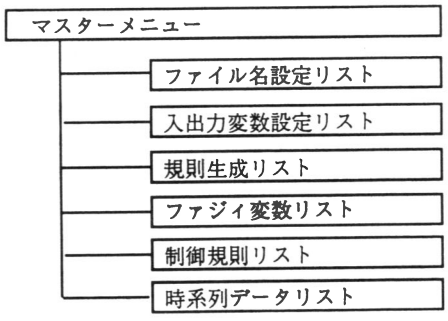


図1 ファジィ制御規則生成支援ツール画面構成

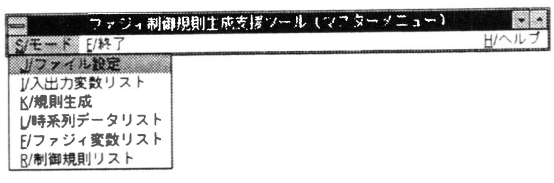


図2 ファジィ制御規則生成支援ツールのマスターメニュー

ツールの機能としてマスターメニューから6つの画面が選択でき、順次選択しながら作成を行なう。その機能は図2に示す各画面と対応しており

- 時系列データのファイル名の設定
- 時系列データの入出力名、データの上下限値の設定
- 規則の生成
- メンバーシップ関数の確認・修正
- 制御規則の確認・修正
- 時系列データ及び生成された制御規則による推論値の表示

の機能を有する。

2．2規則生成のフロー

ファジィ制御規則生成支援ツールは、ファジィクラスタリングの手法を用いてプラントの実データからデータを分割し、メンバーシップ関数、制御規則を生成していく。このツールのフローチャートを図3に示す。

2．3ファジィクラスタリングによるデータの分割

ファジィクラスタリングの手法として応用例も多く定評の

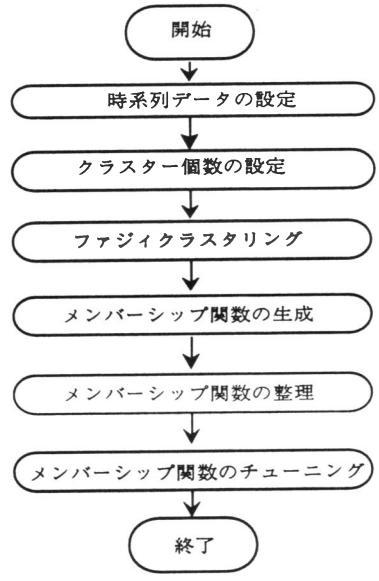


図3 規則生成のフローチャート

あるＦＣＭ（Fuzzy C-Means Method）を用いている。ＦＣＭは通常のC-Means法をファジィに拡張したものである。通常クラスター個数を与えなければならないが本手法では評価関数の値を局所最小となる分割数を採用している。この際、分割数を２から１つずつ増やし、評価関数の値が増加した段階で終了する。

２．４入力変数の選出とメンバーシップ関数の定義

メンバーシップ関数は出力変数の各クラスターを入力変数に射影し、各クラスターに対するデータの度合いをしきい値で区切り各々の入力変数に対するものを定義していく。

また、入力変数の選出に関して、まず各入力変数の各々を用いた際の推論値と出力データとの差が小さくなるものを採用する。さらに採用された以外の入力変数との組み合わせによる推論を行い出力データとの誤差が小さくなるものを採用していく。順次この手順を繰り返し変数を決定する。

２．５規則生成の操作

制御規則作成に用いる実プロセスのデータを用意し、ファイル名設定リストでファイル名を設定する。データの操作値（出力値）に対してファジィクラスター分割を行ない、分割個数を求める。

データは各クラスターに属する値を持ち、それぞれの度合いからメンバーシップ関数を生成していく。これらの過程においてメンバーシップ関数を図形表示し、ユーザーの判断により統合してよいものを選択しメンバーシップ関数を整理する。

図４にクラスター個数が５つの時の分割・生成された前件部メンバーシップ関数の原形を示す。

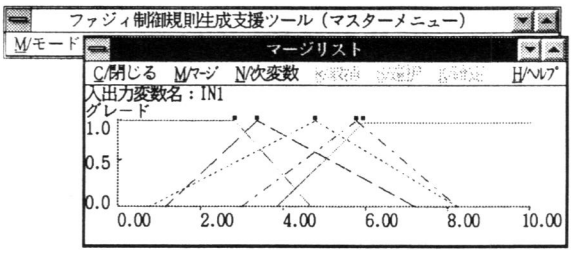


図４　生成されたメンバーシップ関数の原形

生成されたメンバーシップ関数のうち、１つにまとめたほうが良いものをマージ（統合）してゆく。

図５では図４の右側の２つのメンバーシップ関数を統合して１つにまとめたものを示す。

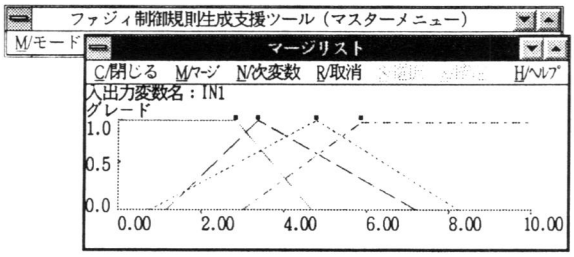


図５　マージ後のメンバーシップ関数

各入出力変数において同様の操作を行ないメンバーシップ関数の整理を順次行なう。

図６に本手法で生成した制御規則を示す。規則数は５個、入力の１番目と３番目が使用されている。また、図７に時系列データのトレンドグラフを示す。実操業における操作がOUT1（太い実線）、本ツールにより生成された制御規則による推論値がFUZ1（細い実線）で示されている。５つという非常に少ない制御規則で操作を表現することが可能である。

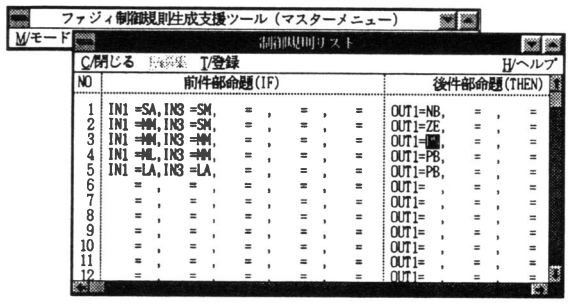


図６　生成した制御規則

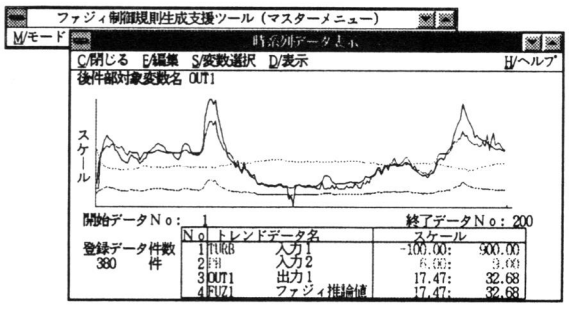


図７　操作データと推論値の比較

３おわりに

プラントの実運用データからファジィ推論に用いる制御規則の生成を行なうツールを開発した。ファジィ推論についての知識を必要とせず、簡単に作成することができた。今後、作成した制御規則が本来のオペレータの感覚にマッチしたものであるかどうかの検討を行い、規則の充実を図るツールとしていきたい。

謝辞：本ツールの基本アルゴリズムは東京工業大学菅野研究室にて提案されたものであり、本ツールの構築を進めるにあたり、多大な御指導御協力を頂いた菅野教授に深く感謝致します。

参考文献

[1]安川隆廣、菅野道夫：数値データに基づく言語モデリング、第６回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.83/86,1991

[2]Michio Sugeno, Takahiro Yasukawa: A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modeling, IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, Vol.1, No.1, February, 1993

[3]伊藤修、右田博久、宮本章広、伊藤正満：操業ノウハウに基づく制御規則の設計と調整、日本ファジィ学会誌、第6巻、第2号、pp.373/385、1994年4月

連絡先
〒191　東京都日野市富士町１
富士ファコム制御株式会社　開発本部
第四開発部　第三開発課
右田博久
TEL ：0425-86-1115　　FAX ：0425-84-7785

TA3-3

相互インデックス行列に基づく ファジィシソーラス生成法と類似事例の検索

FuzzyThesaurus Generation Based on Cross-Index Matrix and Retrieval of Similar Cases

野本弘平†、久保剛弘‡、小菅義夫†

Kohei Nomoto †, Takahiro Kubo ‡ and Yoshio Kosuge †

†三菱電機 (株) 電子システム研究所
‡三菱電機 (株) 電子事業本部

† Electro-Optics & Microwave Systems Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation
‡ Government Requirements Marketing Division, Mitsubishi Electric Corporation

Abstract If we use fuzzy information retrieval for document retrieval, we are able to obtain desired documents with grades of relevance. In case-based reasoning, we should find past cases which are similar to the present case, and hence, the fuzzy information retrieval seems to be helpful. If we use it, we are able to obtain desired cases with grades of similarity to the present case.

A type of fuzzy information retrieval using a fuzzy thesaurus is appropriate for the similar case retrieval in the case-based reasoning, because we can use index attribute values of the cases as keywords of documents. A conventional algorithm to generate the fuzzy thesaurus is based on simultaneous occurrences of keywords. This algorithm, however, is not appropriate for the case-based reasoning, because there is only one index attribute value in each index and the simultaneous occurrence is not observed consequently.

In this paper, a new algorithm to generate a fuzzy thesaurus is presented which is appropriate for the case-based reasoning. It makes use of multiple indexes in the case-based reasoning. The index attribute value is single in each index indeed, but the indexes which correspond to categories of the keywords in the document retrieval are multiple. In this algorithm, a correlation between a pair of index attribute values in other indexes is evaluated. The correlation composes a matrix, which we call "a cross-index matrix". The fuzzy thesaurus of index attribute values in an index is generated based on the cross-index matrix.

1．はじめに

人間が意思決定を行う場合には、現在の問題によく類似した過去の事例を参考にする場合が多い。この枠組みは、事例ベース推論 (CBR： Case-Based Reasoning) [1] として研究されている。事例ベース推論における上記の類似事例の検索は、現在の問題に完全に一致するような過去の事例は普通はないから、現在の問題にどの程度似た事例であるかという定量的な情報検索が相応しい。特に、類似事例の検索では、検索の質問に相当する現在の問題も、検索される過去の事例もクリスプであり、事例間の関係を定量化することが特徴である。

このような定量的な情報検索を具体的に実現するには、情報間を結び付ける付帯的な指標に着目する必要がある。たとえば、付帯的な指標として、引用関係を利用して技術文献のファジィ検索を行うことができる [2] [3]。また、この指標として、キーワードを利用して、その同時出現頻度からファジィシソーラスを作成して、文献のファジィ検索を行うことができる [4] [5]。事例ベース推論では、各事例に複数のインデックスが設定されているので、これを指標として利用したファジィシソーラスによる定量検索を考える。しかし、各インデックスにはインデックス値が1個ずつしか付与されていないので、単一のインデックス内での同時出現に基づく文献検索のファジィシソーラス生成法は、そのままでは事例ベース推論に適用できない。そこで、この方法を一般化して、複数のインデックスの関係を相互に評価する多次元的な方法として、相互インデックス行列に基づくファジィシソーラス生成法を提案する。

2．相互インデックス行列に基づくファジィシソーラス生成法

事例ベース推論における類似事例の検索は、各事例に設定されたインデックスのインデックス値を指定することにより行われる。したがって、インデック

ス値は文献検索の場合のキーワードに相当する。また、文献検索にはキーワードは一種類しかないが、インデックスはいわばキーワードの種類に相当する。したがって、ファジィシソーラスは、ファジィ検索を実施したいインデックス毎に必要である。以下、あるインデックス（これを対象インデックスと呼ぶ）のファジィシソーラスを別のインデックス（これを参照インデックスと呼ぶ）を評価基準として利用することにより、生成する方法を示す。この方法を「相互インデックス行列に基づくファジィシソーラス生成法」と呼ぶ。

まず、行列同士の二項演算として、p×qの行列$\mathbf{A}$とq×rの行列$\mathbf{B}$の間のsum-min合成（sum-min composition）を次式のように定義する。

$$[\mathbf{A}\circ\mathbf{B}]_{i,k}=\sum_{j=1}^{q}\left([\mathbf{A}]_{i,j}\wedge[\mathbf{B}]_{j,k}\right) \tag{1}$$

ここで、$[\mathbf{A}]_{i,j}$は行列$\mathbf{A}$の第(i,j)要素を示す。このsum-min合成の結果として計算される行列$\mathbf{A}\circ\mathbf{B}$は、p×rの行列となる。

さて、事例の数をn個とし、その集合を$C=\{c_1,c_2,\cdots,c_n\}$とする。各事例には、インデックスが設定されており、k番目のインデックスには、m_k個のインデックス値の内の1個が付与されているものとする。このk番目のインデックスのインデックス値の集合を$W_k=\{w_{k,1},w_{k,2},\cdots,w_{k,m_k}\}$とする。

ここで、k番目のインデックスにおけるi_k番目のインデックス値$w_{k,i_k}\in W_k$が、p番目の事例$c_p\in C$に付与されていれば1であり、されていなければ0であるような変数$a_{k,i_k,p}\in\{0,1\}$を考える。この変数を第(i_k,p)要素とする行列$\mathbf{A}(k)$を定義し、k番目のインデックスの出現行列と呼ぶことにする。

$$[\mathbf{A}(k)]_{i_k,p}=a_{k,i_k,p} \tag{2}$$

この行列は、k番目のインデックスのインデックス値全体と各事例との間の関係を、直積からの写像$\mathbf{A}(k):W_k\times C\to\{0,1\}$として表現したものである。この$\mathbf{A}(k)$は、各行が$k$番目のインデックスの各インデックス値に対応し、各列が各事例に対応する$m_k\times n$の行列となり、各列に1はただ1個ずつ存在し、他の要素は0である行列となる。

さらに、k番目のインデックスとl番目のインデックスの関係を表すために、直積空間からの写像$\mathbf{C}(k,l):W_k\times W_l\to\{0,1,2,\cdots\}$を考える。この写像を、$k$番目のインデックスの出現行列$\mathbf{A}(k)$と、$l$番目のインデックスの出現行列$\mathbf{A}(l)$の転置行列とのsum-min合成として定義する。

$$\mathbf{C}(k,l)=\mathbf{A}(k)\circ\mathbf{A}(l)^T \tag{3}$$

ここで、行列の右肩のTは、その行列の転置を意味する。この行列$\mathbf{C}(k,l)$は、各行がk番目のインデックスの各インデックス値に対応し、各列がl番目のインデックスの各インデックス値に対応する$m_k\times m_l$行列となる。$a_{k,i_k,p}\wedge a_{l,i_l,p}$が1になるのは、$k$番目のインデックスにおける$i_k$番目のインデックス値$w_{k,i_k}\in W_k$と、$l$番目のインデックスにおける$i_l$番目のインデックス値$w_{l,i_l}\in W_l$が、同一の事例に出現するときであるから、$\mathbf{C}(k,l)$の各要素は、異なるインデックス間の各インデックス値の同時出現頻度を意味する。この意味で、$\mathbf{C}(k,l)$を、k番目のインデックスとl番目のインデックスとの間の相互インデックス行列と呼ぶことにする。

相互インデックス行列を用いて、k番目のインデックスのインデックス値同士の直積空間からの写像$\mathbf{G}(k|l):W_k\times W_k\to\{0,1,2,\cdots\}$を、$k$番目のインデックスと$l$番目のインデックスとの間の相互インデックス行列$\mathbf{C}(k,l)$とその転置行列とのsum-min合成により定義する。

$$\mathbf{G}(k|l)=\mathbf{C}(k,l)\circ\mathbf{C}(k,l)^T \tag{4}$$

この行列$\mathbf{G}(k|l)$は、各行と各列がk番目のインデックスの各インデックス値に対応した$m_k\times m_k$の正方行列となる。この$\mathbf{G}(k|l)$を、l番目のインデックスにより評価されたk番目のインデックスの一般化同時出現行列と呼ぶ。一般化同時出現行列$\mathbf{G}(k|l)$の第(i_k,j_k)要素は、k番目のインデックスにおけるi_k番目のインデックス値$w_{k,i_k}\in W_k$とj_k番目のインデックス

値$w_{k,j_k} \in W_k$との関係の強さである。この対角要素(i_k, i_k)は、k番目のインデックスにおけるi_k番目のインデックス値$w_{k,i_k} \in W_k$がすべての事例に出現した頻度の総数となる。

k番目のインデックスを対象インデックス、l番目のインデックスを参照インデックスとする。そして、k番目のインデックスのインデックス値の概念の間の包含関係を意味するファジィ写像$\varphi(k|l): W_k \times W_k \to [0,1]$を、一般化同時出現行列に基づき、次のように定義する。

$$[\varphi(k|l)]_{i_k,j_k} = \begin{cases} [\mathbf{G}(k|l)]_{i_k,j_k} / [\mathbf{G}(k|l)]_{i_k,i_k} & ; [\mathbf{G}(k|l)]_{i_k,i_k} \neq 0 \\ 1 & ; [\mathbf{G}(k|l)]_{i_k,i_k} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

この行列を、l番目のインデックスにより評価されたk番目のインデックスの概念包含行列と呼ぶことにする。概念包含行列は、$m_k \times m_k$の正方行列であり、その第(i_k, j_k)要素は、k番目のインデックスにおけるi_k番目のインデックス値$w_{k,i_k} \in W_k$の概念がj_k番目のインデックス値$w_{k,j_k} \in W_k$の概念に包含される度合を意味する。

k番目のインデックスのインデックス値同士の直積空間からのファジィ写像$\mathbf{N}(k|l): W_k \times W_k \to [0,1]$として、概念包含行列を用いてファジィ下位語行列を次のように定義する。

$$[\mathbf{N}(k|l)]_{i_k,j_k} = \begin{cases} \varphi(k|l)_{i_k,j_k} & ; \varphi(k|l)_{i_k,j_k} > \varphi(k|l)_{j_k,i_k} \\ 0 & ; \varphi(k|l)_{i_k,j_k} \leq \varphi(k|l)_{j_k,i_k} \end{cases} \quad (6)$$

ファジィ下位語行列は、$m_k \times m_k$の正方行列であり、その各要素は0から1までの実数値を取る。この行列の第(i_k, j_k)要素は、k番目のインデックスにおけるi_k番目のインデックス値$w_{k,i_k} \in W_k$がj_k番目のインデックス値$w_{k,j_k} \in W_k$の下位語のファジィ集合に属するメンバーシップ値を示す。ここで、(6)式で場合分けにより強制的に0を指定しているのは、インデックス値の対、AとBについて、AがBの下位語であり、なおかつ、BがAの下位語であるという、人間の感覚に不自然な状況を避けるためである。

k番目のインデックスのインデックス値同士の直積空間からのファジィ写像$\mathbf{R}(k|l): W_k \times W_k \to [0,1]$として、概念包含行列を用いてファジィ関連語行列を次のように定義する。

$$[\mathbf{R}(k|l)]_{i_k,j_k} = \min\left[\varphi(k|l)_{i_k,j_k}, \varphi(k|l)_{j_k,i_k}\right] \quad (7)$$

ファジィ関連語行列は、$m_k \times m_k$の正方行列であり、その各要素は0から1までの実数値を取る。この行列の第(i_k, j_k)要素は、k番目のインデックスにおけるi_k番目のインデックス値$w_{k,i_k} \in W_k$がj_k番目のインデックス値$w_{k,j_k} \in W_k$の関連語のファジィ集合に属するメンバーシップ値を示す。

3．試作システムにおける評価結果

災害派遣活動に関する意思決定システムの一部として、災害派遣活動の類似事例検索システムを試作した。事例は、1990年1月から1994年8月までの記事を元に100件あまりを作成し、登録した。

各事例には、図1に示すようなインデックスを設定し、事例の内容によりそれぞれのインデックス値を1個ずつ付与した。

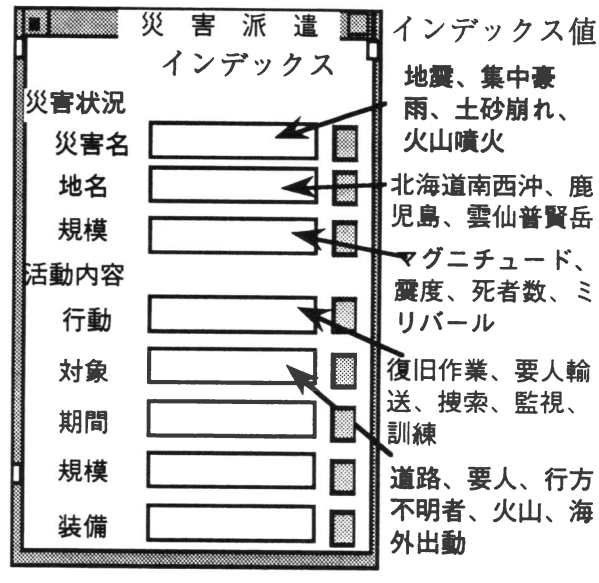


図1　事例のインデックス構造

ここでは、災害名のインデックスを参照インデックスとし、行動のインデックスを対象インデックスとして、前章に述べた相互インデックス行列に基づく方法により、ファジィシソーラスを生成した結果について報告する。

まず、図2に、(3) 式により定義された、災害名のインデックスと行動のインデックスとの間の相互インデックス行列を図示する。この行列は、2種類のインデックスのインデックス値の組が、同一の事例に現れた頻度を示している。たとえば、災害として集中豪雨が発生した場合には、災害派遣活動として災害復旧を行う頻度が高いことが、この図から読み取れる。

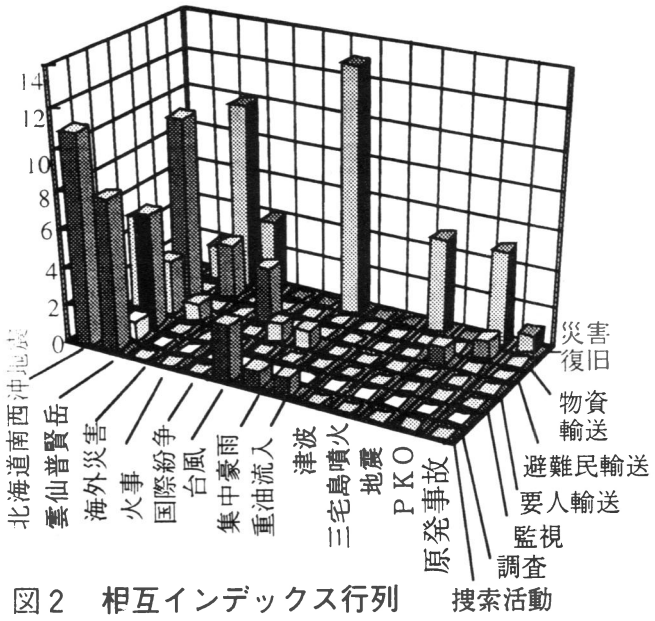


図2　相互インデックス行列

この相互インデックスを元に求められる (7) 式により定義された、行動のインデックスのインデックス値に関するファジィ関連語行列を図3に図示する。同一のインデックス値の関連は1であり、関連語関係は相互的なものであるから、この行列は対象で反射的な行列となることがわかる。また、たとえば、避難民輸送という活動と監視という活動は、活動に関わる人員や装備などは異なるが、災害の種類に着目した評価からは、関連性が高いことが、図から読み取ることができる。

この関連語行列、および (6) 式により定義されるファジィ下位語行列が、ファジィシソーラスの具体的表現である。これらの行列により定量化されたインデックス値間の関係を用いて、検索時に事例間の類似関係を定量化することが可能となる。

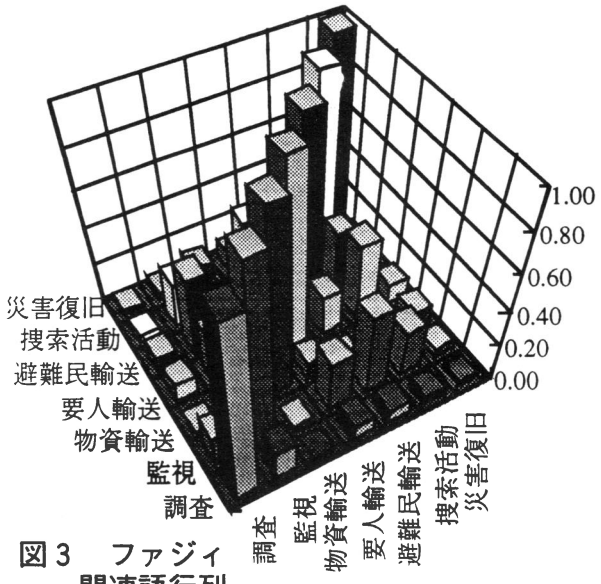


図3　ファジィ関連語行列

4．おわりに

事例ベース推論の複数インデックスの構造を利用した相互インデックス行列に基づくファジィシソーラス生成法について示した。この方法を、実際の災害派遣活動の事例を登録した試作システムに適用し、ファジィシソーラスの生成を行った。

参考文献

[1] 小林重信：第1章総論、5編人工知能と知識工学、in　計測自動制御学会編：ニューロ・ファジィ・AIハンドブック、pp.311-338　(1994.5.25)．

[2] 野本弘平、若山栄夫、桐本哲郎、近藤倫正：引用関係に基づくファジィ検索システム、システムと制御、Vol.31, No.10, pp.748-755　(1987)．

[3] K.Nomoto, S.Wakayama, T.Kirimoto, Y.Ohashi and M.Kondo : A document retrieval system based on citations using fuzzy graphs, Fuzzy Sets and Systems, Vol.38, pp.207-222　(1990)．

[4] S.Miyamoto, T.Miyake and K.Nakayama : Generation of a pseudothesaurus for information retrieval based on cooccurrences and fuzzy set operations, IEEE Trans. Syst.Man & Cybern., Vol.SMC-13, No.1, pp.62-70 (1983)．

[5] 宮本定明、三宅輝久；第5章ファジィ理論と情報検索のモデル、in　日本ファジィ学会編；講座ファジィ第9巻、ファジィデータベースと情報検索、日刊工業新聞社，　pp.123-151　(1993.9.30)．

連絡先
〒247鎌倉市　大船　5-1-1
三菱電機 (株)　電子システム研究所
野本弘平
tel.　0467-41-2522
fax.　0467-41-2519
E-mail nomoto@eml.melco.co.jp

TA3-4

Fuzzy-ID3と非線形回帰モデルによる熟練作業者のスキルの抽出と冗長マニピュレータの作業計画への応用

Criteria of Skilled Operators by Fuzzy-ID3 and Nonlinear Regression Model for Motion Planning of a Redundant Manipulator

柴田　崇徳　　阿部　保　　谷江　和雄　　野瀬　松男
Takanori SHIBATA　Tamotsu ABE　Kazuo TANIE　Matsuo NOSE

機械技術研究所ロボット工学部バイオロボティクス研究室
Bio-Robotics Div., Robotics Department, Mechanical Engineering Laboratory, MITI
コマツ　中央研究所
Komatsu, Ltd.

Abstract - A modeling method of criteria of skilled operators is proposed for motion planning of a redundant manipulator in industrial applications. The method employs Fuzzy-ID3 to extract important factors from the criteria and GMDH (group method of data handling) to model them to evaluate motion plans. Then, it applies a genetic algorithm to optimize redundancy of the manipulator. The proposed method reduces the operator's labor and time for task teaching process, so that he only has to determine a path without considering redundant parameters. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

1. まえがき

産業用マニピュレータの適用分野にプレス成型品等の３次元ワークを切断する作業がある．この作業では，マニピュレータに１自由度の冗長性があるため，切断装置（以下ツールと記す）の長手方向回転角は作業者によって任意に設定できる(**Fig. 1**:Ψ角と記す)．同様な冗長性は溶接作業等，他の作業にも存在し，有効に利用される．しかし，このような冗長性は作業者が行う教示作業の複雑さを増すという問題を生じさせる．切断作業における教示では，Ψ角の設定が悪いと関節部の加速度変動が大きくなり軌跡ズレや振動が発生する場合がある．こうした教示作業に対し，熟練作業者は冗長性をうまく利用して軌道を教示する能力を持つ．しかし熟練作業者においても，その最適化には多くの時間と労力を必要とする．

一方，冗長マニピュレータの最適化に関する研究は，数多く行われている．それらの手法は，局所的（Local）な最適化手法[1]と大域的（Global）な最適化手法[2]に大きく分類できる．しかし，両者の手法には，それぞれ種々の問題があり，実用には至らないのが現状である．

そこで筆者らは，教示作業における冗長性最適化の自動化を目的として，熟練作業者が持つ評価規範から評価関数を定義し，GA(Genetic Algorithm)を用いて最適化する手法を提案した[3]．しかし，熟練者の評価規範を抽出することは難しく，第１報，第２報では，それぞれヒアリングと主成分分析により，その技能を抽出し定式化を行ったが，ヒアリングには，曖昧性のあるヒアリング結果から，その評価関数を確実に定式化できたかという疑問があり，また，主成分分析には，

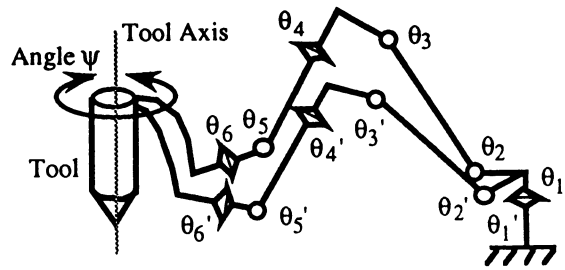


Fig.1 Rotational Angle of Tool Axis

計算時間がかかり過ぎるという問題があった[4]．

そこで本稿では，Fuzzy-ID3を適用し熟練者の技能を抽出し，重要な変数の絞り込みを行った．そして，抽出された変数を入力変数とし，非線形回帰モデルの一手法であるGMDH (Group Method of Data Handling)を適用し，評価関数を定式化した．

2．切断作業における動作計画

切断作業における教示作業では，ツールは対象ワークに対して常に垂直な姿勢を保持するよう，かつツール先端とワークとの距離は，常に一定に保たれるよう指定される．作業者は，この条件を満たしつつ軌道上の通過点（以下，パスポイントと記す）の位置と姿勢，およびパスポイント間の補間方法(例えば，直線or円弧)を順次教示していく．しかし，パスポイントを教示する際，Ψ角は任意に設定できるため，**Fig. 2**のようにパスポイント毎の最適なΨ(i)角は，作業者が設定しなければならない．（i=1, 2, ... n: nは，軌道上のパスポイント数）

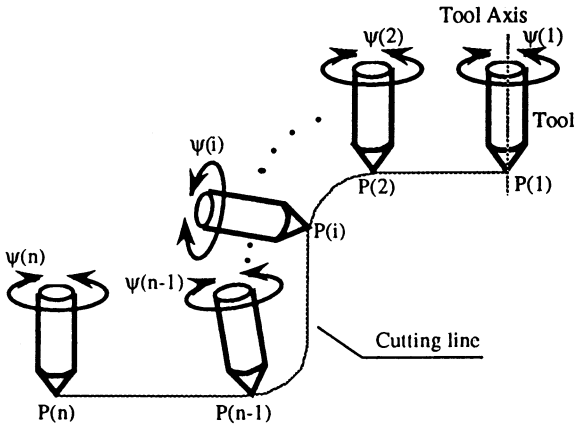


Fig.2 Optimization Problem for Combination of Angles, Ψ

3．評価関数の定式化

ここでは，教示データから熟練者の技能を抽出し，評価関数を定式化した結果について述べる．教示データは，熟練作業者が作成したものを使用し，教示場所は，マニピュレータの常用使用範囲内の異なる6カ所，軌道上のパスポイント数は1カ所あたり，10点である．

3.1 Fuzzy-ID3アルゴリズム

Fuzzy-ID3アルゴリズムは，Quinlan によって提案されたID3[5]を数値や曖昧性を含んだ属性まで扱えるよう拡張したものである[6]．Fuzzy-ID3アルゴリズムもID3と同様にエントロピーを用いることによって，「データを分類するときのテスト回数の期待値が最小になる決定木を生成する」ことを目的としている．また，Fuzzy-ID3から得られる決定木は，ファジィ決定木となる．このファジィ決定木を用いた分類は，最上部にある分岐ノードから順次分岐ノードにおいて曖昧な判断を行い，確信度を持った事例を下位に伝播することで行われる．最終的には，末端ノードに到達した事例の確信度の合計で分類クラスの判断を行う．

本研究では，このFuzzy-ID3を熟練者の技能抽出に用いた．

3.2 決定木の生成と判断属性の抽出

ここでは，ファジィ決定木を生成するためのデータ処理方法について述べる．

本研究で，その組み合わせを最適化する変数は，パスポイント毎のツール軸周りの回転角度（ロール角）Ψ(i)である(**Fig.1**)．この変数は，教示ペンダントと呼ばれるマニピュレータ操作用の携帯用ユニット上の一つの釦で簡単に操作することができる．しかし問題は，この操作によって設定された軌道上のΨ(i)の組み合わせである．従って，熟練者は軌跡ズレや振動が起きそうな軌道区間に対して，この釦を操作し，最適なΨ(i)の組み合わせを設定している．すなわち，パスポイント間のΨ(i)の偏差量ΔΨ(=｜Ψ(i)－Ψ(i-1)｜)が大きい場合には，熟練者はそのパスポイント間で振動が

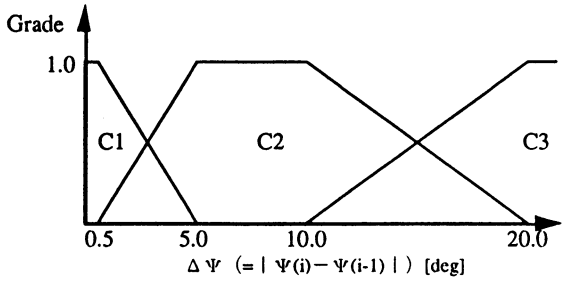


Fig.3 Classfication of Redundant Parameter: ΔΨ

発生しないための調整をしたことになる．このような考えからΔΨを以下のように分類し，ファジィ決定木を生成した．

パスポイント間の偏差量:ΔΨを**Fig.3**に示すメンバシップ関数で3つの確信度(p_j)付きのクラスに分類する．ここで3つのクラス(C_k)（k=1,2,3）とは，以下のように熟練者の調整度を表すと考えられる．

C_1：調整を必要としない区間
C_2：調整を必要とした区間
C_3：かなりの調整を要した区間

各パスポイント間で，この分類クラスC_k（k=1,2,3）を分類する判断属性A_a（a=1,･･･, N_a）の値を計算し，各クラスの属性値v_{ai}として割り当てた．訓練事例数は，54組とした．

ここで，クラスを分類する判断属性A_aは，前回の熟練作業者のヒアリング結果により，熟練者は，マニピュレータの5軸中心位置（直交座標系における**Fig.1**-θ_5の軸中心位置を指す．）の挙動を特徴量として認識していることがわかっているため，5軸中心位置の物理量を主に選択した．また，一般的なパラメータとして各軸の加速度・ジャーク値等の属性も選択した．属性は全部で9個であり，それら属性を以下に示す．

A_1: 5軸中心位置の速度ベクトルの成す角の平均値
A_2: 5軸中心位置の速度ベクトルの成す角の最大・最小値の差
A_3: 5軸中心位置の速度絶対値の平均値
A_4: 5軸中心位置の速度絶対値の最大・最小値の差
A_5:各軸角速度ノルムの平均値
A_6: 5軸中心位置の加速度絶対値積分の平均値
A_7: 5軸中心位置のジャーク値絶対値積分の平均値
A_8:各軸角加速度ノルムの平均値
A_9:各軸ジャーク値ノルムの平均値

求めた分類クラスと各属性値からファジィ決定木を生成した．得られたファジィ決定木を**Fig.4**に，それぞれの分岐ノードでのメンバシップ関数を**Fig.5**に示す．本稿では，ここで得られた重要属性A_2, A_3, A_5 を非線形回帰モデルへの入力変数として用いた．

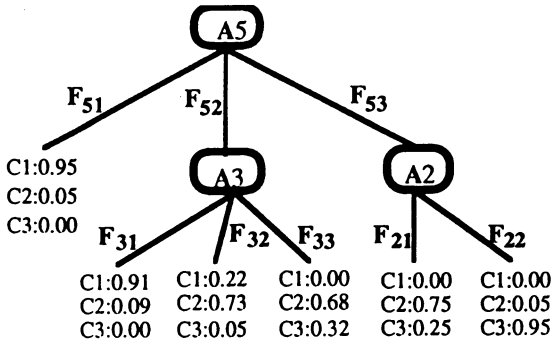
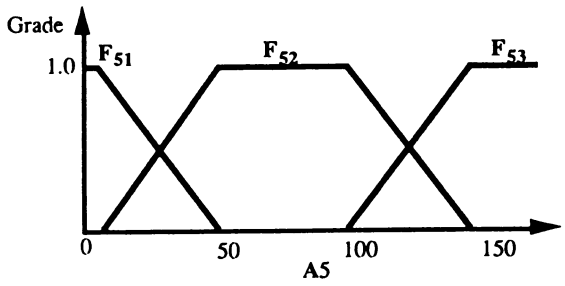
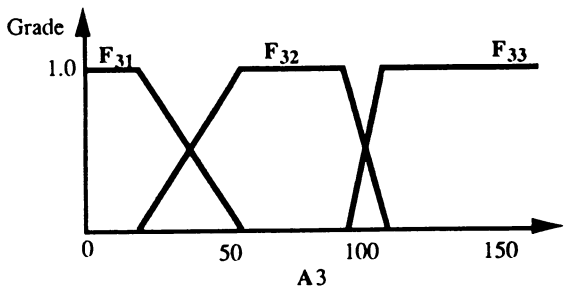


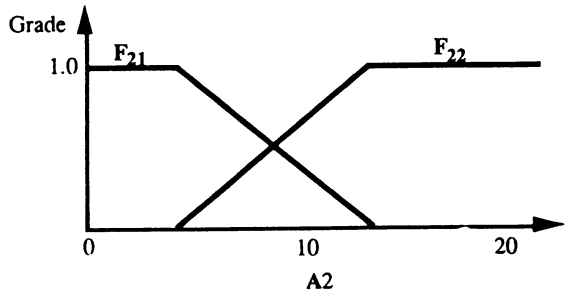
Fig.4 Fuzzy Decision Tree



(a) Membership function for attribute A_5



(b) Membership function for attribute A_3



(c) Membership function for attribute A_2

Fig.5 Acquired Membership Functions of Important Attributes

3.3 非線形回帰モデルへの入出力データの生成

評価関数を定義するため，学習用データを作成した．学習用データである入出力データは，パスポイント間の両端点:Ψ(i)とΨ(i+1)の一方の端点：Ψ(i)に変位量

Table1 Number of dΨ(j) [deg]

dΨ (1)	dΨ (2)	dΨ (3)	dΨ (4)	dΨ (5)	dΨ (6)	dΨ (7)	dΨ (8)	dΨ (9)	dΨ (10)	dΨ (11)
-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25

：dΨ(j)を加算することで作成する．dΨ(j)の値を**Table1**に示す．それぞれのdΨ(j)で，前に述べた九つの属性値を演算し入力データとした．また，GMDHの出力用データは，**Table1**のdΨ(j)を２乗して入力の組の平均値で除算した値とした．入出力用データの組は，全部で594組得られた．

3.4 非線形回帰モデリング

3.2と3.3で作成したデータから評価関数を求める．ここでは，非線形回帰モデリングの一手法であるGMDH(Group Method of Data Handling)[7]を適用する．求めた評価関数を下式に示す．

$$\begin{aligned} fe^*(i) = {} & 9.19052 + 0.15402\, v_{1i} + 0.01496\, v_{1i}^2 \\ & - 3.86158\, v_{2i} + 1.10916\, v_{1i} v_{2i} \\ & + 1.75353\, v_{2i}^2 - 0.23117\, v_{3i} \\ & - 0.15339\, v_{1i} v_{3i} - 0.24251\, v_{2i} v_{3i} \\ & + 0.16003\, v_{3i}^2 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで，$fe(i)$は第ｉ～第ｉ＋１パスポイント間の評価値，v_{ai}は第ｉ～第ｉ＋１パスポイント間のａ番目（ａ＝1,2,3，A_2，A_3，A_5 の属性値はそれぞれ v_{1i}，v_{2i}，v_{3i} に対応する）の属性値である．また，軌道区間全体の評価関数として，(1)式の総和E^*を定義する．すなわち，

$$E^* = \sum_{i=1}^{n-1} fe^*(i) \tag{2}$$

となる．ここで，ｎは軌道上のパスポイントの総数である．GAの計算では，このE^*を最小にするΨ(i)の組み合わせを求める．

4．遺伝アルゴリズムによる最適化

最適化には，GA[8-9]を用た．また，コーディング方法は，与えられた初期値Ψ_0(i)からの偏差量とした．例えば，１つの個体のコード列として，

$$"d\psi(1), d\psi(2), \cdots, d\psi(n-1), d\psi(n)"$$

(但し，$d\psi(n)$は実数値)

が設定される．

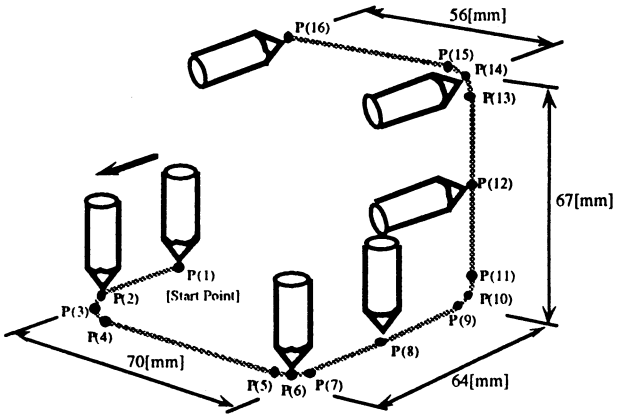


Fig.6 Trajectory for Simulation

5．シミュレーション結果

シミュレーション用データとして熟練作業者が設定したΨ(i)（Ψskill(i)と記す）に±20[deg],±30[deg],±40[deg]を最大値とする2系列の乱数を加算し，擬似的に無計画に教示されたΨunskill(i)を作成する．シミュレーションでは，この6種類のデータに最適化を施した．使用した切断軌跡を**Fig.6**に示す．**Fig.6**で**P**(i)は軌道上のパスポイントを示す．また，シミュレーション条件は，ツール先端移動速度を1.5[m/min](=一定)とし，GAは個体数を9個体，世代を600世代まで行った．

最適化時の各世代における最良の評価値の推移を示す．評価値は低いほど良い．熟練者の評価値は，最初からその値が低く，最適値に近いことが認められる．しかし，乱数を加算されたデータは，最初は評価値が悪く，世代が進むにつれて熟練者の評価値に近づいていく様子が分かる．この結果から，定義した評価関数が熟練者の規範を良く表しており，かつ，その最適化により非熟練者のデータを熟練者並に最適化することが可能であることが分かる．

次にパスポイント毎の偏差量ΔΨ(i)（＝Ψopt(i)−Ψskill(i)）を比較する．ここで，Ψopt(i)は，最適化後に得られたΨ(i)である．得られた結果を**Fig.7**に示す．

Fig.7より，最適化後に得られたΨopt(i)は，ほぼ熟練者のそれと一致していることが分かる．

7．まとめ

本研究では，産業用マニピュレータの冗長性最適化に関して，熟練作業者の評価規範を考慮した評価関数を定義し，GAによって最適化する手法を提案してきた．本稿では，Fuzzy-ID3による技能の抽出と非線形回帰モデルによる評価関数の定式化を行い，得られた評価関数が，熟練者の評価とほぼ一致していることを示した．

今後の課題として，より多くの動作で，定義した評価関数の有効性を検証する必要や，ワークとの干渉回避を含めた最適がある．

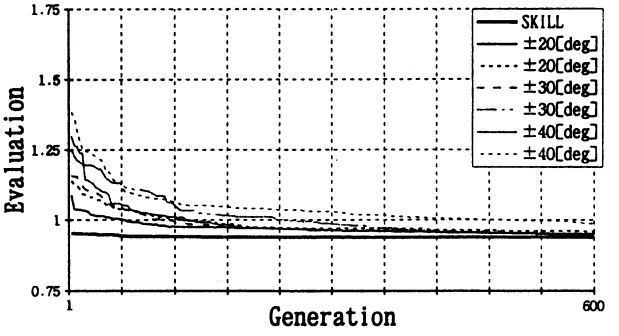


Fig.6 Transition of Best Evaluation Value

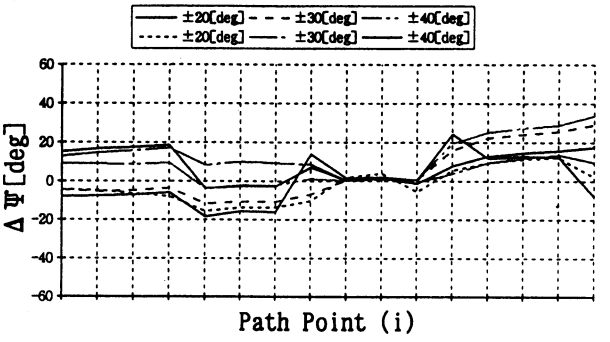


Fig.7 Transition of ΔΨ(i) Values on Path Point Using Evaluation Function Based on Interview with Skilled Operator

参 考 文 献

[1] J.M.Hollerbach, et al., Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization, IEEE jounal of Robotics and Automation, RA-3-4, pp.308-316 (1985)

[2] 中村，花房，関節型ロボットアームの最適冗長性制御，SICE論文集，Vol.21，No.5，pp.501-507 (1985)

[3] 阿部，柴田，谷江，野瀬，冗長性を有するマニピュレータの動作計画（第1報），日本ロボット学会予稿集，No.3，pp.907-908 (1994)

[4] 柴田、阿部、谷江、野瀬、冗長性を有するマニピュレータの動作計画（第2報）、日本機械学会第72期通常総会講演会講演論文集、pp. 25, 26 (1995)

[5] J.R.Quinlan, Learning Efficient Classisication Procedures and Their Application to Chess End Games, in Machine Learning, Tioga Press, pp.463-482 (1983)

[6] 櫻井，荒木，ファジィ理論を適用した知識獲得，第15回知能システムシンポジウム，pp.169-174(1992)

[7] 池田，GMDHの基礎と応用，システムと制御，Vol.23，No.12，pp.710-717 (1979)

[8] Y.Davidor, Analogous Crossover, Proc. of ICGA'89, pp.98-103 (1989)

[9] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison Welsey (1989)

連絡先：〒305つくば市並木1－2
機械技術研究所ロボット工学部　柴田崇徳
Tel: 0298-58-7299　Fax: 0298-58-7201
E-mail: shibata@mel.go.jp

TA4-1

ファジィクラスタリングを用いたエレベータガイドレールの曲げ矯正における加工力の推定

An estimation method of stress required for the reformation of the elevator guide rail using fuzzy clustering method

長谷川 貴史* 古橋 武* 石丸 伊知郎** 斉藤 英樹** 内川 嘉樹*
Takashi HASEGAWA Takeshi FURUHASHI Ichirou ISHIMARU Hideki SAITOU Yoshiki UCHIKAWA

*名古屋大学工学部
Faculty of Engineering, Nagoya University
**株式会社 日立製作所 生産技術研究所
Production Engineering Research Laboratory Automation Engineering Dept. Hitachi, Ltd.

Abstract: In recent years, the speed of elevators has been increased. In order to increase the speed, the guide rail of the elevator should be as straight as possible. The guide rail has been reformed by an experts'; however, the number of experts has been decreasing year by year. Automatic reformation is required.

This paper presents an estimation method of the stress required to reform the elevator guide rail using a fuzzy clustering method. The results of simulations are highly satisfactory. The precision of reform experiment also satisfies the target.

1 はじめに

近年のエレベータの高速化にともない、エレベータガイドレールの曲げ矯正は、より精密なものが要求されている。通常、曲げ矯正は熟練者の経験に基づいてなされている。しかし、今後熟練者の不足が予測されるため、曲げ矯正の自動化の要望が高まっている。エレベータガイドレールは硬化弾塑性体であり、その表示式は実験的にいくつか提案されている。従って、正確な表示式を求めることができれば、必要な加工力を求めることは可能となる。しかし、ガイドレールの素材のばらつきにより、加工特性がレール毎に異なり表示式を一意に定めることは困難である。また、除荷時にスプリング・バックが発生するが、負荷状態での変位量の測定が困難なため、スプリング・バックをあらかじめ考慮して負荷をかけることは困難である。

本稿では、ファジィクラスタリング手法を用いて加工データから規範出力を求め、加工力を推定する手法を提案する。中森, 領家[1]は、超楕円体クラスタリング手法を提案している。また文献 [2] において、中小河川水質予測モデルの構築を行なうことにより、その手法の有用性も示している。超楕円体クラスタリング手法では、各々の部分データを用いて部分線形モデルを構築することにより予測モデルを同定している。しかし、ガイドレールの表示式のパラメータには、一次相関がないため部分線形モデルでは精度の良い加工力推定は困難である。そこで、本稿では表示式のパラメータのクラスタリングには、Fuzzy k-means 法[3]を用いる。またクラスタリングに際してはガイドレールの特性の近似式である n 乗式に着目して、このパラメータを用いることとする。

クラスタリングの結果得られた規範出力を用いて、加工力の推定を行なう手法を示す。本稿では数値シュミレーションと実験機によるガイドレールの加工実験により本手法の有用性を示す。

2 ガイドレールの加工特性

まず始めに、ガイドレールの加工特性の表示式を近似することを行なう。図 1にガイドレールの応力-ひずみ関係の例を示す。横軸に変位量$\varepsilon(\mu m)$、縦軸に加工力σ(kgf) を表す。応力-ひずみ関係の式表示を行なう場合、しばしば次のような簡単化がおこなわれる。[4]

(i) バウシンガー効果の無視

(ii) ひずみ硬化の無視

(iii) 弾性ひずみの無視

ここで、(i) のみを採用すれば対象は硬化弾塑性体と考えられる。また (i), (iii) を採用することにより、対象とする材料は硬化剛塑性体と考えられる。本稿では (i), (iii) を採用する。

普通、塑性範囲にあてはまる実験式は

$$\sigma = Y + F\varepsilon^n$$

もしくは

$$\sigma = F(\varepsilon_Y + \varepsilon)^n$$

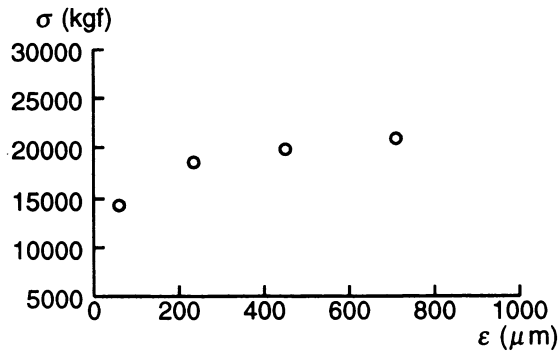


図 1: 応力-ひずみ関係の一例

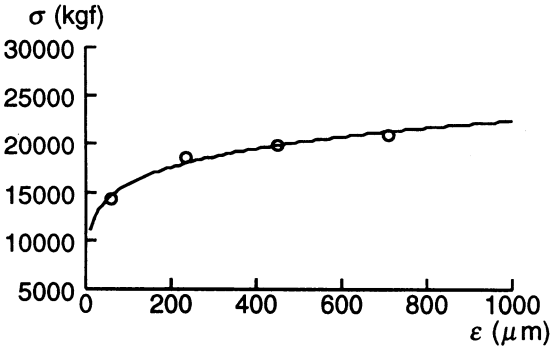


図 2: n 乗式による近似例

と表され、3 個の材料定数 F, n および Y もしくは ε を用いれば、十分な精度で式表示することができる。上式の特別な場合として、

$$\sigma = F\varepsilon^n \tag{1}$$

で表される n 乗式がある。この式により表される特性は、n 乗硬化特性と呼ばれ、延性材料に対してはしばしば良い近似度であてはまる。

n 乗式は近似式であるが、観測された加工力 σ および変位量 ε を用いて、簡単に 2 個の材料定数 F, n を求めることができるため、本稿ではガイドレールの特性を n 乗式を用いて近似する。

n 乗式の 2 個の材料定数 F, n は次のようにして求められる。(1) 式に示される n 乗式の両辺の対数をとることにより、n 乗式は

$$\begin{aligned} \log\sigma &= \log F\varepsilon^n \\ &= \log F + \log\varepsilon^n \\ &= \log F + n\log\varepsilon \end{aligned} \tag{2}$$

と表される。ここで、

$$y = \log\sigma \tag{3}$$

$$x = \log\varepsilon \tag{4}$$

$$b = \log F \tag{5}$$

とすることにより、

$$y = b + nx \tag{6}$$

となり、一次式で表される。従って、加工実験により計測された加工力 σ と変位量 ε の対数をとり、その結果を最小自乗法により一次式で表すことにより、(1) 式の材料定数 F, n を簡単に求めることができる。

図 2に図 1の関係を、n 乗式を用いて近似した例を示す。この図に示すように、n 乗式を用いて実際の応力-ひずみ関係がよい精度で表現できることがわかる。

3 クラスタリング手法

現在データのクラスタリングには Fuzzy k-means 法を用いている。Fuzzy k-means 法の発見的アルゴリズムは次のようになる[5]。

STEP 1 クラスタの数を g, ステップ数 s=0 とし、ファジィクラスタ $U = (u_{ij})$ の初期値 $U^{(0)}$ を適当に与える。

STEP 2 $s = s + 1$ とする。

STEP 3 クラスタの平均ベクトル $v_i^{(s)}(i = 1, 2, \cdots, g)$ を次式で求める。

$$v_i^{(s)} = \frac{\sum_{j=1}^{N}(u_{ij}^{(s-1)})^m x_j}{\sum_{j=1}^{N}(u_{ij}^{(s-1)})^m}(1 \le i \le g) \tag{7}$$

STEP 4 各点のクラスタへの所属行列を次式により計算する。

$$u_{ij}^{(s)} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{g}\left(\frac{d^2(x_j, v_i^s)}{d^2(x_j, v_k^s)}\right)^{\frac{1}{(m-1)}}}; 1 \le i \le g, 1 \le j, \le N \tag{8}$$

$$u_{ij}^{(s)} \in [0,1], \sum_{i=1}^{g} u_{ij}^{(s)} = 1 \tag{9}$$

ここで、d は距離関数であり、$d^2(x_j, v_i) = ||x_j - v_i||$ とする。また、N はデータ数である。

STEP 5 終端条件

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{g}|u_{ij}^{(s)} - u_{ij}^{(s-1)}| \le \epsilon \tag{10}$$

ここで、m はクラスタのファジィ性を表すパラメータである。

クラスタリングをおこなう際、クラスタ中心と各データ点との距離 d を求める。距離関数は、

$$d^2(x_j, v_i) = \sum_{p=1}^{n}|x_{ip} - v_{jp}|^2 \tag{11}$$

を用いた。

4 加工力推定法

本章では、任意の目標変位量に対する加工力の推定法について説明する。加工力を推定するために、まず、規範出力を作成する。規範出力を作成するために、ある程度の数の加工実験データを準備する。次に、その加工実験データの加工力 σ、変位量 ε を用いてそれぞれのガイドレールに対して、材料定数 F, n を求める。この材料定数 F, n を Fuzzy k-means 法を用いて任意のクラスタ数にクラスタリングを行なうことにより、任意の数の規範出力を作成する。規範出力は、各クラスタの出力としての材料定数 F, n を用いて求めることも可能であるが、n 乗式は変位量が大きくなると誤差が増大するため、クラスタリングに用いたデータを用いて次式で求める。変位量 ε に対する i 番目のクラスタの出力である加工力 σ_i^c は、

$$\sigma_i^c(\varepsilon) = \frac{\sum_{j}^{N} u_{ij}\sigma_j^e(\varepsilon)}{\mu_i} \tag{12}$$

$$\mu_i = \sum_{j}^{N} u_{ij} \tag{13}$$

と求められる。ここで、Nはデータの数を表す。また、$\sigma_j^c(\varepsilon)$は、クラスタリングに用いたj番目のデータから求められる、変位量εに対する実加工力を表す。u_{ij}は、i番目のクラスタに対するj番目のデータの帰属度を表す。また、μ_iは、j番目のデータのi番目のクラスタに対する帰属度の総和である。u_{ij}は、(8)式を用いて矯正中のガイドレールの材料定数F,nに対して求めるため、あらかじめ2回以上の加工を行ない材料定数を求めなければ、適用することができない。

次に目標変位量ε_dに対する加工力を

$$\sigma_{t+1}^* = \frac{\sum_i^g \sigma_i^c(\varepsilon_d)\cdot\mu_i\cdot u_i}{\sum_i^g \mu_i\cdot u_i} \tag{14}$$

と求める。gはクラスタ数。u_iは、t回目までの加工によって求められた材料定数F_t,n_tのi番目のクラスタに対する帰属度を表す。また、応力-ひずみの関係より、t回目の実加工力σ_tに対して、変位量は必ずt回目の実変位量ε_tとなることより、推定加工力の補正を行なう。補正値は、F_t,n_tを用いてt回目の加工での実変位量ε_tに対する推定加工力σ_t^*を

$$\sigma_t^* = \frac{\sum_i^g \sigma_i^c(\varepsilon_t)\cdot\mu_i\cdot u_i}{\sum_i^g \mu_i\cdot u_i} \tag{15}$$

と推定し、その推定値σ_t^*と実加工力σ_tより、

$$\sigma_t^* - \sigma_t \tag{16}$$

と求められる。従って最終的な推定加工力は

$$\sigma_{t+1}^* - (\sigma_t^* - \sigma_t) \tag{17}$$

と求められる。

5 シミュレーション結果

まず始めに、シミュレーションにより本手法の検証を行なう。操業時には、目標変位量εは常に一定であるが、シミュレーションでは、一つの加工点に対して任意の回数目標変位量の設定を行ない加工力の推定を行なった。ただし、加工方向は同一となるように目標変位量の設定をした。

評価は次の式により行なう。

$$E = \frac{\sum_t^N |\varepsilon_t^* - \varepsilon_t|}{N} \tag{18}$$

Nは一つの加工点に対して設定した目標変位量の数、ε_t^*はt回目の目標変位量に対して求められた推定加工力で加工した場合の変位量、ε_tは目標変位量を表す。ただし、ε^*は実験データより近似的に求められる。

図3は規範出力の作成に用いたデータの応力-ひずみ関係を表す。それぞれの応力-ひずみ関係から、材料定数F,nを求めクラスタリングを行なう。図4にクラスタリングの結果を示す。図4は横軸がF、縦軸がnを表す。○はそれぞれのデータの材料定数であり、×がクラスタ中心を表す。本稿では、クラスタ数4、クラスタリングにおけるパラメータ$m=3$、クラスタリング終了条件$\epsilon=0.001$としてクラスタリングを行なった。その結果、図5に示す4本の規範出力が得られた。

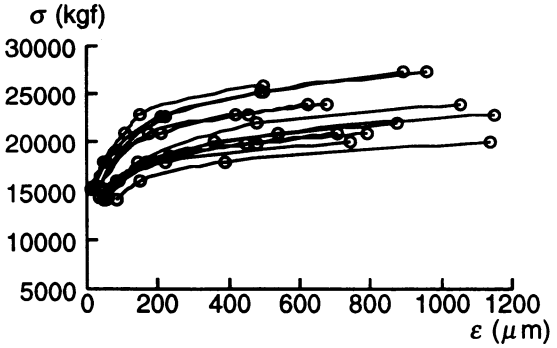


図 3: 規範表示式作成用データ

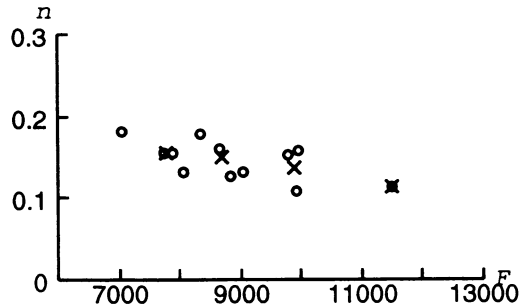


図 4: クラスタリング結果

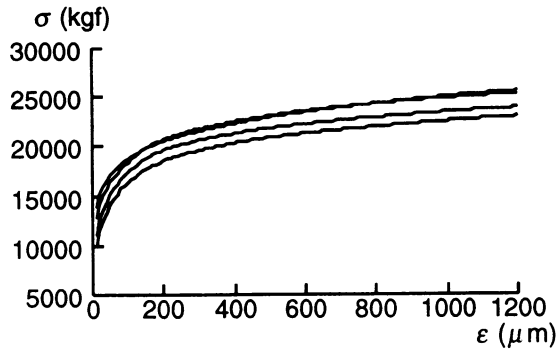


図 5: 規範表示式

この結果を用いて加工力の推定を行なった結果を表1に示す。6種類のガイドレール、合計10ヶ所に対して、加工力の推定を行なった。各ガイドレールの部分に対して、N回の目標変位量の設定を行ない加工力の推定を行なった。実験においては目標変位量に対して$\pm 15\mu$m以内の精度で変形を行な

うことが要求される。シミュレーションの結果、レールの種類、位置に関係なく加工力の推定が行なわれた。精度は要求精度を満たすものではないが、変形量が推定値であることを考慮すると充分な精度で推定が行なわれていると考える。

6 実験結果

次にこの結果をもとに、実験機でのガイドレールの矯正を行なった結果を示す。図6は矯正前のガイドレール、図7は矯正後のガイドレールの形状を表す。規範出力はシミュレーションと同一のものを用いた。ガイドレールの矯正は、要求精度 (15μm 以下) を充分満たすものとなった。

実際の加工では、曲げ戻し時にバウシンガー効果により降伏応力の絶対値に著しい低下がみられる。実験においては、曲げ戻しの際にバウシンガー効果を考慮した加工力の推定を行なっているが、本稿では説明を省略する。

7 まとめ

実験データより規範出力を Fuzzy k-means 法により求め、エレベータガイドレールの曲げ矯正における加工力の推定を行なう手法の提案をおこなった。本手法によれば、ガイドレールの材料特性の違いを考慮して、加工力の推定を精度良く行なうことができる。

本アルゴリズムは、材料定数 F, n をもとに加工力の推定を行なっている。材料定数は加工結果をもとに最小自乗法により求めるため、一ヶ所の加工に対してあらかじめ2回の加工結果が必要となる。そのため、一ヶ所の矯正に3回以上の回数を要することとなる。今後の課題として、加工回数を減少させるための手法の検討があげられる。

参考文献

[1] 中森, 領家 : "ファジィモデル構築のための超楕円体クラスタリング法", 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.3, pp.537–547(1993)

[2] 中森, 領家 : "探索的ファジィモデリング", 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.6, pp.1323–1336(1993)

[3] J.C.Bezdec : "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms", Plenum Press, (1981)

[4] 河合 望 : 新板 塑性加工学, 朝倉書店, pp.27–32

[5] 講座 ファジィ 6 ファジィOR 日本ファジィ学会編, 日刊工業, pp.190-191

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

表 1: シミュレーション結果

レール	N	最大誤差 (μm)	最小誤差 (μm)	平均誤差 (E) (μm/点)
A	3	75.0	44.0	63.0
	4	138.5	21.8	65.2
B	4	131.0	22.1	66.8
	3	116.9	64.0	92.8
C	2	94.4	91.3	92.8
D	2	303.0	39.3	171.1
	3	74.4	25.6	50.6
E	3	78.9	5.4	34.6
F	2	101.1	22.8	62.0
	3	180.2	55.8	109.0

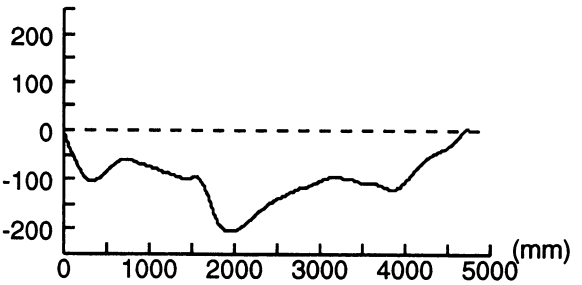


図 6: 矯正前

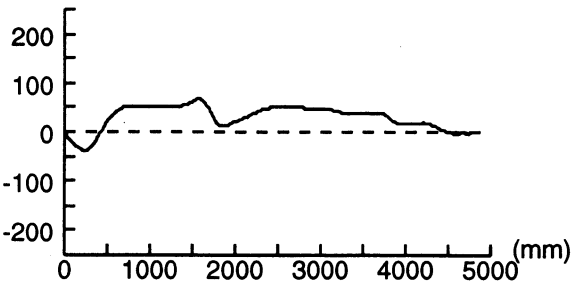


図 7: 矯正後

TA4-2

強化学習を用いたファジィコントローラの生成

Reinforcememt Learning Method for Generating Fuzzy Controller

福田　敏男　　長谷川　泰久　　下島　康嗣　　斎藤　史倫
Toshio FUKUDA, Yasuhisa HASEGAWA, Koji SHIMOJIMA Fuminori SAITO
名古屋大学大学院　工学研究科　マイクロシステム工学専攻
Dept. of Micro System Engineering, Nagoya University

Abstract- In this paper, we propose a new reinforcement learning algorithm for generating fuzzy controller. The algorithm generates a range of continuous real-valued actions, and reinforcement signal is self-scaled. This prevents the weights from overshooting when the system gets a very large reinforcement. The proposed method is applied to the problem of controlling the brachiation robot, which moves dynamically from branch to branch like gibbon swinging its body in a pendulum fashion.
Key words Fuzzy Controller, Reinforcement Learning, Brachiation, Swing of a Pendulum

1．はじめに

現在，ファジィモデリング，ファジィ制御が，産業分野を始めとして自動車や家電製品に至るまで多岐にわたって利用されている．このファジィ推論をより広い分野に応用するには，より優れた自己学習能力が望まれている．従来では，ニューラルネットワークの学習法を応用したファジィ・ニューラルネットワーク[1]や遺伝的アルゴリズム(Genetic Algolithm 以下 GA)を学習則に応用した学習型ファジィ推論[2,3]が提案されている．しかし，このような学習型ファジィ推論は学習モデルを必要とし，つまり推論構造を構築するための何らかの方法で得た教師データを必要とする．しかし，動的な動作を行うロボットの制御などでは制御対象の正確な数学モデルを獲得することが困難であり，また得られた数学モデルが非線形であることが多く，それからコントローラを生成するための教師データを得ることは，大変困難である．

そこで，制御対象の数学モデルおよび教師データを用いることなく，制御目的に応じた評価関数を用いることで，ロボットの試行錯誤的な経験により発見的により良い動作を獲得していく強化学習法が提案されている[4]．しかしこれらの多くがコントローラにCMAC (Cerebellar Model Arithmetic Computer)を用いており，動作など連続状態をもつロボットの制御に用いる場合には膨大なメモリを要する．そこで，本論文では状態表現にファジィを用いたファジィコントローラの獲得方法を提案する．また，提案した手法をブラキエーション形移動ロボット（以下BMR）の制御に応用し，シミュレーションにより良好な結果を得た．

以下に，その構成および学習則，シミュレーションによる実験結果を示す．

2.. ファジィ推論と学習則

本報には，前件部を構成するメンバーシップ関数をガウス基底により表現された簡略型ファジィ推論[5]を用いる．メンバーシップ関数は，次式で表される．

$$\mu_{ij} = \exp\left(-b_{ij}\cdot\left(x_j - a_{ij}\right)^2\right) \tag{1}$$

i：ルール番号　x_j：入力変数

各ルールに対する適合度 μ_iは，

$$\mu_i = \prod_{J_i}\mu_{ij} \tag{2}$$

後件部の値は(3)式の確率でランダムに選ばれ，そのときのファジィ制御器の出力は，式(4)のようになる．

$$g = \frac{1}{2\pi\sigma}\exp\left(-\frac{\left(w_i - w_c\right)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{3}$$

$$y = \frac{\sum_I \mu_i \cdot w_i}{\sum_I \mu_i} \tag{4}$$

s回目の動作が終了した後，その動作で得られるリワード r'は，その動作に対する評価値を $f_{(s)}$をすると，これまでの動作で得られた過去の評価値の重み付き平均 $a_{(s)}$との差となる．

$$a_{(s)} = \frac{\sum_{i=0}^{s}\gamma^{s-i}f_{(i)}}{\sum_{i=0}^{s}\gamma^{s-i}} \tag{5}$$

$$r' = f_{(s)} - a_{(s)} \tag{6}$$

得られたリワード r'の取りうる範囲は評価関数によって大きく左右されるため，式(7)を用いて範囲を-1から1の範囲にする．

$$r = \frac{1-\exp\left(-\frac{r'}{\beta}\right)}{1+\exp\left(-\frac{r'}{\beta}\right)} \tag{7}$$

β：　後件部の学習係数

各回の動作が終了した後，その動作で使用されたルールに対し，その後件部の中心位置 w_cおよび分散 σを式(8)(9)に従って変更する．

$$w_c \Leftarrow w_c + r(w_i - w_c) \tag{8}$$

$$\sigma \Leftarrow \sigma - \frac{\alpha \cdot r}{1 + w_i - w_c} \tag{9}$$

3．2リンクBMRのモデル

簡単のためにBMRのモデルとして2リンクのものを考え，図1に示すように2つのリンクの間に回転モータがあり，両リンクの先端には梯子軸をつかむグリップがある．2つのリンクは全く対象とした．制御入力は関節モータによるトルクのみである．このロボットの動力学方程式はラグランジュ方程式を用いて導いた．詳細は[6]を参照．このロボットは自由度が2であるのに対して制御力は1つであるので，動的な制御によってしか移動を制御することができない．実機の代わりにこのモデルを用いてシミュレーションによりコントローラの獲得を行う．

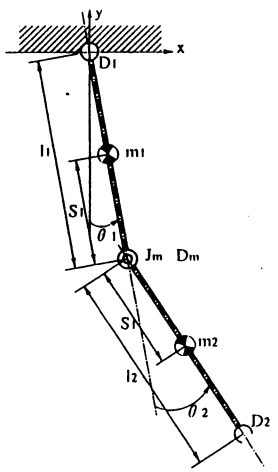


図1　2リンクモデルBMR

4．シミュレーション実験

本論文で提案した学習手法をBMRのファジィ制御器の獲得に応用した．ファジィ制御器は，BMRの状態変数を入力に持ち，BMRの制御トルクを出力する．つまり各リンクの角度と各速度の4入力，制御トルク1出力を持つ．メンバーシップ関数を1入力変数あたり3個等間隔に配置し，81個のルールを用いた．BMRの動作の評価関数として，2リンクの先端と枝が再接近した時の距離dおよび先端速度v，1回の動作で要したエネルギーeを考慮した．

$$f_{(S)} = 1/(Cd \cdot d^2 + Cv \cdot v^2 + Ce \cdot e) \tag{10}$$

試行回数は500回まで行った．図2は獲得されたコントローラを用いてBMRの制御した時の入力トルク，図3はその時のBMRの状態を0.025秒ごとに示している．目標位置との誤差は0.011[m]，そのときの速度は0.020[m/s]となり，目標枝をつかむのに十分な精度が得られた

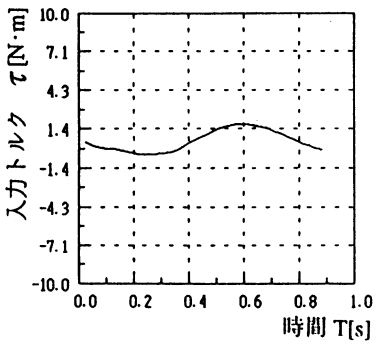


図2　BMRの入力トルク

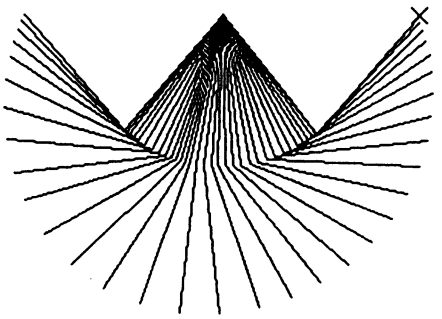


図3　スティク線図（0.025秒間隔）

5．まとめ

本論文では，簡略型ファジィ推論に対しての強化学習法を用いた教師なし学習法の提案を行った．この学習法では，評価関数を任意に設定でき，ファジィ制御器を用いることでメモリの節約ができる．これをBMRの制御器に用い，シミュレーションを行い，良好な結果を得た．

参考文献

[1] S.Horikawa, T.Furuhashi, Y.Uchikawa, "On fuzzy modeling using fuzzy neural networks with the back-propagation algorithm", IEEE Trans. Neural networks, Vol. 3, No. 5, pp. 801-806, (1992).

[2] 山本，久保，和多田，遺伝的アルゴリズムによるファジィ制御のメンバーシップ関数の学習，第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 97-100, (1993).

[3] 福田，石上，新井，柴田，遺伝アルゴリズムとデルタルールによるファジィモデルの自動生成，電気学会論文集C分冊，Vol.113, No.7, (1993).

[4] Hamid Benbrahim, Judy A. Franklin, "Self-Scaling Reinforcement: A new Algorithm for leaming Continuous Control", Proc. of the Eighth Yale Workshop on Adaptive and Learning Systems, pp97-101, (1994).

[5] 下島，福田，新井，RBF型ファジィ推論とその学習法，第3回インテリジェントシステム・シンポジウム，pp. 415-416, (1993).

[6] 福田，斎藤，新井，小菅，ブラキエーション形移動ロボットの研究　第3報，日本機械学会論文集C編　57巻541号 1991-9.

[問い合わせ先]
〒464-01　名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院　マイクロシステム工学専攻　福田研究室
長谷川泰久
Tel: (052)789-4481 Fax: (052)789-3115
E-mail yasuhisa@mein.nagoya-u.ac.jp

TA4-3

概略推論と局所推論との合成型ファジィ推論の回路設計

Circuit Design for Composition-type Fuzzy Reasoning Method of Global Reasoning and Local Reasoning

仲田　明紀　　水本　雅晴　　有川　晴彦
Akinori NAKATA　Masaharu MIZUMOTO　Haruhiko ARIKAWA
大阪電気通信大学　　アーク・テクノリサーチ株式会社
Osaka Electro-Com. Univ.　　Ark Techno-Research Inc.

Abstract —— This paper presents the usefulness of a composition-type fuzzy reasoning method of global reasoning and local reasoning and its circuit design. The fuzzy reasoning method can reduce the number of fuzzy rules without losing the efficiency. Besides, by means of the division into global reasoning and local reasoning, one can describe fuzzy rules clearly and can design multiple input/output fuzzy reasoning systems simply.

1　はじめに

ファジィ理論の応用として最も身近なものに家電製品を思い浮かべる人も多いだろう。その家電製品に使われているファジィ推論プロセッサはこれまでも様々なものが開発されてきた。

ファジィ推論プロセッサを開発する上で重要となる点として、高精度な推論ができること、高速であること、人間エキスパートの知識を入れやすいことなどが挙げられる。本論文ではこれらを、部分的にではあるが、解決する概略推論と局所推論との合成型ファジィ推論 [1] の有用性の検証とこの推論法を採用した回路設計について述べる。

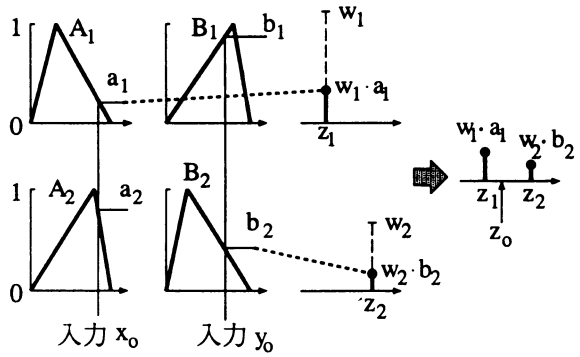


図 1: ファジィシングルトン型推論法

2　ファジィシングルトン型推論法

本研究で使用したファジィ推論法は、ファジィ規則の後件部を実数値にし、その実数値に重みを付加したファジィシングルトン型推論法（別名、重み付き簡略化推論法）[2] である。図 1 に 2 入力の場合の例を示す。

入力 x_o , y_o が入力された場合、ファジィ規則の適合度 h_i は、ファジィ規則の前件部 A_i , B_i のグレードの min(=∧) をとることで

$$h_i = \mu_{A_i}(x_o) \wedge \mu_{B_i}(y_o) \tag{1}$$

と与えられる。この適合度 h_i と、このファジィ規則の重み w_i を掛け合わせたもの $w_i h_i$ が結論 z_i が得られる度合いとみなせ、最終的な結論 z_o は

$$z_o = \frac{w_1 h_1 z_1 + w_2 h_2 z_2 + \cdots + w_n h_n z_n}{w_1 h_1 + w_2 h_2 + \cdots + w_n h_n} \tag{2}$$

と与えられる。

通常、前件部適合度 h_i は式 (1) のように min(=∧) ではなく、代数積を用いる場合が多い。しかし、回路設計において代数積を用いることは、扱う値の桁数を膨大なものにし、計算速度を低下させたり、回路のゲート数を増加させたりする要因となるだけでなく、前件部の個数が異なる場合は直感に合わない結論を得るなどの欠点もあるので [3]、min を使用した。また、ファジィ規則の重み w_i を採用することで、$w_i > 1$ の場合は強調、$0 < w_i < 1$ の場合は抑制の効果を与えることができる。$w_i = 1$ のときは明らかに簡略化推論法に帰着される。

表 1: 7 ラベルの場合

de \ e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NS
NS	PB	PB	PM	PS	NS	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PM	PS	PS	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

表 2: 2 ラベルの場合

de \ e	NB	PB
NB	PB	ZO
PB	ZO	NB

3 概略推論と局所推論の合成型ファジィ推論法

ファジィシングルトン型推論法を回路設計する上で以下の問題が生じてくる。

表 1、表 2に通常のファジィ規則の例を示す。1 入力あたりのラベル数を 7 個とした場合、入力数を 2 とすると、$7^2 = 49$ 個のファジィ規則ができる（表 1)。6 入力になると 117,649 個のファジィ規則が必要になる。これほどの数のファジィ規則では最適な規則を生成することは不可能となる。規則生成をニューロやＧＡによる自動チューニングに頼るとしても、推論に必要な計算量が増えてしまうことは明らかである。従って、回路上ではゲート規模が大きくなり、計算に必要な時間が増えてしまい、推論速度の低下の要因となる。

逆に、1 入力あたりのラベル数を 2 個とすると、2 入力で $2^2 = 4$ 個 (表 2)、6 入力だとしても組合せ数は最大でも 64 個となる。ラベル数が少ないと、規則生成もし易く、回路規模もそれほど大きくなく、高速推論が実現できる。しかしこの場合、人間の“コツ”とも言うべきファジィ規則の使用ができなくなる。例えば、液面制御の場合を取り上げると、表 1の網掛け部分が単純に ZO（ゼロ）である場合よりも、表 1のように PS や NS とおく方（コツに相当する）がかなりオーバーシュートを抑えることができる（図 3 参照)。

以上のことから、ラベル数を多くすると計算量が多く、回路規模も大きく、高速推論が望めなくなる。逆にラベル数を少なくすると、高速推論が望める反面、高精度な推論が望めなくなるということがわかる。

これまでは、とりわけ使用されることがない規則を初めから除外することで高速化をはかる手法がとられてきた。この場合、入力値によってはファジィ規則が発火しない状態が起きる。万一、そのような状態が起こった場合に対処できないファジィシステムでは信頼性に欠ける。

そこで、入力空間全体を覆うメンバーシップ関数によるおおまかな推論（**概略推論**）と、重要な部分に人間エキスパートのコツとなるファジィ規則を用いる推論（**局所推論**）の両方をそれぞれ計算し、2 つの結果を

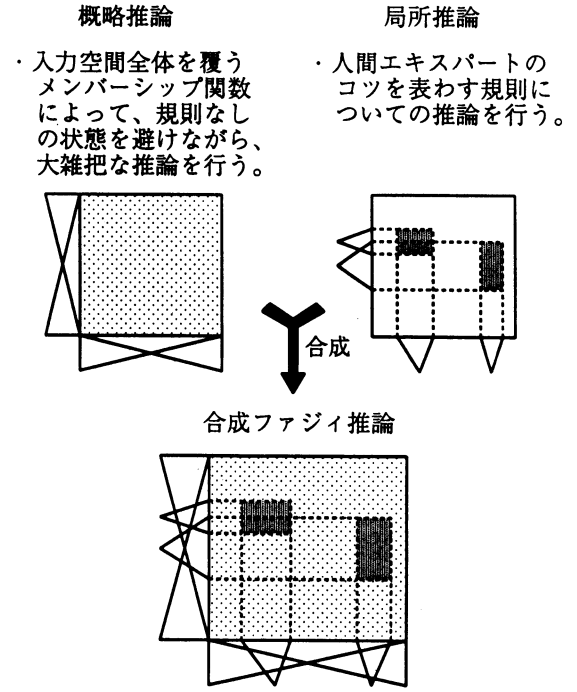


図 2: 概略推論と局所推論の合成ファジィ推論

合成することにより 1 つの結論を得ることが考えられる [1]（図 2 参照)。

この場合、入力値によってファジィ規則が存在しない状態がなくなり、人間エキスパートのコツを簡単に取り入れることができる。図 2 に示すような 2 入力の場合、概略推論の規則数が $2 \times 2 = 4$、局所推論の規則数を 2 とすると総規則数 6 個ということになる。同様に 6 入力でも $64+\alpha$ 個の規則だけですむ（α は局所推論で必要とされる規則数)。

次に、ファジィシングルトン型推論法をこの概略推論と局所推論の合成型ファジィ推論法に適用する方法を述べる。ただし、2 入力の場合で説明する。

概略推論において、入力値に対する 4 つの規則の前件部の各グレードを計算し、各規則ごとに min を施し、ファジィ規則の重みと後件部の実数値との積を求め、式 (2) の分母、分子に相当するそれぞれの総和を求める。

局所推論の場合も同様に式 (2) の各分母、分子の総和を求める。この 2 つの推論の結果を以下の式で合成することにより最終的な結論 z_o を得る。

$$z_o = \frac{\sum_{\text{概略}} w_i h_i z_i + \sum_{\text{局所}} w'_j h'_j z'_j}{\sum_{\text{概略}} w_i h_i + \sum_{\text{局所}} w'_j h'_j} \qquad (3)$$

この合成型ファジィ推論によるファジィ制御の例を見てみよう。図 3 は液面制御のシミュレーション結果である。破線や点線が表 1の規則によるファジィ制御の結果であり、実線が概略推論と局所推論の合成ファジィ推論を用いた場合の結果である。合成ファジィ推論法

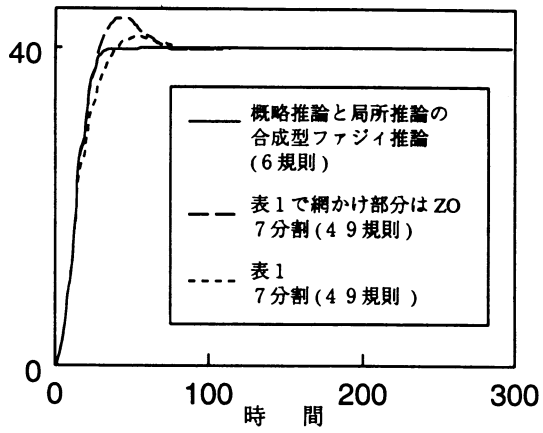


図3: 液面制御シミュレーション結果

におけるファジィ規則数は6個（概略推論規則4個、局所推論規則2個であり、図4に示す。）であるが、シミュレーション結果からわかるように、表1のような49個のファジィ規則を使用した場合と同等以上のファジィ制御が行えることがわかる。ただし、表1の規則のNB～PBは区間[-6,6]上のファジィ集合である。

さらに、この推論法では概略推論と局所推論とに分けていることにより、次のような利点が挙げられる。

- 人間にわかりやすいファジィ規則であり、管理しやすい。
- “コツ”の部分にあたる局所推論のメンバーシップ関数を自由に定義できる。
- 1推論ユニットあたりのラベル数が少ないので、メモリーネットワーク[4]の高速アルゴリズムに適用しやすい。
- 概略推論と局所推論をそれぞれ複数個配置し、合成部において接続する組合せを替えるだけで容易に多入力多出力が実現できる。

4　概略推論と局所推論の合成ファジィ推論による回路設計

上記の合成ファジィ推論法を用いて、回路設計を行い、そのブロック図を図5に示す。

本回路設計ではＮＥＣ社のVISTASL 3というパソコン上で動作するASIC開発用のシステムで設計し、シミュレーションを行った。特にＮＥＣ社のゲートアレイCMOS-6ファミリ（1.0μmルール）を用いて設計した。

入出力はデュアルポートＲＡＭを介して行う。入力された値を基に、まず前件部メンバーシップ関数の各グレードを求めるが、ここでは「アドレスルックアップ方式」[4]を採用する。これは入力値をアドレスとし、そのアドレスの指すメモリに予め計算しておいたグレー

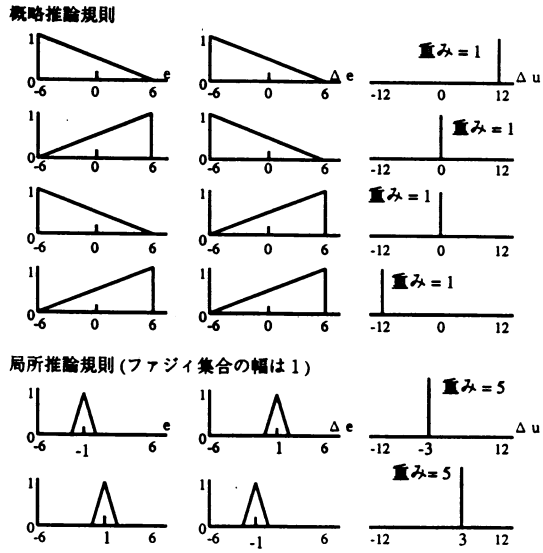


図4: 図3に対する合成ファジィ推論規則

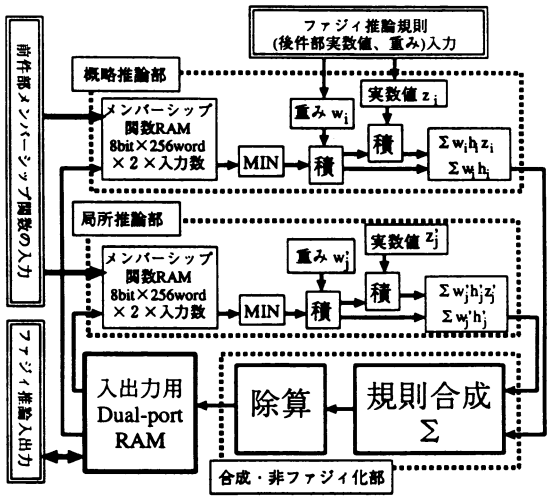


図5: ファジィ推論チップのブロック図

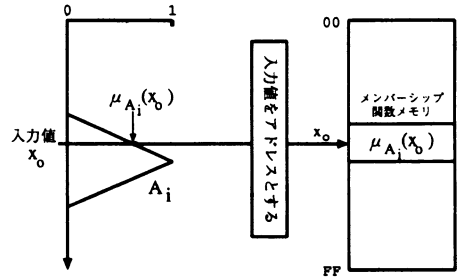


図6: アドレスルックアップ方式

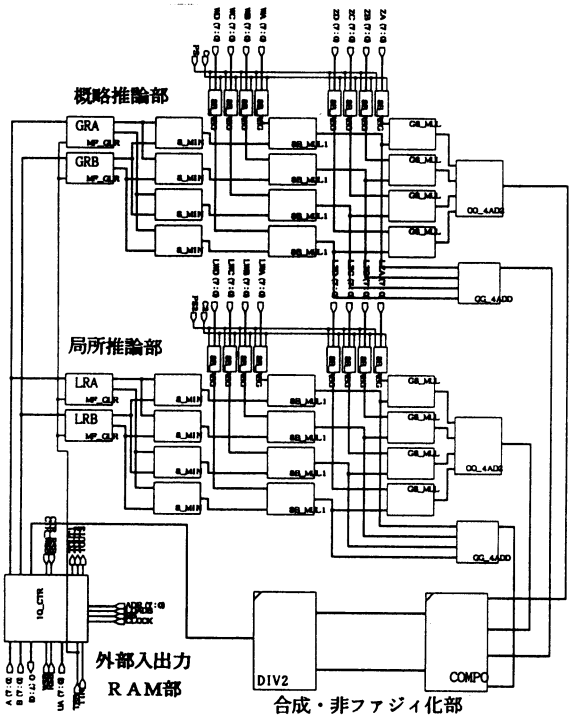


図 7: 概略推論と局所推論との合成
ファジィ推論チップの回路図

ド値を格納しておく方式である（図 6 参照）。このように一度格納しておけばメモリを読み出すだけで直ちにグレード値が求められるので高速である。もちろん、このメモリもデュアルポートＲＡＭを用いることで随時メンバーシップ関数の位置、形状などを変更できるようにし、ニューラルネットワーク等との併用の際の学習機能を持たせることも可能である。後件部実数値、規則の重みも同様、各規則ごとにレジスタをそれぞれ配置し随時書換え可能となっている。

また、回路全体は一定の同期をとって動作させるので、一定の速度で処理を行える特徴を持つ。1 周期で 1 推論が終了し、結論となる実数値 z_o は再び、デュアルポートＲＡＭに書き込まれる。ユーザーはあたかもメモリーにデータを書き込み、読み出しを行っているように使用することができる。

2 入力 1 出力としてシミュレーションを行った結果、毎秒約 400 万回のファジィ推論を行うことができた。

5 おわりに

本論文において、概略推論と局所推論の合成ファジィ推論法の有用性の検証と回路設計について述べた。概略推論と局所推論の採用は、規則数を大幅に低減できるうえ、高精度な推論を行うことが可能であることがわかった。

また、概略推論部と局所推論部を並列に複数個並べ、合成・非ファジィ化部において出力にあった概略推論出力、局所推論出力を選んで合成することで容易に多入力・多出力を実現出来るだろう。これに重みや後件部実数値に対してもアドレスルックアップ方式を採用することで、超高速多入力多出力ファジィ推論を行うことが可能である。

今後の課題として、多入力・多出力ファジィ推論システムへの応用の際の局所推論部の最適な規則数の決定、チューニング、ニューロやＧＡなどとの融合についての検証などが考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご協力いただいた日本電気 IC マイコンシステム（株）関西ＬＳＩ開発センターの浅嶌正明、斉藤美栄子、竹島宏祐、中村真保美の各氏に深く感謝いたします。

参考文献

[1] 有川・水本：“概略線形推論と局所非線形推論とのベクトル合成によるファジィルール数の低減法とファジィＰＩＤハイブリッド制御”, 第 10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 , pp.437-438, 1994.

[2] 水本：“ファジィ制御の改善法（6）－ファジィシングルトン型推論法による場合－”, 第 8 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 , pp.529–532, 1992.

[3] 水本：“ファジィ制御法において max と min の使用は適当か?”, 第 9 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 , pp.317-320, 1993.

[4] 有川・廣田：“アドレスルックアップ仮想ページング方式によるファジィ推論チップ”, 計測自動制御学会論文集 , Vol.26, No.2, pp.180–187, 1990.

[5] 塩瀬昌人：“概略線形推論と局所非線形推論の合成ファジィ推論に対する回路設計”, 大阪電気通信大学卒業論文, 1995.

問い合わせ先：
〒 572 寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学大学院工学研究科情報工学専攻
仲　田　明　紀
Tel: 0720-20-4569
Fax: 0720-24-0014
E-mail: nakata@mzlab.osakac.ac.jp

TA4-4

ファジィシステム記述言語（ＦＤＬ）による推論システムの記述とそのシミュレーションソフト

Development of simulator for inference systems described by fuzzy system description language

大塚　和彦† 新沢　洋太† 森　雄一郎†† 向殿　政男†
Kazuhiko OTSUKA Youta SHINZAWA Yuichiro MORI Masao MUKAIDONO

†明治大学　理工学部　情報科学科
Dept. of Computer Science, Meiji UNIV.

††高知大学　理学部　情報科学科
Dept. of Information Science, Kochi UNIV.

Abstract

At present, there are various fuzzy systems which apply fuzzy theory.They have been developed at each vendor, laboratory and university. However, most of those systems aim at fuzzy control based on fuzzy inference. In these systems, knowledge bases for fuzzy inference considerably look similar to each other in their description style, inference methods, etc., although the hardware implementations are different system by system. It is not easy for system developer to share knowledge bases which have been accumulated before, because the standardized descriptive language does not exist until now. Therefore, the property value of the developed system is not so high. Here, we propose a primitive part of fuzzy system description language as a public standard, that is standard notations of membership function and rulebase. The purpose of standardization is to preserve and to use commonly the existing knowledge bases, moreover, promoting to use commonly the knowledge bases which will be developed in future.

1. 背景

現在，ファジィ理論，特にファジィ制御を用いた製品が電車の運転制御から炊飯器といった家電製品まで幅広く開発されており，私たちの生活に大変密着したものになっている．このような実用化された製品の他にもさまざまなファジィ理論を応用したファジィシステムが多く開発研究がなされている．しかしながら，その１つ１つの研究，開発では，その開発者が各々独自の開発環境で行っているのが現状である[1][2][3]．そのためにそれぞれのシステムによって蓄積されたルールをはじめとするソフトウェア資産を異なる開発環境で生かすことが出来ない．さらに，開発環境に目を向けてみると，多くの実用例のあるマイクロプロセッサを用いたファジィ制御の分野などでは，その開発言語としてアセンブラなどの低級言語で記述されていることが多い．低級言語を使ったプログラムは，一般的に第３者が理解することが難しいため，開発者が入れ替わると詳細の把握が困難になり，場合によってははじめから作り直す様な状況が起こりうる．また，低級言語はその性格上，使われるシステムを構築する環境に大きく依存するためにシステムの一部を変更するだけでも全体を直す必要があり効率が悪い．そして，個別に記述されたシステムを同じように評価することは困難であり，これはそれらのシステムを利用するユーザーにとっても大変不利益なものとなる．

そこで，今回，これらの問題を解決するための１手段として，現在広く使われている高級言語であるＣ言語をベースにし，ファジィ理論を扱う上で必要と思われる機能を拡張したファジィシステム記述言語ＦＤＬについて検討を重ねてきた．今回は，このFDLの検討の一貫として，FDL の記述をサポートするためのエディタと回路エディタを用いたシミュレータを開発したので，これらについて報告する．

2．FDLの概要

今回報告するファジィシステム記述言語 FDL(Fuzzy system Description Language)は，ファジィを取り扱う様々なシステムを記述する事を目的としている．そこで，書式および機能についてはANSI Ｃ言語[4][5]をベースにすることにした．ここで，この言語の検討するに当たって，Ｃ言語をベースとして採用したのは，

- 現在のプログラム環境としてＣ言語が多く利用されているので理解しやすい．
- 現在のＣ言語で作られている多くのシステムにファジィ理論を応用する場合にその移行が容易である．
- 高級言語であることから異なる開発環境への移植が容易である．
- Ｃ言語は本来持つその柔軟性から，これから更に発展していくであろうファジィ理論に併せた対応がしやすい．

などの理由が挙げられる．ところが，Ｃ言語ではファジィ理論を取り扱うための型や手続きが用意されていないので，これらの機能を盛り込むように拡張を施すことにした．

そこで，私たちがＦＤＬを検討するにあたり，まず一般的なファジィ制御が扱えるような機能[6][7]を考えた．

・ファジィに関する型の定義
・メンバーシップ関数の定義
・ファジィの論理演算
・推論ルール
・脱ファジィ化などの操作

これらの機能は，現状必要と考えられる機能の中でも最も基本的なものを中心に考えており，現時点で決定しているものが全てではなく，今後の論議の中で様々な機能の拡張や改善を行っていく予定である．また，ファジィ理論そのものが，現在なお新たな提案がされている分野でもあることから，ファジィに関する処理では基本的にユーザーが行えるようにすることも基本方針とした．

3．　ＦＤＬの機能

本章ではFDLの機能の基本的な部分について説明する．

3．1　型

FDL では，ファジィに関する数値を表現するためにＣ言語で決められている型の他にファジィ型(fuzzy)とファジィ真理値型(fuzzy_truth)を定義した．これらは，メンバーシップ関数とメンバーシップ値を表現するために用意した型である．ファジィ型では，基本となる型と，台集合が数値の場合，その上限，下限，そしてその指定された区間の分割数を指定する．FDL ではメンバーシップ関数を指定された分割点のみで記憶している．一方，ファジィ真理値型は，ハードウェアなどに実装する場合を考慮して内部表現を整数で表現することなどを許した型である．この２つの型では，その値が実際に持つ情報よりも少ない情報量で表現をしているので，精度の面で問題が生じてしまう．しかし，精度について言及していくと実際にシステムを構築していく上での問題点が数多く出てくるので，ＦＤＬでは，この分割点による記憶方法を採用した．

3．2　メンバーシップ関数

ファジィ理論において，そのあいまいさを表現するために用いられる表現方法として一般的な方法がメンバーシップ関数による表現である．しかし，メンバーシップ関数の形状は多くの場合設計者による主観的な割合が大きいため様々な形状のものが考えられる．従って，一概に特定の型のみが記述できるだけでは不十分である．そこで，FDL では任意の形状のものを表現するために

・列挙（補間なし）
・関数によるユーザー定義

の２種類を基本として用意した．ところが，制御の分野では主に三角形型と台形型を使用している．加えて１次元のファジィ集合では，これらの型は様々な用途での利用が考えられるために以下のものについても用意することにした．

・列挙（補間あり）　・ベクトル
・三角形　・台形
・シングルトン

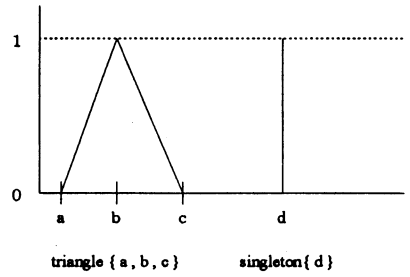


図１　メンバーシップ関数の定義の例

3．3　演算

ファジィ集合の演算は，通常，論理演算を用いて定義されている．２値論理では，和演算，積演算と言った論理演算は一意に決定することができたが，ファジィ論理ではこれらを一意に決定することはできない．代表的なものでも論理，代数，限界，激烈といった４つの演算が知られている．これらの演算以外にも様々な和演算，積演算の定義が提案されている．また，この４演算にしても状況によって使い分けがなされており，統一的な演算の選択方法などは現在のところまだ確立されていない．そこで，FDL では，状況に応じて論理演算の切替ができるように演算子の指定ができるようにした．また，１つのプログラム中に複数のシステムが複合して存在することも考慮をし，この切替はプログラムの関数単位で行えるようにした．また，先に説明したようにこれら４演算ばかりでなく他にも有用と思われる様々の演算にも対応するために，ユーザーが定義した演算方法を指定することができるようにした．

3．4　ルール

ファジィ推論，ことにファジィ制御にとって必要不可欠なものがその規則を記述するルールである．本来ルールは，通常のＣ言語の範疇でも記述することが可能であるが，推論ルールは多くの場面で利用されると考えられる．そこでファジィ制御などで使われる記述を尊重したルールベースとして，独立した文法によって記述することにし，使いやすさの向上を図った．また，既に構築してあるルールベースについても，新しく作成されたルー

ルベースに組み込む機能を加えることによって，従来蓄積されたルールベースの資産を有効に活用できるようにした．

３．５　脱ファジィ化およぶその他の処理

ファジィ理論では以上の他にα－カットや円筒的拡張，射影と言ったファジィ集合に関する処理がある．また，ファジィ制御では推論によって求められたファイジィ集合から１つの数値を導く脱ファジィ化といった処理がある．これ以外にも数々のファジィ集合に関する処理がある．そこで，これらのファジィ集合に関する処理については全て関数としてFDLでは用意している．従って，これらの手法以外にもファジィシステムを構築していく上において有用と思われる処理，手法については逐次システムに追加，変更ができるようにした．

４．ＦＤＬシミュレータ

今回作成したシミュレータは，ファジィ推論を行う論理回路の機能を検証することを目的としたものである．ここでは，回路を大きくファジィ推論を行う部分（推論部）と入出力や演算などを行う部分（周辺部）の２つに分けて考えて，それぞれを個別に行うことにした．

周辺部の設計では，X Windows system 上で動作をするXFLCE(X Fuzzy Logic Circuit Editor) [8]というシステムを利用した．また，推論部の設計には今回提案したシステム記述言語であるFDL用に併せて開発を行ったXFDLE(X FDL Editor) を使うことにした．次にこれらのツールを使った回路設計の手順について説明する．

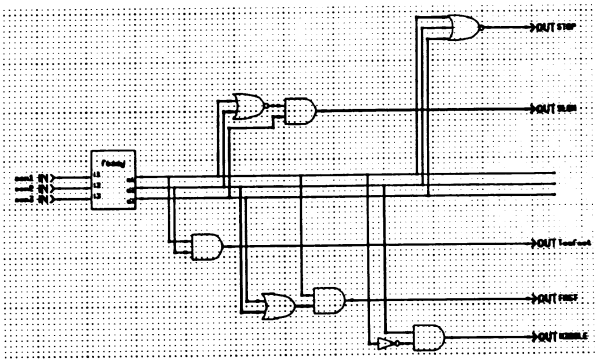


図２　周辺部の回路設計例（fuzzyは推論部）

まず，XFDLEを使い推論部を作成する．今回この推論部では，推論をするのに必要とされる推論の方法，メンバーシップ関数の定義，ルールの記述，そして，脱ファジィ化を指定している．これらの設定は，主にメニュー形式によって作成していく．こうして作られた推論の情報は，FDLの文法に照らし合わせて記述されたファイルによって保存される．次にXFLCEを使い周辺部の設計を行う．ここでは推論部つまり，FDLによって記述されたものについては．一般のパーツとして取り込むことが可能になっており，他のパーツと同じく回路上に自由に配置することができ，また階層的に設計することができるようになっている．このXFLCEによって作成されたファイルはFHSDL言語(Fuzzy Hierachical Sequential Circuit Description Language)という階層構造を持つ回路記述言語を作る．

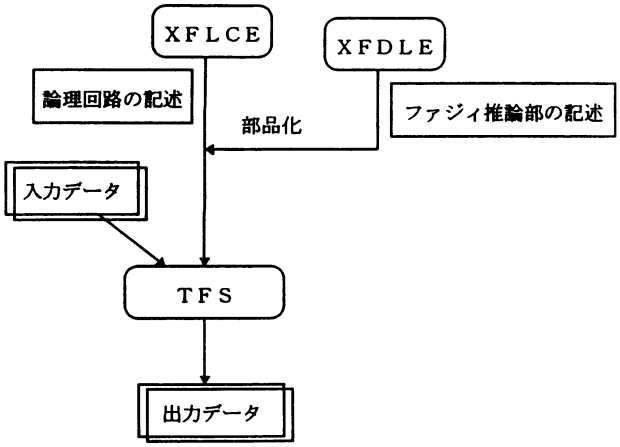


図３　シミュレータの手順

このようにして推論部と周辺部をそれぞれFDLとFHSDL言語によって記述する．この２つの言語でかかれたファイルを今回作成したシミュレータ TFS(Tiny-FDL Simulator)を用いて検証する．このTFSは，推論部の記述にはFDLのサブセットであるTiny-FDL言語を利用している．この言語のFDL言語との違いは以下のものである．

- メンバーシップ関数の定義に関数定義使えない．
- ファジィの演算の定義は，基本的な４演算のみとする．（論理，代数，限界，激烈）
- Ｃ言語の演算は行えない．
- 関数呼び出しをしない．

これらについては，基本的なファジィ推論を書く場合，特にマイクロプロセッサを用いた場合にはあまり重要性が高くないと考えられるので，ＴＦＳでは導入を見合わせることとした．

さて，一般的に回路を設計する場合には，ゲートの状態の変化に要する時間や信号線の長さによる伝搬の時間といったいわゆる遅延などを考える必要がある．また，同期についてもさまざまな問題が発生するが今回は，完全な回路の検証よりもこの章の冒頭で述べたようにファジィ推論を行う論理回路の機能を検証をする事を目的としているので，遅延などが起こらないきわめて理想的な回路を想定している．

今回は既存のエディタを利用したので，推論部と周辺部がそれぞれ別の言語によって記述されているがFHSDL

でかかれているファイルは，FDL でも記述することが可能であるので将来的には全て FDL 言語で記述するようにする予定である．

5．まとめ

私たちはファジィシステム記述言語の標準化を目指して，FDL と言うシステム記述言語を提案している．その活動の一環として FDL を利用してプログラムを作る際に必要と思われる，メンバーシップ関数の記述，ルールの調整を目的としたエディタを開発した．また，それに併せてシステムの検証を行うためにシミュレーションソフトを開発した．これらのソフトについては，現在進行中の FDL の言語機能からみても大変機能を制限したものであるが，FDL を利用した回路設計のアプローチの１つとして，大変意味のあるものであると考えられる．しかしながら，実際のシミュレータとしての機能としてはまだまだ不十分な点が数多く存在している．今後は，遅延を考慮したり，制限した機能を盛り込むなどの改良の余地が多分に残されているので，これらの改良をして行きたい．また，今回は回路全体の入出力についてのみしかその検証の対象としていないが，回路内部での状態の変化などについてもその対象とし，また GUI 環境による逐次的な状態の変化などが視覚的検証できるような環境を整えて行きたいと考えている．

なお．本研究は，（社）日本電子機械工業会(EIAJ）からの委託により日本ファジィ学会ファジィ言語仕様調査研究委員会の下で行われた標準化言語の作成の活動の一環として行われたものです．

```
fuzzy speed ( double , 0, 200, 100 );
fuzzy space ( double , 0 , 100, 100 );
fuzzy accel ( double , -30, 30 , 60 );

double FDL (double sensor1, sensor2 )
{
  fuzzy speed now_speed = sensor1;
  fuzzy speed SLOW = trapezoid ( 0 , 0, 20, 30 );
  fuzzy speed MIDDLE = triangle ( 25, 40, 70 );
  fuzzy speed FAST = triangle ( 60, 90, 120 );
  fuzzy speed DANGER = trapezoid ( 100, 140, 200, 200 );

  fuzzy space front = sensor2;
  fuzzy space NARROW = trapezoid ( 0, 0, 10, 20 );
  fuzzy space CORRECT = triangle ( 15, 30 , 40 );
  fuzzy space WIDE = trapezoid ( 35, 50, 100, 100 );

  fuzzy accel now_accel ;
  fuzzy accel HARD_BREAK = trapezoid ( -30 , -30, -20 , -15 );
  fuzzy accel SOFT_BREAK = triangle ( -20 , -10, 0 );
  fuzzy accel DRIVE = triangle ( -5, 5, 10 );
  fuzzy accel ACCEL = triangle ( 5, 10, 20 );
  fuzzy accel HARD_ACCEL = trapezoid ( 15, 20, 30, 30 );

  rule_base speed_control ( now_speed, front ) ( now_accel );
  return ( centroid ( now_accel ) );
}

rule_base speed_control ( fuzzy speed sp, fuzzy space fr) ( fuzzy accel acc )
{
  fuzzy_and          fuzzy_logic_and;
  fuzzy_or           fuzzy_algebraic_or;

  rule1: if sp is FAST and fr is NARROW then acc = HARD_BREAK;
         if sp is MIDDLE and fr is CORRECT then acc = DRIVE;

  rule12:if sp is SLOW and fr is WIDE then acc = ACCEL;
}
```

図４　FDL のプログラム例

問い合わせ先
〒214-71　神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科システム科学研究室
大塚　和彦 E-mail:tsuka@cs.meiji.ac.jp
Tel 044-934-7442　Fax 044-934-7912

参考文献

[1] M.Abe, M.Nakatsuyama and H.Kaminaga, "Fuzzy C and its application", 1st Asia Fuzzy System Symposium, .pp666-670, Nov 1993.

[2] M.Umano, "Fuzzy-set manipulating system in Lisp", 2nd IFSA congress , vol.2, pp.840-843, 1987.

[3] T.Teichrow, E.Horstkotte and M.Togai, "The Fuzzy-C compiler: a software tool for producing portable fuzzy expert systems", 3rd IFSA congress, pp.708-711, 1989.

[4] B.W. Kernighan, D.M.Ritchie, 石田晴久訳, "プログラミング言語Ｃ", 共立出版, Jun 1989.

[5] 日本規格協会, " JIS X 3010 プログラム言語 C", 1994.

[6] 日本ファジィ学会, "ファジィ論理", 日刊工業新聞社, Mar 1993 .

[7] 石畑　清, 森　雄一郎, 大塚　和彦, 新沢　洋太, 向殿　政男, "ファジィシステム記述言語の標準化に向けて", 11th Fuzzy System Symposium, Jul 1995.

[8] 森　雄一郎, 下野　雅樹, 向殿　政男, "ファジィ論理回路シミュレータ（ＦＬＳ）の開発", 9th Fuzzy System Symposium, pp.777-780, May 1993.

TB1-1

ファジィ推論型可変忘却係数を導入したパラメータ同定に基づいた超音波モータの位置制御

Position Control of Ultrasonic Motors Based on On-Line Parameter Identification Using Variable Forgetting Factor with Fuzzy Reasoning

千住 智信　宮里 裕　上里 勝実
Tomobobu Senjyu　Hiroshi Miyazato　Katsumi Uezato

琉球大学
University of the Ryukyus

Abstract — Ultrasonic motor (USM) is a new type motor and its mathematical model has not been developed yet. Moreover, its speed characteristics vary with driving conditions. Therefore, it is important to identify the speed characteristics of ultrasonic motor on-line in order to achieve the high-performance position control. Authors derived a mathematical model of ultrasonic motor and proposed speed/position control based on the model using adaptive control. In this paper, we propose precise position control of ultrasonic motor based on on-line parameter identification using variable forgetting factor with fuzzy reasoning. The effectiveness of proposed control scheme is demonstrated by experiments.

1. まえがき

超音波モータ (Ultrasonic Motor : USM) は，圧電素子の振動力を駆動源とする新しいタイプのモータであり，多くの優れた性能と特徴を備えている。また応答性に優れ，供給電圧を断った後でも保持力を有することから位置決めサーボモータとしての応用が期待されている[1]。

しかし超音波モータは，動作原理が一般の電磁モータと異なるため，その動特性式は未だ確立されていない。さらに温度上昇や負荷トルク印加など，駆動条件により特性が変化する。

著者らは，超音波モータを高性能に制御するための超音波モータのモデル式を提案し，そのモデル式に基づいた位置制御法を提案している[2]。この制御法は，適応制御に基づいた制御系を構成し，温度上昇や負荷トルク印加などによるモータの特性変動に対して良好な位置制御を達成している。しかし，これまで用いていたパラメータ同定法(繰返し最小二乗法)は，忘却係数が固定であった。一般に大きな値の忘却係数を用いた場合には，推定されたパラメータは安定であるが真値へ収束するまでに長い時間を要し，また小さな値の忘却係数を用いた場合には，パラメータ同定の適応性は向上するがシステム内の雑音に対して敏感になる。したがって，忘却係数の値を決定する場合には両者のトレードオフを考慮しなければならなかった。

そこで本論文では，忘却係数の値をファジィ推論を用いてオンラインで調整することにより，パラメータの同定における安定度および真値への収束性を改善する手法を提案する。

2. 制御システム

超音波モータを制御するものとして印加電圧，印加電圧位相差，および駆動周波数制御がある。本論文では，印加電圧位相差および駆動周波数を制御して超音波モータの位置を制御を行う。

2.1 印加電圧位相差制御

STC(Self Tuning Controller) による位置制御のためのシステム構成図を図1に示す。ここで，$y_m(k)$ は指令位置，$y(k)$ は回転子位置，$u(k)$ は制御入力 (印加電圧位相差 ϕ)，f は駆動周波数である。

超音波モータのモデル式を (1) 式で表し[3]，コントローラおよび同定器の設計を行う。

$$A\,y(k) = q^{-d}B\,u(k) + w(k) \tag{1}$$

$$\left.\begin{aligned} A &= 1 + a_1 q^{-1} + \cdots + a_n q^{-n} \\ B &= b_0 + b_1 q^{-1} + \cdots + b_m q^{-m} \end{aligned}\right\}$$

ここで，d はおくれ時間，q^{-1} はシフトオペレータ，$w(k)$ は白色雑音である。

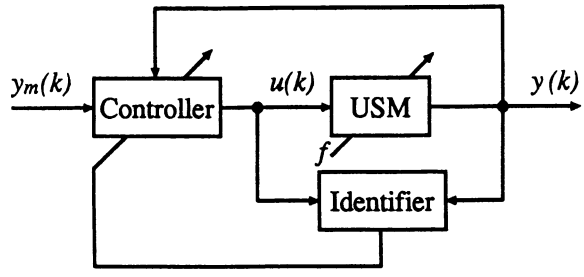


図 1. Block diagram of STC.

制御入力 $u(k)$ は，出力誤差の分散および制御入力の制限を考慮した (2) 式の評価関数 J_1 を最小にするように決定する。

$$J_1 = E\left[\{y(k+d) - y_m(k+d)\}^2 + \lambda\{u(k) - u(k-1)\}^2\right] \quad (2)$$

ここで $E[\cdot]$ は期待値，また λ は重み係数であり値を大きくすると制御入力 $u(k)$ を制限できる。

$\partial J_1/\partial u(k) = 0$ より評価関数 J_1 を最小とする制御入力 $u(k)$ を求めると，(3) 式を得る。

$$\left\{B\,R + \frac{\lambda}{b_0}\right\} u(k) = y_m(k+d) - H\,y(k) + \frac{\lambda}{b_0} u(k-1) \quad (3)$$

ここで多項式 R，H は (4) 式の Diophantine 方程式より一意に求めることができる。

$$\left.\begin{aligned} 1 &= A\,R + q^{-d} H \\ R &= 1 + r_1 q^{-1} + \cdots + r_{d-1} q^{-(d-1)} \\ H &= h_0 + h_1 q^{-1} + \cdots + h_{n-1} q^{-(n-1)} \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

次に，同定器は逐次繰返し最小二乗法のアルゴリズムを用いて (1) 式のパラメータ a_i，b_i を推定する。最小二乗法による未知パラメータの同定は，次の評価関数 J_2 を最小にするパラメータベクトル θ を求めることである [4]。

$$\begin{aligned} J_2 &= \sum_{k=0}^{N} \beta^{N-k} w^2(k) \\ &= \sum_{k=0}^{N} \beta^{N-k} \left\{y(k) - z^T(k)\theta\right\}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

ただし，θ，$z(k)$ は以下のベクトルである。

$$\left.\begin{aligned} \theta^T &= [-a_1\ -a_2\ \cdots\ -a_n\ b_0\ b_1\ \cdots\ b_m] \\ z^T(k) &= [y(k-1)\ y(k-2)\ \cdots\ y(k-n) \\ &\qquad u(k-d)\ u(k-d-1)\ \cdots\ u(k-d-m)] \end{aligned}\right\}$$

ここで β は忘却係数と呼ばれるもので，β の値を小さくすることでパラメータ同定の真値への収束が速くなり時変パラメータに対しても有効である。しかし，β の値が小さすぎると雑音に対して敏感になってしまう [5]。

$\partial J_2/\partial\theta = 0$ とおいて θ の推定値 $\hat{\theta}$ を求めると最終的に次式が得られる。

$$P(N) = \frac{1}{\beta}\left\{P(N-1) - \frac{P(N-1)z(N)z^T(N)P(N-1)}{\beta + z^T(N)P(N-1)z(N)}\right\} \quad (6)$$

$$\hat{\theta}(N) = \hat{\theta}(N-1) - \frac{P(N-1)z(N)}{\beta + z^T(N)P(N-1)z(N)}\left[z^T(N)\hat{\theta}(N-1) - y(N)\right] \quad (7)$$

(6)，(7) 式が逐次繰り返し最小二乗法 (Recursively Least Square Method) のアルゴリズムとなる。

なお，(1) 式における多項式の次数 n，m およびむだ時間 d には，STC を実際に設計する際に適値を与える。

2.2 駆動周波数制御

高速・精密な位置制御を実現するためには印加電圧位相差の他に駆動周波数の制御が必要である。そこで指令位置 $y_m(k)$ と回転子位置 $y(k)$ との誤差 $e(k) = |y_m(k) - y(k)|$ を考慮して (8) 式のように駆動周波数 f_1 を決定する。

$$f_1 = f_0 - K_E\,e(k) \quad (8)$$

ここで，f_0=42.0[kHz]：始動時の駆動周波数

しかし，上式による駆動周波数制御だけでは，ヒステリシス特性のため最悪の場合には始動不能に落ち入るおそれがある。そこで，(9) 式のようにモータの回転速度 $N(k)$ を考慮して駆動周波数 f_2 を決定する。

$$f_2 = f_0 - K_S\,N(k) \quad (9)$$

実際に使用するモータ駆動周波数は，f=max(f_1, f_2) を用いて f_1，f_2 の値を比較して高い値を採用する。

なお，モータを安定に運転するために，駆動周波数は $40.0 \le f \le 42.0$[kHz] の範囲内に制限する。

3. 忘却係数固定時の実験結果

忘却係数が固定の場合の実験結果を以下に示す。図 2，図 3 は忘却係数 β の値を 1.00，0.92，指令位置を 360[deg.]，制御時間を 5.0[sec.] とし，20 回の試行を行った時の位置制御の精度を示す。β=1.00 の場合 (図 2) には，位置誤差なく停止した確率が 30[%] と低いがすべて ±0.2[deg.] の範

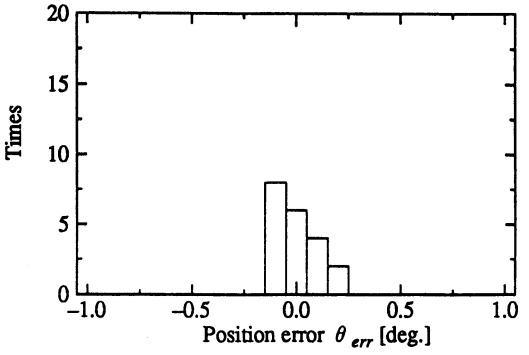


図 2. Precision of position control (β=1.00).

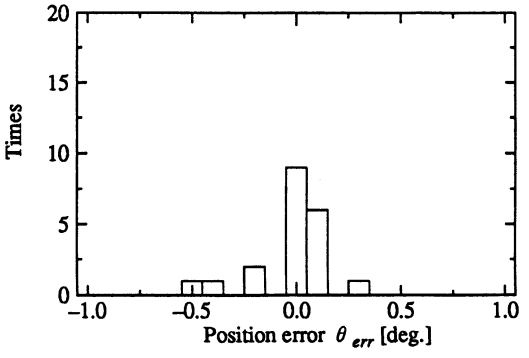
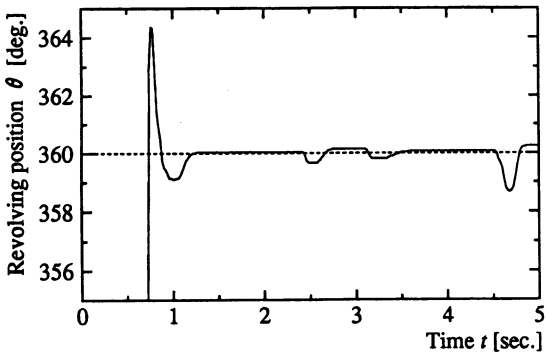
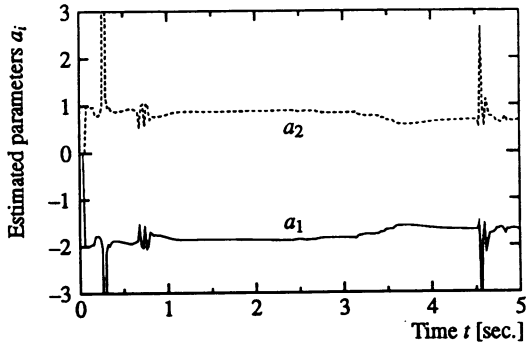


図 3. Precision of position control (β=0.92).



(a) Position.



(b) Estimated parameters a_i.

図 4. Position control with β=0.92.

囲内に入っている。β=0.92 の場合 (図 3) には，位置誤差なく停止する確率は 45[%] と高いが精度が悪い場合も生じている。これはパラメータ同定結果が影響しており，同定時に雑音の影響が大きく現れた場合には回転子位置が指令位置からずれてしまう。

その時の例を図 4 に示す。図 4 は忘却係数β=0.92 とした場合に雑音の影響が現れた時の実験結果である。t=2.0[sec.] では正確な位置制御が達成されているが，その後一度収束した同定パラメータが変動し，t=4.5[sec.] 付近ではパラメータが大きく振動している。その結果，回転子が指令位置より大きくずれていることがわかる。

4. 忘却係数の調整

同定されたパラメータの真値への収束性を改善し，雑音に強いパラメータ同定を実現するため，忘却係数βをファジィ推論に基づいて調整することを提案する。

超音波モータの特性を変化させるものとしては，温度上昇，負荷トルク印加，DC 電圧の変動がある。また，制御入力である駆動周波数および印加電圧位相差によっても大きく変化する。そこで，本論文では駆動周波数，印加電圧位相差の変化分Δf，$\Delta\phi$により忘却係数βの値を制御する。

表 1 にファジィルールを示す。前件部関数に対するメンバシップ関数は三角形のものを使用している。また，最終的な推論結果は (10) 式の重みつき平均値により決定する。

$$\text{if } \Delta f \text{ is } A_j \text{ and } \Delta\phi \text{ is } B_h$$

$$\text{then } \beta = C_i$$

$$\beta = \sum_{i=1}^{9} w_i C_i / \sum_{i=1}^{9} w_i \qquad (10)$$

ここで，$w_i = A_j B_h$：前件部関数の適合度

以上のファジィ推論結果を三次元の図で表したものが図 5 である。

表 1. Fuzzy rules.

		$\lvert\Delta f\rvert$		
		S	M	B
$\lvert\Delta\phi\rvert$	S	B	M	VS
	M	M	S	VS
	B	S	VS	VS

V:Very S:Small
M:Medium B:Big

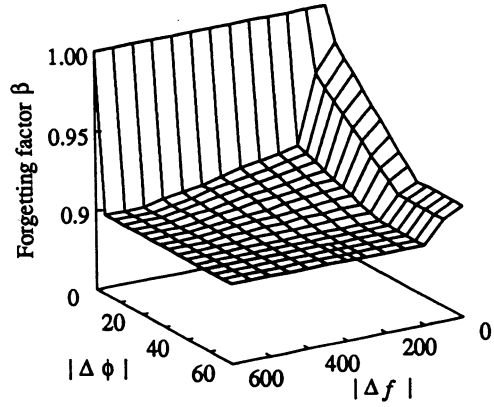
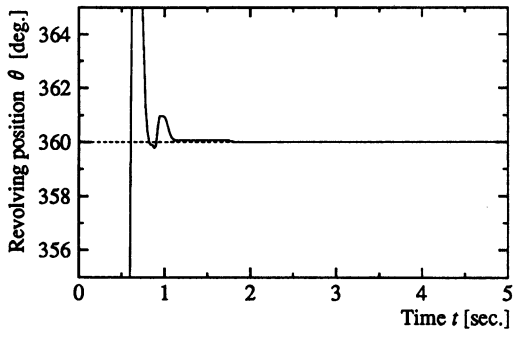


図 5. Value of fuzzy reasoning.

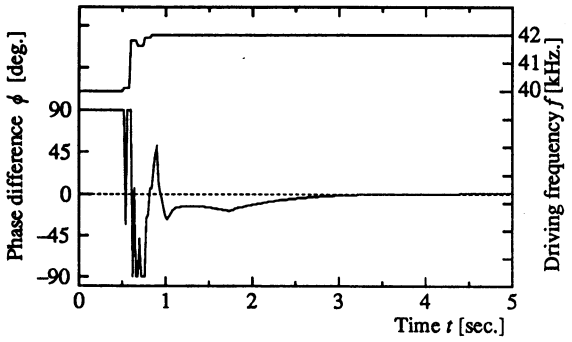
5. 実験結果

提案手法による実験結果を図 6 に示す。ここで (a) は回転子位置，(b) は制御入力，(c) はパラメータ a_i の同定過程，(d) は忘却係数を表している。忘却係数を制御することで，真値への収束が良く安定したパラメータ同定が行われていることがわかる。その結果，良好な位置制御が達成されている。

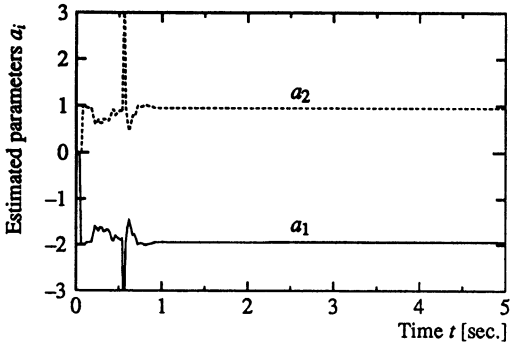
位置制御を 20 回行った時の位置制御の精度を図 7 に示す。位置誤差なく停止した確率は 75[%]，また位置誤差はすべて $\pm$0.1[deg.] の範囲内に収まっており，提案手法により位置制御の精度を向上することができた。



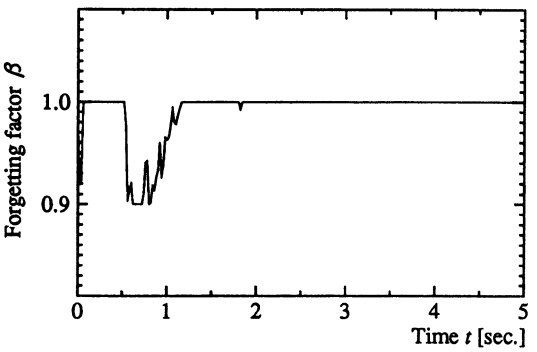
(a) Position.



(b) Phase difference and driving frequency.



(c) Estimated parameter a_i.



(d) Forgetting factor β.

図 6. Position control with proposed control scheme.

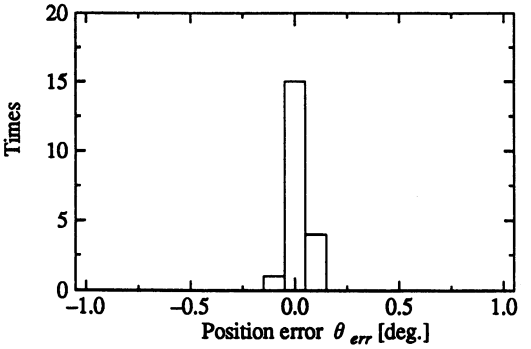


図 7. Precision of position control (proposed control scheme).

6. あとがき

本論文では，超音波モータの位置制御の精度を向上するために繰返し最小二乗法によるパラメータ同定における忘却係数の値をファジィ推論を用いて制御する手法を提案した。提案手法により，位置制御の精度を忘却係数 β=1.00 固定時と比較して 2.5 倍，β=0.92 固定時と比較して 1.7 倍に向上することができた。

また，紙面の都合上示してはいないが 1.48[kgf·cm] の負荷トルクを印加した場合でも，同程度の精度での位置制御が可能である。

文　献

(1) 見城, 指田：「超音波モータ入門」, 総合電子出版社 (1991)

(2) 千住, 他：「摩擦力制御を導入した超音波モータの高速・精密位置制御」, 電気学会回転機研資, RM-95-25(平 7)

(3) 千住, 他：「適応制御による超音波モータの速度制御」, 電学論 D, 113 , pp. 1226–1227 (平 5-10)

(4) 鈴木：「適応制御の基礎」, Computrol, No32(平 2)

(5) 魚崎, 他：「複数忘却因子法による適応同定法」, 計測自動制御学会論文集, 28, No. 9, 1046–1051 (1992)

連絡先

〒 903-01　沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地
琉球大学工学部電気電子工学科
千住 智信
TEL : 098-895-2221(内線)3292
FAX : 098-895-4377
E-mail : b985542@tec.u-ryukyu.ac.jp

TB1-2

ファジィ位相進み補償における絶対安定条件の導出

A Condition of Absolute Stability for Fuzzy Phase-lead Compensation

池田　貴幸　　田中　一男
Takayuki IKEDA　　Kazuo TANAKA

金沢大学　　機械システム工学科
Kanazawa Univ.　　Dept. of Mechanical System Eng.

Abstract - This paper presents stability analysis of feedback systems in fuzzy phase-lead compensation (FPLC). Circle Criterion, which is a nonlinear analysis technique, is used to analyze stability of feedback systems in FPLC. Relations between a stability condition derived via Circle Criterion and H^∞ norm are discussed in terms of robust control theory. The robust conditions derived in this paper achieve easily stability analysis not only for the feedback systems of the fuzzy phase-lead compensation but also for more generalized fuzzy control systems. Finally, we demonstrates a simple example of the stability analysis.

1．はじめに

ファジィ制御系の構成の一手法として、ファジィ位相進み補償法[1) 2) 3)]が提案されている。本論文では、このファジィ位相進み補償によるファジィ制御系の安定解析について述べ、さらに一般化したファジィ制御系の安定解析まで言及する。ファジィ制御系の安定解析についてはいくつかの手法[4) 5) 6)]が提案されており、絶対安定性に関するアプローチ[7) 8)]も行われている。本論文も絶対安定性からのアプローチを行うが、以下の点が特徴である。

1）以前のアプローチは、前件部、後件部ともファジィ集合で表現されている通常のif-thenルールから成るファジィ制御器を対象としていたが、本論文では、ファジィ位相進み補償器とその一般化したより広い補償器を対象とした。

2）H^∞制御理論の観点からも考察を加え、その関連性を考察する。特に、本論文で求めた絶対安定の条件と等価な条件をノルムの型で導出した。

なお、本論文で述べる方法では、前件部、後件部ともファジィ集合で表現されている通常のif-then規則からなるファジィ制御への適用も可能であり、多入力系への適用も可能となる。

本論文の構成は、次の通りである。2章では、ファジィ位相進み補償について簡単に述べ、ファジィ位相進み補償器が、線形部と非線形部に分離して表現できることを示す。3章では、円板定理を適用することによってファジィ位相進み補償器を用いた制御系の安定条件を導出し、その問題点について述べる。4章では、円板定理とH^∞制御理論の関連性について述べる。5章では、ファジィ位相進み補償器の一般化を行う。6章では、H^∞制御理論と有界実定理について簡単に述べ、5章で一般化されたファジィ制御器を用いた制御系の安定条件を有界実定理から導出する。7章では、簡単な安定解析例を示す。

2．ファジィ位相進み補償

ファジィ位相進み補償は、藤井ら[9)]により提案されたが、この方法では効果的な位相進み補償が行えないことが指摘され、効果的に位相進み補償を行う新しいファジィ位相進み補償[1) 2) 3)]が提案されている。このファジィ位相進み補償器は、速応性の優れた制御規則と減衰性の優れた制御規則を用いることによって、速応性と減衰性がともに優れた制御系を構成することである。ファジィ位相進み補償器は次の２つの規則からなる。

制御規則１（速応性に関する規則）：

IF $\phi(t)$ is about " $-\pi$ or 0 or π "

THEN

$$u_0(t)=\begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} \qquad (1)$$

制御規則２（減衰性に関する規則）：

IF $\phi(t)$ is about " $-\pi/2$ or $\pi/2$ "

THEN

$$u_1(t)=\begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}T(\theta,\omega)\begin{bmatrix} e(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} \qquad (2)$$

実際の操作量は次のような重み付き平均で求める。

$$u(t)=g_0(t)\,u_0(t)+g_1(t)\,u_1(t) \qquad (3)$$

ここで、

$$T(\theta,\omega)=\begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\frac{1}{\omega}\sin(-\theta) \\ \omega\sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix}$$

であり、周波数 ω において位相 θ を進ませる変換行列で振動を抑制する働きをする行列である。$g_0(t)$ はファジィ集合 about " $-\pi$ or 0 or π "のメンバーシップ値、$g_1(t)$ はファジィ集合 about " $-\pi/2$ or $\pi/2$ "のメンバーシップ値であり、

$$0\le g_0(t)\le 1\ ,\ 0\le g_1(t)\le 1\ ,\ g_0(t)+g_1(t)=1$$

である。

$\phi(t)$ は前件部変数であり、この $\phi(t)$ の変数上でファジィ分割（いわゆる極座標分割）を行っているのが特徴である。このファジィ分割は、図１のようなファジィ分割を実現できるものであれば、どのようなファジィ集合を用いても良い。一例を挙げると

$$g_0(t)=\cos^2(\phi(t)+\phi_0)\quad g_1(t)=\sin^2(\phi(t)+\phi_0)$$

$$\phi(t)=\tan^{-1}\left(\mu\frac{\dot{e}(t)}{e(t)}\right)$$

がある。このファジィ集合はμを大きくとると、about " $-\pi/2$ or $\pi/2$ "の領域が大きくなり、about " $-\pi$ or 0 or π " の領域が小さくなる。また、ϕ_0の値を変えることによってファジィ分割された領域が回転する。

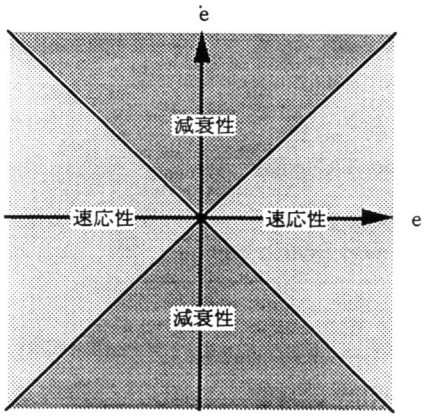


図１　位相平面のファジィ分割

なお、以降、表現を簡単にするため、

$$k \equiv [a\ b]$$

$$-x(t) \equiv \begin{bmatrix} e(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix}$$

を用い、(1)式,(2)式の後件部をそれぞれ

$$u_0(t) = -k\,x(t)$$

$$u_1(t) = -kT(\theta, \omega)x(t)$$

とすれば、(3)式は、(4)式で表現できる。

$$u(t) = -g_0(t)\,k\,x(t) - g_1(t)\,kT(\theta, \omega)x(t) \qquad (4)$$

$g_0(t) + g_1(t) = 1$の関係を用いれば、(4)式は

$$u(t) = -k\,x(t) - g_1(t)\,k\{T(\theta, \omega) - I\}x(t) \qquad (5)$$

のように線形部と非線形部に分けて表現できる。

3．円板定理による安定解析法と問題点

ここでは、次のような１入力の制御対象を考える。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) \quad A \in R^{n \times n} \quad b \in R^{n \times 1} \qquad (6)$$

(5)式において、$k_1 = k(T(\theta, \omega) - I)$とおくと

$$u(t) = -k\,x(t) - g_1(t)\,k_1 x(t) \qquad (7)$$

となる。ただし、

$$0 \le g_1(t) \le 1$$

である。(7)式を(6)式に代入すると、制御系全体は

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A - bk)x(t) + bu(t) \\ y(t) &= k_1 x(t) \\ u(t) &= -g_1(t)y(t) \quad 0 \le g_1(t) \le 1 \end{aligned} \qquad (8)$$

と変形され、図２のように線形部と非線形部に分けて表現できる。

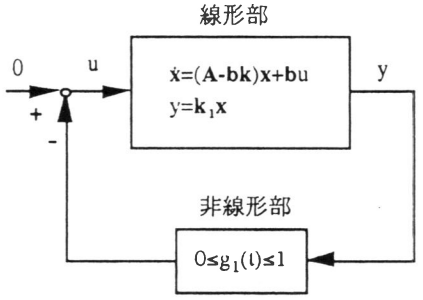


図２　ファジィ位相進み補償

この制御系はルーリエ系に帰着し、非線形部が時変である場合の安定条件は、円板定理から導出できる。これを(8)式に適用すると次の条件が導出できる。

$$1 + \mathrm{Re}\, g(j\omega) > 0 \qquad (9)$$

ここで、

$$g(s) = k_1(sI - A + bk)^{-1}b$$

である。この(9)式の条件は図３に示すように点（-1、0）を通る虚軸に平行な直線より右に、システムの線形部のナイキスト軌跡が存在することと等価である。

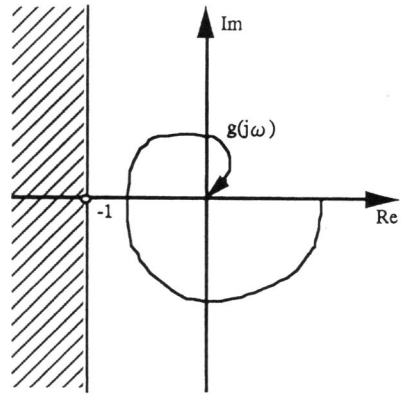


図３　円板定理による安定判別法

この円板定理はナイキスト軌跡を用いて安定判別ができることが利点として挙げられるが、

［問題点１］２つの規則からなるファジィ位相進み補償器には適用可能であるが、２つ以上の規則からなるファジィ制御器には適用できない。

［問題点２］実際にナイキスト軌跡を計算する必要があり、安定判別作業の簡単化が期待できない。

のような問題点も挙げることができる。

これらの問題点を解決するポイントはH^∞制御理論を導入することである。４～６章では、この点について述べる。

4．円板定理とH^∞制御理論の関連性

(8)式を

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A - bk + \tfrac{1}{2}bk_1)x(t) + \tfrac{1}{2}bu(t) \\ y(t) &= k_1 x(t) \\ u(t) &= -\bar{g}_1(t)y(t) \quad -1 \le \bar{g}_1(t) \le 1 \end{aligned} \qquad (10)$$

と等価変換する。(8)式との違いは非線形部が-1から1まで変動する点である。(10)式に円板定理を適用すると、図４のようになり、この条件は以下の条件と等価となる。

$$\left\| \bar{g}(j\omega) \right\|_\infty < 1 \qquad (11)$$

ただし

$$\bar{g}(s) = k_1(sI - A + bk - \tfrac{1}{2}bk_1)^{-1}b \qquad (12)$$

である。(11)式はH^∞ノルムである。そのため、H^∞制御理論が適用でき、上で挙げた［問題点１］［問題点２］が解決され、さらに、ロバスト安定解析として新たな展開[11) 12)]が期待できる。この点については、５章、６章で述べる。

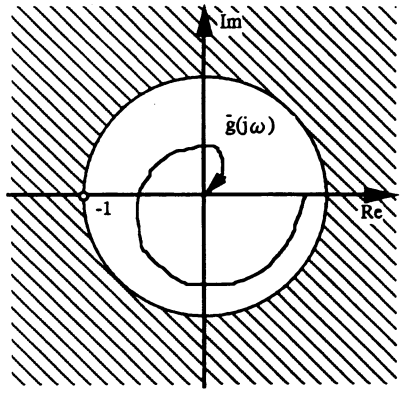


図4　円板定理による安定判別法

5．ファジィ位相進み補償の一般化

(4)式を一般化すると

$$u(t)=-\sum_{i=0}^{r} g_i(t)\bar{k}_i x(t)$$

と表現することができる。ここで

$$0\le g_i(t)\le 1\ ,\ \sum_{i=0}^{r} g_i(t)=1 \qquad (13)$$

$$\bar{k}_i\in R^{1\times n} \quad i=0,1,\cdots\cdots,r$$

である。また、

$$\sum_{i=0}^{r} g_i(t)=1$$

の関係から

$$u(t)=-kx(t)-\sum_{i=1}^{r} g_i(t)k_i x(t) \qquad (14)$$

と表現できる。ただし、

$$k=\bar{k}_0$$

$$k_i=\bar{k}_i-\bar{k}_0 \quad i=1,2,\cdots\cdots,r$$

と置き換えた。

2.では、図1のような位相平面上でのファジィ分割を用いたが、位相平面上のファジィ分割はすでにいろいろと提案されている。本論文で提案する安定判別法は、すべての時刻tで(13)式の条件を満たせば、どのようなファジィ分割によるものでも良い。

6．有界実定理による安定解析法

6.1　H^{∞}制御理論と有界実定理

次のような不確かさを有するシステムを考える。

$$\dot{x}(t)=\{A_0+DF(t)E\}\,x(t) \qquad (15)$$

ここで、D、Eは既知の実行列であり、F(t)は

$$\|F(t)\|\le 1 \qquad (16)$$

を満たすものとする。ただし

$$F(t)=\mathrm{diag}\left[g_1(t),g_2(t),\cdots,g_r(t)\right] \qquad F(t)\in R^{r\times r}$$

$$-1\le g_i(t)\le 1 \quad i=1,2,\cdots\cdots,r$$

である。

この系の安定条件として次の定理が導出されている。

[定理1][10)]

(15)式のシステムが安定であるための必要十分条件は以下のように与えられる。以下の条件は互いに等価であり、いずれかが成り立てばこのシステムは安定である。

(C1)A_0が安定行列で、

$$\left\|E(sI-A_0)^{-1}D\right\|_{\infty}<1$$

(C2)以下のRiccati方程式が正定解$P>0$をもつ。

$$PA+A^{T}P+PDD^{T}P+E^{T}E<0$$

(C3)以下の行列Hの固有値の実部がすべてゼロでない。

$$H=\begin{bmatrix} A & -DD^{T} \\ E^{T}E & -A^{T} \end{bmatrix}$$

この定理は有界実定理と呼ばれており、不確かさを持つ時変システム(15)式の安定条件として知られている。また、(16)式の対角要素が一つの場合、(C1)の条件は円板定理に帰着する。また、実際に安定解析を行うとき、(C3)を使えば、固有値を計算するだけでよいので、円板定理を使うよりも安定判別作業の簡単化が期待できる。

6.2　一般化したファジィ制御器を用いた制御系の安定条件

(6)式の制御対象と(14)式のファジィ制御器で構成されるファジィ制御系を考える。このとき、

$$D=\left[-b,-b,\cdots,-b\right] \qquad D\in R^{n\times r}$$

$$E^{T}=\left[k_1^{T},k_2^{T},\cdots,k_r^{T}\right] \qquad E\in R^{r\times n}$$

$$\Delta(t)=\mathrm{diag}\left[g_1(t),g_2(t),\cdots,g_r(t)\right]$$

$$\Delta(t)\in R^{r\times r}\ ,\ 0\le g_i(t)\le 1 \quad i=1,2,\cdots\cdots,r \qquad (17)$$

を導入すると、このファジィ制御系は、

$$\dot{x}(t)=\{A-bk+D\Delta(t)E\}\,x(t) \qquad (18)$$

と等価表現できる。この系は(16)式の条件を満たすので、有界実定理を適用することができる。しかし、このまま適用すると得られる結果が保守的になる。そこで、さらに、

$$\dot{x}(t)=\{A-bk+\tfrac{1}{2}DE+\tfrac{1}{2}D\bar{\Delta}(t)E\}\,x(t) \qquad (19)$$

と等価変換する。ただし

$$\bar{\Delta}(t)=\mathrm{diag}\left[\bar{g}_1(t),\bar{g}_2(t),\cdots,\bar{g}_r(t)\right]$$

$$\bar{\Delta}(t)\in R^{r\times r}\ ,\ -1\le\bar{g}_i(t)\le 1 \quad i=1,2,\cdots\cdots,r$$

である。(18)式から(19)式への等価変換の方法は付録に示す。(19)式に［定理1］を適用すると次の安定条件が導出できる。

［定理2］(6)式、(14)式からなるファジィ制御系が安定であるための必要十分条件は、以下のように与えられる。以下の条件は互いに等価であり、いずれかが成り立てば、このファジィ制御系は安定である。

(C4) $A-bk+\frac{1}{2}DE$が安定行列で、

$$\left\|\tfrac{1}{2}E(sI-(A-bk+\tfrac{1}{2}DE))^{-1}D\right\|_{\infty}<1$$

が成り立つ。

(C5) リッカチ不等式

$$(A-bk+\tfrac{1}{2}DE)^{T}P+P(A-bk+\tfrac{1}{2}DE)+P(\tfrac{1}{2}D)(\tfrac{1}{2}D)^{T}P+E^{T}E<0$$

が正定解$P>0$をもつ。

(C6) 行列Hは虚軸上に固有値を持たない。

$$H=\begin{bmatrix} A-bk+\frac{1}{2}DE & -(\frac{1}{2}D)(\frac{1}{2}D)^{T} \\ E^{T}E & -(A-bk+\frac{1}{2}DE)^{T} \end{bmatrix}$$

実際に安定判別を行うときには、(C6)の条件を用いる方が便利である。このとき $\mathbf{DD}^T$、$\mathbf{DE}$、$\mathbf{E}^T\mathbf{E}$は

$$\mathbf{DD}^T = r\,\mathbf{bb}^T$$
$$\mathbf{DE} = -\sum_i^r \mathbf{bk}_i$$
$$\mathbf{E}^T\mathbf{E} = \sum_i^r \mathbf{k}_i^T\mathbf{k}_i \qquad (14)$$

と示され、Aと同じマトリクスサイズとなる。これは$g_i(t)$の個数によらず、Hは2n×2nのマトリクスであることを示している。一方、(C4)のH^∞ノルムを計算するとき、

$$\frac{1}{2}\mathbf{E}(sI-(\mathbf{A}-\mathbf{bk}+\frac{1}{2}\mathbf{DE}))^{-1}\mathbf{D}$$

はr×rの行列となる。rが大きい場合、すなわち規則数が多い場合、この行列のサイズが大きくなりH^∞ノルムの計算は容易でない。

7. 解析例

(6)式、(14)式でからなるファジィ制御系において、(6)式、(14)式のパラメータが

$$n=2\ ,\ r=2$$
$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -4 & 0\end{bmatrix} \qquad \mathbf{b}=\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}$$
$$\mathbf{k}=\begin{bmatrix}-0.10 & 0.80\end{bmatrix}$$
$$\mathbf{k}_1=\begin{bmatrix}-0.50 & 0.40\end{bmatrix}$$
$$\mathbf{k}_2=\begin{bmatrix}0.00 & -0.60\end{bmatrix} \qquad (21)$$

であるときの安定解析を行う。このとき、(20)式より、行列$\mathbf{DD}^T$、$\mathbf{DE}$、$\mathbf{E}^T\mathbf{E}$を求め、行列Hを構成すると、

$$\mathbf{H}=\begin{bmatrix}0 & 1.00 & 0 & 0\\ -3.65 & -0.70 & 0 & -0.50\\ 0.25 & -0.20 & 0 & 3.65\\ -0.20 & 0.52 & -1.00 & 0.70\end{bmatrix}$$

となる。行列Hの固有値は

$$0.2212 \pm 1.8931i\ ,\ -0.2212 \pm 1.8931i$$

となる。すべての固有値の実部がゼロでないので、このパラメータを持つファジィ制御系は安定である。

8. まとめ

本論文では、ファジィ位相進み補償器を一般化し、その安定条件をH^∞制御理論などのロバスト安定性の観点から導出した。本論文で提案した手法は、従来のナイキスト軌跡による安定判別よりも簡単かつ容易に安定解析が行えることが特徴である。なお、本論文では、1入力の線形の制御対象しか扱わなかったが、多入力や非線形なものへの考察ついては別報[12]にて報告したい。

参考文献

1)田中、アドバンストファジィ制御、共立出版 (1994)

2)田中ほか、ファジィ制御系における位相進みの実現、日本ファジィ学会論文集、Vol.4、No.3、pp.163-170 (1992)

3)田中ほか、周波数に基づくファジィ制御器の設計とδルールによる自己調整、計測自動制御学会論文集、Vol.29、No.7、pp.826-832 (1993)

4)K.Tanaka and M.Sugeno, Stability Analysis of Fuzzy Control Systems Using Lyapunov's Direct method,Proceedings of NAFIPS '90 , pp.133-136 (1990)

5)K.Tanaka and M.Sugeno, Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems ,FUZZY SETS AND SYSTEM ,vol.45 ,No.2 , pp.135-156 (1992)

6)北條、寺野、増井、位相面によるファジィ制御系の安定解析、日本ファジィ学会論文集、Vol.4,No.6、pp.893-905 (1992)

7)北村、ファジィルール制御系の絶対安定条件、第5回ファジィシステムシンポジウム、pp.505-508 (1989)

8)井ノ口、村上、間接法によるファジィ制御の安定解析、第9回ファジィシステムシンポジウム、pp.505-508 (1989)

9)藤井ほか、周波数応答法を用いたファジィコントローラ設計、第5回ファジィシステムシンポジウム、pp.9-12 (1989)

10)木村、藤井、森、ロバスト制御、コロナ(1994)

11)田中,H.Wang,M.Giffin,非線形システムに対するロバストファジィ制御器の設計法、第11回ファジィシステムシンポジウム (1995)

12)K.Tanaka, T. Ikeda and H. Wang,"Fuzzy Controller Design for Stabilization of a Class of Nonlinear Systems, IEEE Conf. on CDC'95 (Submitted).

［問い合わせ先］

〒920 石川県金沢市小立野2-40-20

金沢大学工学部機械システム工学科

田中 一男

Tel & Fax 0762-34-4736

Email tanaka@ kicews2.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

付録

次のような不確かさを有するシステムを考える。

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\{\mathbf{A}_0+\mathbf{D}\Delta(t)\mathbf{E}\}\,\mathbf{x}(t)$$
$$\Delta(t)=\mathrm{diag}[g_1(t)\ g_2(t)\ \cdots\ g_s(t)]$$
$$\alpha_i \le g_i(t) \le \beta_i \qquad (a1)$$

ここで、α_i、β_iは正、ゼロ、負いずれの値でもよい。

(a1)のシステムは、行列

$$\mathbf{M}=\mathrm{diag}[\frac{\beta_1+\alpha_1}{2}\ \frac{\beta_2+\alpha_2}{2}\ \cdots\ \frac{\beta_s+\alpha_s}{2}]$$
$$\mathbf{N}=\mathrm{diag}[\frac{\beta_1-\alpha_1}{2}\ \frac{\beta_2-\alpha_2}{2}\ \cdots\ \frac{\beta_s-\alpha_s}{2}]$$

を使って、等価変換することによって

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\{\bar{\mathbf{A}}+\bar{\mathbf{D}}\bar{\Delta}(t)\bar{\mathbf{E}}\}\,\mathbf{x}(t)$$
$$\bar{\mathbf{A}}=\mathbf{A}_0+\mathbf{DME},\quad \bar{\mathbf{D}}=\mathbf{DN}$$
$$\bar{\mathbf{E}}=\mathbf{E},\quad \bar{\Delta}(t)=\mathbf{N}^{-1}(\Delta(t)-\mathbf{M}) \qquad (a2)$$

と表現できる。

(a1)式では、

$$\|\Delta(t)\| \le 1$$

でなかったものが、(a2)式では、

$$\|\bar{\Delta}(t)\| \le 1$$

のようになっていることに注意する。(17)式において、

$\alpha_i=0$ $\beta_i=1$

より、

$$\mathbf{M}=\mathbf{N}=\mathbf{I}/2$$

となるので、(18)式から(19)式への等価変換ができる。

TB1-3

ファジィ推論を利用した調光制御
Lighting Power Control by Use of Fuzzy Inference

加藤義人　西守克己　小松直樹
Yoshito Kato　Katsumi Nishimori　Naoki Komatsu

鳥取大学工学部電気電子工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering,Tottori University

Abstract - Fuzzy reasoning has been used for control of various electric equipments, traffic systems and so on. Conventional lighting control method has been investigated for saving-energy and amenity in lighting apparatus. Since these controls employ sequential control, they do not exactly satisfy human sense. We apply fuzzy theory to lighting control of fluorescent lamp which satisfies human sense. In this report, we have created lighting control model which uses fuzzy reasoning, and obtained control characteristics by several typical reasoning methods. The result verifies usefulness of this fuzzy lighting control.

1、はじめに

本研究では、あいまいさを表現する方法として注目されるようになったファジィ制御に着目し、蛍光ランプの調光制御に適応することで人間の感覚に則する照明制御を行った。ファジィ推論を用いて調光制御モデルを設定し、各種の代表的な推論方式の制御特性を調べ、その有効性について検討した結果を報告する。

2、調光制御システムの構成

調光制御システムの構成を図1に示す。このシステムは、照度センサ（ＣｄＳ）で作業面上の照度を測定し、その測定量をファジィボードに入力し、あらかじめ設定したおいたファジィルールとメンバーシップ関数を用いて非ファジィ化を行い、操作量として出力された電圧値を調光器に入力し蛍光ランプを調光する。
また、今回用いた調光の制御規則の形式は速度型を採用し、前件部２変数、後件部１変数で表現した。前件部は測定量として得られる照度偏差と照度偏差の一階差分で構成し、後件部は操作量として出力する調光器の相対的な調光範囲を対応させる。
設定した制御規則を式（１）に、また制御規則の結合を式（２）に示す。

R^i: if e1 is Ai1 and Δe2 is Ai2 then Δui is Bi
(i=1, 2, …, n) …（1）

i ：制御規則の番号
e1：制御偏差（照度偏差）
Δe2：制御偏差（照度偏差）の一階差分
Δui：操作量（調光器の調光範囲）
Ai1：制御偏差（照度偏差）のファジィ数
Ai2：制御偏差（照度偏差）の一階差分のファジィ数
Bi ：操作量（調光器の調光範囲）のファジィ数

$$R = R1 \cup R2 \cup \cdots \cup Rn = \bigcup_{i=1}^{n} Ri \quad \cdots (2)$$

なお、操作量はΔuiは式（３）で表す。

$$\Delta u^i = \Delta u^{i-1} + \Delta u^* \quad \cdots (3)$$

Δu^{i-1}：１サンプル前の操作量
Δu^* ：ファジィ推論結果

次にメンバーシップ関数の設定について述べる。今回行った制御ではJIS Z-9110 で設定されている会議室の照度約６００１ｘを適正照度（目標照度）とした。今回用いた照度偏差、照度偏差の一階差分及び調光器の入力電圧（調光範囲）を定義したメンバーシップ関数を図２に示す。各々のメンバーシップ関数は式（４）で表す５個の三角形からなるファジィ変数で構成する。

$$A(X) = (-|X-b|)/a \vee 0,\ a>0 \quad \cdots (4)$$

Ｘ：メンバーシップ関数の台集合
ａ：メンバーシップ関数の広がり
ｂ：メンバーシップ関数のグレードが１になるＸの値

また、調光制御のルール表を表１に示す。今回用いた推論方式には論理積－論理和－重心法と代数積－加算－重心法を基本とした４つの推論方式を用いた。また、確定方式の重心法は式（５）に示す。

$$\Delta u = \sum_{i=0}^{n} i \cdot B'(i) \Big/ \sum_{i=0}^{n} B'(i) \quad \cdots (5)$$

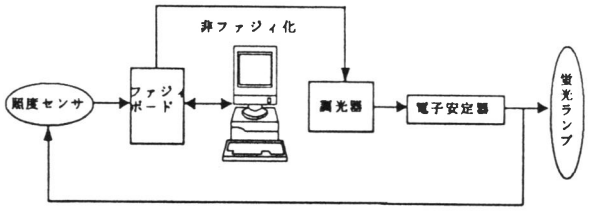


図1　調光制御システム

表1　ファジィルール表

Δe \ e	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	PB	PS	PS
NS	PB	PB	PS	PS	PS
ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
PS	NS	NS	NS	NB	NB
PB	NS	NS	NB	NB	NB

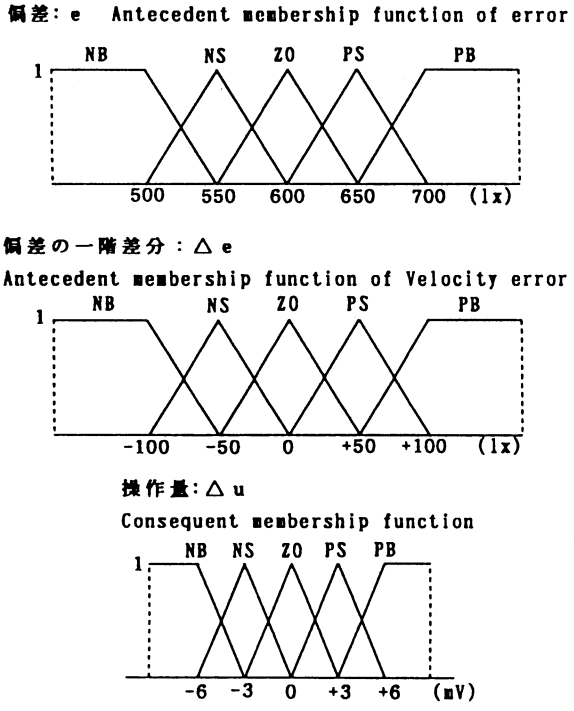


図2　メンバーシップ関数

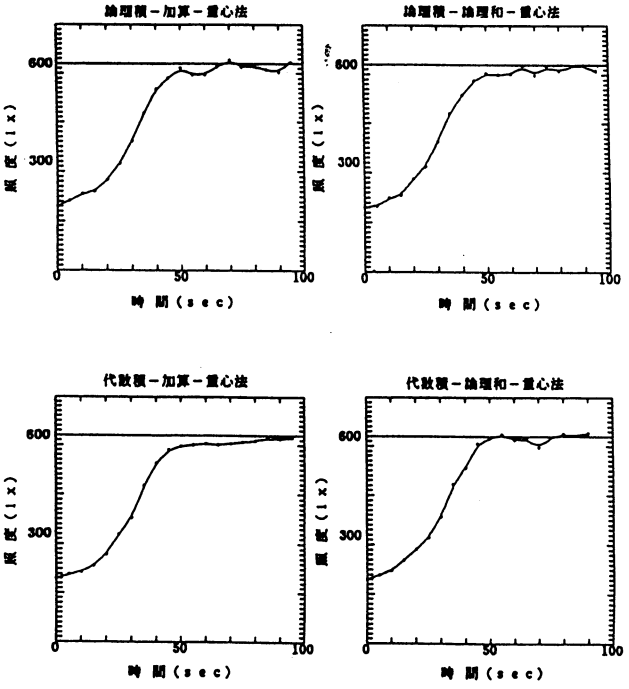


図3　各推論方法による制御結果

3、最適な推論方法の検証

ファジィ推論の推論方式に関しては数多くの提案がなされている。しかし、これらの中でどの推論方式を選択すべきかという方法論はまだ確立されていない。そこで、現在よく用いられている確定方式に重心法を採用した推論方法の中から４つの方式を選択し今回の調光制御に適していると思われる推論方式を調べた。今回の制御では、作業面照度を目標値以下に設定した後、目標値に近づける制御を行った。その結果を図３に示す。その結果、代数積－加算－重心法を用いたものが適していると思われる。

4、調光制御実験結果

（３）で行った結果を基に、調光制御を行った。推論時間は４秒とし、４秒の推論時間中に１０回のサンプリングを行い、その相加平均値をそのときの作業面上の照度とした。実験では作業面上の照度を変化させたときに、適切な作業面照度を保つ実験を行った。そのときの照度変化と調光範囲（調光器入力電圧）の関係を図４に示す。結果より、作業面上に照度変化があった後もなめらかな調光を行い、目標値である６００１ｘに収束していることが確認できる。また、そのときの調光器入力電圧（調光範囲）を見てもなめらかに変化し良好な結果となっていることが確認できる。

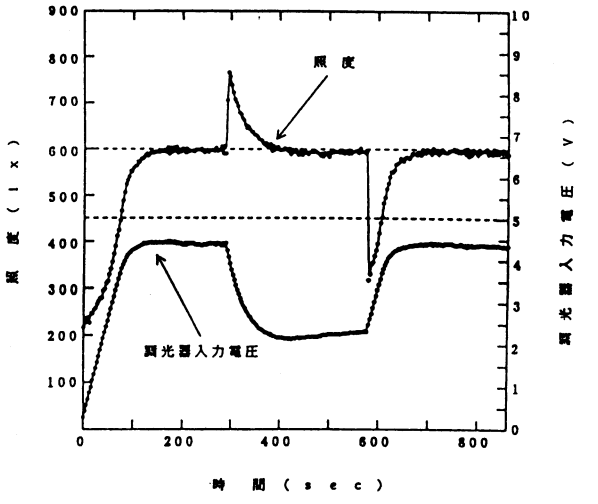


図4　調光制御結果

5、まとめ

本研究では、ファジィ理論を用いて調光の制御モデルを設定し、各種の代表的な推論方法の制御特性の検証を行い、その有効性について検討した結果、以下の結論を得た。

（１）蛍光ランプの調光制御にファジィ理論を適用する方法の有効性が確認された。
（２）蛍光ランプの調光制御には推論方式に代数積－加算－重心法を用いたものが適している。
（３）ファジィメンバーシップ関数の後件部変数に操作量の変化量（速度型制御）を用いる必要がある。
（４）明暗順応を考慮することでより快適な調光制御を行える。

参考文献

（１）菅野　道夫、”ファジィ制御”日刊工業新聞社、１９８８
（２）中村　誠　他、”ファジィ理論を用いた採光制御の一方法　山口県工業技術センター研究報告、第４号　１９９２

連絡先

〒６８０　鳥取県鳥取市湖山町南４丁目１０１番地
鳥取大学工学部電気電子工学科
西守克己
ＴＥＬ：０８５７－３１－５６８８
ＦＡＸ：０８５７－３１－０８８０

TB2-1

サーボ系の過渡特性改善へのファジィ推論の適用

An Application of Fuzzy Inference for Improving the Transient Characteristic of Servo Systems

王 碩玉　中津山 幹男　高橋 一清　神長 裕明　水沼 充

Shouyu WANG Mikio NAKATSUYAMA Kazukiyo TAKAHASHI Hiroaki KAMINAGA Mitsuru MIZUNUMA
山形大学工学部 Faculty of Engineering, Yamagata University

In this paper, we propose an application of fuzzy inference for improving the transient characteristic of model following control system. Finally, the proposed method is shown to be effective by simulation studies.

1．はじめに

工作機械やロボットマニピュレータなどのサーボ系の設計において，目標値追従過程でのパフォーマンスインデクス（例えば，上昇時間，オーバシュート，定常誤差など）の指定が要求される場合が多い．このようなサーボ系の設計に対して，制御対象の応答を望ましいモデル応答に近づけるようなモデル追従制御系（Model Following Control System, MFCS）が有効である[1)2)3)]．モデルフォロイング制御法は，設計者の要求する望ましい性能あるいはプラントの動特性をあらかじめ規範モデル（Reference Model）で規定し，プラントの出力をこのモデルの出力に一致するようにプラントの動特性を修正する制御法である．したがって，規範モデルとプラントとの初期状態が同じ場合，適切な制御法則により修正されたプラントの動特性をモデルの動特性と一致することができ，望みの応答特性を満たすことが期待できる．しかし，実際のシステムにおいて，両者の動特性が全く同じである場合でも，プラントの初期状態とモデルの初期状態が異なるとき、有限な時間内ではプラントの出力をモデルの出力に一致することができなく，現れてくる過渡応答は全くプラントの初期状態に依存する。この問題の解決策としては，ある特定な初期状態に対して，満足できる追従特性を得るようにある設計パラメータを適切に調整することが考えられるが，プラントの初期状態はいろいろな値を取り得るので，すべての初期状態に合わせてパラメータを調整するのは現実的ではない．本報告ではファジィ推論を用いて，オンラインでモデルフォロイング制御系の制御効果を評価し，制御入力を修正することによりこれらの問題点を解決する．

ファジィ推論[4)5)6)]の特長はプラントに対する定性的な知識や経験などを言語ルールの形で適切に定量化することができ，制御系の設計に応用するときプラントの厳密な数式モデルを必要としないことである．近年プロセス制御分野において多くの実績があげられている[7)]．また，ファジィ推論を用いた制御系の構成の流れとしては，（1）ファジィ制御系の解析と設計と（2）高度知識制御との二つに分けられる[8)]．前者は現代制御理論によるモデルに基づくファジィ制御であり，後者はニューラルネットワークやGAなどをファジィ推論と融合することにより，よりよくオペレータのもつ高度な制御戦略を実現する制御である．著者らは，従来の制御理論との融合の意味で，（1）の方式によるファジィ推論の応用について考察している[9)10)]．すなわち，なんらかの制御法に基づいてコントローラを構成してから，ファジィ推論によりその制御系の目標値を計画する方式を検討している．本報告もファジィ推論を独立に使うことではなくて，現代制御理論とともにそれぞれの特長を生かした最善なシステムを構成すべきという立場に立っている．具体的にはファジィ推論とモデルフォロイング制御法を融合することにより，望みの目標追従過渡特性を満足することができる制御系を構成する．最後にシミュレーションによりその有効性を示す．

2．モデルフォロイング制御法

モデルフォロイングの考え方に基づく制御法は多数提案されたが，本節では，本報告の用いたモデルフォロイング制御法の概要について述べる．

まず制御対象は次の式で表わすのもとする．ただし，$u(t)$と$y(t)$はそれぞれ入力，出力信号である．$x(t)$は状態変数である．$G_p(s)$は入出力間の伝達関数を表わす．

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) \tag{1}$$

$$y(t) = c^T x(t) \tag{2}$$

$$G_P(s) = \frac{\beta_q s^q + \beta_{q-1} s^{q-1} + \cdots + \beta_1 s + \beta_0}{s^n + \alpha_{n-1} s^{n-1} + \cdots + \alpha_1 s + \alpha_0} \tag{3}$$

$$x(t) \in R^n,\ G_P(s) = c^T (sI - A)^{-1} b$$

望みの応答特性を表わす規範モデルは(4)～(6)式で表わすものとする．ただし，$u_m(t)$と$y_m(t)$は規範モデルの入力と出力である．$x_m(t)$は規範モデルの内部状態変数である．$G_M(s)$は規範モデルの入出力間の伝達関数を表わす．

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + b_m u_m(t) \tag{4}$$

$$y_m(t) = C_m^T x_m(t) \tag{5}$$

$$G_M(s) = \frac{\beta_{Mm}s^m + \beta_{Mm-1}s^{m-1} + \cdots + \beta_{M1}s + \beta_{M0}}{s^n + \alpha_{Mn-1}s^{n-1} + \cdots + \alpha_{M1}s + \alpha_{M0}} \tag{6}$$

$$x_m(t) \in R^n, \quad G_M(s) = C_m^T(sI - A_m)^{-1}b_m$$

制御目的は，何らかの設計法により設計した制御器でプラントの出力$y(t)$を望ましい規範モデルの出力$y_m(t)$に近づけることである．もし，$y(t)=y_m(t)$ということが実現できれば，制御目的が完全に達成できることになる．そのためにいろいろなサーボ系の設計法が考えられるが，本報告では，次の制御法を用いることにする．ただし，スペースの関係でこの定理の証明については省略する．

定理：（7）式により（1）－（3）式で表わすプラントを制御すれば，規範モデルに関して（8）式が成り立つ．

$$u(t) = K^T x(t) + \frac{1}{F_0} y_d(t) \tag{7}$$

$$\lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{t\to\infty}[y_m(t) - y(t)] = 0 \tag{8}$$

ただし，

$$K^T = -FC^T H^T, \quad y_d(t) = FY^T$$

$$F = (f_0, f_1, \cdots, f_{n-q}), \quad f_0 = 0$$

$$H = (A^{n-q}, A^{n-q-1}, \cdots, A, 1)$$

$$Y = (y^{(n-q)}, y^{(n-q-1)}, \cdots, \dot{y}, 1)$$

設計パラメータベクトルFは次の多項式を安定に選ぶものである．

$$F_o = F(s^{(n-q)}, s^{(n-q-1)}, \cdots, s, 1)^T$$

3．ファジィ推論に基づくモデルフォロイング制御系の構成法

2章の定理により制御時間が無限大のとき$\lim e(t) = \lim[y(t) - y_m(t)] = 0$は理論的に保証されているが，途中での追従特性に関しては明確に表わすことができない．結局ある特定な初期状態に対して，望ましい過渡パフォーマンスインデクスを満たすように設計者の試行錯誤により設計パラメータベクトルFを繰り返し調整することになる．　しかし，はじめに述べたように実際のシステムにおいて，プラントの初期状態はいろいろな値が有り得るので，すべての初期状態に合わせてパラメータを調整するのがやはり無理である．　この問題を解決するために，本節ではファジィ推論を用いて，オンラインでモデルフォロイング制御系の制御効果を評価しながら，制御入力を適切に修正する．これにより上記の問題点が解決できる．

ファジィ推論を応用するとき，応用すべき対象に関する知識は非常に重要である．そのファジィ推論の効果はまったくその知識の正確さにより左右される．以下では，本システムに関する定性的な知識を重点において説明する．

まず，定性的な知識を述べる．

基本的な考え方としては，オンラインでモデルフォロイング制御系の制御入力$u(t)$を監視することにより，モデルとプラントとの初期状態の異なる原因で，過小な$u(t)$または過大な$u(t)$を直ちに修正する．つまり，規範モデル出力とプラント出力との誤差およびその誤差の差分を見ながら，オンラインで補正すべき制御入力の値$u_f(t)$を推論させることにする．

したがって，制御系の構造はモデルフォロイング制御系にファジィ補償器を附けた形となっている．具体的に，k時刻で，規範モデルの出力$y_m(k)$とプラントの出力$y(k)$との誤差$[y_m(k) - y(k)]$が正で大きく，さらにこの誤差$[y_m(k) - y(k)]$が前の$(k-1)$時刻での誤差$[y_m(k-1) - y(k-1)]$よりも大きい場合，制御入力uがかなり足りないことを意味するので，正で大きな補正入力u_fを加える必要がある．もし，速やかに不十分なuに大きな入力を加えて修正しなければ，つまり，モデルフォロイング制御系の制御入力uだけで制御すると，状態の初期誤差などの原因で，望みの過渡応答特性は得られないことになる．

以上のことによりファジィ推論の前件部と後件部は次のように選ぶことにする．

前件部：

$$e(k) = [y_m(k) - y(k)]$$

$$\Delta e(k) = [y_m(k) - y_m(k-1)] + [y(k-1) - y(k)]$$

後件部：　$u_f(k)$

そして，上述の知識をルールの形で書くと

if $e(k)$＝正で大きい and $\Delta e(k)$＝正で大きい
then $u_f(k)$＝正で大きい

となる．したがって，実際の制御入力は$[u(k) + u_f(k)]$となる

上に述べた定性的な知識によりファジィ推論ルールを設計することができる．実際の制御を行うとき，前件部のファジィ変数の数で推論ルールの個数が決まるが，本報告では，簡単のため，二つの前件部をそれぞれ三つのファジィ変数に選んで，推論ルール

が９個になっている．前後件部のファジィ変数を定量化するメンバーシップ関数におけるパラメータについて，現在のところでは試行錯誤により選択する．これらは当日会場にて説明する．

４．シミュレーション

本手法の有効性を確認するために下図の電気回路の電圧制御を例としてシミュレーションを行った．すなわち，電圧u(t)で容量の電圧$u_c(t)$を予め定められた通りに制御する．

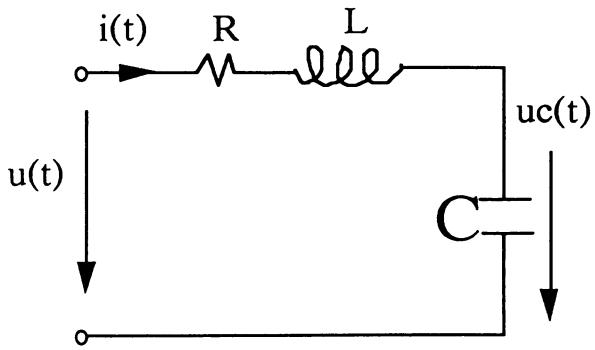


図.1　制御対象

ただし，R＝3.58，L＝0.28，C＝0.09である．
また$u_c(t)$の規範モデルは次式で表わすものとする．

$$G_M = \frac{\beta_{m0}}{s^2 + \alpha_{m1}s + \alpha_{m0}} \qquad (9)$$

ただし，β_{m0}=1.0，α_{m1}=11.5，α_{m0}=28.0
f_0=1.0，f_1=3.23，f_2=2.475

シミュレーション結果を図.2と図.3に示す．図.2はファジィ推論を用いず，モデルフォロイング制御法により制御した結果であり，図.3はファジィ推論に基づくモデルフォロイング制御法により制御した結果である．ただし，両図において，(a)，(b)，(c)図はそれぞれ規範モデルの電圧$u_{cm}(t)$と容量の電圧応答$u_c(t)$，規範モデルで表した電流$i_m(t)$と回路の実際の電流i(t)，制御入力の端子入力電圧u(t)を表している．また，図.3(c)の$u_f(t)$はファジィ推論による補正入力で，$u(t) - u_f(t)$はモデルフォロイング制御法による制御入力である．図.3(a)における追従誤差は図.2(a)における追従誤差より低減されているので本手法の有効性が示された．

５．まとめ

本報告はファジィ推論とモデルフォロイング制御法を融合することにより，それぞれの特長を生かしたモデルフォロイング制御システムの構成法を提案した．本構成法により設計した制御系は指定された目標追従過渡特性を保証することができる．最後にその有効性をシミュレーションにより確認した．今後の課題としては実際のプラントにかかる制御入力の制限も考慮したファジィ推論ルールの開発が残されている．

参　考　文　献

1) I.D.Landau and B.Courtiol: Design of Multivariable Adaptive Model Following Control System, Automatica, Vol.10, pp.483-494, 1974.
2) 金井　喜美雄：制御システム設計，槇書店，1989.
3) 小林，中溝，高田：モデル適合とモデル追従制御，システムと制御，Vol.32, No.3, pp.199-206, 1988.
4) 水本：ファジィ推論(１),(２)，日本ファジィ学会誌，Vol.4, No.2, pp.256-264(1), Vol.4, No.3, pp.433-444(2), 1992.
5) 塚本：ファジィ推論（３），日本ファジィ学会誌，Vol.4, No.4, pp.676-684, 1992.
6) 水本：ファジィ制御に対する最近の手法，システム／制御／情報，Vol.38, No.11, pp.590-595, 1995.
7) 伊藤：プロセス制御分野におけるファジィ制御の意義と役割，日本ファジィ学会誌，Vol.7, No.1, pp.19-34, 1995.
8) 田中：アドバンストファジィ制御—ファジィ制御の新たなる展開—，共立出版株式会社，1994.
9) 王，土谷：ファジィ軌道計画とそのロボットマニピュレータ経路制御への応用，日本ロボット学会誌，Vol.9, No.3, pp.304-310, 1991
10) 王，土谷，橋本：オンラインファジィ軌道計画に基づくロボットマニピュレータ経路追従制御，日本ファジィ学会誌，Vol.5, No.1, pp.1133-1142, 1993.
11) 王，中津山，高橋，橋本，神長，水沼：２重ファジィ制御器の構成，計測自動制御学会東北支部30周年記念学術講演会論文集，pp.49-50，1994，10.

連絡先

〒992　山形県　米沢市城南４丁目３番１６号
山形大学工学部電子情報工学科
王　碩玉
Tel：(0238)26-3312
Fax:：0238-24-2751
E-mail：wang@ea5.yz.yamagata-u.ac.jp

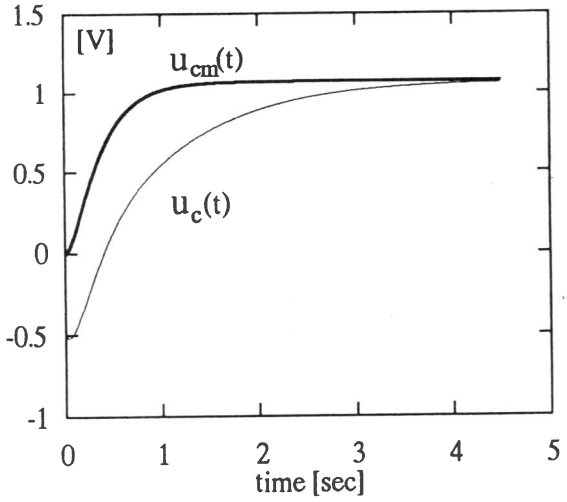


図. 2 (a) 参照電圧$u_{cm}(t)$と電圧応答$u_c(t)$

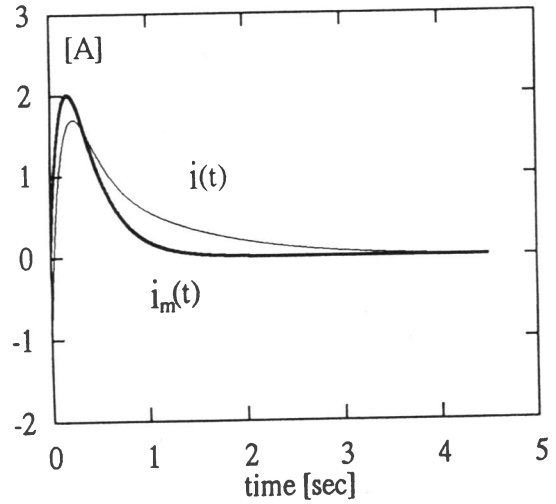


図. 2 (b) 電流$i_m(t)$ と実際の電流 i(t)

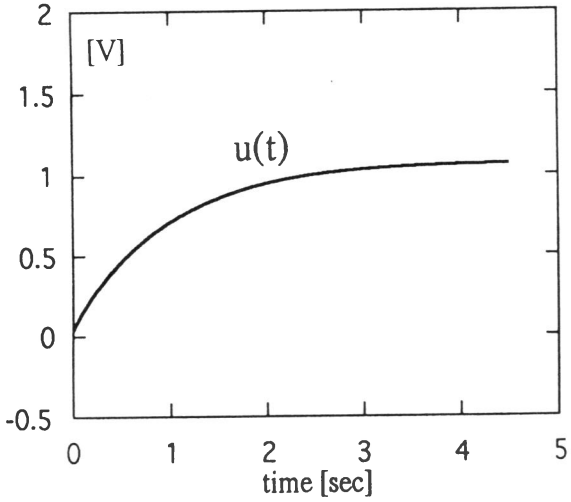


図. 2 (c) 制御入力電圧 u(t)

図. 2 MFCSによる制御結果

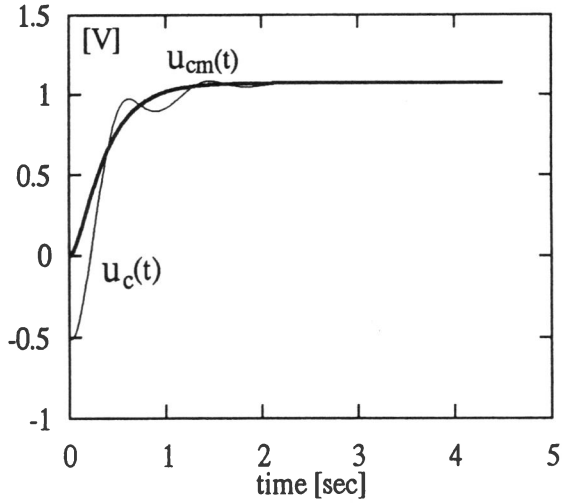


図. 3 (a) 参照電圧$u_{cm}(t)$と電圧応答$u_c(t)$

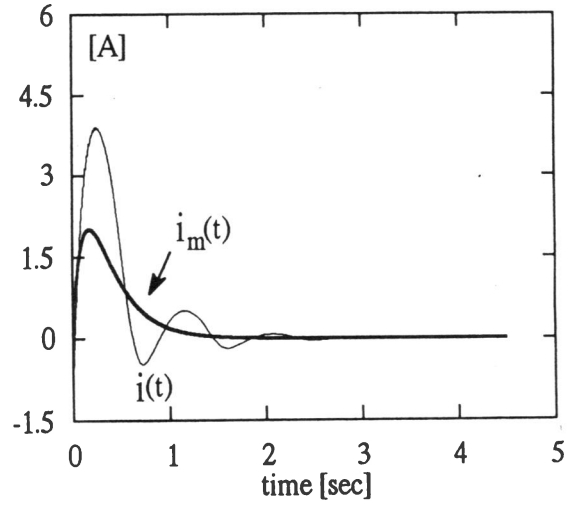


図. 3 (b) 電流$i_m(t)$ と実際の電流 i(t)

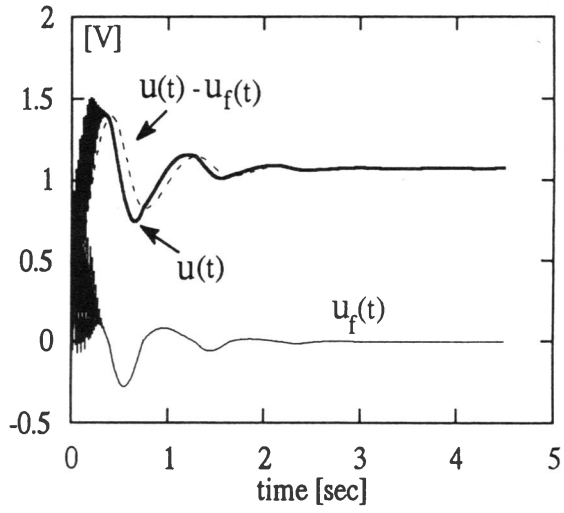


図. 3 (c) 制御入力電圧 u(t)

図. 3 MFCS +FRによる制御結果

TB2-2

$Lur'e$ の第1標準形で記述されるファジィ制御系の安定性解析

Stability Analysis of Fuzzy Logic Controller Described by Lur'e's Canonical Form

山川　烈　　内野　英治　　海老沼　拓史

Takeshi YAMAKAWA　　Eiji UCHINO　　Takushi EBINUMA

九州工業大学情報工学部

Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract- It is difficult in general to analyze the stability of fuzzy logic control systems because of their non-linearities. The stability of some classes of nonlinear control systems however can be discussed analytically by the Lyapunov's second method. The control system with a Lur'e's canonical form belongs to one of these classes. In this paper, a discussion is made on a sufficient condition of asymptotic stability in the large for a control system with a Lur'e's canonical form.

1 はじめに

ファジィ制御系は，非線形制御系であるため，安定性解析を数学的に取り扱うのは難しい．

一方，ある特定の微分方程式で記述された系の中には，すでに安定性が数学的に保証されているものがある．その一つに $Lur'e$ の第1標準形がある [1]．そこで本報告では，ファジィ制御系が $Lur'e$ の第1標準形で記述できる条件を求め，大域的漸近安定に関する十分条件を導出する．

2 ファジィ制御系の等価変換

次のようなファジィ制御系を考える．

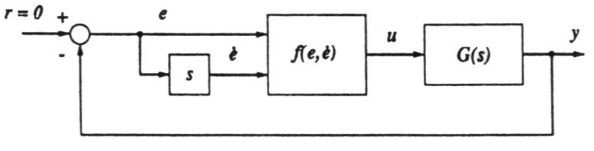


図1 ファジィ制御系

図1において，ファジィコントローラの非線形特性 $u = f(e, \dot{e})$ は，図2に示すように3次元空間に図示できる．

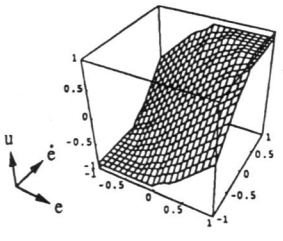


図2 コントローラの非線形特性の例

ここで，$g_1 e + g_2 \dot{e} = 0$ のとき $u = 0$ となる g_1, g_2 が存在すれば，図3に示すように，非線形特性 $f(e, \dot{e})$ を $e - \dot{e}$ 平面上の直線

$$\sigma = g_1 e + g_2 \dot{e} \tag{1}$$

に垂直な平面 P に投射することにより，σ と u の関係がある領域 R に拘束されることがわかる．このとき，コントローラの出力は，図4に示すように，この領域 R 内で非線形な時変関数

$$u = \xi(\sigma, t) \tag{2}$$

とみなすことができる．

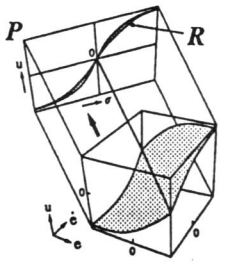


図3 非線形特性の投射

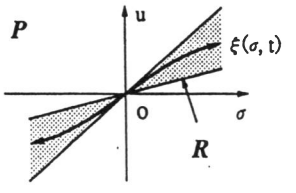
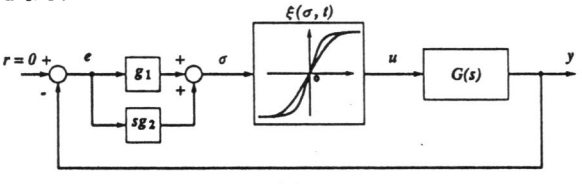
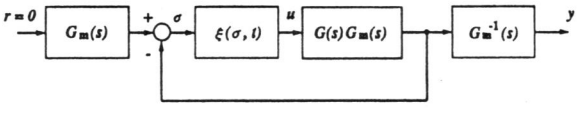


図4 時変関数 $\xi(\sigma, t)$

このとき，図1のファジィ制御系は図5(a)に等価変換することができる．さらに，加え合わせ点を移動させ整理すると，図5(b)となる．



(a)



(b)

図5 ファジィ制御系の等価変換

ここで，図5(b)の伝達関数 $G_m(s)$ は

$$G_m(s) = g_1 + s g_2 \tag{3}$$

で表される．

3 安定性の十分条件

図5(b)のフィードバック系は,伝達関数$G(s)G_m(s)$が厳密にプロパーであり,その極λ_iが互いに異なれば,次のような微分方程式で記述できることがわかっている.ただし,$x_1, x_2, \ldots, x_n$は状態量,δ_iは定数である.

$$\dot{x}_i = \lambda_i x_i + \xi(\sigma, t) \quad i = 1, 2, \ldots, n \tag{4}$$

$$\sigma = -\sum_{i=1}^{n} \delta_i x_i \tag{5}$$

さらに,式(5)を時間に関して微分し,式(4)を代入し整理すると,

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i - \gamma \xi(\sigma, t) \tag{6}$$

となる.ただし,β_i, γは

$$\beta_i = -\delta_i \lambda_i \quad \gamma = \sum_{i=1}^{n} \delta_i \quad i = 1, 2, \ldots, n \tag{7}$$

で表される定数である.

式(4),(5),(6)で記述される系を$Lur'e$の第1標準形と呼ぶ.第1標準形で記述される系の安定判別法は,多数報告されている[2].安定判別法は,安定方程式と安定条件から成る.安定方程式は,系の安定限界を与え,安定条件は,系の大域的漸近安定の十分条件を与える.以下は,その中の一つである.

第1標準形で記述される系が,次の安定条件

1. $Re(\lambda_i) < 0 \quad i = 1, 2, \ldots, n$
2. $\gamma \geq 0$
3. $\xi(0, t) = 0$
4. $\int_0^{\sigma} \xi(\sigma, t) d\sigma \geq 0 \quad \forall |\sigma > 0$
5. 安定方程式

$$2a_i \sum_{j=1}^{n} \frac{a_j}{\lambda_i + \lambda_j} = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \tag{8}$$

の解a_iは,λ_iが実数のときは実数,λ_iが複素数のときは複素数である.

を満足する場合,系は大域的漸近安定である.ここで,安定条件1,2および5は制御対象に関する条件であり,安定条件3,4はファジィコントローラの非線形性に関する条件である.

4 ファジィ制御系の安定解析

図5(b)に示す系において,例えば

$$G(s) = \frac{K}{(s+1)(s+2)} \quad , \quad G_m(s) = s + 3$$

の場合を具体的に考察する.

まず,$G(s)G_m(s)$を部分分数に分解することにより

$$\delta_1 = 2K \quad , \quad \delta_2 = -K \quad , \quad \lambda_1 = -1 \quad , \quad \lambda_2 = -2$$

を得る.λ_1とλ_2は負の実数であり,安定条件1を満足している.

また,式(7)より

$$\gamma = K$$

となる.Kは正の実数であるため,安定条件2を満足する.

次に,式(8)から安定方程式として

$$a_1{}^2 + \frac{2}{3} a_1 a_2 = 2K \tag{9}$$

$$\frac{2}{3} a_1 a_2 + \frac{1}{2} a_2{}^2 = \frac{1}{2} K \tag{10}$$

を得る.本系ではλ_1とλ_2は実数であるから,安定条件5を満足するためには,安定方程式(9),(10)の解a_1, a_2は実数でなければならない.根を求めると

$$a_1 = \pm 1.646\sqrt{K} \quad , \quad a_2 = \mp 0.646\sqrt{K}$$

$$a_1 = \pm 3.646\sqrt{K} \quad , \quad a_2 = \mp 4.646\sqrt{K}$$

を得る.したがって,$0 < K < \infty$であれば安定条件5を満足することがわかる.

また,安定条件3,4は,ファジィコントローラの入出力特性に依存する.例えば図6に示すような入出力特性す持つファジィ制御系の場合,安定条件3および4は容易に満足される.

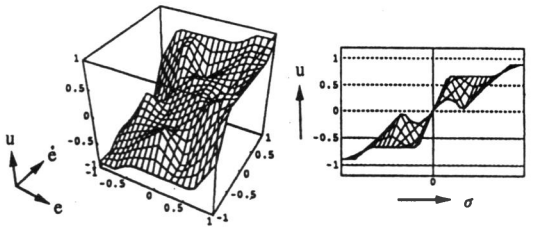


図6 非線形性の強いコントローラの特性

5 おわりに

本報告では,ファジィ制御系が$Lur'e$の第1標準形で記述できる場合に限定し,大域的漸近安定に関する十分条件を安定方程式と安定条件から導出した.

非線形制御対象への拡張が今後の研究課題である.

参考文献

[1] A.I.Lur'e: Some Nonlinear Problems in the Theory of Automatic Control, Her Majesty's Stationery Office, London (1957)

[2] J.E.Gibson (堀井武夫訳): 非線形自動制御, コロナ社 (1968)

[問い合わせ先]
〒820 福岡県飯塚市川津 680-4
九州工業大学情報工学部制御システム工学科
山川 烈
Phone: 0948-29-7712
Fax: 0948-29-7742
E-mail: yamakawa@ces.kyutech.ac.jp

TB2-3

ファジィシステムに基づく非線形制御のロバスト性と安定余裕

Robustness and Stability Margin of Nonlinear Control Based on Fuzzy System

川本俊治 Shunji Kawamoto　桑田晶彦 Akihiko Kuwata　兼高 巌 Iwao Kanetaka　滝野勝彦 Katsuhiko Takino　新原淳一 Jun-ichi Shinbara
石亀篤司 Atsushi Ishigame　谷口經雄 Tsuneo Taniguchi　＊田中裕幸 Hiroyuki Tanaka

大阪府立大学 工学部
College of Engineering, University of Osaka Prefecture
＊関西電力株式会社
The Kansai Electric Power Co., Inc.

Abstract - An approach for constructing a fuzzy system and finding a stability margin of robustness is proposed in the case that a nonlinear control system is given by a set of differential equations. As an example, a simple electric power model system is treated, and first the differential equations are rewritten into a fuzzy system without approximation. Next, the stability theorem is applied to it, and the common Lyapunov problem is solved by the P-region method. Finally, under the existence of a P-region, the bound of the system parameters is obtained, and the stability margin of robustness is quantitatively discussed.

1　はじめに

非線形システム[1][2]のロバスト性が盛んに研究されており、システムパラメータの不確かさを考慮できるロバスト制御の方法がいくつか提案されている。本稿では、図1に示すように、微分方程式で与えられる非線形制御システムのロバスト性と安定余裕の計算方法を報告する。まず非線形システムの制御入力も含めてシステム全体をファジィシステムに書き換えて安定定理を適用し、共通リアプノフ問題を導出する。そして連立不等式に共通な行列Pを、著者らが提案してきたP－領域計算法[3]で解く。P－領域が存在すればシステムの安定性が保証されるので、システムのパラメータが変動してもP－領域が存在するパラメータの範囲を求めることにより、システムのロバスト性と安定余裕を定量的に検討することができる。

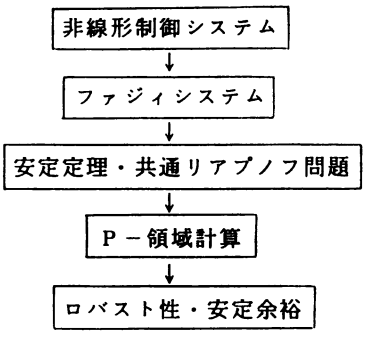


図1　提案手法の流れ

2　ファジィシステム構成

図2に非線形制御システムの例として、1機無限大母線電力モデル系統を示す。発電機には制御器としてＡＶＲ（自動電圧調整器）とＧＯＶ（調速機）が付けられており、Ｆ点での3相短絡故障を想定すると、故障回線除去後の動揺方程式は変数変換後次式で表せる。

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{1}$$

$$\dot{x}_2 = \{-Dx_2 + x_3 + P_{m0} - P_e(x_1, x_4)\}/M \tag{2}$$

$$\dot{x}_3 = -\{(K_g/\omega_0)x_2 + x_3\}T_g + u_g/T_g \tag{3}$$

$$\dot{x}_4 = \{-x_4 + x_5 + e_{fd0} - (x_d - x_d')i_d(x_1, x_4)\}T_{d0}' \tag{4}$$

$$\dot{x}_5 = -\{x_5 + K_a(V_t(x_1, x_4) - V_{t0})\}/T_a + u_a/T_a \tag{5}$$

ここで u_a と u_g はそれぞれＡＶＲとＧＯＶの補助制御入力である。ua に線形制御入力

$$u_a = -[f_4\ f_5][x_4\ x_5]^T \tag{6}$$

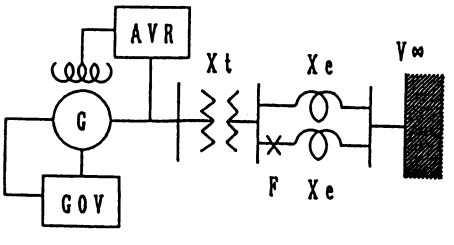


図2　1機無限大母線電力モデル系統

を加えると、ＡＶＲを表現する式(4)と(5)よりx_4およびx_5はそれぞれx_1の関数、すなわち $x_4=f(x_1)$, $x_5=g(x_1)$ であることに注意すると、式(2)において $P_e=P_e(x_1, x_4(x_1))=P_e(x_1)$ と書き直すことができる。したがって、式(4)と(5)の影響を式(2)のP_eで考慮することにより、システム全体の安定性は式(1)-(3)の安定性解析で検討することができる。u_gとしてファジィ制御入力

$$u_g=-\{w_1(x_1)F_1+w_2(x_1)F_2\}\mathbb{X}/\{w_1(x_1)+w_2(x_1)\} \qquad (7)$$

を加えると、式(1)-(3)はファジィシステム

$$\dot{\mathbb{X}}=\{w_1(x_1)A_1+w_2(x_1)A_2\}\mathbb{X}/\{w_1(x_1)+w_2(x_1)\} \qquad (8)$$

$$\mathbb{X}=[x_1\ x_2\ x_3]^T$$

$$w_i(x_1)=\pm\{P_e(x_1)-(k_1x_1+P_{m0})\}$$

$$F_i=[f_{i1}\ f_{i2}\ f_{i3}]$$

$$A_i=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -k_1/M & -D/M & 1/M \\ -f_{i1}/T_g & -(K_g/\omega_0+f_{i2})/T_g & -(1+f_{i3})/T_g \end{bmatrix} \qquad (9)$$

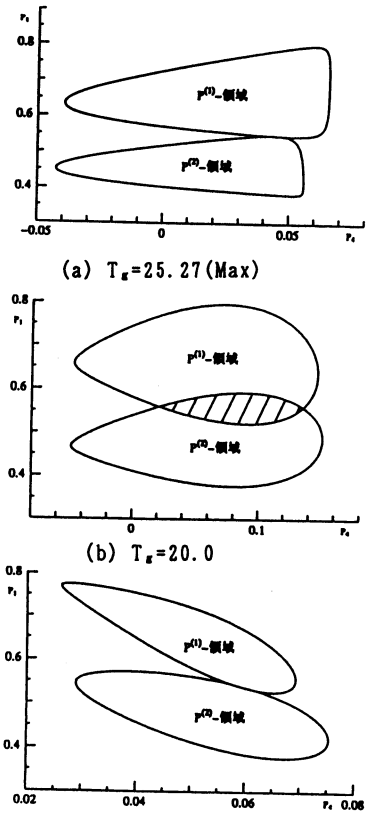
に書き直すことができる。

3　ロバスト性と安定余裕

ファジィ型リアプノフ関数[4] $V=\mathbb{X}^TP\mathbb{X}$ かつ $\dot{V}<0$ のためにはリアプノフ不等式 $A_i^TP+PA_i<0$, $(i=1,2)$ が成立しなければならない。そして不等式に共通な正定対称行列Ｐを求める共通リアプノフ問題に、著者らが提案してきたＰ－領域計算法を適用する。その計算において、Ｐ－領域が存在すれば非線形制御システム(1)-(5) の安定性が保証できる。したがって、システムのパラメータ、たとえばＧＯＶの時定数 T_g については、図３に示すように $0.0503\leqq T_g\leqq 25.27$ の範囲でＰ－領域が存在し、そのロバスト性と安定余裕を定量的に求めることができる。図４には、$u_g=0$ およびファジィ制御入力を加えた場合の安定余裕に対応する制御応答を示している。

4　おわりに

２種類の制御器を含む電力モデル系統を例題に、提案する手法によりシステムパラメータのロバスト性と安定余裕を具体的に計算した。多機電力モデル系統および他の非線形制御システムへの応用を現在すすめている。

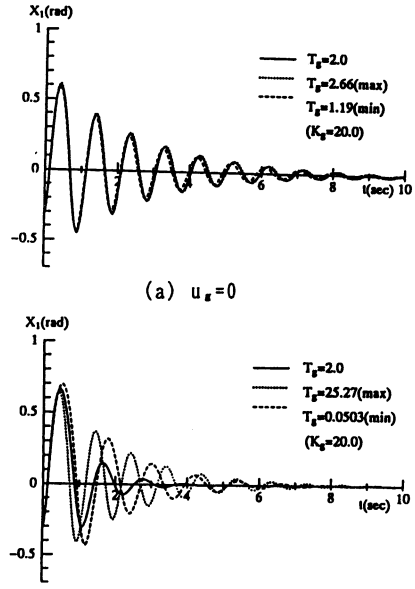


(a) $T_g=25.27$(Max)

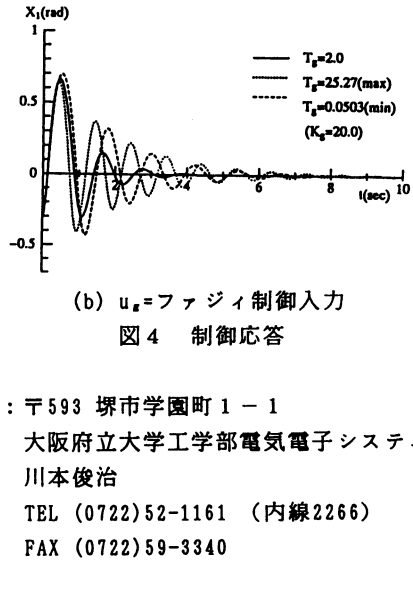
(b) $T_g=20.0$

(c) $T_g=0.0503$(Min)

図３　Ｐ－領域（斜線部）



(a) $u_g=0$



(b) u_g=ファジィ制御入力

図４　制御応答

参考文献

[1] 平井・池田：「非線形制御システムの解析」，オーム社，1986　[2] 石島　他：「非線形システム論」，計測自動制御学会，1993　[3] 川本　他：「田中－菅野のファジィシステム安定定理の拡張」，日本ファジィ学会，Vol.5, No.5, pp.1190-1199(1993)　[4] 川本　他：「ファジィ型リアプノフ関数による電力系統の安定領域評価」，電学論（Ｂ），７月号掲載予定

連絡先：〒593 堺市学園町１－１
大阪府立大学工学部電気電子システム工学科
川本俊治
TEL (0722)52-1161 （内線2266）
FAX (0722)59-3340

TB2-4

ファジィ制御の改善法（IX）
－ファジィシングルトン型推論法による状態依存型ファジィ制御－

IMPROVEMENT OF FUZZY CONTROLS (IX)
- State Dependent Fuzzy Controls by Fuzzy Singleton-type Reasoning Method -

水本雅晴
Masaharu MIZUMOTO

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

This paper proposes a state dependent fuzzy reasoning method which is realized by using weights, which change with input values, of fuzzy rules of a "fuzzy singleton-type reasoning method." The fuzzy reasoning method is applied to fuzzy controls in which fuzzy control rules are constrained with weights changing with input values, and good control results are obtained. Moreover, it is shown that fuzzy singleton-type reasoning method is equivalent to a simplified reasoning method by interpreting weights as fuzzy sets in the antecedent part of simplified reasoning method.

1．はじめに

ファジィ規則の後件部をファジィシングルトンにした、すなわち後件部を実数値にし、重みを付加した「ファジィシングルトン型推論法」（別名：重み付き簡略化推論法）[1]は、後件部の重みを変えることにより、ファジィ推論結果の微妙な調節が可能となる。この性質をファジィ制御に利用することにより、たとえば設定値付近での制御を微妙に調節することができ、制御結果の改善につながることが示された[1]。また、重みを時間的に変化させることにより「時間変動型ファジィ推論法」が提案でき[2]、時変型ファジィ制御への適用が可能となる。この場合、ファジィ規則だけでなくファジィ規則群の切り替えを行うことができ、動的なファジィ制御器の実現が可能となる。

本論文では、ファジィシングルトン型規則の後件部の重みを入力状態に応じて変化させることによる「状態依存型ファジィ推論法」を提案し、ファジィ制御に適用することにより、制御結果の改善が得られることを示す。

また、ファジィシングルトン型規則の重みを前件部のファジィ集合に掛けることにより、簡略型推論法の規則に変換できることから、「ファジィシングルトン型推論法は簡略化推論法と等価である」ことを示す。また、入力状態に応じて重みが変化する状態依存型ファジィ推論法において、その重みを前件部のファジィ集合とすることにより「ファジィ拘束型推論法」なる新しいファジィ推論法が提案できることを示す。

2．ファジィシングルトン型推論法

後件部がファジィ集合でなく実数値 zi であるようなファジィ推論形式に対するファジィ推論法が簡略化推論法であるが、実数値 zi に重み wi を付加した、すなわちファジィシングルトン wi/zi にしたファジィ推論形式

規則1: A_1 and B_1 => w_1/z_1
……
規則n: An and Bn => wn/zn (1)
事 実: x。and y。
結 論: z。

に対するファジィ推論法がファジィシングルトン型推論法（別名：重み付き簡略化推論法）である[1]。

重み wi は 0 以上の実数としている。wi>1 のときはファジィ規則 Ai and Bi => zi を「強調」することを表し、0≦wi<1 のときは「抑制」することを表す。明らかに、wi = 1 の場合は通常のファジィ規則になり、簡略化推論法に帰着される。

（注）重み wi をすべて 1 以下に規格化することが考えられるが、この場合、ある規則を 2 倍に強調したい場合には、その他の規則の重みをすべて 1/2 に変更しなければならないという不便さがある。

（注）重み wi を zi のグレードではなく、ファジィ規則自体の重みとみなすこともでき、この場合、wi はファジィ規則の“重視度”、“重要度”と解釈できる。

ファジィシングルトン型推論法による結論 z。は以下のようにして求められる。

事実「x。and y。」とファジィ規則の前件部「Ai and Bi」との適合度 hi は

$$hi = \mu_{Ai}(x_0) \cdot \mu_{Bi}(y_0) \tag{2}$$

と与えられる。最終的な結論 z。は、後件部 $z_1,\cdots,zn$ を、各適合度 $h_1,\cdots,hn$ に重み $w_1,\cdots,wn$ を掛けたもので荷重平均することにより得られる。

$$z_0 = \frac{h_1w_1z_1 + h_2w_2z_2 + \cdots + hnwnzn}{h_1w_1 + h_2w_2 + \cdots + hnwn} \tag{3}$$

3．状態依存型ファジィ推論

式(1)のファジィシングルトン型の規則の重み wi は定数としているが、重みが入力 x, y に応じて変化するような重み wi(x,y) である場合のファジィシングルトン型推法を考えてみよう。

規則1: A_1 and B_1 => $w_1(x,y)/z_1$
……
規則n: An and Bn => wn(x,y)/zn (4)
事 実: x。and y。
結 論: z。

結論 z。は次のように与えられる（図1参照）。

$$z_0 = \frac{h_1w_1(x_0,y_0)z_1 + \cdots + hnwn(x_0,y_0)zn}{h_1w_1(x_0,y_0) + \cdots + hnwn(x_0,y_0)} \tag{5}$$

【例】次のような簡単な1次元のファジィシングルトン型推論法を考えてみよう。この場合、入力値 x。に応じて変化する重み w(x。）がどのように推論結果 y。に影響を及ぼすかを議論する。

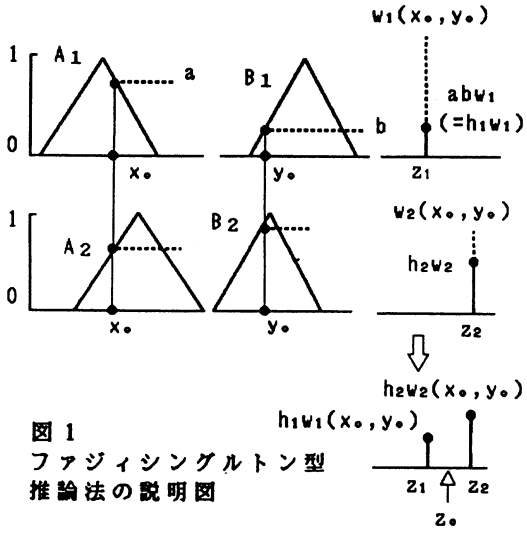


図 1
ファジィシングルトン型
推論法の説明図

規則 1 : $\underset{\sim}{x_1}$ => 1 /y_1
規則 2 : $\underset{\sim}{x_2}$ => w(x_0)/y_2 (6)
事 実: x_0
結 論: y_0

ここで、$\underset{\sim}{x_1}$ は「x_1ぐらい」を表す三角型のファジィ集合である（図 2 参照）。規則 1 は通常の規則 $\underset{\sim}{x_1}$ => y_1 であるが、規則 2 では、後件部 y_2 は入力 x_0 に依存した重み w(x_0) を有している。

推論結果 y_0 は、入力 x_0 でのグレードを a とすると、式(5)より

$$y_0 = \frac{ay_1 + (1-a)w(x_0)y_2}{a + (1-a)w(x_0)}, \quad a = \mu_{\underset{\sim}{x_1}}(x_0) \qquad (7)$$

と与えられる。

図 3、4 は種々の重みの下での推論結果がどのようになるかを示したものである。図 3 (a)は、x_2 付近で重みを変化させた場合であるが、重み w_1、w_2 は x_2 付近で大きく、したがって x_2 付近で規則 2 を強調することを表している。逆に w_4, …, w_7 は x_2 付近で抑制することを表している。まず、w_3 の場合、重みは常に 1 であることから、規則 2 は通常の規則 $\underset{\sim}{x_2}$ => y_2 になり、式(6)の推論法は簡略化推論法に帰着され、図 3 (b)のように線形の推論結果（点線部）が得られる。重み w_1 は、x_2 付近を強調するためのものであり、このことから規則 2 の働きが強くなり、特に、x_2 付近で推論結果 y_0 は y_2 に近い値を取っていることがわかる。一方、w_4 のように x_2 付近を抑制した場合では、x_2 付近で規則 2 $\underset{\sim}{x_2}$ => y_2 の働きが弱くなり、大きな（y_2 に近い）推論結果が得られないが、x_2 の真近くでは規則 1 $\underset{\sim}{x_1}$ => y_1 の働きも弱くなり、結局、推論結果は、急激に y_2 に近づいている。

一方、図 4 (a)の重みは x_1 付近の強調・抑制の効果を表したものである。重み w_1 は x_1 付近を強調したものであるが、規則 2 の影響が出て、x_1 付近で大きな推論結果が得られている（図 4 (b)）。

以上のように、重みの変化により推論結果が大きく変動することが確認できる。

次に、重みを入力状態により変化させた場合の、状態依存型のファジィ制御について述べてみよう。

4. ファジィ制御

対象とするプラントモデルは時間遅れを有する一次遅れの系で T dh/dt + h = u、具体的には、$G(s) = e^{-2s}/(1+20s)$ であるとする。

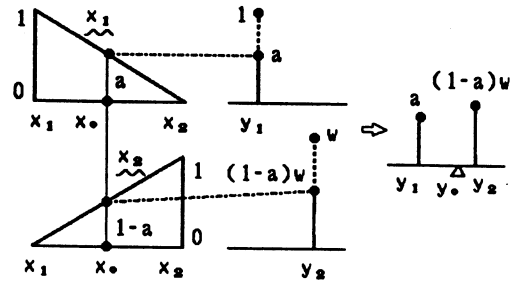
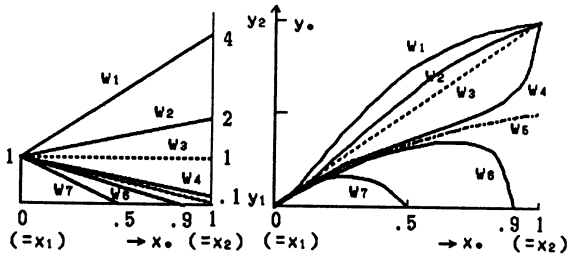
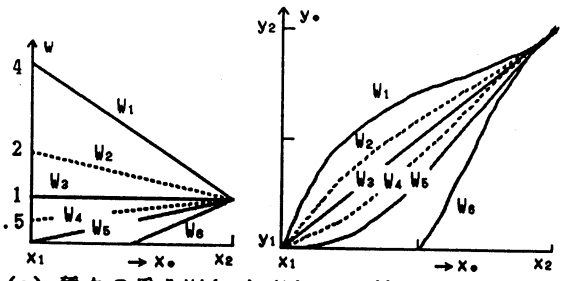


図 2 式(6)に対するシングルトン型推論



(a) 種々の重みwi(x_0) (b) x_0に対する推論結果y_0.
図 3 x_2 付近の重みを変化させた場合の推論結果



(a) 種々の重みWi(x_0) (b) x_0に対する推論結果y_0.
図 4 x_1 付近の重みを変化させた場合の推論結果

この一次遅れの系に対するファジィ制御規則は図 6 の表で示されたようなものである。この 25 個のファジィ制御規則は、e（偏差）と △e（偏差の変化分）より △u（操作量の変化分）を評価するものである。ただし、NB, …, PB は区間 [-6, 6] を 5 分割する三角型のファジィ集合である。なお、設定条件は以下のようである。

設定値 = 40、時間遅れ = 2
△e の倍率 = 1.2、△u = 2.5

設定値 40 付近での強調効果をねらうために

e is ZO and △e is ZO => △u is 0 (8)

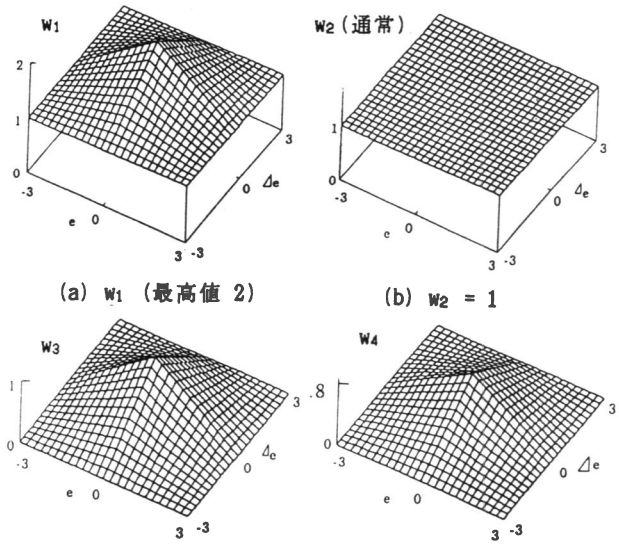
なるファジィ規則の後件部の値 0 に対して、入力 e, △e に依存した重み w(e, △e) を付加した

e is ZO and △e is ZO => △u is w(e, △e)/0 (9)

なるファジィシングルトン型の規則を考える。図 6 の表中、「0^w」はこのファジィ規則を表している。

設定値付近での強調効果の影響を見るために、式(9)のファジィ規則の重み w(e, △e) を変化させた場合の制御結果をみてみよう[4]。

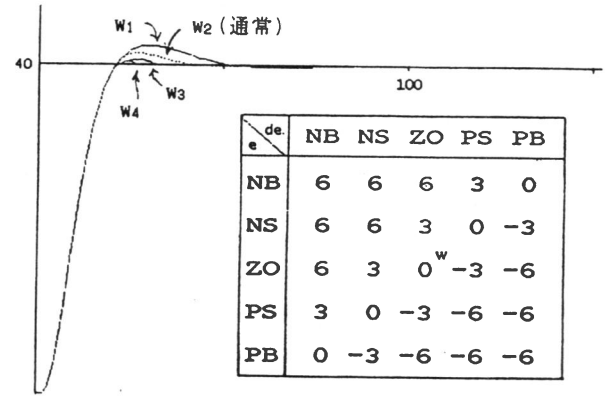
まず、設定値付近での強調効果を強くするために、重みの最高値を 2 にした図 5 (a)のような重み w_1 の場合、(e, △e) = (0, 0) 付近で △u を 0 にするように強調していく（すなわち、操作量 u を変化させないようにする）ことに相当しているため、図 6 に見られるように反応が鈍くなり、オーバシュートが大きくなっている。ただし、w_2 = 1 の場合は通常の場合である。



(a) w_1 (最高値 2)　(b) w_2 = 1

(c) w_3 (最高値 1)　(d) w_4 (最高値 0.8)

図 5 種々の重み wi(e,△e)



e \ de	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	6	6	6	3	0
NS	6	6	3	0	-3
ZO	6	3	0	-3	-6
PS	3	0	-3	-6	-6
PB	0	-3	-6	-6	-6

図 6 種々の重みの下での制御結果

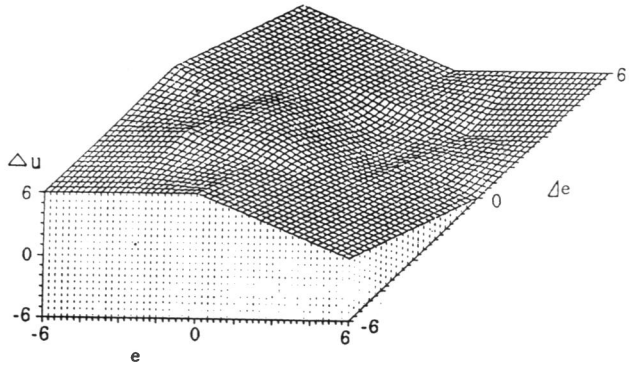


図 7 重み w_4 の場合の e,△e → △u の図示

一方、最高値を 1 とし、周囲を低くした重み w_3 の場合（図 5 (c)）、抑制効果が働いて、通常の場合よりも良い制御結果を得ている。さらに、最高値を 0.8 にした重み w_4 の場合、殆どオーバシュートがなく最良の結果を示している。

最良の制御結果を得ている重み w_4 の場合の e, △e に対する △u を図示すると図 7 のようになり、中央付近が線形（w_2 = 1 の場合）でなくわずかに変化していることがうなずける。

以上のことから、設定値付近での規則(9)は強調しすぎるとオーバシュートが大きくなり、適当に抑制を行えば良い制御結果が得られることがわかる。

5. ファジィシングルトン型推論法と簡略化推論法との等価性

ファジィシングルトン型推論法は、重みを調整することにより制御結果の改善が得られたり[1]、重みを時間的に変化させることにより、動的なファジィコントローラを実現できることが示された[2]。また今回のように、重みを入力状態に応じて変化させることにより、きめ細かい制御を行うことができる。

このようにファジィシングルトン型推論法は重みの採用により興味深い性質をもつことがわかるが、以下に、ファジィシングルトン型推論法は原理的には簡略化推論法と等価であることを示そう。

まず、準備として、式(1)の重み wi (i = 1,…,n) はすべて 1 以下に規格化できることを示そう。例えば、重み wi を、すべての重み w_1, w_2, …, wn の最大値または合計値で割ったものを新たな重み wi' とすれば、すなわち

$$wi' = wi / \max\{w_1, w_2, \cdots, wn\} \quad (10)$$

$$wi' = wi / (w_1 + w_2 + \cdots + wn) \quad (11)$$

のように規格化すれば、重みをすべて 1 以下に押さえることができる。この場合、式(3)の推論結果 z. と同じ結果が得られることは容易に確かめられるであろう。

このことから、以下では、すべて重み wi は 1 以下であるとして議論していく。

まず、式(1)のファジィシングルトン型規則

$$Ai \text{ and } Bi \Rightarrow wi/zi \quad (12)$$

は次の簡略型推論法の規則と等価であることが示せる。

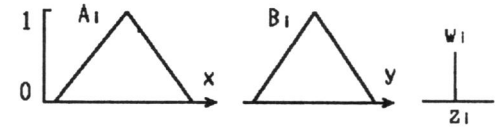
$$Ai' \text{ and } Bi \Rightarrow zi \quad (13)$$

ここで、ファジィ集合 Ai' は以下のようである（図 8）。

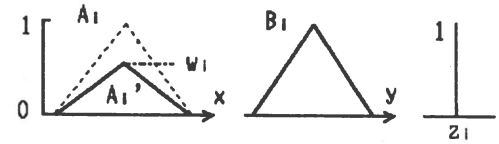
$$\mu_{Ai'}(x) = wi \cdot \mu_{Ai}(x) \quad (14)$$

このようにファジィ集合 Ai の高さを wi 倍すれば簡略化推論法の規則に還元されることがわかる。この場合、Ai ではなく、ファジィ集合 Bi を wi 倍してもよいし、wi = a·b となる a, b に対して、Ai、Bi の高さをそれぞれ a, b 倍してもよいことがわかる。

このようにファジィシングルトン型推論法の重み wi を前件部のファジィ集合に掛けてやることにより簡略化推論法に還元できることがわかり、「ファジィシングルトン型推論法は簡略化推論法と等価である」ことがいえる。



(a) ファジィシングルトン型規則



(b) 簡略化推論法の規則

図 8 等価なファジィ規則

ファジィシングルトン型推論法の重みを時間的に変動させる「時間変動型ファジィ推論」[2]におけるファジィ規則

$$Ai \text{ and } Bi \Rightarrow wi(t)/zi \qquad (15)$$

に対しては、時間的に変化する重み wi(t) を時間軸上のファジィ集合 Wi のメンバーシップ関数とみなせば、次の規則と等価であることがわかる。

$$Ai \text{ and } Bi \text{ and } Wi \Rightarrow zi \qquad (16)$$

ここで、時間軸 t 上のファジィ集合 Wi は

$$\mu_{Wi}(t) = wi(t) \qquad (17)$$

と定義される。したがって、前件部の適合度 hi' は

$$hi' = \mu_{Ai}(x_0) \cdot \mu_{Bi}(y_0) \cdot \mu_{Wi}(t) \qquad (18)$$

となる。

最後に、入力状態 x, y によって重みが変化する今回の状態依存型ファジィ推論法の場合では、ファジィ規則

$$Ai \text{ and } Bi \Rightarrow wi(x,y)/zi \qquad (19)$$

は

$$x \text{ is } Ai \text{ and } y \text{ is } Bi \Rightarrow z \text{ is } wi(x,y)/zi \qquad (20)$$

のように書き換えられることに注意すれば、等価な規則は次のようになる。

$$x \text{ is } Ai \text{ and } y \text{ is } Bi \text{ and } (x,y) \text{ is } Wi \Rightarrow z \text{ is } zi \qquad (21)$$

これを簡単に書くと次のようになる。

$$Ai \text{ and } Bi \text{ and } Wi \Rightarrow zi \qquad (22)$$

ここで、Wi は直積空間 X x Y 上のファジィ集合であり

$$\mu_{Wi}(x,y) = wi(x,y) \qquad (23)$$

のように与えられる。

式(22)のファジィ規則においては、それぞれ X, Y 上のファジィ集合 Ai, Bi の直積 Ai and Bi を Wi が"ファジィ拘束"(fuzzy constraint)する働きをもつことから、式(22)の形式のファジィ推論を「ファジィ拘束型推論法」と名付けることができる（図９参照）。

この場合、入力 x_0, y_0 が与えられたときの前件部の適合度 hi' は次のように与えられる。

$$hi' = \mu_{Ai}(x_0) \cdot \mu_{Bi}(y_0) \cdot \mu_{Wi}(x_0, y_0) \qquad (24)$$

以上のように、ファジィシングルトン型規則の重みを前件部に移行させることによって簡略型規則に還元できることができ、したがってファジィシングルトン型推論法は簡略化推論法と等価であることがわかる。

また、ファジィシングルトン型推論法は代数積-加算-重心法と等価であることが知られていることから[3]、

代数積-加算-重心法
＝ ファジィシングルトン型推論法
＝ 簡略化推論法

となり、３つのファジィ推論法は等価であることがわかる。

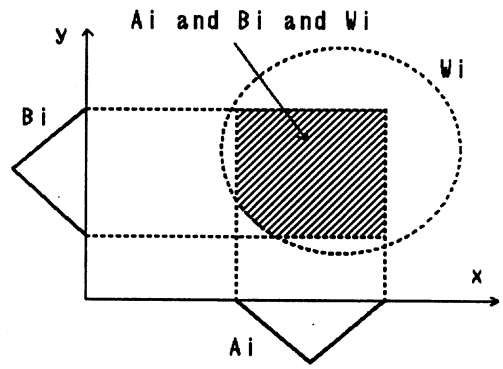


図９ ファジィ拘束型推論法の原理

６．むすび

ファジィシングルトン型推論法の重みが入力状態に依存するような状態依存型のファジィ推論法を提案し、ファジィ制御に適用した結果、重みを偏差と偏差の変化分に応じて変化させることにより、きめ細かい制御が行うことができ、制御結果の改善に結びつくことが示された。

ファジィシングルトン型推論法の重みを前件部に吸収させることにより、簡略化推論法に還元できることを示したが、この場合、簡略化推論法では前件部のファジィ集合の高さで推論結果の調節を間接的に行わなければならず不便さが残るが、ファジィシングルトン型推論法の場合では後件部の重みで、直接、推論結果の微妙な調節を行うことができ、使い易い方法といえるであろう。

参考文献

1. 水本、ファジィ制御の改善法（VI）－ファジィシングルトン型推論法による場合－、第８回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、529-532、1992.
2. 水本、ファジィ制御の改善法（VII）－ファジィシングルトン型推論法による時間変動型ファジィ制御－、第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、445-448、1994.
3. 水本、ファジィ制御の改善法（VII）－ファジィシングルトン型推論法と代数積-加算-重心法の等価性－、第９回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、529-532、1993.
4. 山本雅之、ファジィシングルトン型推論法による状態依存型ファジィ制御、大阪電気通信大学卒業論文、1995.

問い合わせ先：〒572 寝屋川市初町18-8
大阪電気通信大学 情報工学部 情報工学科
水 本 雅 晴
Tel: 0720-24-1131 内 2361
Fax: 0720-24-0014
E-mail: mizumoto@mzlab.osakac.ac.jp

TB3-1

多入力ファジィ推論における前件部適合度へのハイブリッド演算の提案

A Proposal of Hybrid Operation for Antecedent Matching Degree in Multi-Input Fuzzy Reasoning

有川 晴彦
Haruhiko ARIKAWA
アーク・テクノリサーチ株式会社
Ark Techno-Research Inc.

水本 雅晴
Masaharu MIZUMOTO
大阪電気通信大学
Osaka Electro-Com. Univ.

Abstract － As conventional operations to calculate antecedent matching degrees, operations such as MIN, Algebraic Product, Arithmetical Mean and Geometrical Mean are commonly used, while each of them has several problems discussed in this paper. In order to solve the problems, this paper proposes a new method of Hybrid operation which is a combination of merits of the conventional operations. The method is effective especially in the case of multi-input fuzzy reasoning.

§1. はじめに

ファジィ推論の前件部が複数項目で構成される場合において、全体的な前件部適合度を算出することは、ルールの発火度を算出することと同義であり、推論結果を直接に左右する重要な要素である。従来から採用されている前件部適合度の演算方法として、ｍｉｎ演算、代数積演算、算術平均演算、幾何平均演算、その他があるが、各々に長所および欠点がある。本論文は、各々の演算方法の長所を組み合わせた、ハイブリッド演算による前件部適合度の算出方法を提案する。この方法は、特にファジィ推論の前件部が多入力である程、効果的である。

§2. 従来の演算方法による前件部適合度の算出とハイブリッド演算による前件部適合度の算出

前件部適合度を算出するための従来の演算方法として、以下の①～④に示す方法がある。

ただし簡単のため、３入力のファジィ推論での式を示す。

また、a1～a3は前件部各項目のメンバーシップ関数と入力（制御の場合はセンサーからの観測値）から得られる各項目ごとの適合度であり、Amは求める全体の前件部適合度である。

① ｍｉｎ演算

$$Am = a1 \wedge a2 \wedge a3 \quad (1)$$

② 代数積演算

$$Am = a1 \cdot a2 \cdot a3 \quad (2)$$

③ 算術平均演算

$$Am = (a1+a2+a3)/3 \quad (3)$$

④ 幾何平均演算

$$Am = (a1 \cdot a2 \cdot a3)^{1/3} \quad (4)$$

上に示した演算方法以外にも多くの方法があるが、後述する諸問題を同様に有しているうえ、採用度も低いので、紙面の都合上議論を省略する。

前件部適合度を算出する従来の演算方法には、後述する諸問題がある。その問題を解決するため、本論文ではハイブリッド演算による前件部適合度の算出方法を提案し、⑤に示す。

⑤ 新提案のハイブリッド演算

$$Am = (a1 \wedge a2 \wedge a3) \cdot (a1+a2+a3)/3 \quad (5)$$

つまり、従来の①と③の演算を並列に行い、最後に②の代数積演算を（１回だけ）行なうという演算方法である。

§3. 従来の演算方法の諸問題と新提案のハイブリッド演算方法の効果

従来の①～④の演算方法の諸問題点を以下に議論し、新提案のハイブリッド演算方法⑤と比較し、その効果を示す。

３．１ 単調増加性（線形性）について

ｍｉｎ演算①を用いた式(1) において、例えばa1 が最小値とすれば、a2 およびa3 が a2,a3≧a1 の範囲でどのような値をとろうと、Amは変化しないという問題点[1] がある。これは多入力になる程、たった１つの最小値以外は全く無視される不合理が問題となってくる。このような非単調増加性は“期待しない非線形性”を有する推論結果を招き、特に推論出力を次の推論の入力として用いるようなカスケード推論を多重に行なう場合は、この“期待しない非線形性”が加速度的に倍加されていく。

図１に、①～⑤の各演算による前件部適合度の算出例を示す。ただし説明の簡単のためａおよびｂの２入力とし、ｂ＝０．５の例[2] で図示する。

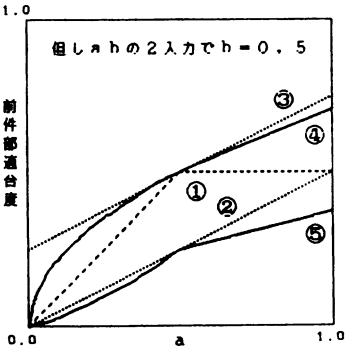


図１．各演算方法による前件部適合度の算出例

この図より明らかなように、代数積演算②や算術平均演算③は完全な線形性を示し、このような問題は生じない。

幾何平均演算④は、完全に線形ではないが、単調増加性を示している。しかしゼロ付近から急激に値が大きくなるので、かなり敏感な推論結果となり、制御では目標値付近での安定性に欠ける傾向が、筆者らのシミュレーションで確認されている。

ハイブリッド演算⑤のグラフは、０．５≦ａ≦１．０では完全に線形で、０．０≦ａ≦０．５では２次曲線となるが、いずれも単調増加性を有している。

３．２ 前件部適合度のデータ長（分解能）と整合性について

代数積演算②を用いた式(2) において、例えばa1～a3に各々２５６の分解能を与えると、Am算出には２５６の３乗の分解能が必要となる。つまり代数積の性質上、多入力になる程、Amの分解能を表現するためのデータ長が指数関数的に増加する。例えば８入力ともなれば、２５６の８乗つまり１６×１０の１８乗もの天文学的数字となる。そこで実際は適当なデータ長に丸めながら計算を進めざるをえない。換言して浮動小数点による計算でいえば、Amの値が極端に小さくなる傾向が生じる。

さらに、後件部を同じくするファジィ推論で、複数のルールの前件部の項目数が異なる場合について、代数積演算では各ルールの前件部適合度のデータ長が異なってくるため、整合性がとれな

くなる問題が生ずる。

幾何平均演算④は、式(4) のように括弧内部に代数積が入っているが、最初から括弧内部を求めるようにせず、浮動小数点計算でa1の３乗根を求め、次にa2の３乗根と代数積をとる、というように計算を進めていけば、値が極端に小さくなるという問題を回避しながら計算できる。しかし代数積を多重に行なうことは避けられないため、やはり厳密にいえば、Amの分解能を表現するためのデータ長が指数関数的に増加することになる。

またｍｉｎ演算①、算術平均演算③は、演算の性質上、データ長が増加したり不整合が生じることは無い。ハイブリッド演算⑤では、①と③の演算を並列に行い、多入力でも項目数に関係なく１回の代数積を行なうだけであるから、データ長も２倍になるだけで、整合性もとれ、これらの問題は生じない。

もっとも前件部の項目数が異なる場合でも、各ルールの存在しない項目を、適合度が常に１をとる暗黙の項目と考えれば、項目数を等しく揃えることができる。すると整合性の問題はもともと存在しないことになるが、その場合でも、例えば代数積演算におけるAmが極端に小さくなる傾向は解決できない。

一方、a1＝a2＝a3＝０．１ のとき、Ａｍ＝０．１となる演算方法は①③④であるが、いくら０．１を重ねても０．１であるのは不適当であるとの考え方もあるであろう。この場合ハイブリッド演算では０．０１となるが、詳細の議論は別の機会に譲る。

３．３　発火ルールへの影響について

算術平均演算③を用いた式(3) において、例えばａ1＝０ であるが、ａ2，ａ3＞０の場合、Ａｍ＞０となり、そのルールは発火状態となる。つまり１つの項目の適合度がゼロであっても全体の前件部適合度の演算結果はゼロとならないので、全体としてかなり広範囲のルールが発火することになる。これは一見、より多くのルールを考慮することで、より良い推論結果を得られそうにも考えられるが、実際は次のような諸問題があり、総体的にあまり良い推論結果が得られない場合が多い。まず広範囲のルールが発火するため全体のゲインが低下する。これはゲインを上げることで解決するが、次の問題は避けがたい。例えば、表１の網掛けで示すようなオーバーシュートを低減するための“局所的な非線形ルール”など、ある場面では発火して欲しくないルールまでもが期待に反して発火するため、目標到達時間が長くなったり、目標値付近で定常偏差が残ったりする傾向が生じる。

表１．　局所的に非線形なルール例（網掛部分）

入力 e	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZR
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZR	NS
入 NS	PB	PB	PM	PS	PB	NS	NM
力 ZR	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
de PS	PM	PS	NB	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZR	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZR	NS	NM	NB	NB	NB	NB

またより多くのルールが発火するため、より多くの計算時間を要することにもなる。

ｍｉｎ演算①、代数積演算②、幾何平均演算④およびハイブリッド演算⑤では、１つの項目がゼロであれば演算結果はゼロとなるので、発火ルール数ができるだけ必要最小限に抑えられ、このような問題は生じない。

３．４　演算処理時間について

幾何平均演算④を用いた式(4) において、前述したように浮動小数点計算を行なうにしても、３乗根計算や代数積計算を処理するので、①～⑤の演算方法の中では最も多くの処理時間を要する。ハードウェアで処理するにしても回路が最も複雑化する。

代数積演算②では、やはり乗算器を用いるので、その次に処理時間を要する。

算術平均演算③では、単純な加算と１度だけの割り算（しかも除数が整数なのでビットシフトで処理可能）であるから、処理時間は短い。

ｍｉｎ演算①では、比較器を用いるだけであるから、①～⑤の中で最も処理時間が短い。

ハイブリッド演算⑤では、①と③の演算と、入力項目数に関係なく１回の代数積を行なうだけであるから、①と③の次に演算時間が短い。しかもハードウェアで①と③を並列処理すれば、倍近くの高速化が可能である。

３．５　シミュレーション

１次遅れ系の液面制御シミュレーションを行ない、各演算方法を比較したところ、新提案のハイブリッド演算方法により、良い制御結果が得られたので、その一例を図２に示す。ただし、制御ルールは表１のものを使用した。

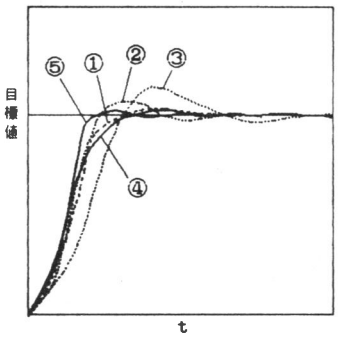


図２．各演算方法による液面制御シミュレーションの比較例

§４．　おわりに

前件部適合度を求める従来演算方法として、ｍｉｎ演算、代数積演算、算術平均演算、幾何平均演算の諸問題を議論し、それらの問題に完全ではないが、実用的な範囲で総合的な解決を与えるハイブリッド演算による前件部適合度の算出方法を提案した。

今後の発展として、[3]～[7]の研究にハイブリッド演算を適用した、総合的な多入力ファジィ推論の研究およびその回路設計を検討したい。

参考文献

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

[2] 水本雅晴：　ファジィ工学入門講座－３，メインテナンス誌 No.122，pp.68-71，1990.7

[3] 有川晴彦・水本雅晴：　多入力ファジィ推論のためのアドレスルックアップ方式，第８回ファジィシステムシンポジウム予稿集，pp.469-472，Hiroshima 1992

[4] 有川晴彦・水本雅晴：　高速多入力ファジィ推論の実現，第９回ファジィシステムシンポジウム予稿集，pp.773-776，Sapporo 1993

[5] 有川晴彦・水本雅晴：　概略線形推論と局所非線形推論とのベクトル合成によるファジィルール数の低減法とファジィＰＩＤハイブリッド制御，第１０回ファジィシステムシンポジウム予稿集，pp.437-438，Osaka 1994

[6] 水本雅晴・仲田明紀・有川晴彦：　多入力ファジィシングルトン型推論法に対する回路設計，第１０回ファジィシステムシンポジウム予稿集，pp.67-70，Osaka 1994

[7] 仲田明紀・水本雅晴・有川晴彦：　概略推論と局所推論との合成型ファジィ推論の回路設計，第１１回ファジィシステムシンポジウム予稿集掲載予定，Okinawa 1995

問い合わせ先：〒600 京都市下京区中堂寺南町１７番地
㈱京都高度技術研究所ラボ２１内
アーク・テクノリサーチ株式会社
有川　晴彦
TEL:(075)322-1121　FAX:(075)315-9121

TB3-2

階層型ファジィ制御方式の学習機構の提案と評価

A Proposal of Learning Mechanism for Hierarchical Fuzzy Control

トムソン　シリンゴリンゴ
Thomson　Siringoringo

筑波大学　理工学研究科
Master Prog. in Sciences and Engineering,
University of Tsukuba

安信誠二
Seiji　Yasunobu

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

Abstract - The proportional - integral - differential (PID) controller is one of the most common servo-controllers in industrial practice. However, tuning of the PID coefficient to achieve a desired servo-mechanism and implementing a flexible control is difficult. In this paper we design a fuzzy logic based hierarchical control method with a learning mechanism that achieves flexible performance and automatic rules adjusting. Fuzzy reasoning is used as a controller determiners during the operation. In order to make the plant response satisfy the design specification we tune the controller determiners rules automatically using a real-time automatic rule tuning mechanism. Computer simulations on 3 linear stable plants illustrate the validity of our approach.

1　はじめに

化学プラント，石油精製所などでは計算機を用いたプロセス制御が積極的に適用されている．このプロセス制御では気圧，水温，流量のような制御量を自動調整するため，PID制御方式が依然として幅広く使われている．PID制御方式では，コントローラのパラメータ（比例・積分・微分）の調整法については，限界感度法，Ziegler-Nicholsの調整法[1]など数多く報告されているが，実際の現場では熟練オペレータの経験による調整が一般的である．またPID制御方式は基本的に1変数形のフィードバック制御であるため，コントローラの自由度も低く，柔軟な制御の実現が難しい．

このPID制御方式の柔軟性問題の解決案として，我々は，従来のPID制御方式とファジィ推論を統合化した制御方式[2,3]を提案した．提案した方式では，オペレータがプラントを運転しているときに用いている制御戦略をファジィ推論を用いて，コンピュータで実現する．この制御方式を用いることにより，運転中にシステムの状態に応じて，特性の違うコントローラがファジィ推論を用いて切り換えられ柔軟な制御が実現できた．しかし，提案方式に基づいて制御系を設計する際，立上り時間，オーバシュートなどの設計仕様が与えられるときに，それらを満足させるために制御量の応答波形をみながら推論ルールを試行錯誤で調整する必要があった．

本論文では，従来のPID制御方式における問題点，すなわちコントローラのパラメータ設定問題および柔軟性問題に対して，ルール自動調整アルゴリズムを含んだコントローラ切り換え制御方式を提案する．この制御方式では，運転中にシステムの状態に応じて，特性の異なるコントローラがファジィ推論によって，切り換えられる．更に，プラントの応答波形が，与えられた設計仕様を満足するように，コントローラの切り換えルールに対してリアルタイムな自動調整を行う．ここで構成した自動調整アルゴリズムは，従来，人間が行っている調整法を言語的なルール群で記述しており，ファジィ推論を用いてコンピュータで実行される．提案した制御方式を次数の異なる伝達モデルをもつ3つのプラントに適用し，提案方式の有効性を数値シミュレーション実験で確認する．

2　ファジィ設計仕様による学習機構を含んだ制御方式

PID制御方式に基づき，プロセス制御系を設計している際に生じたコントローラの柔軟性問題に対して我々は階層型ファジィ制御方式を提案した[3]．しかし提案した方式において，ファジィ推論を制御系に組み込む場合，どのようなタイミングでどのようなコントローラを設定すればプラントの応答が望ましい応答になるかを熟知した設計者の知識やノウハウにより，コントローラ決定ルールの後件部を調整する必要がある．

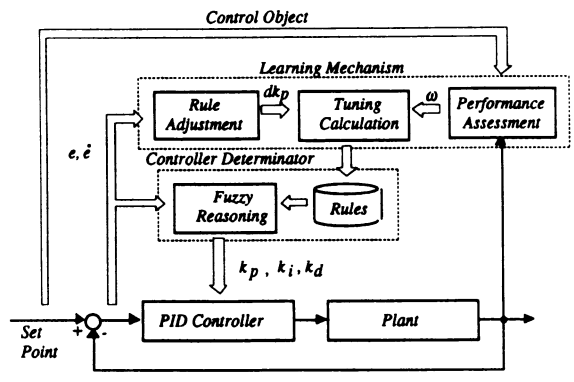


Fig.1 System Configuration

この問題点の解決案として学習機構の付加が重要である．つまりプラントに対して予め定めた設計仕様を満足させることができるルール自己調整アルゴリズムが必要となる．ここで提案した制御系の構成をFig.1に示した．従来の(1)PIDコントローラ部に加えて更に２つの部分，(2)コントローラ決定部と(3)ファジィ学習機構部を設けた．

Fig.1に示された各部分の機能は，次ぎの通りである．

（１）PIDコントローラ部

単純な1入力1出力PIDコントローラであり，目標値と観測量との差に対して比例・積分・微分の操作が行われる．実際の制御則を次式に示す．

$$u(t) = k_p(e + k_i\int e\,dt + k_d\frac{de}{dt})$$

u(t) は時間 t における制御入力，e は目標値と観測量との差，kp, ki, kd はそれぞれ比例・積分・微分の操作パラメータを示す．

（２）コントローラ決定部

運転中にコントローラの特性を決定する働きをもち，ファジィ推論により構成される．ここで行われるコントローラ決定は状態評価ファジィ推論が用いられ，ルール部に記述された言語的ルール群が実行される．この部分の入力情報は目標値と観測値の差e ，そしてその一回微分de/dtとする．入力情報に基づき，現在どのパラメータを用いるかの決定が，ファジィ推論で行われる．決定されたパラメータはPIDコントローラ部に送られる．

ここでは簡略ファジィ推論を用い，前件部メンバーシップ関数は各入力領域を7等分割した一様な三角形メンバシップ関数である．ファジィ分割した位相面に基づき，切り換えルールを構成すると，以下に示す49個のルールを記述することになる．

R_1 : if e is F_{11} and de/dt is F_{12} then $k_p = K_{p1}$ $k_i = K_{i1}$ $k_d = K_{d1}$

R_2 : if e is F_{21} and de/dt is F_{22} then $k_p = K_{p2}$ $k_i = K_{i2}$ $k_d = K_{d2}$

...

R_{49} : if e is F_{491} and de/dt is F_{492} then $k_p = K_{p49}$ $k_i = K_{i49}$ $k_d = K_{d49}$

（３）ファジィ学習機構部

制御結果を監視し，制御目的が満足されていなければ適切な対策を取る部分である．

従来，コントローラ決定部に含まれているルールの調整は，実機の試験運転やモデルのシミュレーションにより行われた．ルール調整を行う際，設計者は経験的知識やノウハウによって応答波形の特徴量をとらえ，コントローラのパラメータ推論ルールを決定する．ここで設計者の経験則を，

経験則１：「立上りが遅いなら，位相面上の領域1（e が正かつ de/dt がゼロ）の比例ゲイン（kp）を上げる．」

経験則２：「オーバシュートが大きいなら，位相面上の領域2（e がゼロかつ de/dt が負）の比例ゲイン（kp）を下げる．」

経験則３：「目標値から大きく行き過ぎるなら，位相面上の領域3（e が負かつ de/dt がゼロ）の比例ゲイン（kp）を上げる．」

経験則４：「アンダーシュートが大きいなら，位相面上の領域4（e がゼロかつ de/dt が正）の比例ゲイン（kp）を下げる．」

経験則５：「応答が落ち着いたなら，位相面上の領域5（e がゼロかつ de/dt がゼロ）の比例ゲイン(kp)を変化させない．」

のように記述できる．

ここでは従来，人間が行なっていた調整手順をアルゴリズム化し，人間に代わってコンピュータによるルール自動調整機構を構築する．この調整機構では人間の経験知識やノウハウをコンピュータ上で実現する手段が必要となるため，ここではファジィ推論を適用した．

ファジィ学習機構部はFig.1に示したように３つの部分からなり，各々(a) 制御性能評価部，(b) ルール調整部と(c) ルール修正計算部である．この３つの部分をまとめ，ファジィ設計仕様に基づく切り換えルール調整部と呼ぶ．この切り換えルール調整部に含まれる各々の部分の機能は以下の通りである．

(a) 制御性能評価部

この部分は制御結果を評価し，評価結果に応じて適切な操作を行う部分である．この部分の実際の仕様をFig.2に示す．設計仕様（立上り時間，オーバシュート，定常偏差）の条件によってファジィ化された目標軌跡が定められている．ここではファジィ化された目標軌跡に対して現在のプラント軌跡 yt が設計仕様を満足しているかを評価する．評価結果は重み w と修正係数 Gkp j である．プラント軌跡 yt を評価するファジィ集合と修正係数は時刻 Tr, To によって異なっており，それぞれFig.3に示される．

(b) ルール調整部

ここでは調整アルゴリズムをファジィ推論によって実現した．例えば修正係数 Gkp j が正値を取るときFig.4に図示されるような調整アルゴリズムを構成できる．

eとde/dt の状態に応じてコントローラの比例操作パラメータの変化分 dkp がファジィ推論によって切り換えられる（Fig.4）．現在の状態が領域R1にあるとすると，kpが増加され，より速応性の早いコントローラとなる．これによって目標値に早く到達できる．逆に状態が領域R2に入ると，kpが減少され，より減衰性の良いコントローラとなり，オーバシュートや振動性が抑制できる．

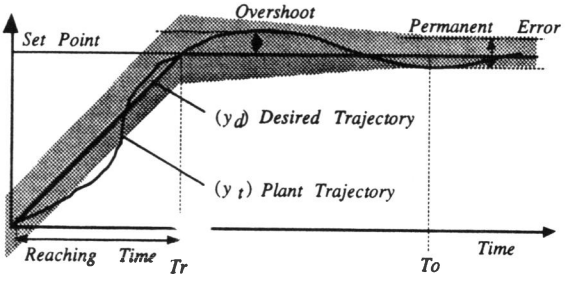


Fig.2 Fuzzyfied Desired Trajectory

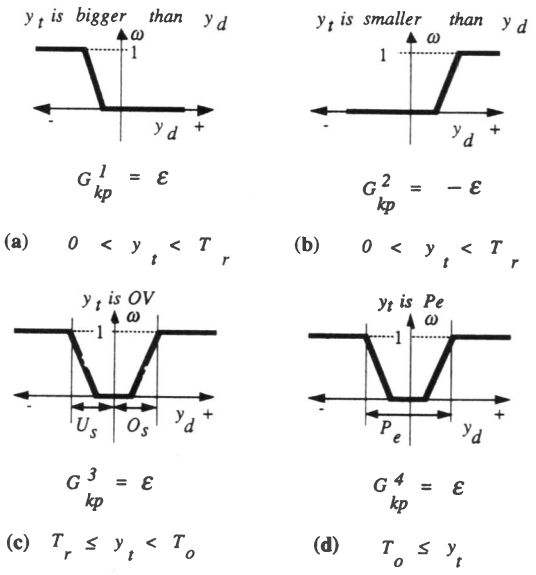


Fig.3 Membership of Desired Trajectory and Tuning

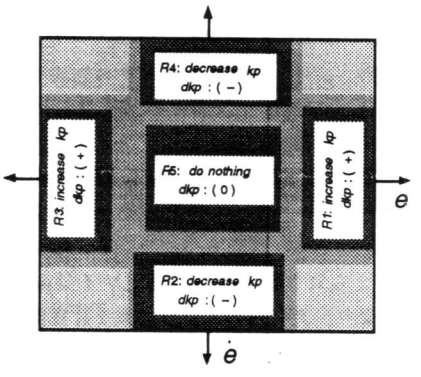


Fig.4 Illustration of Controller Gain Adjustment

Fig.4に基づき，調整ルールを記述すると，次ぎに示すようなファジィルールを構成できる．

R1:ifeisPositiveandde/dtisZerothenIncreasekp(dkpisPositive)

R2:ifeisZeroandde/dtisNegativethenDecreasekp(dkpisNegative)

R3:ifeisPositiveandde/dtisZerothenIncreasekp(dkpisPositive)

R4:ifeisZeroandde/dtisPositivethenDecreasekp(dkpisNegative)

R5:ifeisZeroandde/dtisZerothenDoNothing(dkpisZero)

ここでは簡略ファジィ推論法を用い，ルールの後件部はシングルトンの集合である．

(c)ルール修正計算部

この部分はコントローラ決定部と直接つながっており，コントローラ決定ルールを修正する部分に当たる．コントローラ決定部に含まれるk番目のルールの修正計算は次式を用いる．

$$kp_t^k = kp_{(t-\Delta)}^k + \sum_{j=1}^{4} G_{kp}^j \times \mu k \times \omega \times dkp$$

ただし，wとGkp jは制御性能評価部からの情報であり，それぞれ重みと修正係数である．dkpはルール調整部からのパラメータ修正量である．kp_t^kは更新された比例ゲイン，kp(t-Δ)kは過去Δ時刻の比例ゲイン，μkはコントローラ決定部に含まれるルールの前件部の評価値である．

3 提案方式の伝達関数モデルへの適用

ここで提案した制御方式は，階層型ファジィ制御方式 [2]における人間の調整アルゴリズムをコンピュータにより実現しようとするものである．しかし，提案したルール調整機構を用いてファジィルールの自動調整を行う際に，制御系の設計仕様を満足させることができる否かを検討する必要がある．また，プラントの制御量が予め定められた目標軌跡に収束できる否かも調べる必要があるため本節では，提案したルール調整機構を伝達モデルをもついくつかのプラントへ適用し，数値シミュレーションを行う．数値シミュレーション結果を考察し，提案した制御方式の有効性を検証する．

（1） プラントの数学モデル記述

ここで，提案した制御方式を次数が異なる3つのプラントに適用し，その数値シミュレーションを行う．それぞれのプラントは，

の伝達関数モデルをもつ3つのプラントとする．それぞれ1次，2次および3次遅れ系のプラントであり，すべて定常性プロセスである．

$$\text{Plant 1 : } G(s) = \frac{1}{(5s+1)}$$

$$\text{Plant 2 } G(s) = \frac{0.5}{(2s+1)(2.5s+1)}$$

$$\text{Plant 3 } G(s) = \frac{1}{(0.389s+1)(s+1)(2.5s+1)}$$

（2） 制御系の構築

制御系の構築手順は上に述べた全てのプラントに対して同様であり，次ぎの手順で行う．

手順1：制御系の設計仕様を決定する．従来のPIDコントローラによる制御結果を参考にプラントに対する実現可能な設計仕様を定める．

手順2：コントローラ切り換え部を構成する．ここでは，まず位相面をファジィ分割し，システム状態eおよびde/dtを評価するメンバーシップ関数を決定する．今回，システム状態e およびde/dtを評価するメンバーシップ関数として，各入力領域を7等分割した一様な三角形メンバシップ関数を定義する．次ぎにファジィ分割した位相面に基づき，PIDコントローラのパラメータ切り換えルールを構成する．

手順3：制御性能評価部を構成する．手順1に決定した設計仕様（立上り時間，オーバシュート，定常偏差）の条件基づき，目標軌跡を設定する．次ぎに，目標軌跡に沿ってFig.4に示されるようなファジィ集合を設け，目標軌跡をファジィ化する．

手順４：ルール調整部を構成する．手順２と同様に位相面をファジィ分割するが，ここでは各入力領域を3等分割した．システム状態 e および de/dt を評価するため，一様な三角形メンバシップ関数を用い，Negative，Zero，Positiveとする．次ぎにファジィ分割した位相面に基づき，PIDコントローラのパラメータ修正量を推論するルールを構成する．

手順５：ルール修正計算式に含まれる修正係数 Gkp j を決定する．

（３） 数値シミュレーション実験

ここでは，既に述べた設計手順で全てのプラントのモデルに対する制御系を構築し，数値シミュレーション実験を行う．実験の内容は設計した制御系に対して単位ステップ応答を行い，制御量の応答波形を考察する．上に述べた3つのプラントの数値シミュレーション結果をFig.5，Fig.6，Fig.7に示す．学習回数につれて制御結果が目標軌道に収束するのがわかる．

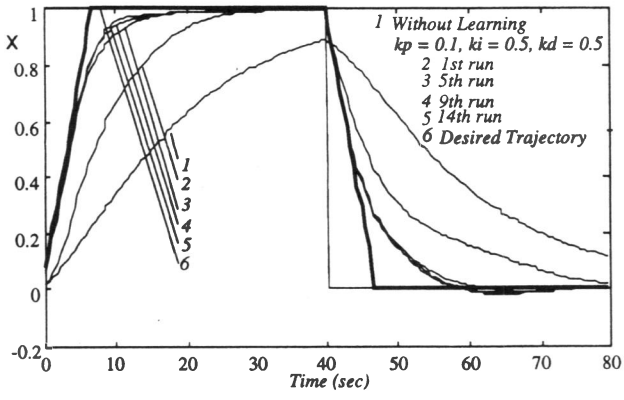


Fig.5 Result of 1st Order Plant

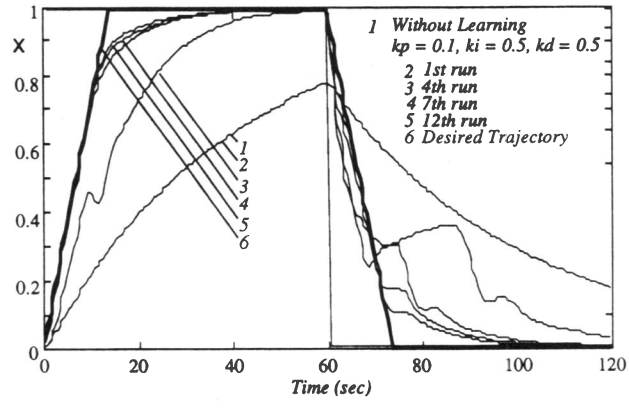


Fig.6 Result of 2nd Order Plant

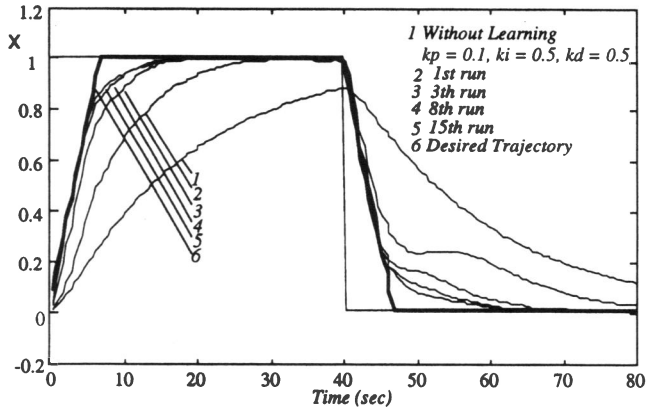


Fig.7 Result of 3rd Order Plant

4　おわりに

本研究では従来のPID制御方式の問題点である柔軟性問題およびパラメータ設定問題に対して，ファジィ学習機構を含んだ階層型ファジィ制御方式を提案した．提案方式を用いることにより，運転中にコントローラを切り換えることができ，従来のコントローラより柔軟な制御が実現できた．

提案した制御方式は，熟練オペレータの知識やノウハウを組み込んだエキスパートシステムの一種であり，本研究では，ファジィ推論を用いて実現した．提案した方式の有効性を示すため，異なる次数の伝達関数をもつプラントに適用し，その数値シミュレーションを行った．数値シミュレーション結果から，異なる次数をもつプラントに対しても，提案方式により与えられた設計仕様を満足する制御を実現できた．これらにより，人間の考え方や知識を計算機上で再現できるファジィ推論を制御系に組み込んだ提案方式は，従来のPID制御方式における課題の解決案として有効であることを確認した．

参考文献

[1] 須田，" PID制御"，システム制御情報ライブラリー，朝倉書店, 1994

[2] 安信，" 人間の制御戦略に基づくＦｕｚｚｙ制御方式の一提案"，計測自動制御学会論文集、２３－9，967/976, 1987

[3] 安信，トムソン，" PID制御＆ファジィ推論による階層型ファジィ制御方式と実験評価"，第１０回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.435/436, 1994

連絡先

〒３０５　つくば市天王台１－１－１

筑波大学　構造工学系／工学システム学類

安信誠二・ﾄﾑｿﾝ ｼﾘﾝｺﾞﾘﾝｺﾞ

TEL : 0298-53-5019

Internet : yasunobu@.kz.tsukuba.ac.jp

TB3-3

簡略推論法を適用した低次元分割におけるファジィ制御性能の改善

Improvement of Control Performance for Low-Dimensional Number of Fuzzy Labelings Applying Simplified Inference Method

大坪 昭文　林 健一郎　村上 周太　前田 幹夫
Akifumi OTSUBO　Kenichiro HAYASHI　Shuta MURAKAMI　Mikio MAEDA

佐賀県工業技術センター
Industrial Technology Center of Saga

九州工業大学
Kyushu Institute of Technology

Abstract － First, an improvement method of fuzzy control performance for low-dimensional number of fuzzy labelings applying the "Simplified Inference Method" is proposed in this paper. Next, the effectiveness of this improvement method is inspected from the investigated results of several simulations where the first order lag systems with dead time are setted for the controlled system.

1．まえがき

現在ファジィ制御器を設計するにあたり，ファジィ分割数として７×７分割や５×５分割といった高次のものが良く使用されている．これは，一般に高次分割数になるほど，多種多様なファジィ制御器の非線形特性が実現できるからである．しかし，高次分割数になるほど制御規則やメンバシップ関数などの制御パラメータの数は飛躍的に増加してしまい，この傾向はファジィ制御器の入出力変数の増加に伴って一層顕著なものとなる[1]．その結果，高次分割数になるほど，ファジィ制御器の調整や検証は困難で時間を要する作業となるばかりでなく，その高速化の要求をも達成できなくなる．

そこで，本論文では，ファジィ制御器の低次元化を目的として，まず，「簡略推論法」[2]を適用した低次元分割におけるファジィ制御性能の改善法について提案を行う．ここでの提案は，ファジィ分割数が低次の３×３分割の場合に，ファジィ推論法として「簡略推論法」を用いた場合，その後件部のシングルトン形メンバシップ関数ＺＯの高さｈを調整することによって，制御性能が改善できるという方法である．次に，制御規則表を規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」[3]，更にはファジィ制御器の一層の高速化のために規則数を大幅に減少した「山崎・菅野の制御規則」[4]に対して，シミュレーションを行った検討結果から本改善法の有効性を確認する．

2．ファジィ制御系の構成

本シミュレーションにおけるファジィ制御系は図１に示した構成であり，Ｅは偏差，⊿Ｅは偏差の変化分である．ここで，ファジィ制御器の出力は操作量Ｕの変化分⊿Ｕで制御器は速度型とした．また，ファジィ制御のための推論法として「簡略推論法」[2]を用いた．

検討した制御対象は，プロセス特性の代表的なモデルであるむだ時間のある一次遅れ系とした．そのモデルの伝達関数は次式となる．

$$G(s)=\frac{K e^{-Ls}}{1+Ts}$$

上式において，Ｌはむだ時間の大きさ，Ｔは一次遅れ時定数，Ｋはプロセスゲインを表す．

一般に制御系設計の知識により，むだ時間のある一次遅れ系はＬ/Ｔの値に応じて，時定数が支配的な遅れ系（Lag System），中間系（Medium System），むだ時間が支配的なむだ時間系（Dead Time System）の３つのモデルに分類できる[5]．ここで，Ｌ/Ｔの値が大きくなるほど，つまりむだ時間が支配的になるほど制御し難いと言われる[6]．

本シミュレーションにおいては，これらのモデルを制御対象とし，Ｌ/Ｔの値は0.1から10の範囲となるように設定した．

3．制御規則とメンバシップ関数

制御規則として，ファジィ分割数が３×３分割の場合に，その制御規則表を全て規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」[3]と，更には規則数減少のためにその制御規則表に空きを設けた「山崎・菅野の制御規則」[4]を用いた．これらの制御規則表をそれぞれ表１の(a)と(b)に示す．ここで，３×３分割とは，表１に示すように前件部及び後件部をＮＢ（Negative Big），ＺＯ（Zero），ＰＢ（Positive Big）の３つのファジィラベルで分けることである．

前件部メンバシップ関数としては，図２に示すような通常良く用いられる(a)三角形（Triangle Type）に加えて(b)釣鐘形（Bell Type）を用いた．

一方，後件部メンバシップ関数としては，ファジィ集合ではなく，図３に示すような幅が零のシングルトン形（Singleton Type）を用いた．

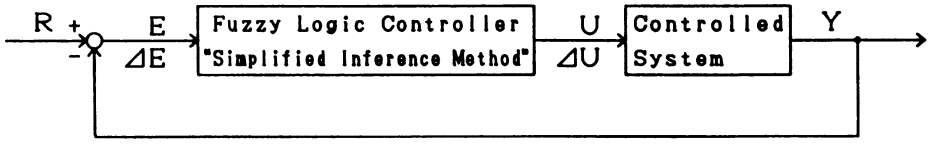


図１　ファジィ制御系の構成

表１　３×３分割の場合の制御規則表

（a）　Rutherford's Control Rule

ΔE \ E	NB	ZO	PB
PB	ZO	PB	PB
ZO	NB	ZO	PB
NB	NB	NB	ZO

（b）　Yamazaki & Sugeno's Control Rule

ΔE \ E	NB	ZO	PB
PB		PB	
ZO	NB	ZO	PB
NB		NB	

4．簡略推論法

一般に，ファジィ推論法における推論過程は以下に示すような４つのステップに分けることができる．

Step1：入力があった場合に，規則の前件部適合度を求める．

Step2：各規則による推論結果を求める．

Step3：各規則による推論結果を統合化し，規則全体としての推論結果を求める．

Step4：規則全体としての推論結果を非ファジィ化し，出力を求める．

「簡略推論法」における推論過程を図４に示す．この推論過程では，Step1，2において代数積(×)演算を使用し，Step3，4で高さ法（重み付き加算平均）を使用するものである．ここで，A_i，B_i（i=1,2）は前件部のファジィ集合，h_iは各規則の前件部適合度，z_iは後件部のシングルトン形の位置を表す．また，x_0，y_0は確定値入力（観測値），z_0は推論結果である非ファジィな出力を表す．

5．低次元分割における制御性能の改善

ファジィ分割数が低次の３×３分割の場合には，図３から分かるように，後件部にはＮＢ(負)，ＺＯ(零)，ＰＢ(正)の３つのシングルトン形メンバシップ関数しか存在しないので，シングルトン形ＺＯの高さｈを変更しその制御への貢献度を調整することで，ファジィ制御器の非線形特性を変更できる．

本章では，特にファジィ推論法の「簡略推論法」[2]に対して，このシングルトン形ＺＯの高さｈの調整法によって，制御性能の改善が図れることを示そう．

5．1　制御規則表を埋め尽くした場合

本節では，まず，表１(a)の制御規則表を規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」[3]に対して，この高さｈの調整法の適用で制御性能が改善できることを示そう．図５は，「Rutherfordの制御規則」を用いた場合に，後件部のシングルトン形ＺＯの高さｈを変化させた場合の制御結果を示したものである．

図５(a)遅れ系では，シングルトン形ＺＯの高さｈを１から小さくして，その制御への貢献度を「抑制」（0≦ｈ≦1）するに従って，前件部メンバシップ関数の形に関わらず制御結果は改善されている．具体的にはシングルトン形ＺＯの貢献度の「抑制」に従って，一般には相反する傾向を示すものであるが，ここでは立ち上がり特性とオーバシュート量が同時に改善される結果となっている．

前件部メンバシップ関数が三角形の場合には，ある高さｈでハンチング（持続振動）が起こり不安定となっている．一方，釣鐘形の場合にはｈ＝0の場合でも制御が可能となっている．従って，この場合表１(a)のRutherfordの制御規則表では，後件部がＺＯの３個の規則が不要となり，９個から６個の規則数に減少できることを意味する．

図５(b)中間系と(c)むだ時間系では，遅れ系の場合とは逆にシングルトン形ＺＯの高さｈを１から大きくして，その制御への貢献度を「強調」（1≦ｈ）するに従って制御結果は改善されている．

前件部メンバシップ関数が釣鐘形の場合には，ｈを大きくするに従ってオーバシュート量は改善されていくが，逆に立ち上がり特性は若干悪くなっている．一方，三角形の

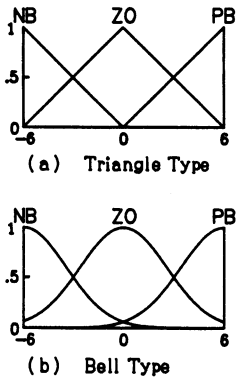


図２　前件部メンバシップ関数

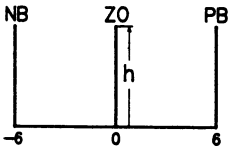


図３　後件部メンバシップ関数
（シングルトン形）

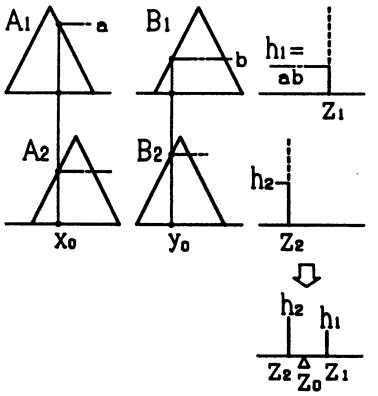


図４　「簡略推論法」における推論過程

場合には，立ち上がり特性の良さは保ったまま，オーバシュート量を大幅に改善することができ，良好な制御結果となっている．

５．２　規則数を大幅に減少した場合

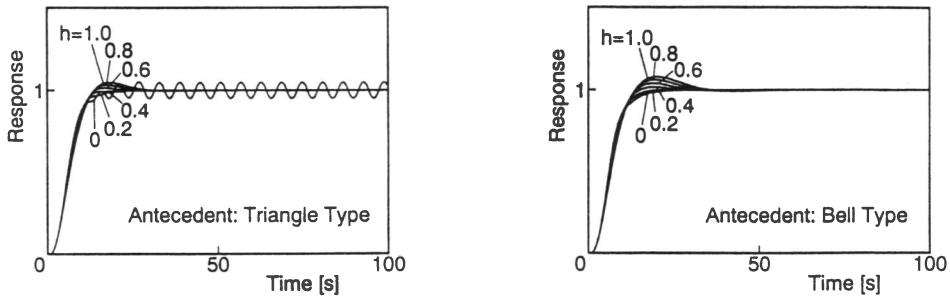
本節では，更に，ファジィ制御器の一層の高速化を目的として，規則数を９個から５個の約半分に減少した表１(b)の「山崎・菅野の制御規則」[4]に対しても，この高さｈの調整法の適用で制御性能が改善できることを示そう．図６は，「山崎・菅野の制御規則」を用いた場合に，後件部のシングルトン形ＺＯの高さｈを変化させた場合の制御結果を示したものである．

図６から分かるように，この規則数を大幅に減少した「山崎・菅野の制御規則」の場合も，図５に示した「Rutherfordの制御規則」の場合の制御結果と同様に，シングルトン形ＺＯの高さｈの調整法を適用することで，モデルが(a)遅れ系の場合にはシングルトン形ＺＯの高さｈを１から小さくし，その制御への貢献度を「抑制」することによって，モデルが(b)中間系や(c)むだ時間系の場合には，逆にシングルトン形ＺＯの高さｈを１から大きくし，その制御への貢献度を「強調」することによって，制御性能が改善できる．

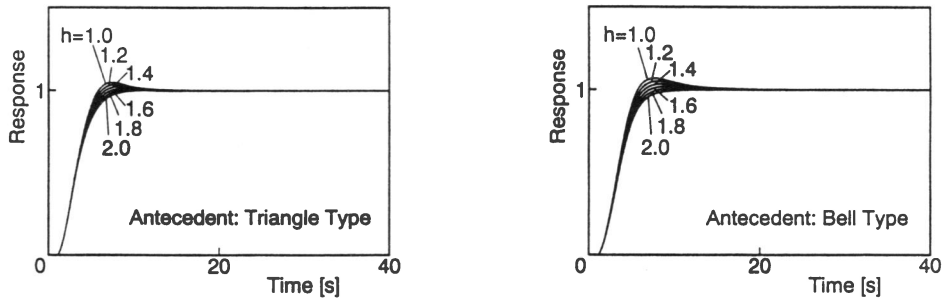
以上，５．１，５．２節において述べてきたように，シングルトン形ＺＯの高さｈの調整法の特徴は，一般的な規格化定数の調整法[1]が前件部及び後件部の３つの規格化定数の変更を要する（図１に示したファジィ制御系の場合）のに比べ，１つのパラメータｈの変更によって，遅れ系，中間系，むだ時間系のどのモデルに対しても，制御性能の改善を図ることができる点にある．ここでは，立ち上がり特性の良さは保ったまま，オーバシュート量を大幅に低減できる．

６．あ と が き

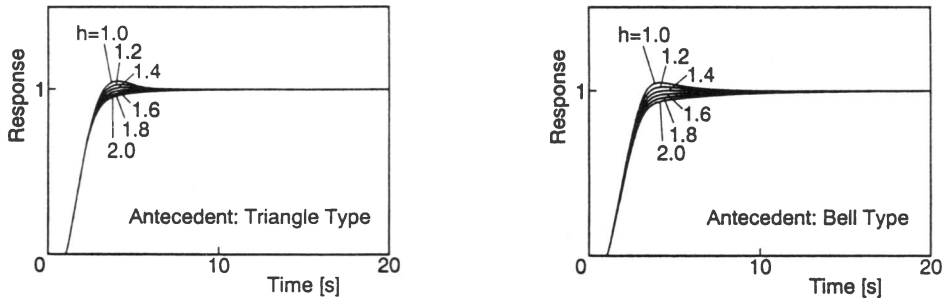
本論文では，まず，ファジィ分割数が低次の３×３分割の場合に，ファジィ推論法として「簡略推論法」[2]を適用した場合，その後件部のシングルトン形メンバシップ関数ＺＯの高さｈを調整することによって，制御性能が改善



(a)　Lag System　L=1[S], T=10[S], K=1 (L/T=0.1)



(b)　Medium System　L=1[S], T=1[S], K=1 (L/T=1)



(c)　Dead Time System　L=1[S], T=0.1[S], K=1 (L/T=10)

図５　後件部シングルトン形ＺＯの高さｈを変化させた場合の制御結果
（「Rutherfordの制御規則」の場合）

できるという方法を提案した．

次に，制御対象としてむだ時間のある一次遅れ系を設定し，まず制御規則表を規則で埋め尽くした「Rutherfordの制御規則」[3]，更には規則数を大幅に減少した「山崎・菅野の制御規則」[4]に対して行った各種シミュレーション結果から，本改善法の有効性を検証した．

謝　辞

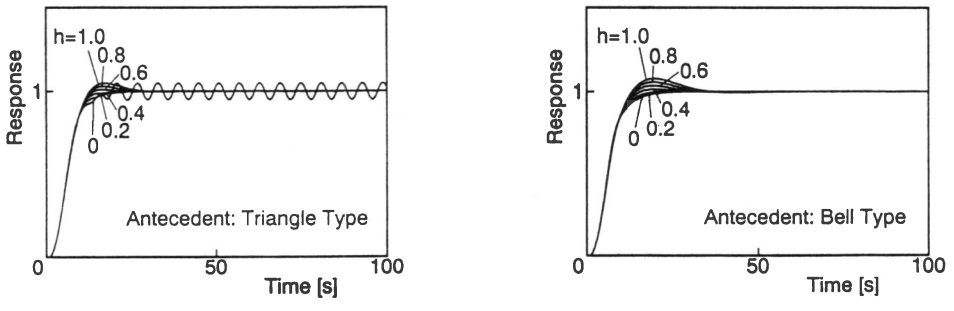
本研究を進めるにあたり，有益なご助言を頂いた大阪電気通信大学の水本雅晴教授に深く謝意を表します．

参考文献

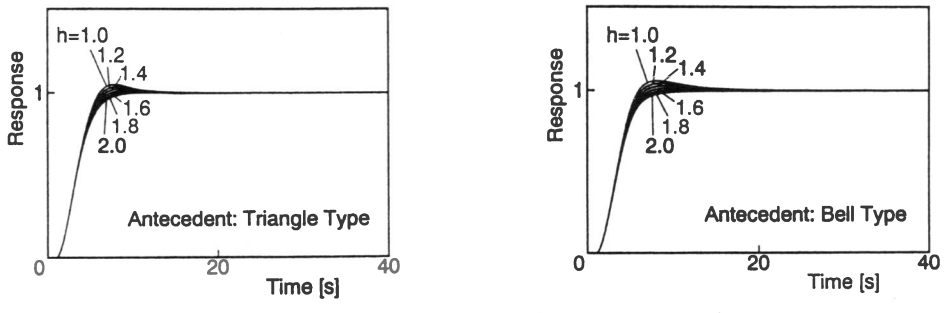
(1) 前田，福宮，坪根：“非線形スケーリングファクタとそのファジィ制御への応用”，第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.549-552 (1992-05)．
(2) 前田，村上：“ファジィ制御とその応用”，システム／制御／情報，34-5，pp.282-287(1990)．
(3) M. Brrae and D.A. Rutherford : “Theoretical and Linguistic Aspect of the Fuzzy Controller”, Automatica, 15, pp.533−577(1979).
(4) 山崎，菅野：“ファジィ制御”，システムと制御，28-7，pp.442-446(1984)．
(5) 岩崎，森田，丸山：“制御対象のクラス分けを付加したファジィオートチューニング”，日本ファジィ学会誌，5-3，pp.639-649(1993-06)．
(6) 松山：“温度の測定と制御”，pp.124-128，(財)省エネルギーセンター(1989)．

連絡先

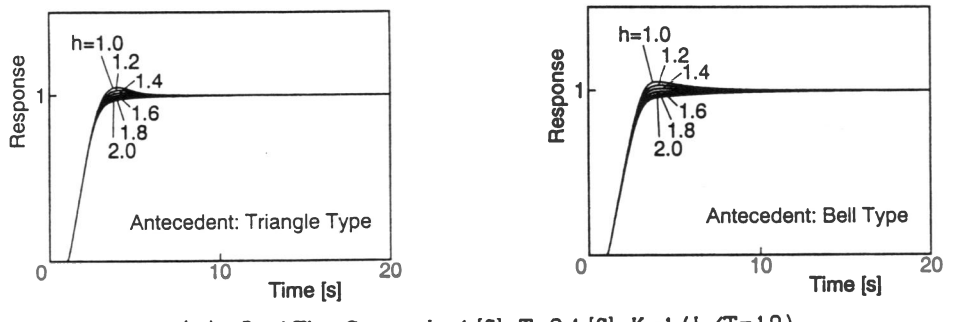
〒849　佐賀市鍋島町大字八戸溝114番地
佐賀県工業技術センター　応用電子部
大坪　昭文
TEL:0952-30-8161，FAX:0952-25-1694



(a)　Lag System　L=1 [S], T=10 [S], K=1 (L/T=0.1)



(b)　Medium System　L=1 [S], T=1 [S], K=1 (L/T=1)



(c)　Dead Time System　L=1 [S], T=0.1 [S], K=1 (L/T=10)

図6　後件部シングルトン形ＺＯの高さｈを変化させた場合の制御結果
（「山崎・菅野の制御規則」の場合）

TB3-4

遺伝的アルゴリズムによるファジィシングルトン型推論法の下での並列倒立振子のファジィ制御

Fuzzy Controls of Parallel Inverted-Pendulum under Fuzzy Singleton-Type Reasoning Method Using Genetic Algorithm

藤田和之, 水本雅晴
Kazuyuki FUJITA, Masaharu MIZUMOTO
大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract

This paper shows the fuzzy controls of parallel inverted-pendulum using fuzzy singleton-type reasoning method. At first, we obtain singleton-type fuzzy control rules using trial and error method. Moreover, we use genetic algorithm for the optimization of fuzzy rules, and compair control results with those by simplified reasoning method. And we show that our method is effective.

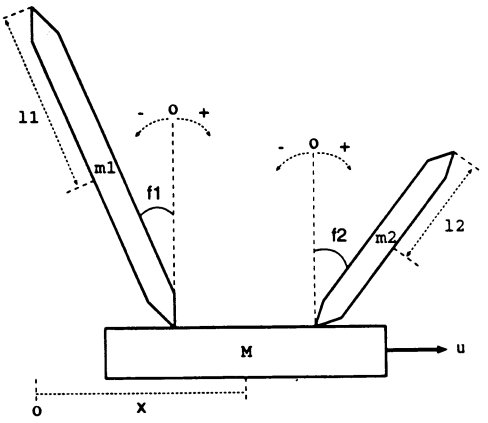
1 はじめに

今日、ファジィ制御は様々な実システムに応用されるようになり、「ファジィ」という言葉も人々の間に定着するようになった。ファジィ制御がこれほど短期間の内に浸透していったのは、ファジィ制御が人間の直感に合った制御を行うことができる、つまり制御対象に対するオペレータが持っている経験則をIF-THEN型の自然言語的な規則として与えることができるからである。ところが、大規模なシステムや入力数の多いものに対して、制御規則を言語的に記述するのは大変困難である。また、厳密な制御を必要とするシステムに対しては、人間の直感による規則だけでは最適な制御規則を得ることが難しく、対応しきれない場合もある。

本研究では、非線形制御モデルとしてよく知られている倒立振子の例として並列倒立振子を制御対象とした。まず人間が試行錯誤的にファジィ規則を作成し、振子の長さや長さの比の変化にも耐え得る規則が得られた。さらに、振子の長さや比を固定した時にその対象に最も効果的な制御規則を得るために、人間が作成した規則をベースにして遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用いることにより、適切なファジィ規則が生成できることを示す。推論法としては、ファジィシングルトン型推論法 (重み付き簡略化推論法)[1] を用い、通常よく用いられている簡略化推論法による場合との比較を行う。

2 並列倒立振子のファジィ制御

並列倒立振子とは、台車上に異なる長さの振子が2本並列に取り付けられたものである (図1参照)。長さが異なれば台車を操作したときの振子の振れ方も異なるので、本研究ではこの違いに着目して、台車を操作することによって2本の振子を倒立 (安定) させることを目的とした。



f1：振子1の角度　l1：振子1の長さの半分
f2：振子2の角度　l2：振子2の長さの半分
x：台車の位置　m1：振子1の質量
u：台車の操作量　m2：振子2の質量
M：台車の質量

図1 並列倒立振子モデル

2.1 ファジィ推論

並列倒立振子をファジィ制御するにあたり、本研究では「ファジィシングルトン型推論法」と呼ばれる推論法を用いる。これは簡略化推論法におけるファジィ規則の後件部の実数値 z_i に、$w_i \geq 0$ となる実数 w_i を"重み"として付加したものである。$w_i > 1$ ならばその規則に強調効果を、$0 \leq w_i < 1$ ならばその規則に抑制効果を与えることができる [1]。重みがすべて1のときは通常の簡略化推論法になる。推論の例を図2に示す。

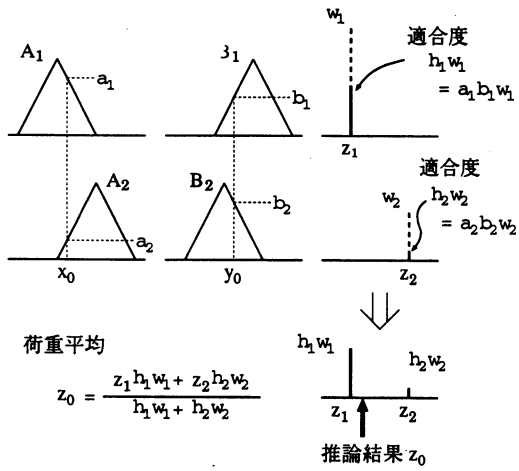


図2　ファジィシングルトン型推論法

2.2　ファジィ規則

ファジィ制御に用いる入出力を以下のように定める。

入力 ： f1 (振子　の角度)
Δf1 (振子 1 の角度の変化分)
f2 (振子 2 の角度)
Δf2 (振子 2 の角度の変化分)

出力 ： u (台車の操作量)

台車の操作量は、NB, NS, ZO, PS, PB の 5 状態で表す。ただし、振子の傾きとその変化分は NB, PB の 2 状態とする。2 状態とした理由は、並列倒立振子では入力として上で述べた 4 入力が必要であり、状態数を増やすとファジィ規則作成の際に組合せの数が膨大になるからである。図 3 に今回使用したファジィ集合を示す。

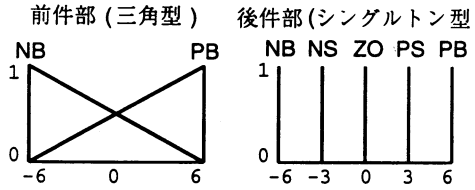


図3　ファジィ集合

ファジィ規則の作成方法は以下のようである [3]。例えば、「振子 1(長い方)、振子 2(短い方) 共に負に大きく傾き、更に両方とも負に大きく傾こうとしていれば、台車の操作量を負に大きく加える。つまり、両方の振子を立てるように台車を操作する。」ということから、

f1=NB, Δf1=NB, f2=NB, Δf2=NB ⇒ u=NB

のような規則を作成する。

ファジィ規則を作成する際に注意すべき点がある。通常の 1 本の倒立振子では、すべての規則が振子を倒立させるためのものであるが、並列倒立振子では 2 本の振子を倒立させるための規則と、2 本の振子の傾く方向をそろえるための規則の 2 種類が必要である。また、短い振子は台車の移動に敏感に反応し、長い振子はゆっくりと動くので、それらをふまえて表 1 の「人間」の項に、作成した 16 個の重み付きのファジィ規則を挙げる [3]。ここで後件部の右上の数値は重みを表す。数値の付いていないところはすべて重み 1 である。なお次節で述べるが、遺伝的アルゴリズムで生成された規則として、「GA1」の項はファジィシングルトン型推論法での規則,「GA2」の項は簡略化推論法での規則を表している。

表1　ファジィ規則表

	前件部				操作量 u		
	f1	Δf1	f2	Δf2	人間	GA1	GA2
1	NB	NB	NB	NB	NB^{40}	$NS^{2.5}$	NS
2	NB	NB	NB	PB	PS	$PB^{1.9}$	PB
3	NB	NB	PB	NB	PS	$ZO^{2.9}$	ZO
4	NB	NB	PB	PB	PB^{40}	$PS^{4.7}$	PS
5	NB	PB	NB	NB	NB	NS	NS
6	NB	PB	NB	PB	$ZO^{0.5}$	$NS^{2.6}$	NS
7	NB	PB	PB	NB	$ZO^{0.5}$	$NS^{4.3}$	ZO
8	NB	PB	PB	PB	PB	$PS^{4.2}$	PS
9	PB	NB	NB	NB	NB	$NS^{0.4}$	NS
10	PB	NB	NB	PB	$ZO^{0.5}$	$NS^{1.2}$	NS
11	PB	NB	PB	NB	$ZO^{0.5}$	$PS^{0.1}$	PS
12	PB	NB	PB	PB	PB	$PS^{1.9}$	PS
13	PB	PB	NB	NB	NB^{40}	$NS^{4.2}$	NS
14	PB	PB	NB	PB	NS	$ZO^{2.1}$	ZO
15	PB	PB	PB	NB	NS	$ZO^{4.3}$	NS
16	PB	PB	PB	PB	PB^{40}	$PS^{1.5}$	PS

ファジィ規則に記されている 16 個の振子の状態の中で、特に危機的な状態は規則 1, 4, 13, 16 の 4 個である。規則 1, 16 は 2 本の振子が同じ方向へ倒れていく場合、規則 4, 13 は 2 本の振子が反対方向へ倒れていく場合である。この 4 個の危機的な状態に対しては、他の状態よりも優先度を高くする必要があるので重みをかなり大きな値にした。また、台車の操作量を ZO にするという規則は無いと困るが、通常は推論時にあまり影響を及ぼさないようにするため重みを 0.5 にした。

この規則を用いて制御を行った例を図 4 に示す。

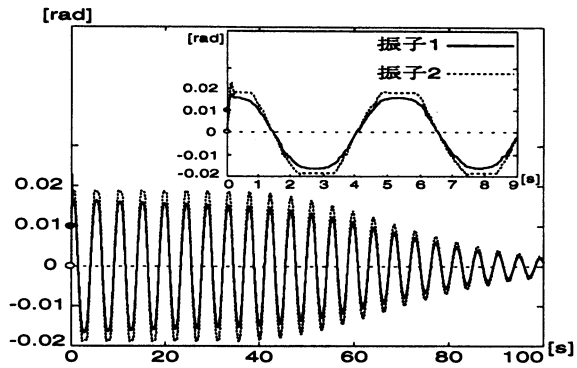


図4　ファジィシングルトン型推論法 (人間) による制御

(振子 1 : 3m, 0.01rad(約 0.57 度)
振子 2 : 1m, 0rad(0 度))

3 GAによるファジィ規則の生成

前節で述べたように試行錯誤的に作成したファジィ規則は、直感に合った規則であるから振子の長さや比を変化させた場合でも、その影響を受けつつも制御できる (図4及び図7-(a) 参照)。しかしながら、汎用性がある規則は特定の条件下において最適な規則であるとは言いがたい。そこで、試行錯誤的に作成した規則をベースにして、遺伝的アルゴリズムを用いて満足のいくファジィ規則を生成することができたので、その手順を以下に述べる。

3.1 ファジィ規則と重みの生成

(1) 遺伝子型の設定と第一世代の個体の発生

遺伝子の形式は、規則の後件部実数値 (-6.0, -3.0, 0.0, 3.0, 6.0) とその重み (0.1〜5.0 まで 0.1 刻み) を1セットとして1個体 (1つの規則表に対応 [2]) を図5のように設定する。その際、後件部実数値をランダムに設定するとあまりにも自由すぎて規則の生成に時間がかかるので、人間の作った規則をベースとして第一世代の遺伝子集団を作成した。具体的には、「人間が作った各規則の後件部実数値に±3.0をランダムに加えるか、またはそのままにする。重みはランダムに発生させる。」という制限を設けて遺伝子を100個体生成する。

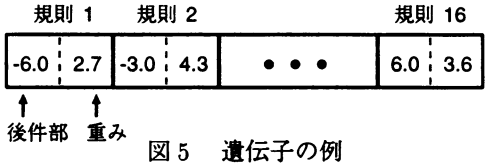


図5 遺伝子の例

(2) 適応度の計算

各個体 (各規則表) の適応度は以下に示す評価関数により求める。ある世代において5組の初期角度をランダムに作成し、i 番目の個体 (規則表) を用いて並列倒立振子の制御を行う。そして、ある時点での2本の振子の角度の絶対値の和に時間を掛けたものをその時点での評価値とし、時間 T まで加算する。

$$h_{ij} = \sum_{t=0}^{T} \{t \cdot (|f_1(t)| + |f_2(t)|)\}$$

ただし i=1,⋯,100(個体数), j=1,⋯,5(初期角度の組)

これを5組の初期角度すべてについて行い、総和を求め、それをその個体 i の評価値とする。

$$\text{評価値 } H_i = \sum_{j=1}^{5} h_{ij}$$

その世代ですべての個体の評価値を求めた後、その中から評価値の最大値 (max) と最小値 (min) を求め、次式により各個体のその世代における適応度を求める。

$$\text{適応度 } \mathrm{fit}_i = 100 - \left(\frac{max - H_i}{max - min} \times 100 \right)$$

これより最も優れた個体には100が、最も劣った個体には0が与えられる。

(3) 淘汰

適応度の低い個体をその世代から消す。

(4) 増殖

淘汰によって個体数が減少するので、元の個体数になるまで残った個体群の中から優秀なものを適当にコピーする。

(5) 交叉

一点交叉で遺伝子 (規則表) の交叉を行う。ただし、重みはその規則の重要性を示すもので後件部との関係が深いので、交叉するポイントは図5における後件部 (実線部分) とし、重み (点線部分) は交叉するポイントに選ばれないように設定した。本実験では交叉率を30%とした。

(6) 突然変異

本実験では最大3ヶ所まで突然変異が起こり得るようにする。また突然変異する位置は全くランダムに決定されるものとする。本実験では突然変異率を3%とした。

これらの手順を繰り返して生成された規則を、表1の「GA1」の項に示す。また、これを用いて制御した結果を図6に示す。

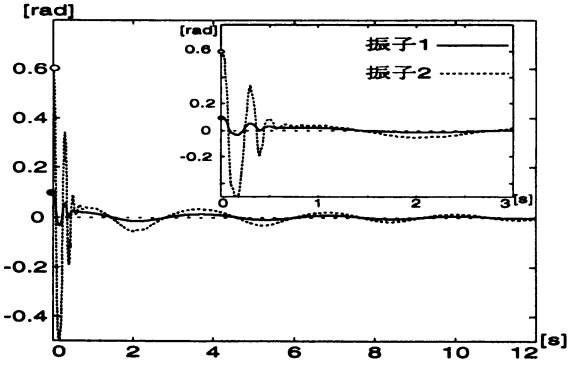


図6 ファジィシングルトン型推論法 (GA) による制御
(振子1：10m, 0.1rad(約5.7度)
振子2：1m, 0.6rad(約34.4度))

3.2 簡略化推論法の規則の生成

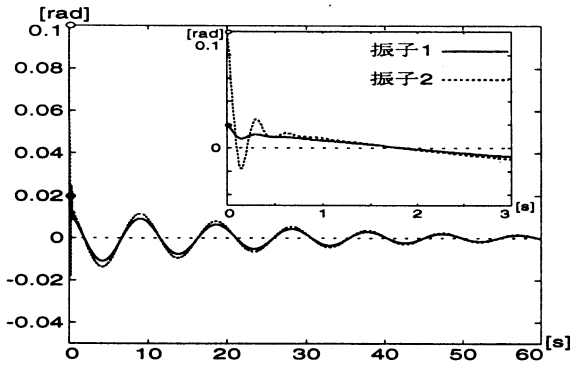
人手による簡略化推論法の下での規則は作成することができなかったので [3]、GAでのみ生成する。手順は前節と同様であるが、重みの部分をなくす。生成された規則を表1の「GA2」の項に示す。

4 制御結果の比較

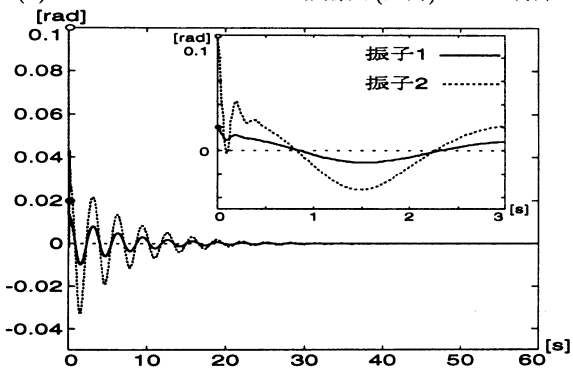
図7に、ファジィシングルトン型推論法用の規則((a)は人間が作成したもの,(b) はGAで作成したもの)と簡略化推論法用の規則((c)GAで作成したもの)の3パターンについて、並列倒立振子を制御した結果を示す。

条件として、振子1は10m, 10kg、振子2は1m, 1kg、初期角度を振子1は0.02ラジアン(約1.2度), 振子2は0.1ラジアン(約5.7度)とした(グラフ中に黒丸, 白丸で表示)。グラフの縦軸は振子の角度, 横軸は時間(秒)を表し、実線は振子1, 点線は振子2を表している。

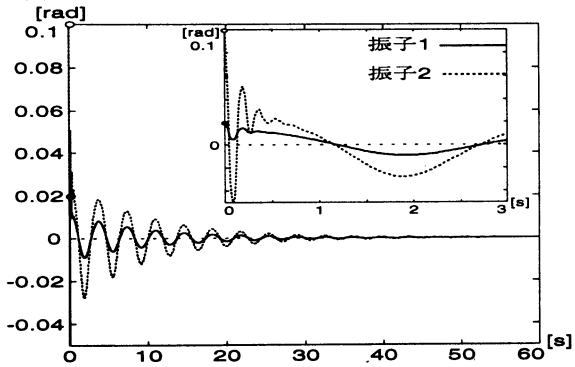
得られた制御結果より、3種類のファジィ規則はどれも並列倒立振子の安定化に成功している。その他の様々な初期角度でも実験を行った結果、制御を始めてから



(a) ファジィシングルトン型推論法(人間)による制御



(b) ファジィシングルトン型推論法(GA)による制御



(c) 簡略化推論法(GA)による制御

図7 制御結果

(振子1：10m, 0.02rad(約1.2度)
振子2：1m, 0.1rad(約5.7度))

何秒かの間で2本の振子の周期をそろえることに成功すれば、その後にそれらの振幅を徐々に小さくしていき倒立させることが可能であることがわかった。制御の様子を見ると、どのファジィ規則を用いても振子1(長い方)の安定化を優先し、振子2(短い方)を振子1の周期に合わせるような制御を行っている。しかし、(a)が緩やかな制御であるのに対して、(b), (c)では素早く2本の振子の周期をそろえ、2本共倒立させている。中でも(b)は最も短い時間で並列倒立振子を制御できている。このことより、GAによる適切なファジィ規則の生成に成功していると言えるであろう。

また、振子1=0.1rad(約5.7度), 振子2=0.6rad(約34.4度)という大きな初期角度を与えたところ、3種類の規則の中でGAで生成されたファジィシングルトン型推論法用の規則を用いたものだけが制御が可能であった(図6参照)。よって、ファジィシングルトン型推論法はきめ細かい制御を必要とする対象に対して有効であると思われる。ここで、人間が試行錯誤的に作成した規則は3パターン中最も悪い結果を示したが、振子の長さや質量や長さの比を変化させても制御することができるのに対して、GAで生成されたものは、少しでも振子の条件を変えると全く制御できなかった[4]。

5 むすび

人間が作成したファジィ規則をベースにして、より満足のいくファジィ規則を得るために遺伝的アルゴリズムを用いることは有効であることがわかった。また、ファジィ規則の後件部の位置を直接チューニングしなくても、重みを用いることにより良好な制御が行える場合があることが示された。

今後の課題として、遺伝子の母集団の調整やエリート戦略の使用等の遺伝的アルゴリズムの改良を行い、ファジィ規則を短時間に生成することが考えられる。

参考文献

[1] 水本、ファジィ制御の改善法(VI) -ファジィシングルトン型推論法による場合-、第8回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集、pp.529-532、1992

[2] 高濱・宮本・小倉・中村、遺伝アルゴリズムによるファジィ制御規則の学習、第8回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集、pp.241-244、1992

[3] 藤田和之、「並列倒立振子のファジィ制御」、大阪電気通信大学卒業論文、1994

[4] 宮崎俊治、「遺伝的アルゴリズムによるファジィ規則の自動生成とその並列倒立振子への応用」、大阪電気通信大学卒業論文、1995

問い合わせ先：〒572 大阪府寝屋川市初町18番8号
大阪電気通信大学 大学院工学研究科 情報工学専攻
藤田和之
Tel：0720-20-4569 Fax：0720-24-0014
E-mail：fujita@mzlab.osakac.ac.jp

TB4-1

ファジィ論理・ニューラルネットワークを用いたアスパラガスの形状判別

Shape Classification of Asparagus using Fuzzy Logic and Neural Networks

高柳　浩[1]　　手島　昌一[1]　　山ノ井　高洋[2]

Hiroshi Takayanagi　Shoichi Teshima　Takahiro Yamanoi

1(株)ジャパンテクニカルソフトウェア　研究部

Japan Technical Software Co.,LTD.

2 北海学園大学工学部

Hokkai-Gakuen University

Abstract — A shape of bend is greatly concerned with the classification at shipping of long agricultural products such as asparagus. A property of the bend have several aspects, so that one cannot easily realize their automatic classification. Nevertheless, there is an increased demand for it on seasonable agricultural products. In order to classify asparagus automatically, we applied the fuzzy logic to determine a degree of bend and the neural network to classify their shapes. Classification by this method coincides in almost 90% with that by human vision.

1．はじめに

画像処理技術の発達にともない、様々な視覚による選別作業が自動化されている。しかしながら、農産物に関しては依然として人手に頼っている部分が多い。この理由は、農産物は工業製品のような明確な規格化が難しいとともに、各々の品種のばらつきおよび体差が大きく、一定のガイドラインで扱うことができないためである。

それにもかかわらず、アスパラガスのように、短期（北海道では、６月から７月の２ヶ月）に集中して出荷する野菜の選別作業に対する自動化の需要は大きい。

アスパラガスの選別作業は、大きく分けて、「大きさ」、「曲がり具合」、「穂先のひらき具合」、「キズの有無」が挙げられる。これらのうち、「曲がり具合」、「穂先のひらき具合」、「キズの有無」については、熟練者の視覚による判断に頼っている。

本研究では、アスパラガスの形状のうち等級判別に大きく影響する「曲がり具合」に着目し、ファジィ論理・ニューラルネットワークを用いて判別する手法を提案する。

2．アスパラガスの曲がり具合の判定

アスパラガスの曲がり具合については、大きく分けて次のようなものがある。

(1)全体的に曲がっているもの
(2)下部が曲がっているもの
(3)中部が曲がっているもの
(4)上部が曲がっているもの

それぞれの曲がり具合によって、判定の結果が異なる。例えば、上部は、ある程度まで曲がっていてもよいにもかかわらず、中部の曲がりが大きいとＢ級品と判定されてしまう。

このように、アスパラガスの曲がり具合の判定は、「全体的に大きく曲がっている」、「穂先のほうが曲がっている」などの主観的な判別規準によって行われている。

3．曲がり具合の判定手法

アスパラガスの曲がり具合を判定するため、曲がり具合をファジィ論理により導いた後、最終的な判定の部分にニューラルネットワークを用いた。手順は以下の通りである。

(1)アスパラガスの輪郭線抽出

まず、アスパラガスの外形の特徴を得るために、画像データに対して、微分処理を施し輪郭線抽出を行う。

アスパラガスの形状のうち茎部の長辺の２本の輪郭線はほぼ平行であり、曲がりがあっても一方の曲がりが特に大きいということはない。従って、処理を簡素化するために、茎の一方の輪郭線のみを判定対象として用いる。

(2)曲がりの特徴量

抽出した輪郭線を等間隔に 30 等分（アスパラガスの長さ約 21.5cm で約 7mm 間隔となる）し、これらをセグメント S_n (n=1,...,30)とする。

また、穂先方向から順に S_1 から S_{10} までを上部セグメント、S_{11} から S_{20} までを中部セグメント、S_{21} から S_{30} までを下部

セグメントとして、上部、中部、下部の各セグメントごとに判別規準を置くこととする。

つぎに各部位のセグメント間の角度αの変化量Δαの上部、中部、下部におけるそれぞれの合計を

$$S_g = \Sigma \Delta \alpha_n$$

ただし、$\Delta \alpha_n = S_n$ と S_{n+1} のなす角

とし、曲がりの程度（「大きい」「中くらい」「小さい」）とする。例えば、中部の場合

S_g ＝ 3° 以下 「小さい」
3～8° 「中くらい」
8° 以上 「大きい」

とする。

(3)曲がり具合の表現

上部、中部、下部における Sg の曲がり具合を表現するメンバーシップ関数をそれぞれ定めた。中部に対するメンバーシップ関数を図１に示す。この内部知識は、熟練者による曲がり具合の判定実績値を簡易化したものであり、小さい曲がり(B1)、中くらいの曲がり(B2)、大きな曲がり(B3)の知識としている。

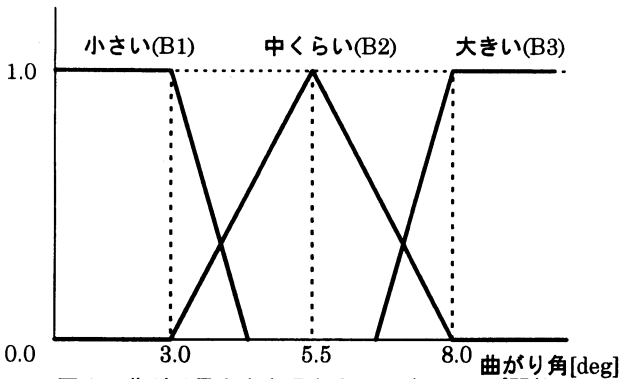


図１ 曲がり具合を表現するメンバーシップ関数
（中部の場合）

(4)曲がり具合の判別

メンバーシップ関数に対して、各部位のマッチング値を取る（表１）。

表１ 各部位の曲がり具合のマッチング値の例

	上 部	中 部	下 部	全体平均
大きい	0.22	0.15	0.18	0.16
中くらい	0.53	0.29	0.11	0.28
小さい	0.33	0.35	0.25	0.52

各部位のマッチング値をもとに総合的な曲がり具合の判定を行うために、３層のニューラルネットワークを用いる。

各部位のマッチング値を入力層の値として、出力層の値により選別の判定（可(p)か否(q)か）とする。ニューラルネットワークの学習方法はＢＰ手法を用いた。

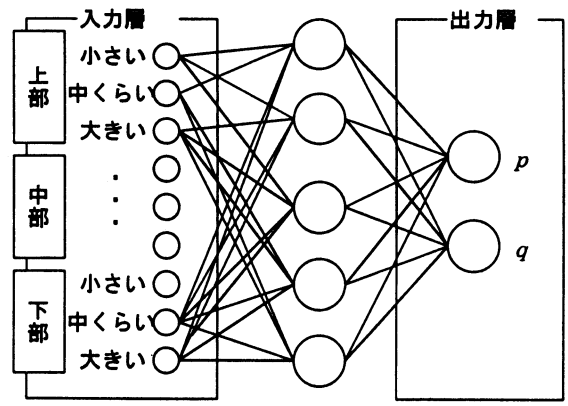


図２ ニューラルネットワークによる総合的な判別

４．実験結果

本手法を用いて、アスパラガス 100 本の曲がり形状の判定を行った。判断方法としては、ニューラルネットワークの出力値において $p>q$ の場合を曲がりが少ないもの、 $p<q$ を曲がりが大きくＢ級品として扱われるものとした。その結果、およそ 90%の正当率（熟練者の視覚による判定に対する割合）を得た。

５．まとめ

アスパラガスの曲がり具合の判別に、ファジィ論理・ニューラルネットワークを用いることの利点は、曖昧な判別規準を数理的に表現できることである。また、農産物は年度により作柄の変化が大きく、判別規準を変える（豊作の場合は判別規準が厳しくなる）必要があるが、このような場合にも判別規準を柔軟に変更させることができる本手法は有効である。

なお、本研究はホクサイテック財団研究開発支援事業の補助を受けたものである。

参考文献

(1)日本ファジィ学会編：「ファジィ画像処理」,日刊工業新聞社,1993

(2)朝倉、上田、日詰：「農産物の画像識別へのファジィ理論の応用」,日本機会学会論文集(C),Vol.59,p.147-152,1993

連絡先

〒060 札幌市中央区北４条西１２丁目
ＪＴＳ 研究部
高柳 浩
TEL:011-261-8045 FAX:011-261-5793
e-mail:PXL00050@niftyserve.or.jp

TB4-2

ファジィ推論とニューラルネットワークによる時系列パターンの識別システム

The Classification System of Sequential Patterns by Fuzzy Inference & Neural Networks

宮沢正明* 石塚晃** 黒沢正明**
Masa-aki Miyazawa Akira Ishituka Masa-aki Kurosawa
菊池浩明* 中西祥八郎*
Hiroaki Kikuchi Shohachiro Nakanishi

* 東海大学工学部
Faculty of Engineering, Tokai University
** 東芝エンジニアリング（株）
Toshiba Engineering Corporation

abstract: It has been a very difficult to recognize the time sequential data or patterns, because these have been useally very complex patterns or data and contained many factors. In this paper, the authors propose a method to recognize the time sequential data or patterns by fuzzy inference and neural networks. The method is mainly composed of two process: (1) a feature extraction process, and (2) a pattern recognition process. We extract the features of time sequential patterns by Kohonen type neural network in first process. In the second process, we use the distributed fuzzy inference system to recognize the patterns from the extracted features. Finally we apply the method to real problems, and show that we can obtain the good results.

1．はじめに

ファジィ理論やニューラルネットワーク等の出現により、データさえあれば先験的知識を必要とせずにそのシステムを比較的容易にモデリングすることができるようになってきた。このような手法を用いてモデリングを行い、モデル化されたものと対象とを比較することでパターンの認識が可能になってきている。しかし動画像データのように複雑で、かつ連続的に変化するようなものはその特徴付けが難しく、パターン認識するには未だ困難な状態にある。

そこで本論文では連続した画像パターンの認識にニューラルネットワークとファジィ推論を用いることにより、人の感覚に近く、かつ精度の高い判別システムを提案する。本システムは特徴付け操作とパターン認識とに大きく分けられる。はじめに、連続した画像データに対して、特徴付け操作を行う。この操作は、特徴抽出とそれらの分類に大別される。最初にデータを画像処理して個々の画像における特徴を抽出する。続いて Kohonen 型ニューラルネットワーク*[1,2]を用いてこれらの複雑な特徴量を自動的に分類する。次に分類された複数の画像における特徴量に関する知識を分散型ファジィ推論*[3]を用いて知識を獲得させる。この獲得した知識と対象の出力とを比較することで連続した画像でのパターン認識を実現する。また、フィールドテストとして実際の動画像データを用いたシステムを構築し、本手法の有用性を示す。

2．システム構成

本システムの構成を図１に示す。本システムは大別して画像の前処理を行う画像処理部と、前処理された画像からパターン判別に必要な特徴量を算出する特徴値決定部と、最終的な判別を行う推論部とから構成される。また、本システムは動画像を認識するための方法として一連の動画像を複数の静止画の集合体として捉え、それぞれの静止画から特徴を取り出し、推論部にて総合的な判断を行わせるものである。

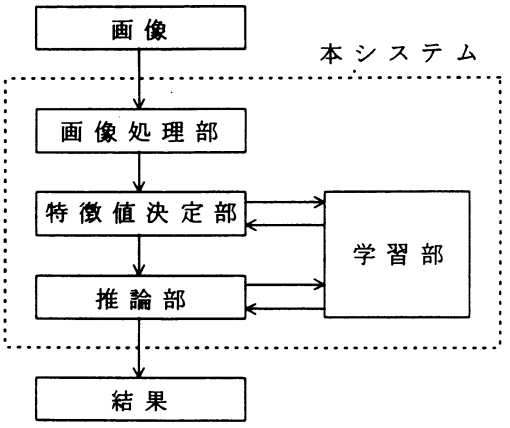


図１　システム構成　概略図

2-1)画像処理部

本システムでは、動画像の入力はCCDカメラを用いて被写体を撮影しVTRなどの記録装置に蓄え、一コマ毎に再生して入力画像として取り扱う。

画像処理部では入力される一コマの画像に対して前処理を行い特徴値を算出する。ここでの特徴値とはパターン認識の対象となる被写体の形状等、判別内容にあわせたものを採用する。この特徴値を得るための代表的な処理としては画像の二値化、空間フィルタ、細線化、論理フィルタなど*[4,5]が考えられる。

2-2)特徴値決定部

画像処理部によって得られた一コマ毎の画像に対する特徴量を用いて、連続された一組の画像における特徴量を決定するために Kohonen 型 ニューラルネットワークを使用する。

Kohonen型ニューラルネットワークの基本的な構造としては、入力層と競合層からなる二層の競合型ネットワークである。ネットワークの説明を簡単にするために入力層のユニット数を1の場合を例にとり説明する。

$$d_{ij}=|e_i-w_j| \quad i=1,2,\cdots,M \ j=1,2,\cdots N \qquad (1)$$

ここで、Mは入力パターン数、Nは競合層のユニット数である。式(1)を用いて、勝者ユニットを決定するために次のような計算を行う。

$$c=\min\{d_{i1},d_{i2},\cdots d_{iN}\} \qquad (2)$$

式(2)よりcとなるw_jに対応するユニットがi番目のパターンにおける勝者ユニットとなる。次に、勝者ユニットの近傍を決める事により重みを更新するユニットを決定する。

$$\delta=\delta_0\{1-(t/T)\} \qquad (3)$$

Tは行うべきすべての訓練回数であり、tは現在の訓練回数である.δ_0は定数である。勝者ユニットからδ以内の距離にあるユニットが近傍となり、この近傍内のユニットの重みのみ更新される。また、図2に示すように隣り合うすべてのユニット間の距離は1として考える。次に、重みは次式を用いて更新量を決定される。

$$w_i^{new}=w_i^{old}+\alpha(e-w_i^{old}) \qquad (4)$$

$$\alpha=\alpha_0\{1-(t/T)\} \qquad (5)$$

ここで、α_0は定数である。

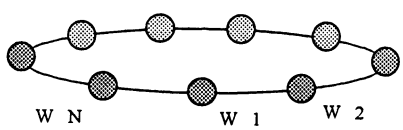


図2 ユニット間の距離

2-3)推論部

特徴値決定部において求められた動画像の特徴値よりパターンを認識する推論システムを構築する。ここでは分散型ファジィ推論*[3]を利用する。

分散型ファジィ推論とは、ファジィIf-Thenルールの生成における問題点を解決する推論方式である。ファジィ識別システムの性能はファジィ分割の仕方に大きく影響する。非常に細かい分割の場合には、学習用データに対しては高い識別能力を示す。しかし、未学習データにおける性能が低くなってしまう。それに対して、非常に粗いファジィ分割を用いた場合には、全体的に曖昧になってしまうために複雑なパターンの識別を行うことが出来なくなってしまう。そこで、これら二つの長所を生かしたものが分散型ファジィ推論といえる。つまり、分割の粗いファジィ推論と分割の細かいファジィ推論を同時に用いることにより非常に高い能力の判別システムを構築することが可能なのである。

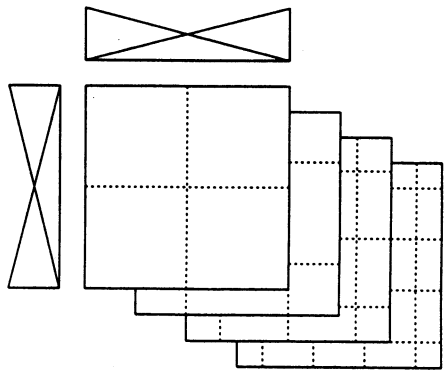


図3 分散型ファジィ推論

ここでは入力空間を2次元平面とし、分散型ファジィ推論について以下に示す。学習用データとしてはM個のグループ$(C_1,C_2,\cdots,C_M)$に分けられたm個の入力パターン$x_p=(x_{p1},x_{p2})$ p=1,2,…,mである。2次元パターン空間の各次元がK個のファジィ集合に分割されているとし、次のような三角型のメンバーシップ関数を用いる。

$$\mu_i^K(x)=\max\{1-|x-a_i^K|/b^K,0\} \ i=1,2,\cdots,K \qquad (6)$$

ここで、a_i^Kは三角型ファジィ集合の中心、b^Kは中心から両端までの距離である。

$$a_i^K=(i-1)/(K-1) \ i=2,3,\cdots,K \qquad (7)$$

$$b^K=1/(K-1) \qquad (8)$$

上の条件の基で手続きによりファジィルールの生成を行う。

$$\beta_{ct}=\sum_{p\in Ct}\mu_i^K(x_{p1})\,\mu_j^K(x_{p2}) \ t=1,2,\cdots,M \qquad (9)$$

$$\beta_{cR}=\max\{\beta_{c1},\beta_{c2},\cdots,\beta_{cM}\} \qquad (10)$$

式(9)により求められるβ_{cR}を用いて、式(10)により最大値を決定する。

$$C_{ij}^K=C_R \qquad (11)$$

これによって得られたC_{ij}^Kがルールの結論となる。また、

2つ以上の最大値をとる場合にはルールはtの小さなものを採用した。

$$CF_{ij}^{K}=|\beta_{CR}-\beta|/\sum_{i=1}^{M}\beta_{Ci} \quad (12)$$

$$\beta=\sum_{i=1,\ Ci\neq CR}^{M}\beta_{Ci}/(M-1) \quad (13)$$

ここで、CF_{ij}^{K}はC_{ij}^{K}における確信度とする。それぞれファジィの分割数に対する確信度を求め、学習の終了とする。

次に、学習されたルールとそのときの確信度を利用して未学習データにおける判別を行う。

$$\alpha_{Ci}=\max\{\mu_{i}^{K}(x_{P1})\cdot\mu_{i}^{K}(x_{P2})\cdot CF_{ij}^{K}\} \quad (14)$$

$$\alpha_{CR}=\max\{\alpha_{C1},\alpha_{C2},\cdots,\alpha_{CM}\} \quad (15)$$

ここで、C_Rが一意的に決定することができる場合は未学習データX_pはグループC_Rであるとする。また、2つ以上が最大値になる場合にはC_tの小さいものを採用する。

3．フィールドテスト

3-1)鋼材判別

本システムの有用性を示すために実データによるシミュレーションを行った。実データとして、鋼材をグラインダーで削った時に連続的に発生する火花（動画像）を使用した。これは、鋼材の品質管理などに利用されているもので、物質含有量が異なる鋼材が形状の異なる火花を発生する事に着目したものである。判別する鋼材として炭素量の異なる１０種類について実験を行った。

まず、CCDカメラにより火花画像を入力する。図４は入力される火花画像のイメージを表したものである。図４からもわかるように火花画像は光の流線と破裂が複雑に交錯した画像である。そこで、まず最初に入力された画像において破裂点を求め、その破裂点における特徴量を算出する。特徴量としては、火花の破裂点の形状、大きさや複雑さを示す二つのパラメータを選択した。

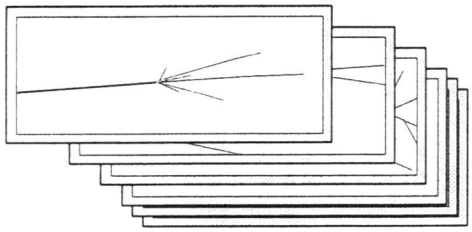


図４　入力画像のイメージ図

画像処理部において算出された火花の破裂点の特徴量をKohonen型ニューラルネットワークにより３種類に分類させる。Kohonen型ニューラルネットワークの学習データとして各鋼材より１０データをとり、１０種類の鋼材におけるデータに関する合計１００種類の特徴量を用いた。図５にシミュレーションの結果を示す。図５において領域A,B,Cはそれぞれ Kohonen型ニューラルネットワークによって分割された特徴領域を示している。

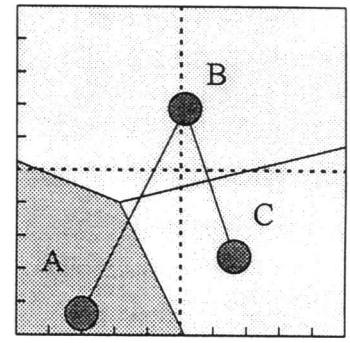


図５　kohonen型ニューラルネットワークの識別結果

学習の完了した Kohonen型 ニューラルネットワークに一定時間の火花画像を入力することによって、連続した画像(動画像)における特徴量を算出する。動画像データとしては、２０フレーム(２秒間)を一つの集合としている。図６は Kohonen型ニューラルネットワークによる特徴抽出のイメージを示したものである。

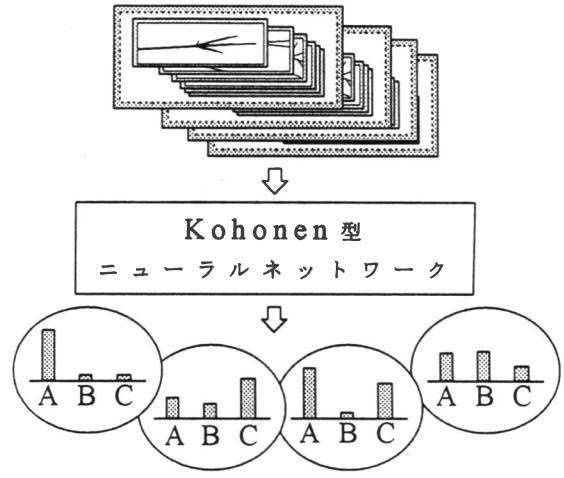


図６　特徴抽出部

特徴抽出部により算出された３次元のデータを分散型ファジィ推論によって１０種類に判別する。図７は分散型ファジィ推論において生成されたファジィルールの例であり、ファジィ分割 K を２の場合と３の場合についてのファジィルールとそれにおけるルールの確信度とを表している。

図７において表記を簡略にするために各辺に対応する入力をA,Cの２つとし、Bについては入力が０の場合

について表している。分散型ファジィ推論の学習用データとして各鋼材毎に１３０パターンとし、鋼種が１０種類であるので合計１３００パターンを使用した。また、ファジィ分割はA,Cの２次元においてはＫ＝２～８０、Bにおいて Ｋ＝８を固定として学習を行った。Ｋ＝３の７番のユニットはそのファジィルールにおけるメンバーシップ関数内に全く入力がなかったためにルールが存在しなくなっているのである。

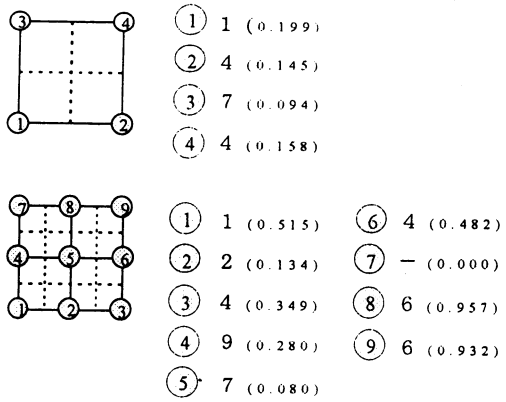


図７ 生成されたファジィルール
（括弧内は確信度）

3-2)結果

本システムに鋼材検査の実データを用いて、鋼種の判別を行った結果を表１に示す。

表１ 判別結果

鋼材の種類	学習用(130)		評価用(270)	
	正答数	正答率	正答数	正答率
No. 1	123	0.946	253	0.937
No. 2	102	0.785	178	0.659
No. 3	108	0.831	187	0.693
No. 4	116	0.892	209	0.774
No. 5	113	0.869	192	0.711
No. 6	126	0.969	230	0.852
No. 7	123	0.946	219	0.811
No. 8	123	0.946	212	0.785
No. 9	121	0.931	224	0.83
No. 10	119	0.915	217	0.804

表１における鋼材の種類は、炭素の含有量が１０％のものから５％おきに５５％までの１０種類を示している。正答数は入力総数(学習用１３０、評価用２７０)における正解を得たパターンの数であり、正答率は(正答数/入力総数)である。本システム全体における正答率としては学習用において９０．３%、評価用において７８．６％となった。この結果は、火花の画像データを用いた鋼材の判別結果としては、現在のところ充分よい精度ではないかと考えられる。

4．おわりに

本論文では、時系列パターンの識別システムとして、Kohonen型ニューラルネットワークと分散型ファジィ推論を用いた手法を提案し、フィールドテストとして鋼材の火花画像を用いた実データによるシミュレーションを行うことによって、本システムの有用性を示した。シミュレーションの結果としては、学習用データにおいて９割の正答率を得られ、また評価用データにおいてもおよそ８割といった非常に精度の高い判別システムであると考えられる。

本システムにおける問題点としては、画像処理部においては破裂点の検出の精度向上や特徴抽出の方法改善が考えられる。また、ファジィ推論において特徴値が非常に似通った値をもつためにファジィルールが必要以上に多くなってしまい、処理時間等に影響を及ぼしてしまう結果となっている。

今後の方針としては、画像処理部、特徴値決定部を改善することで判別精度の向上を図るとともに、ファジィ推論部において推論器の改良によるシステムの高速化を図ることの２点が考えられるであろう。

参考文献

(1)石原、高木、中西：Kohonen型ニューラルネットワークを用いたファジィ推論の構成　第９回 ファジィシステムシンポジウム　講演論文集 pp.425-428 (1993)

(2)石原、高木、中西：Kohonen型ネットワークと GA を用いたファジィ推論　第９回ファジィシステムシンポジウム　講演論文集 pp.129-132 (1993)

(3)Ｊ．デイホフ:ニューラルネットワークアーキテクチャ入門　森北出版株式会社

(4)石渕、野崎、山本、田中：遺伝的手法によるファジーIf-Thenルールの選択　電子情報通信学会論文誌 A vol. J76-A No.10 pp.1465-1473 (1993)

(5)田村秀行：コンピュータ画像処理入門　総研出版

(6)田中 弘：画像処理応用技術　工業調査会

［連絡先］
〒259-12 神奈川県平塚市北金目1117
東海大学工学部電気工学科　中西研究室
宮沢正明
Tel: 0463-58-1211　Ext. 4025
Fax: 0463-59-4025
Email: 40epm027@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

TB4-3

GPSおよび画像情報を用いたヘリコプタの着陸制御
GPS and Image guided landing of an Unmanned Helicopter

平野勲　古津悟　菅野道夫
Isao Hirano　Satoru Kotsu　Michio Sugeno

東京工業大学 システム科学専攻
Department of Systems science Tokyo Inst. of Technology

Abstract:

We have proposed a fuzzy control system for an unmanned helicopter since 1988, and succesed to fly the helicopter in some flight modes. We report that we have developed new system for unmanned helicopter using fuzzy controller. In order to suport a helicopter pilot, we also have introduced the Guiding system by GPS and Image information. The efficiency of this system has been verified by experiments.

1　はじめに

ヘリコプタは垂直上昇・後進・空中停止など、他の飛行機に比べて優れた飛行性能をもつため、山間部の低空やビルの谷間などの危険な環境下での飛行に使用され、近年その需要は高まってきている。

しかし、視界の悪い状態においての飛行での墜落事故も多数報告されている。これは、ヘリコプタがその特性上熟練を要するためと、特に日本においては、地形、環境の上で良好な視界を得られない場合があるだけでなく、ヘリコプタの管制飛行はおこなわれていないため、あくまで有視界飛行に頼らざるを得ないという事情もある。

本研究では、CCDカメラからの画像を用いて無人のヘリコプタの自動飛行および地上目標に対しての自動着陸といった着陸誘導システムの開発をおこなった。

なお制御器としては、過去菅野研究室での無人ヘリコプタに関する研究 [1][2][3][7] において開発されてきた階層型構造化ファジィ制御システムを使用した。

とくに、[7] においては、GPSからの位置情報を利用して、目的位置への飛行および目的経路に沿った飛行を可能にするナビゲーションシステムの構築を目的にそれぞれの階層に関して改良が行なわれている。

これらのガイディングシステムによりパイロットの有視界飛行における負担を軽減できると考える。

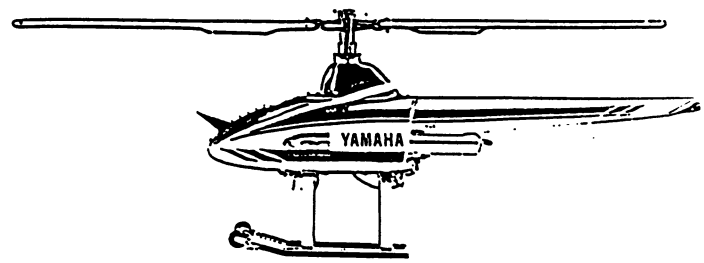


図 1: YAMAHA R-50

2　ヘリコプタ

制御対象とするヘリコプタは、シングルロータヘリコプタと呼ばれる構造のものである。これはメインロータで推力を発生し、テールロータでバランスをとっている。機体は3軸6自由度を持ち、自由な運動をすることができる。

ヘリコプタの操縦では、ロータの推力・機体に働く重力・空気抵抗力の3つの力とモーメントの総和が釣り合った平衡状態を見つけなければならない。この平衡状態における姿勢角と操作量の組をトリムという。トリムは、風・機体重量・飛行状態などによって変化する。このトリムを探すことがヘリコプタの操縦には重要であり、難しくしている要因の1つとなっている。このような平衡状態など、ヘリコプタの詳しい解析については、文献 [4] 参照。

ヘリコプタの詳しい解析については、文献 [4] 参照。

ヘリコプタは多自由度で変数が多く、平衡状態も大きく変わるため、制御のための数理モデルを構成するのが難しい。

ヘリコプタは以下のようなさまざまな飛行状態（飛行モード）をもっている。

ホバリング
前後進・左右進
ホバリングターン
旋回
上昇・下降
離陸・着陸

これらの飛行状態はそれぞれ違う動特性を持っている。そこで、ヘリコプタの飛行制御に関して次章で述べる、ファジィ制御器で対応している。画像情報による着陸誘導に関してはヘリコプタのファジィ制御器にそれぞれの動作に対応したコマンドを送信する方式をとっている。

3 制御系の構成

無人ヘリコプタの制御系には、階層型構造化ファジィ制御システムを用いた。階層化は、ヘリコプタの持つ動特性と平衡状態が変化するという性質に対応するためである。また、ヘリコプタの数理モデルは、時変かつ複雑で求めにくい。そこで、熟練者の知識を利用できる、ファジィ制御を用いてきた。

なお、ヘリコプタ自体のファジィ制御器として、平野氏の研究 [7] により

- 上位層の構造の体系化。
- 下位コントローラの増設、改良。

のような各改良が行なわれたファジィ制御器を使用した。ただし、CCD カメラによる着陸制御の際は、GPS による位置情報は用いていない。

制御器の構成図を図 2に示す。制御器は、上位と下位に階層化し、それぞれを構造化して設計されている。

4 着陸誘導システム全体の概要

本研究で使用したシステムについて説明する。また、着陸目標となる着陸場は

- 長方形（縦 5.0m、横 10.0m）でコンクリート製、白色。
- ランドマーク（直径約 1.8m の赤く塗りつぶした丸印）が描いてある。

とした。

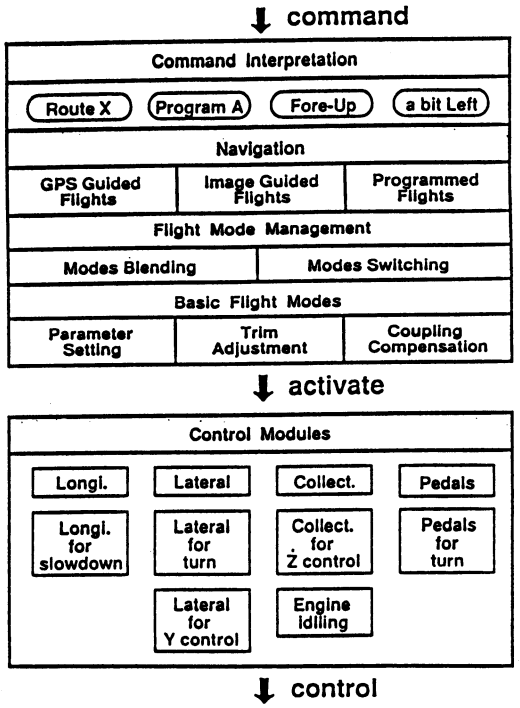


図 2: 制御器の構成

4.1 システム構成

本システムはヘリコプタ搭載部と地上処理部の 2 つの部分からなる。次ページにその概要図を示す。

ヘリコプタ搭載部はヘリコプタの飛行制御のためのファジィコントローラ、CCD カメラ、カメラ駆動用のサーボモータ、そして CCD カメラの映像とヘリコプタのセンサ出力を地上に送る 2 種類の送信器からなる。

地上処理部にはテレビ受信器、テレメータ受信器、画像処理ボード（CPU,DSP × 3, フレームメモリなどからなる）、処理した画像情報と高度、姿勢角から判断しコマンドを導き出すコンピュータ、そして、コマンドを送信するプロポからなる。

ヘリコプタの飛行制御のためのファジィコントローラはすでに開発されたものを用いる。高度、および姿勢角に関してもヘリコプタ本体の飛行制御使用されているものを送信し、それを地上処理部分で変換してもちいている。本研究では、地上処理部の画像処理システムの開発と処理した画像と高度、姿勢角からヘリコプタとカメラへの指令出力を選択する制御プログラムを開発をおこなった。

システムの構成を、図 3に示す。

4.2 ヘリコプタにおける画像処理について

ヘリコプタは空中を飛行するものであり、飛行制御のための制御器は速度を目標値としており、速度 0 を目標値とするホバリング中でも風に流されるなど、そ

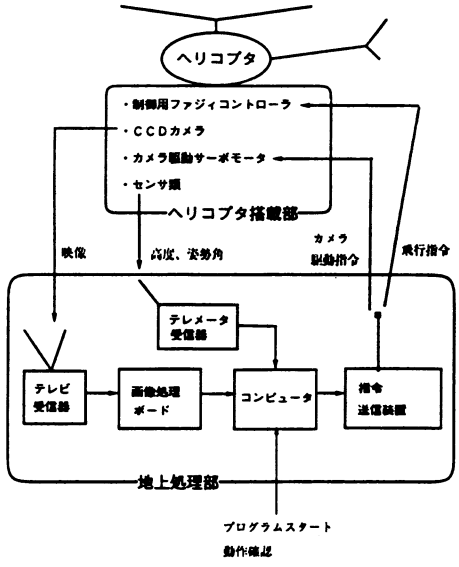


図 3: システム構成

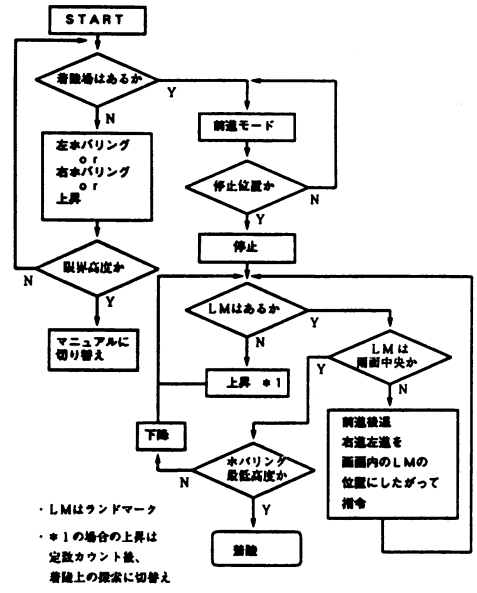


図 4: 着陸までの流れ図

の位置は一定しない。このため、たとえランドマークの真上に飛来し、真下にランドマークがあると認識しても、それまでに機体が流され着陸場所を見失ってしまうことになる。よって、画像処理をおこない、ヘリコプタに飛行指令を送るまでの処理時間は短い必要がある。そのため、処理の重くなる

領域の抽出段階でランドマークのみを抽出する必要がある。また、ランドマークが小さく映り、認識が不可能となる場合には着陸場全体の検出することで対処している。ランドマークを赤い丸印としているのでランドマーク領域の抽出を赤色の抽出をすることでおこなっている。着陸場に関しては白色にしてあるため、明度の高い領域を抽出している。

さらに、ヘリコプタにおいて3次元平面内での目標認識はその姿勢角、CCDカメラの仰角によって困難になる（画面内の対象の変形など)。そこで、前述のピッチ角や高度など、テレメータで送られてくるデータにもとずいたテンプレートを作成する。画面内の抽出した対象が目標としてそれにマッチングするかを調べることで着陸目標を決定する。

4.3 着陸までのながれについて

着陸までのヘリコプタへの着陸指令およびカメラへの駆動指令については以下のように設計した。

まず、設定した一定高度まで離陸する。このときカメラは４５度で着陸上を探す。発見できなかった際には右ホバリングターンをおこない探索する（ただし１８０度まで)。さらにない場合は機首を元の位置まで戻し、そこから左ホバリングターンをおこなう（ただし１８０度まで)。それでも発見できなった場合には高度を１～２ｍあげ、同様に探索をおこなう。ただし高度制限をつけて、それを越えると探索を中止する。もし発見した場合は前進の命令を送り、画像内のので定位置に来たときにストップさせ、カメラを真下に下げランドマークを探すのに切替える。

ランドマークを発見したら、画面内の位置によって前後左右に動きながら、画面の中央にランドマークの重心が来るようにし、ホバリング最低高度なら着陸命令を出す。もし、それ以前に高度を上げているなら、高度を１～２ｍ下げる命令を出し、再びヘリコプタがランドマークの真上に来るように動かす。これを着陸まで繰り返す。途中で見失った場合には高度を上げ探索する。

以上の流れを図4に示す。

5 実機実験

使用した機体はヤマハ発動機製の産業用無人ヘリコプタＲ５０である。全長３５８０ｍｍ、ペイロード２０Ｋｇである。

センサー信号は，3方向姿勢角・3方向角速度・3方向速度・3方向加速度・および高度の合計１３である。これらを計測し4つの操作量を出力する。さらに、ヘリコプタに搭載したCCDカメラからの画像情報とピッ

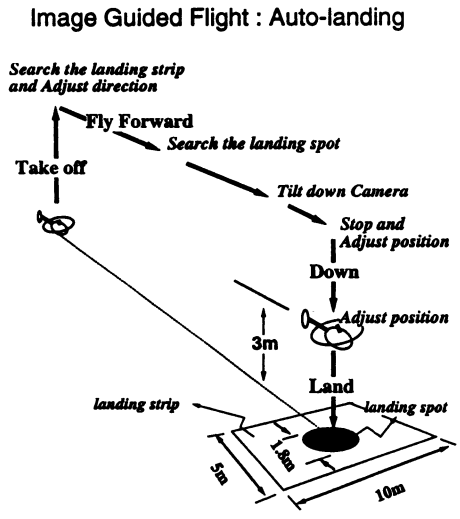


図 5: 画像による着陸誘導

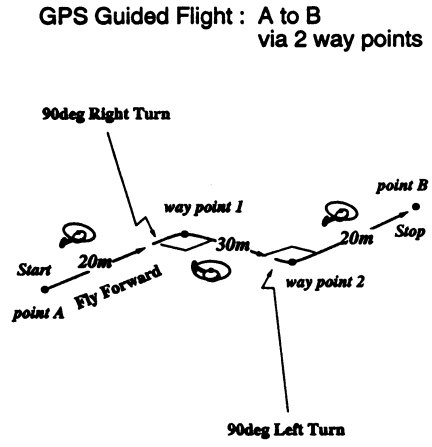


図 6: GPS による誘導飛行

チ角、高度よりヘリコプタに送信するコマンドを決定する。

実験は、図 5のテストフライトを行なった。5回中4回がランドマークにヘリコプタの機体がかかる位置に着陸した。

また、平野氏の研究における GPS による誘導飛行の図 6を示す。テストフライトでは2つの経由点を通過し機体方位の制御も良好であることを示した。

6 結論

高度、姿勢角といった状態変数と組み合わせることで画像情報が着陸誘導に有効であることを確かめた。

このことは、GPS による誘導とあわせて画像情報をもちいた着陸誘導で、ヘリコプタの有視界飛行におけるパイロットの負担を減らせると考える。

参考文献

[1] 百武友幸, 室伏俊明, 菅野道夫. "シミュレータ上でのヘリコプターのファジィ制御". 第7回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.35-38, 1991.

[2] 西野順二, 三輪英昭, 菅野道夫. "無人ヘリコプタのための階層型ファジィ制御システム". 第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.53-56, 1992.

[3] 斎藤裕士. ファジィ理論を用いた無人ヘリコプタの飛行制御. Master's thesis, 東京工業大学, 1993.

[4] 加藤, 今永. ヘリコプタ入門. 東京大学出版会, 1985.

[5] 赤木宏文. 無人ヘリコプタの知的飛行制御. Master's thesis, 東京工業大学, 1994.

[6] 小澤宜信. 画像情報による無人ヘリコプタの位置制御. Master's thesis, 東京工業大学, 1994.

[7] 平野勲. GPS 情報を利用した無人ヘリコプタの知的飛行制御. Master's thesis, 東京工業大学, 1995.

問い合わせ先：〒227
横浜市 緑区 長津田町 4259
東京工業大学システム科学専攻
菅野研究室内 古津 悟
Tel 045-924-5645
Email: kotsu@sys.titech.ac.jp

TB4-4

ThornberのFidelityを半順序関係の連鎖に適用することによる手書文字認識への応用

Application of Thornber's Fidelities in Chains of Partially Ordred of Relations for Recognition Handwritten Characters

磯部 光朗
M. Isobe
N E C
N E C Corp.

Abstracts:Thornber's Fidelity is applied to the scheme for recognizing handwritten characters described by Koike and Isobe, in UD6-2, the Proceedings of 8th Fuzzy Systems Symposium .

In this study, FSM is replaced by the new chains which is deduced from conventional chains expressing partially ordered relations by checking the effectivity in them on the standing point of Fidelity, and the definition of similarity is simplified by the considering the effectivity of feature variances in chains.

1. Preface

Conventional methods for recognizing handwritten characters are based on analizing geometrical features.

Apparently , psychological background of human insight has important influence on recognition of handwritten characters.

In other words, intuitional approcach should be tried.

Assumptions:

(1)Partially ordered relations between features for recognition described by linguistic labels are to be found.

(2)Physical values according to this linguistic labels are to be defined.

Proposals in this study are as follows:

(1)Template is not FSM ,but effective chains based on Thornber's Fidelity[1][2].

(2)Similarity is proposed ,which extends differences between very similar characters,and is much simpler than former scheme based on FSM[3].

2. Scheme

Human institution at recognizing is modelled by linguistic descriptions and partial orders between them.

S:linguistic label

Example of labels:

S1:Horizontal stroke as long as the width of the character is dominant at the upper portion.

S2: Spot-like stroke is clear on the left corner at the bottom.

{Sk} is obtained character by character.

There are some differeces as psychological contributions for correct recognition between the above-mentioned labels.

Pairwise comparrisons between any pairs taken from {SK} give the matrix, [degree of partial order between{Sk}](which is abbreviated as [Sk]),which shows its own structural pattern, and may be call "template".

In this study ,[Sk] is not converted into FSM, but into partially ordered chains by Thornber's fidelity[1][2].

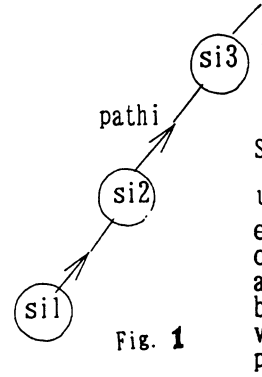


Fig. 1

Sij:"j"th S on path i

u(si):result of measurement onSi

ei:degree of effectiveness as chain of path i

ai.。:degree of partial order between Si.and Si。

vi:degree of contribution by path i as for result of measurement

fi:fidelity along path i

$ei=\{ai1+ai2+\cdots+aim\}\cdot fi/mi$ (1)

$vi=ei\cdot\{u(si1)+u(si2)+\cdots+u(simi)\}/mi$ (2)

$V(\alpha|x)=\{v1+v2+\cdots+vn\}/n$ (3)

where,V:evaluation as character α of input data x

Similarity which expresses the degree of recognizability for"x" as A is :

$D(A|x)=V(A|x)/V(A|A)$ (4)

In (4), if x=A :D(A|x)=1,

if x is far from A :D (A|x) is near 0 .

3. Example[3]

Character α is "チ", and x is "テ".

Partially ordered relations of linguish labels is as follows, and

si is observed as u(si|α), or u(si|x).

s 1 :horizotal stroke at the top

s 2 :vertical stroke at the top

s 3 :horizotal stroke in the middle

s 4 :vertical stroke in the middle

s 5 :jointing horizotal stroke at the top and vertical stroke in the middle

s 6 :crossing horizotal stroke in the middle and vertical stroke in the middle

s 7 :no clearance between jointing strokes

$P(\alpha)=$

	s 1	s 2	s 3	s 4	s 5	s 6	s 7
s 1	0	0	0.9	0	0	0.9	0.9
s 2	0.5	0	0.9	0.5	0	0.9	0.9
s 3	0	0	0	0	0	0	0
s 4	0	0	0.5	0	0	0.7	0.5
s 5	0.5	0	0.7	0.5	0	0.9	0.9
s 6	0	0	0	0	0	0	0
s 7	0	0	0	0	0	0	0

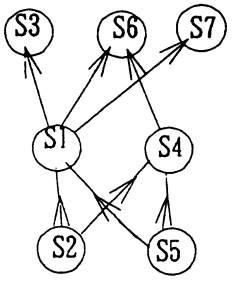
u(s1|チ) = 0.6 u(s5|チ) = 0.7 u(s1|テ) = 0.9 u(s5|テ) = 0.7

u(s2|チ) = 0.6 u(s6|チ) = 1 u(s2|テ) = 0 u(s6|テ) = 0

u(s3|チ) = 1 u(s7|チ) = 1 u(s3|テ) = 1 u(s7|テ) = 0

u(s4|チ) = 0.8 u(s4|テ) = 0.5

all chains fidelity>0 are picked up



FSM Fig. 2

D(チ|テ) = V(チ|テ)/V(チ/チ)=0.58

Thornber's Fidelity

V(チ|チ) =4.468/24

V(チ|テ) =2.864/24

D(チ|テ)= V(チ|テ)/V(チ|チ)=0.64

4. More simplified approach

Formula(1) is replaced by (5), considering author's study [2]which is directly deduced from Thornber's proposal[1][2]:

$Eilm=\{(ail+aim)/2\}fi$ (5)

$wi=Eilm\cdot\{u(sil)+u(si2)+\cdots+u(simi)\}/mi$ (6)

Example:Taking the same conditions as above , the result is the same, because chain length is 2.

Thus, it is easy to reach the idea that simplified approach is to be applied to 1st stage for recognition, and if this stage does not show explicit result, the method with full arcs should be performed.

5. Prospect for study

As above-mentioned, linguish modeling once found, similarity could be simply estimated.

Main problem might be forming linguish modeling rather than such structual estimation asour trial.

The auther would like to try to study linguish modeling from psychological standing points.

References:

1. K. K. Thornber:"The Fidelity in Fuzzy-Logic Inference", IEEE Trns. on Fuzzy Systems, Vol. 1(4), pp. 288-297, '93.

2. M. Isobe, K. Takahashi& H. Koike:"An Application ofThornber's Fidelity(Abstracting effective oriented graphs from Connection Matrix)", SB2-1, Proc. 10th FSS. '94.

3. H. Koike & M. Isobe:"An Application of FSM to theon of Handwritings", UD6-2, Proc. 8th FSS. '92.

連絡先
〒108-01東京都港区芝5丁目7-1
N E C 制御システム事業本部
磯部光朗
Tel 03-3798-9603
Fax 03-3798-9544
PCMail:VGT40481pcvan.or.jp

TC1-1

カオス的データの短期予測における局所ファジィ再構成法のチューニング

Tuning for Local Fuzzy Reconstruction by Short-term Prediction on Chaotic Time-series

松本 義之* 黒田 賢一 和多田 淳三**

Yoshiyuki Matsumoto Ken-ichi Kuroda Junzo Watada

*関西女学院短期大学 **大阪工業大学

Kansai Jogakuin Junior College Osaka Institute of Technology

Abstract − **In this paper a method to forecasting a near future result in the basis of caotic time-series data is proposed.The information related to the caotic time-series data and the local reconstruction based on fuzzy reasoning are employed to make the error of the forecast much lower than a conventional method analyzing caotic data. The fuzzy reasoning method is employed to forecating using past results. The membership functions of fuzzy reasoning are tuned by genetic algorithm. Our method is shown effective by being applied to forecast the near future price of Nikkei bonds.**

1.はじめに

近年カオスchaos〔keias〕[1]理論の研究が注目されており，その応用としてカオス的振る舞いをする時系列データの短期予測問題[2]がある．これは，従来ノイズ，あるいは規則性の無いものと考えられていた事象に，何らかの決定論的規則性を見い出し，その近未来の状態を予測しようとするものである．この予測手法は，観測された時系列データをTakensの埋め込み定理[3]により多次元状態空間に再構成し，最新に観測されたデータを含むデータベクトルの近傍ベクトルを用いて局所再構成により短期予測を行うものである．しかし，この手法を用いても，予測が困難な時系列データが数多く存在する．本研究では，その時系列データの変動に何らかの関係がある別の時系列データを考慮することにより，予測困難な時系列データに対する予測精度を向上させることを目的とする．

2.カオス理論と予測

カオス理論を用いることによって，ある時系列データからそのデータがもっている決定論的規則性を見つけ出し，ある時点のデータからそれが十分に影響を及ぼす程度の近未来のデータを予測することが一般的な目的である．しかし，カオス理論を用いる真の理由は，変動が激しく，非周期的な時系列データを，高い精度で予測することである．この予測は，「高次元力学系の軌道はその中の任意の1成分座標（変数）の情報（時系列データ）だけから再構成できる」というタケンスの理論に基づいている．次にタケンスの理論を述べる．ある時系列データ{x(t)}から，ベクトル（x(t), x(t−τ),x(t−2τ),･･･,x(t−(n−1)τ)）をつくる．ここでτは，任意の時間間隔を表す定数である．このベクトルはn次元空間（データ空間）上の1点を示すことになる．従って，tを変化させると，このn次元データ空間上に軌道が描ける．この軌道は，nを十分大きくとればもとの高次元力学系の軌道を滑らかに変形したものになっている．つまり，もとの力学系になんらかのアトラクタが現れているならば，データ空間上にはこのアトラクタを変形したアトラクタが出現することになる．言い換えると，もとの力学系アトラクタがn次元位相空間の中に埋め込まれることになる．nは通常「埋め込み次元」と呼ばれるが，この次元は，もとの力学系の次元をmとすると，

$$n = 2m + 1$$

にとれば十分であることが証明されている．ただし，これは十分条件であって，データによっては2m＋1未満でも埋め込みができる場合がある．短期予測の実用上は通常3～4程度で十分な場合が多い．

次に，このようにして再構成された軌道を用いて決定論的規則を記述する．これには幾つかの方法があるが，ここでは次に示す方法を用いる．

①等時間間隔（t）で観測された離散型時系列データ（図1）を，埋め込み次元n，時間間隔τで，n次元の位相空間に図2のように写像する．すなわち，写像されるのは次のベクトルである．

Z(t)=(x(t),x(t−τ),x(t−2τ),･･･,x(t−(n−1)τ))

②いま，最新の観測データを含むn次元位相空間上に写像されたベクトルをz(i)とすると，n次元空間におけるz(i)の近傍にプロットされたデータは図3のように

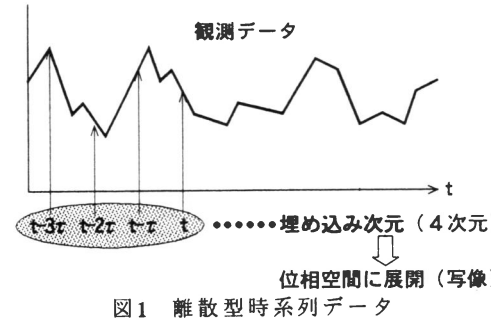


図1 離散型時系列データ

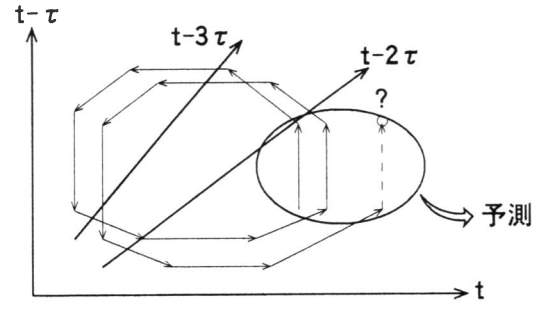


図2 観測された時系列データx(t)がn次元位相空間に写像されたデータZ(t)

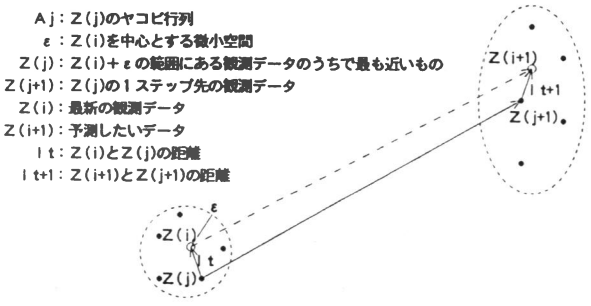


図3　短期予測手法の図解

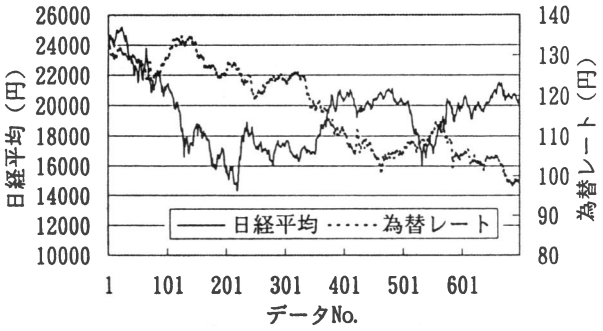


図4　実データ

示される．ところがこれらのデータは，その挙動が図3に示すようにすでにわかっている．これを利用してz(i+1)を予測するものである．

3.関連データの同時埋め込み法

ここでは，カオス理論による短期予測について，予測精度を向上させるための方法を提案する．従来のカオス短期予測においては，予測したい時系列データを，Takensの埋め込み定理に基づいて，再構成状態空間にアトラクタの再構成を行い，このアトラクタを基に予測を行っていた．しかし，予測対象によっては，再構成されたベクトルが十分にカオス的振る舞いをせず，その結果予測がうまくいかない場合も多い．そこで，本研究では，予測したい時系列データに影響を与えると思われる他の関連時系列データを同時に埋め込み，アトラクタを再構成させることにより，予測の精度を上げようというものである．例えば，当時間間隔tで観測された離散型時系列データyの短期予測を行いたい場合，yに影響を与える別の離散型時系列データxも同時に観測する．そして，この二つの時系列データから一つのベクトル

$$Z(t)=(y(t),y(t-\tau),\cdots\cdots,y(t-(n-1)\tau)),$$
$$x(t),x(t-\tau),\cdots\cdots,x(t-(m-1)\tau))$$

を作成する．そして，埋め込み次元 n，m，時間間隔 τ で，(n+m)次元の位相空間に写像する．

このようにして写像されたベクトルに対し，tを変化させてn+m次元空間上に軌道を描く．このようにして描かれた軌道は，元の二つの時系列データのアトラクタを滑らかにしたものになっているはずである．この二つのデータに何らかの関連があるならば，一つの時系列データで描いた軌道よりもより強いアトラクタが現れてくると考えられる．そこで，n+m次元空間におけるz(i)の近傍にプロットされたデータの挙動を利用してz(i+1)を求め，y(i+1)を予測する．本手法を用いると，従来の一つの時系列データによって予測を行う手法よりも，予測精度が向上する．

3.1 東証・日経平均の短期予測

本手法を用いて，短期予測のシミュレーションを行った．ここでは，予測データとして東京証券株式市場の日経平均値，同時に埋め込む関連データとして円－ドルの為替レートを使用した．本シュミレーションでは，どの程度の予測精度が得られるのか，また関連データを組み込んだ場合，組み込まなかった場合に比べて，どの程度予測精度が向上するのかなどを検証する．

本シミュレーションで使用したデータを図4に示す．このデータは1991年9月30日から1994年7月29日までの698個のデータである．今回のシミュレーションでは，前半部分の598個のデータを用いて，後半部分の100個のデータの予測を行った．

3.2 予測手順

この二つの時系列データは，不規則な動きをしているが，これはカオス理論における不規則振動のデータにはなっていない．そこで本研究のシミュレーションでは，この二つのデータの差分，すなわち前日のデータから今日のデータを差し引いたものを今日の値として採用している．さらに，両者のスケールを合わせるため，平均0，標準偏差1になるように正規化を行った．この作業により，図4のようなデータを図5のような振動のデータに変換することができる．

このデータを元にして，日経平均のデータをn次元，為替レートのデータをm次元，時間間隔 τ =1日として，一つのベクトルを作成する．そして，このベクトルをn+m次元空間に写像する．写像されたベクトルに対し，時間tを変化させてn+m次元空間に軌道を描く．今回の場合は，598個のデータを使用して，n+m次元空間に軌道を描いた．この軌道が描かれたn+m次元空間上に予測を行いたいデータから作成したベクトルを写像する．この写像されたベクトルの近傍にある他のベクトルから1日後の値を予測するのである．

具体的に述べると，例えば，日経平均5次元，為替レート2次元の合計7次元空間に埋め込んで予測を行うとする．この時，1994年7月1日のデータから，7月2日の値を予測したいとする．この7月1日の日経平均のデ

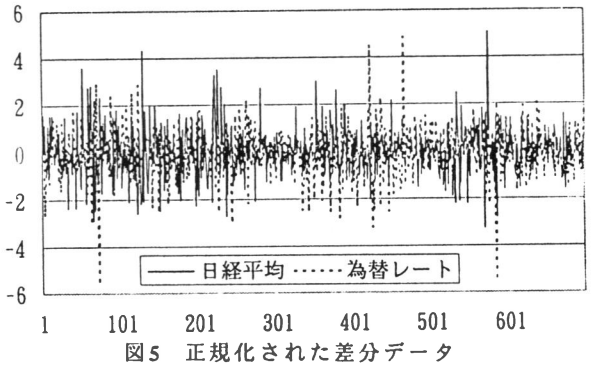


図5　正規化された差分データ

ータをy(0)，為替のデータを x(0)とすると作成されるベクトルZ(0)は，Z(0)=(y(0),y(−1),y(−2),y(−3),y(−4),x(0),x(−1))のようになる．まず，このベクトルを7次元空間に埋め込む．そして，すでに埋め込まれている598個のベクトルの中から，このベクトルに最も距離の近いものを三つ選択する．（なお，この距離の計算にはユークリッド空間距離を使用する）このようにして選択された三つのベクトルを$Z(S_1),Z(S_2),Z(S_3)$とすると，この場合の予測値y(1)は次式によって求められる．

$$y(1) = (y(S_1)+y(S_2)+y(S_3)) / 3$$

3.3 予測結果

前節の手順に基づいて，日経平均2〜9次元，為替レート0〜9次元に変化させてシミュレーションを行った．その結果は，図6が示している．このグラフは，日経平均の埋め込み次元が5次元の場合であり，他の場合も概ね同様の傾向を示している．横軸は為替レートの埋め込み次元数，縦軸が予測値と実測値との平均自乗誤差となっている．つまりこのグラフの左端の点（関連データ次元数が0の点）が従来法による予測であり，それ以外が今回提案した手法による予測となっている．このグラフを見ると，関連データの埋め込み次元数を大きくすると予測精度が良くなる．しかし，埋め込み次元数を大きくしすぎると，逆に精度が落ちていく．これは，関連データの埋め込み次元があまり大きくなると，影響度が大きくなりすぎて精度が落ちるためであると考えられる．今回のシミュレーションで最も誤差の少なかったものは日経平均5次元，為替レート5次元であり，この場合の予測したデータの実際の値との平均自乗誤差，相関係数は表1に示すとおりである．又，予測値と実測値の推移を図7に示しておく．

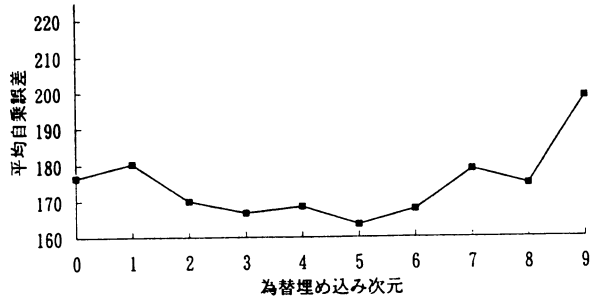


図6　日経平均株価5次元の場合の予測誤差

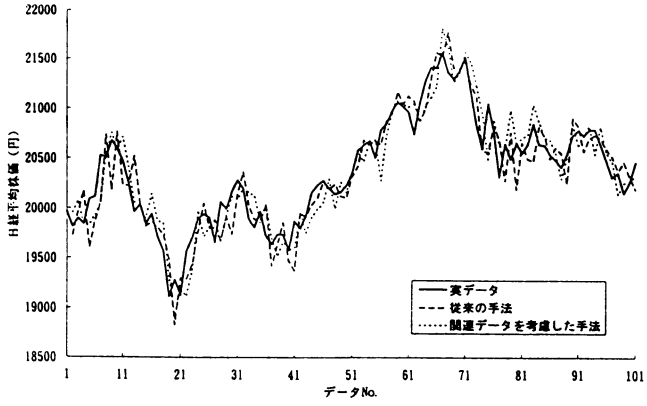


図7　予測結果

4.ファジィ理論を用いたカオス予測方法

本節では，参照する三点に対して個別に重み付けを行い，この予測にファジィ推論を用いている．この方法をとる場合，三点のうちでユークリッド距離が現在の点Z(i)に近いものほど重視する．しかし，このままでは実際にどのような値を与えればよいかは不明であり，試行錯誤によって妥協できるものを得るしか方法はない．本研究では，このようなあいまいな問題に対応するためにファジィ理論を適用し，重みを求めることにした．ここで距離をD，重みをWとすると，これらはすなわち次に示すようなif-then形式のファジイプロダクションルールである．

If D is near then W is big
If D is middle then W is middle
If D is far then W is small

また，このルールに対するメンバーシップ関数は図8に示すものであり，一入力一出力のmin-max重心法によるファジィ推論になっている．各メンバーシップ関数の横軸は，前件部が現在の点から近傍の点までのユークリッド距離であり，経験的に0から3.0に，後件部が求める重みであり，0から1.0に設定している．なお，より良いファジィ推論を行うため前件部のメンバーシップ関数に対してチューニングを行ったが，これについては次章で述べる．前章では，三点の平均を用いていたが，このファジィ推論によって三つの各点Z(j1+1),Z(j2+1),Z(j3+1)に対して現在の点からのユークリッド距離に応じて重みW_1,W_2,W_3をそれぞれ与え，次に示す式によって予測値Z(i+1)を得る．

$$Z(i+1)=\frac{Z(j1+1)\times W_1+Z(j2+1)\times W_2+Z(j3+1)\times W_3}{W_1+W_2+W_3}$$

4.1 予測結果

予測手順は前章に準じる．シミュレーションの結果，平均自乗誤差，相関係数は表1に示すとおりである．

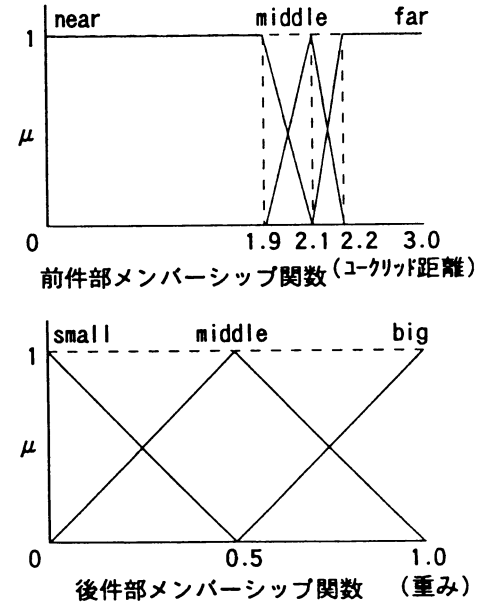


図8　用いたメンバーシップ関数

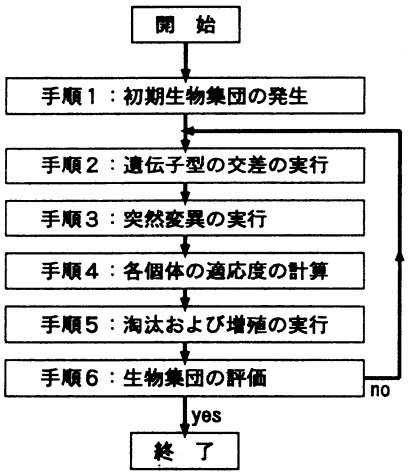


図9　本研究で用いた遺伝的アルゴリズムの処理手順

表1　シミュレーション結果の比較

	平均自乗誤差	相関係数
① 従来のカオス予測	176.4436	0.9198
② ①＋付加情報	163.5320	0.9318
③ ②＋ファジィ理論	159.9855	0.9339

4.2 遺伝的アルゴリズムによるメンバーシップ関数の最適化

ここで用いた前件部メンバーシップ関数は遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行った．この作業は，より良いファジィ推論を行うためだけではなく，本研究のように重み付けの程度が全く不明な場合には不可欠となってくる．メンバーシップ関数の組み合わせに対する予測結果の平均自乗誤差は，これを探索領域ととらえたとき多峰性になっており，一般的な局所探索法である山登り法等では良い解を得ることは難しい．

4.3 シミュレーションに用いたアルゴリズム

用いた遺伝的アルゴリズムは単純遺伝的アルゴリズムで，一点交差，エリート戦略をとる．ここで，用いる個体の遺伝子構造は

α=0.2	β=1.8	γ=2.4

のように，遺伝子が三つで一つの個体を構成しているものである．この三つの遺伝子は左のものから順にメンバーシップ関数のパラメータの三点にそれぞれ相当しており，これらの値がそのまま遺伝子の値となっているところに特徴がある．図9は，処理手順を図示している．遺伝的アルゴリズムの終端判定には，集団に属する全ての個体が同一の遺伝子を持つ場合に終了する方法をとっている．

4.4 結果

パラメータのすべての組み合わせは4495通りであり集団サイズが5%程度で最適解が得られた．

4.5 考察

表1はシミュレーション結果を比較したものである．これより，関連データを考慮した場合，さらにこれにファジィ推論を適用した場合の方がより予測誤差の少ないものとなっている．これは，カオス的なデータを予測する場合においても関連のある情報を考慮することが予測精度を向上させるために有効であることを示しており，より現実的な予測を実現できることを示している．重み付けの方法も，単に平均をとるよりもファジィ理論を用いメンバーシップ関数をチューニングすることでより高精度の予測が可能であることがわかった．

さらに，遺伝的アルゴリズムを用いてチューニングを行うと，全組み合わせ4495通りのうち18%の224個を探索するだけでほぼ最適解が得られた．これは，チューニングの作業を単純化し，作業時間を短縮し効率的であるといえる．このように，データ予測において遺伝的アルゴリズムによるチューニングを行うことで簡単に予測誤差の少ないシステムをつくることができる．

カオス理論を用いた予測方法は，一見不規則に見える時系列データでも，その背後にある何らかの決定論的な法則を見つけ出すことで精度の高い予測を可能にしている．このような時系列データは数多く存在し，この方法によって従来予測が困難であったものに対しても予測を可能にした．

今後の課題には，今回用いた平均株価に変えて特定の株の銘柄に対しての適用，関連データの変更，重み付けの方法の改良，次元数とメンバーシップ関数の同時最適化等が考えられる．

5.おわりに

本研究では次に示すことを明らかにした．

（1）カオス理論を用いた時系列データの予測方法に対して関連データを考慮する方法を提案した．

（2）距離に対する重み付けの方法にファジィ理論の推論法を用いた．

（3）(1)(2)に対して日経平均株価，為替を用いその有用性を示した．

（4）ファジィ理論でのメンバーシップ関数に遺伝的アルゴリズムによるチューニングを適用することで予測精度の向上を実現した．

参考文献

[1] 山口昌哉：カオスとは何か，Computer Today 1987/7 No.32, pp.4-9

[2] 合原一幸，徳永隆治：カオス応用戦略，オーム社，1993

[3] F.Takens :"In Dynamical Systems and Turbulence" ,(eds.Rand and Young),Springer,Berlin,pp.366-381(1981)

[4]五百旗頭正，他：カオス的時系列の短期予測の為の局所ファジィ再構成法，日本ファジィ学会Vol.7, No.1, pp186-194

連絡先

〒673-05　兵庫県三木市志染町青山１－１８
関西女学院短期大学　経営学科　情報専攻
情報処理センター　　松本　義之
Tel.(0794)85-2288　Fax.(0794)85-1102
E-mail : gbh00371@niftyserve.or.jp

TC1-2

ファジィ積分によるアンケート調査の分析
—— 集落の滅失と再生について ——

Analysis of a questionnaire survey using fuzzy integral
— On extinction of village and migration to regenerate —

○宮武　直樹　古川　修文　島田　道彦　山田　水城
（法政大学　工学部）

Naoki Miyatake　Nobuhisa Furukawa　Michihiko Shimada　Mizuki Yamada
(Fuculty of engineering, Hosei univercity)

Abstract: MUROYA village disappeared and migrated result from dam construction. During this times, something have continued and have extincted, something varied and have appeared. So, we analyzed a questionaire survey using the fuzzy integration method. It compared old villege with new village to give these fact estimation.

1．はじめに

新潟県東蒲原郡上川村の室谷集落は、1973年に治水ダムの建設が決まり、集落はダムに水没することになった。1991年に新集落の宅地造成が完了し、その後家屋建設と移転が進められて、'94年には29軒中27軒の移転が終了した。極めて短期間に伝統的な民家の集落が滅失し、区画された造成地に現代住宅からなる新しい集落が再生されたわけである。地形や自然環境、集落・居住の形態が大きく変わる中で、人々の住生活、風俗習慣はいろいろな影響をうけるものと思われる。

本研究は、これらを明らかにし、室谷集落における滅失と再生を新旧両者の比較によって正しく評価することを試みている。その一部として、集落の人々の移転にともなう意識の変化やその構造を明らかにすることを目的として、移転前後にアンケート調査を実施してきた。この解析にファジィ積分の適用を試みたので、その結果を報告したい。

2．アンケート調査とファジィ積分について

新集落での生活が１年半が過ぎ、まだ移ったばかりで分からないことが多いという意識を持ちながらも、それぞれの経験をふまえて住生活にいろいろな工夫をくわえている段階でどのような評価をもっているか、アンケート調査を実施して分析を試みていた。このデータを利用して、これらにファジィ積分を適用した場合の分析結果と比較検討を試みることにした。

このアンケートの２３ヶの調査項目を、下記の６グループに分けて階層化を試みた。

上位項目	下位項目
(1) 場　　所	決め方、位置
(2) 敷地面積	決め方、広さ
(3) 家屋外観	形、屋根、窓、塀、高床式等
(4) 間 取 り	台所、トイレ、風呂、部屋の利用等
(5) 環　　境	冷暖房、風通し、明るさ、除雪等
(6) 全　　体	全体の総合評価値

次に、評価対象を家屋として、居住環境の好ましさを評価するモデルを作成した。

家屋の属性として、上記の上位項目　x_1＝場所、x_2＝敷地面積、……、x_6＝全体　の満足度をそれぞ

家屋No.	項目	X1	X2	X3	X4	X5	X6	平均	評価入	評価	λ
1	g(x)	0.3	0.35	0.35	0.3	0.3	0.3		1	1	-0.847
	h(X)	1	1	1	1	1	1	1.000			
2	g(x)	0.35	0.25	0.35	0.25	0.35	0.35		0.8	0.8	-0.848
	h(X)	1	1	0.72	0.8	0.6	0.853	0.829			
3	g(x)	0.35	0.4	0.3	0.35	0.4	0.35		0.8	0.8	-0.906
	h(X)	0.8	0.8	1	0.8	1	0.867	0.878			
4	g(x)	0.35	0.3	0.3	0.25	0.35	0.3		0.843	0.842	-0.832
	h(X)	1	1	0.88	0.8	0.8	0.88	0.893			
5	g(x)	0.3	0.3	0.35	0.3	0.3	0.3		0.927	0.932	-0.831
	h(X)	1	0.8	1	1	1	0.967	0.961			
6	g(x)	0.35	0.4	0.25	0.35	0.35	0.35		0.937	0.963	-0.886
	h(X)	1	1	0.84	1	1	0.973	0.969			
7	g(x)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3		0.8	0.8	-0.813
	h(X)	0.8	0.8	0.92	0.7	1	0.837	0.843			
8	g(x)	0.3	0.35	0.25	0.3	0.25	0.3		0.8	0.8	-0.879
	h(X)	0.8	0.8	0.92	1	0.8	0.887	0.868			
9	g(x)	0.35	0.35	0.15	0.3	0.3	0.25		0.8	0.8	-0.779
	h(X)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	0.733	0.722			
10	g(x)	0.35	0.35	0.25	0.3	0.3	0.3		0.833	0.8	-0.832
	h(X)	0.8	0.8	1	0.9	1	0.883	0.897			
11	g(x)	0.35	0.4	0.3	0.3	0.25	0.3		0.82	0.82	-0.848
	h(X)	1	0.8	0.92	1	0.8	0.82	0.890			
12	g(x)	0.3	0.35	0.25	0.3	0.3	0.3		0.843	0.829	-0.814
	h(X)	1	1	0.88	0.8	0.8	0.888	0.895			
13	g(x)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3		0.88	0.88	-0.813
	h(X)	0.8	1	0.88	0.9	1	0.93	0.918			
14	g(x)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35		0.88	0.88	-0.895
	h(X)	1	1	0.88	1	0.8	0.913	0.932			
15	g(x)	0.25	0.35	0.35	0.35	0.3	0.35		0.9	0.9	-0.862
	h(X)	1	0.8	0.95	0.9	1	0.908	0.926			
16	g(x)	0.3	0.35	0.35	0.3	0.35	0.35		0.8	0.8	-0.873
	h(X)	1	1	0.76	0.8	0.8	0.86	0.870			
17	g(x)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3		0.8	0.8	-0.813
	h(X)	0.8	0.4	1	1	0.8	0.833	0.806			
18	g(x)	0.25	0.3	0.2	0.25	0.25	0.25		0.833	0.8	-0.664
	h(X)	0.7	0.8	1	1	1	0.917	0.903			
19	g(x)	0.3	0.35	0.35	0.25	0.25	0.3		0.934	0.942	-0.815
	h(X)	1	1	1	1	0.8	0.967	0.961			
20	g(x)	0.3	0.3	0.35	0.35	0.3	0.3		0.833	0.862	-0.845
	h(X)	0.8	0.8	0.96	1	1	0.9	0.910			
21	g(x)	0.35	0.4	0.3	0.3	0.4	0.35		0.8	0.8	-0.896
	h(X)	0.8	1	0.8	0.7	0.8	0.817	0.820			
22	g(x)	0.35	0.35	0.3	0.25	0.35	0.35		0.841	0.867	-0.862
	h(X)	0.8	0.9	0.92	0.8	1	0.87	0.882			
23	g(x)	0.35	0.25	0.3	0.3	0.3	0.3		0.833	0.828	-0.814
	h(X)	0.8	0.8	1	0.9	1	0.833	0.889			
24	g(x)	0.35	0.35	0.35	0.3	0.35	0.35		0.8	0.8	-0.885
	h(X)	0.8	0.8	0.96	0.7	1	0.877	0.856			
25	g(x)	0.25	0.3	0.3	0.3	0.25	0.3		0.8	0.8	-0.774
	h(X)	0.8	0.8	0.96	0.8	0.8	0.827	0.831			
平均	g(x)	0.318	0.334	0.3	0.314	0.312	0.314		0.8454	0.8458	-0.8370
	h(X)	0.877	0.865	0.913	0.881	0.885	0.879	0.883			

表１　評価項目のメンバーシップ値、ファジィ測度及び平均値とファジィ評価値について

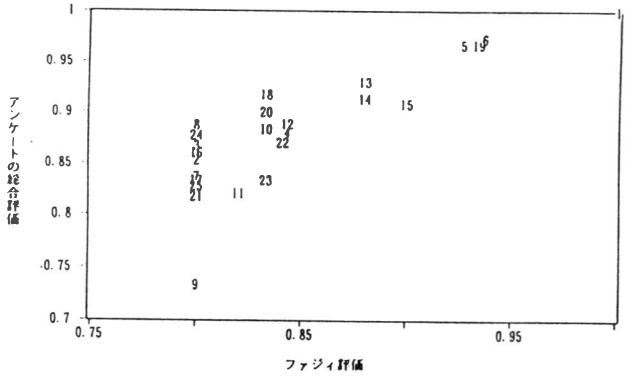


図１　アンケートの評価（評価平均）と共通パラメータλを用いたファジィ評価の関係

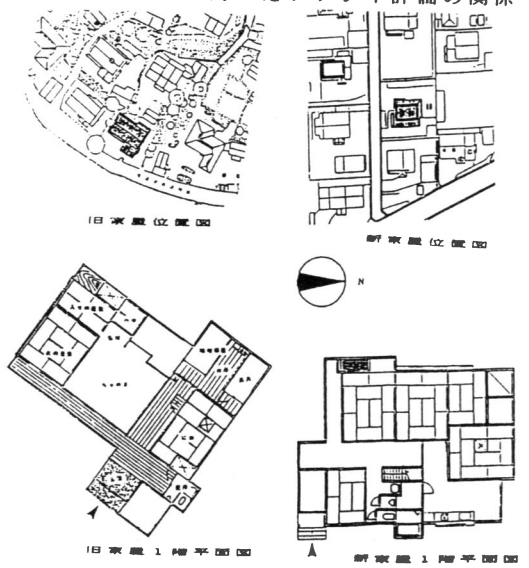


図２　No.9の家の新旧集落の位置と家屋図

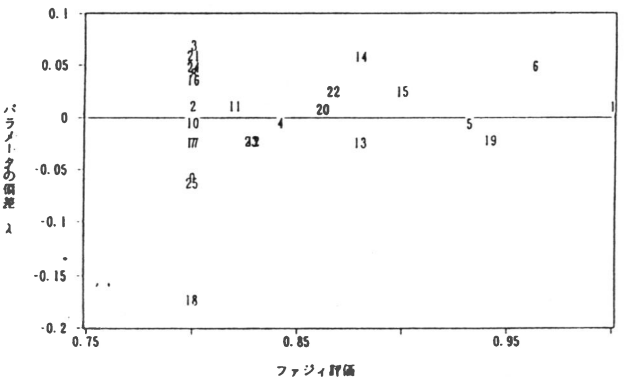


図３　アンケートの評価（評価平均）と項目別パラメータλ_nを用いたファジィ評価の関係

れ取り上げると家屋の属性集合は、$X=\{x_1, x_2, \cdots\cdots, x_6\}$となる。この属性の評価$h_j(x_i)$は、アンケート調査で得た序列尺度の数値を[0,1]に規格化したものである。

次に、ファジィ測度は家屋の好ましさを評価するときの属性の重視度に該当するので、この値は本研究室が経験を活かして主観的に同定した。これらの値を表１に示す。これらの値を用いてファジィ積分を行い総合評価値を求めた。

本研究は、集落の滅失と再生に対して期待と不安を抱いていたはずである人々の意識の変化を各評価基準観のバランスを示す尺度として期待できるパラメータλに着目して、分析を試みた点にある。

即ち、λ＜０ならば、個性重視（独自性）となり、-1 に近ければ近いほどその度合いが強くなること。

λ＞０ならば、バランス重視（共通な特徴）となり、大きければ大きいほどその度合いが強くなること。また、λ＝０のときは確立測度となり加法性を示す。

３．結果と検討

一般的に、主観的な評価を求めるとき、各評価対象に評価値をつけ、評価値の高い評価対象を選択する方法があるが、評価対象に複数の評価基準がある場合、その各評価基準の評価値の加重和で求めることが良く行われている。この場合総合評価値に対して、各評価基準の評価値が独立でなくてはならない。しかし、実際には評価基準間に独立性がなく、相乗や相殺作用などの相互作用がある場合が多い。そこで、本研究では評価項目間の相関を重視して、パラメータλに注目し分析を試みた。

アンケート調査より評価項目に対する１０段階評価×0.1の評価値を求めて、これに一律と評価項目別のファジィ測度を同定して、ファジィ積分により総合評価値を算出した。（表１参照）

図１は、この各評価項目のメンバーシップ値の平均値（評価平均）とファジィ評価（上記の総合評価値）との関係を図示したもので、相関係数0.841と高い相関がみられる。

偏差の大きいNo.9の家は、アンケート調査でみると風通し、日当たりが悪いなど生活環境に強い不満を持っているようである。ファジィ評価も低く、ファジィ測度からその原因が間取りにあることがわかる。図２に新旧の間取りを示す。

アンケートの評価が高くファジィ評価が低いNo.24,8,18の家は、個人的には特に不満はないが専門家からみて間取りや生活環境にやや問題のある場合である。また、No.11,23の場合は、これとは反対に専門家が良いといっても自分は満足できないという個性的、独自性の強い人達であるといえる。

図３は、各評価項目に対応するファジィ測度をそれぞれ求めてファジィ積分を行った場合である。

各パラメータλ_nに着目して、アンケートの評価平均とλ_n－λ_nの関係を示したものである。

No.3,14,21の家は、λが-0.9に近い値を示すことから評価態度は厳しく、その信頼度は高い。

また、No.9,18,25の家は、前述のNo.9の家を除けば、特に不満はないが、評価態度が大まかで、楽観的なためその信頼性は高いとはいえない。このようにλに注目すると評価対象に共通する特徴を捉えることが可能である。

４．おわりに

従来のアンケート調査では、項目別に１つ１つ検討していたが、ファジィ評価はそれらを組み合わせて、項目間の関連度、評価基準間のバランスにλ、人間の主観的尺度にファジィ測度を持ち込むことで、総合的な評価を行う際に有効であることが分かった。

＜参考文献＞
第4回ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会
講演論文集（1994年）
高萩：ファジィ積分による総合評価、pp.64
宮武：授業と評価に関する構造分析、pp.32

TC1-3

ファジィグラフの近似表現と応用

- Approximate Expression of Fuzzy Graph and its Application -

山下　元
HAJIME YAMASHITA
早稲田大学
WASEDA University

佐藤　章
AKIRA SATOH
東洋大学
TOYO University

ABSTRACT : Generally, it may well be difficult to recognize the structural feature of a fuzzy graph since it often is complicatedly presented. The authors have developed an aproximate expression of a fuzzy graph by analysing its relational structure. In this paper, they would describe the construction method of the approximate structure graph which concisely presents the global feature of a fuzzy graph.

1．はじめに

通常，ファジィグラフは複雑で，その構造的な特徴は理解しにくい．筆者等は，ファジィグラフの関連状態を分析し，近似的な構造を抽出する方法を考案した．

本稿では，ファジィグラフの大域的な特徴を表し，かつ，簡潔な近似N値グラフの構成法を述べると共に，その応用法についても言及する．

2．ファジィグラフの近似３値グラフ

ファジィグラフG＝(V,F)は，頂点の有限集合V＝{v_i；1≦i≦n}と頂点v_iからv_jファジィ関連構造行列F＝(f_{ij})，0≦f_{ij}≦1，f_{ii}＝1，で定義される．一般に，ファジィグラフGは，ファジィ関連構造行列Fにより定まるので，本稿ではこれを同一視して，Fをファジィグラフとみなす．

ファジィグラフFの近似N値グラフは，Nが奇数の場合と偶数の場合のそれぞれに分けて構成され，その結果が定理としてまとめられる．

N＝３の場合，ファジィグラフFは，Fのｐ－グラフF^p，FとF^pの相違度を表す距離関数d(p)，F^pの複雑度を表す表現関数e(p)などを用いて近似される．

定義２．１：Fのｐ－グラフF^p，p∈[0，1)

$F^p=(f^p_{ij})$，$f^p_{ij}=r/2$，$f_{ij}\in X_r$

ただし，0≦r<3，$X_0=[0, x_1)$，$X_1=[x_1, x_2]$，$X_2=(x_2, 1]$，また，$x_1=0.5-p/2$，$x_2=0.5+p/2$ である．

定義２．２：FとF^pの距離関数d(p)

$$d(p)=2\Sigma|f_{ij}-f^p_{ij}|/(n^2-n)$$

定義２．３：Fの表現関数e(p)

$$e(p)=\gamma(p)/(n^2-n)$$

だだし，$\gamma(p)=|\Gamma|$，$\Gamma=\{f^p_{ij}\in F^p ; f^p_{ij}\neq 0,1\}$ である．

補題２．１：d(p)の最小値d_m，e(p)の単調性

$$d_m=d(1/2)\leqq d(p)$$

$$p_i<p_j \Rightarrow e(p_i)\leqq e(p_j)$$

次に，FとF^pの一致度を評価するファジィ集合Dのメンバーシップ関数を$f_D(p)$，F^pの簡潔度を評価するファジィ集合Eのメンバーシップ関数を$f_E(p)$とする．

定義２．４：関数$f_D(p)$,$f_E(p)\in[0,1]$

$$f_D(p)=\{d_M-d(p)\}/\{d_M-d_m\}$$

$$f_E(p)=\{e_M-e(p)\}/\{e_M-e_m\}$$

ただし，$d_M=Max\{d(0), d(1^-)\}$，$e_M=e(1^-)$，$e_m=e(0)$，である．

ここで，メンバーシップ関数$f_D(p)$と$f_E(p)$のファジィ決定を$f_\alpha(p)=f_D(p)\wedge f_E(p)$とする．

$f_\alpha(p)$の最大化決定p^*は，Fを近似するｐの最適値と考えられることから，p＝p^*としたファジィグラフFのｐ－グラフを，最適な近似３値グラフとみなす．

補題２．２：Fの近似３値グラフF^*_3

$$F^*_3=(f^*_{ij}),\ f^*_{ij}=r/2,\ f_{ij}\in X^*_r$$

ただし，0≦r<3，$X^*_0=[0, x^*_1)$，$X^*_1=[x^*_1, x^*_2]$，$X^*_2=(x^*_2, 1]$，また，$x^*_1=0.5-p^*/2$，$x^*_2=0.5+p^*/2$ である．

3　ファジィグラフの近似奇値グラフ

N＝2k＋1，k≧２の場合，ファジィグラフFは，Fのｐ－グラフF^p，FとF^pの距離関数d(p)，F^pの表現関数e(p)などを用いて，同様に近似される．

定義３．１：グラフF^p, $p\in[0,\ 1/(2k-1))$

$$F^p=(f^p_{ij}),\ f^p_{ij}=r/2k,\ f_{ij}\in X_r$$

ただし，$0\leqq r<2k+1$, $r>k$のときは$X_r=(x_r, x_{r+1}]$, $r=k$ のときは$X_r=[x_r,\ x_{r+1}]$, $r<k$のときは $X_r=[x_r,\ x_{r+1})$, また，$x_r=0.5+(r-k-0.5)p$，$x_0=0$, $x_{2k+1}=1$である．

定義３．２：FとF^pの距離関数$d(p)$

$$d(p)=2\Sigma|f_{ij}-f^p_{ij}|/(n^2-n)$$

定義３．３：Fの表現関数$e(p)$

$$e(p)=\gamma(p)/(n^2-n)$$

だだし，$\gamma(p)=|\Gamma|$, $\Gamma=\{f^p_{ij}\in F^p\ ;\ f^p_{ij}\neq 0,1\}$ である．

補題３．１：$d(p)$の最小値d_m, $e(p)$の単調性

$$d_m=d(1/2k)\leqq d(p)$$

$$p_i<p_j \Rightarrow e(p_i)\leqq e(p_j)$$

次に，FとF^p の一致度を評価するファジィ集合Dのメンバーシップ関数を$f_D(p)$，F^pの簡潔度を評価するファジィ集合Eのメンバーシップ関数を$f_E(p)$とする．

定義３．４：関数$f_D(p), f_E(p)\in[0,1]$

$$f_D(p)=\{d_M-d(p)\}/\{d_M-d_m\}$$

$$f_E(p)=\{e_M-e(p)\}/\{e_M-e_m\}$$

ただし，$d_M=\mathrm{Max}\{d(0),\ d(1/(2k-1)^-)\}$, $e_M=e(1/(2k-1)^-)$, $e_m=e(0)$, とする．

次に，メンバーシップ関数$f_D(p)$と$f_E(p)$のファジィ決定を$f_G(p)=f_D(p)\wedge f_E(p)$とする．

$f_G(p)$の最大化決定p^*は，Fを近似するpの最適値と考えられることから，$p=p^*$ としたファジィグラフFのp－グラフを，最適な近似（$2k+1$）値グラフとみなす．

補題３．２：Fの近似N値グラフF^*_{2k+1}

$$F^*_{2k+1}=(f^*_{ij}),\ f^*_{ij}=r/2k,\ f_{ij}\in X^*_r$$

ただし，$0\leqq r<2k+1$, $r>k$のときは$X^*_r=(x^*_r, x^*_{r+1}]$, $r=k$ のときは$X^*_r=[x^*_r,\ x^*_{r+1}]$, $r<k$ のときは$X^*_r=[x^*_r,\ x^*_{r+1})$, また，$x^*_r=0.5+(r-k-0.5)p^*$, $x^*_0=0$, $x^*_{2k+1}=1$である．

４．ファジィグラフの近似４値グラフ

Ｎ＝４の場合，ファジィグラフFは，Fのp－グラフF^p, FとF^pの相違度を表す距離関数$d(p)$, F^p の複雑度を表す表現関数$e(p)$などを用いて近似される．

定義４．１：Fのp－グラフF^p, $p\in[0,\ 1/2)$

$$F^p=(f^p_{ij}),\ f^p_{ij}=r/3,\ f_{ij}\in X_r,$$

ただし，$0\leqq r<4$, $X_0=[0,\ x_1)$, $X_1=[x_1,\ x_2)$, $X_2=[x_2,\ x_3]$, $X_3=(x_3,\ 1]$, また，$x_1=0.5-p$, $x_2=0.5$, $x_3=0.5+p$である．

定義４．２：FとF^pの距離関数$d(p)$

$$d(p)=2\Sigma|f_{ij}-f^p_{ij}|/(n^2-n)$$

定義４．３：Fの表現関数$e(p)$

$$e(p)=\gamma(p)/(n^2-n)$$

だだし，$\gamma(p)=|\Gamma|$, $\Gamma=\{f^p_{ij}\in F^p\ ;\ f^p_{ij}\neq 0,1\}$ である．

補題４．１：$d(p)$の最小値d_m, $e(p)$の単調性

$$d_m=d(1/3)\leqq d(p)$$

$$p_i<p_j \Rightarrow e(p_i)\leqq e(p_j)$$

次に，FとF^p の一致度を評価するファジィ集合Dのメンバーシップ関数を$f_D(p)$，F^pの簡潔度を評価するファジィ集合Eのメンバーシップ関数を$f_E(p)$とする．

定義４．４：関数$f_D(p), f_E(p)\in[0,1]$

$$f_D(p)=\{d_M-d(p)\}/\{d_M-d_m\}$$

$$f_E(p)=\{e_M-e(p)\}/\{e_M-e_m\}$$

ただし，$d_M=\mathrm{Max}\{d(0),\ d(0.5^-)\}$, $e_M=e(0.5^-)$, $e_m=e(0)$とする．

ここで，メンバーシップ関数$f_D(p)$と$f_E(p)$のファジィ決定を$f_G(p)=f_D(p)\wedge f_E(p)$とする．

$f_G(p)$の最大化決定p^*は，Fを近似するpの最適値と考えられることから，$p=p^*$ としたファジィグラフFのp－グラフを，最適な近似４値グラフとみなす．

補題４．２：Fの近似４値グラフF^*_4

$$F^*_4=(f^*_{ij}),\ f^*_{ij}=r/3,\ f_{ij}\in X^*_r$$

ただし，$X^*_3=(x^*_3, 1]$, $X^*_2=[x^*_2,\ x^*_3]$, $X^*_1=[x^*_1,\ x^*_2)$, $X^*_0=[0,\ x^*_1)$, また，$x^*_1=0.5-p^*/2$, $x^*_2=0.5$, $x^*_3=0.5+p^*/2$ である．

５．ファジィグラフの近似偶値グラフ

Ｎ＝２ｋ，ｋ≧３の場合，ファジィグラフFは，Fのp－グラフF^p, FとF^pの距離関数$d(p)$, F^p の表現関数$e(p)$などを用いて，同様に近似される．

定義５．１：グラフF^p, $p\in[0,\ 1/2k-2))$

$$F^p=(f^p_{ij}),\ f^p_{ij}=r/(2k-1),\ f_{ij}\in X_r$$

ただし，$0\leqq r<2k$, $r>k$ のときは$X_r=(x_r, x_{r+1}]$, $r=k$ のときは$X_r=[x_r,\ x_{r+1}]$, $r<k$ のときは$X_r=[x_r, x_{r+1})$, また，$x_r=0.5+(r-k)p$, $x_0=0$, $x_{2k}=1$である．

定義５．２：FとF^pの距離関数$d(p)$

$$d(p)=2\Sigma|f_{ij}-f^p_{ij}|/(n^2-n)$$

定義５．３：Fの表現関数$e(p)$

$$e(p)=\gamma(p)/(n^2-n)$$

だだし，$\gamma(p)=|\Gamma|$, $\Gamma=\{f^p_{ij}\in F^p\ ;\ f^p_{ij}\neq 0,1\}$ である．

補題５．１：$d(p)$の最小値d_m, $e(p)$の単調性

$$d_m=d(1/(2k-1))\leqq d(p)$$

$$p_i<p_j \Rightarrow e(p_i)\leqq e(p_j)$$

次に，FとF^p の一致度を評価するファジィ集合Dの

メンバーシップ関数を$f_D(p)$，F^pの簡潔度を評価するファジィ集合Eのメンバーシップ関数を$f_E(p)$とする．

定義５．４：関数$f_D(p), f_E(p) \in [0,1]$

$$f_D(p)=\{d_M-d(p)\}/\{d_M-d_m\}$$

$$f_E(p)=\{e_M-e(p)\}/\{e_M-e_m\}$$

ただし，$d_M=\mathrm{Max}\{d(0), d(1/(2k-2)^-\}$，$e_M=e(1/(2k-2)^-)$，$e_m=e(0)$ とする．

ここで，メンバーシップ関数$f_D(p)$と$f_E(p)$のファジィ決定を$f_\alpha(p)=f_D(p)\wedge f_E(p)$とする．

$f_\alpha(p)$の最大化決定p^*は，Fを近似するpの最適値と考えることから，$p=p^*$ としたFのp－グラフを，最適な近似（２ｋ）値グラフとみなす．

補題５．２：Fの近似N値グラフF^*_{2k}

$$F^*_{2k}=(f^*_{ij}),\ f^*_{ij}=r/2k,\ f_{ij}\in X^*_r$$

ただし，$0\leqq r<2k$，$r>k$のときは $X^*_r=(x^*_r, x^*_{r+1}]$，$r=k$のときは $X^*_r=[x^*_r, x^*_{r+1}]$，$r<k$のときは $X^*_r=[x^*_r, x^*_{r+1}]$，また，$x^*_r=0.5+(r-k)p^*$，$x^*_0=0$，$x^*_{2k}=1$である．

６　ファジィグラフの近似N値グラフ

一般に，補題３．２と５．２から，ファジィグラフFの近似N値グラフ，$N\geqq 3$，ができる．

ファジィグラフFのp－グラフをF^p，FとF^pの距離関数を$d(p)$，F^pの表現関数を$e(p)$とする．

定義６．１：グラフF^p，$p\in[0, 1/(N-2))$

$$F^p=(f^p_{ij}),\ f^p_{ij}=r/(N-1),\ f_{ij}\in X_r$$

ただし，$r<N$，$r>[N/2]$のときは $X_r=(x_r, x_{r+1}]$，$r=[N/2]$のときは $X_r=[x_r, x_{r+1}]$，$r<[N/2]$のときは $X_r=[x_r, x_{r+1})$，また，$x_r=0.5+(r-N/2)p$，$x_0=0$，$x_N=1$である．

定義６．２：FとF^pの距離関数$d(p)$

$$d(p)=2\Sigma|f_{ij}-f^p_{ij}|/(n^2-n)$$

定義６．３：Fの表現関数$e(p)$

$$e(p)=\gamma(p)/(n^2-n)$$

だだし，$\gamma(p)=|\Gamma|$，$\Gamma=\{f^p_{ij}\in F^p;\ f^p_{ij}\neq 0,1\}$ とする．

補題６．１：$d(p)$の最小値d_m，$e(p)$の単調性

$$d_m=d(1/(N-1))\leqq d(p)$$

$$p_i<p_j \Rightarrow e(p_i)\leqq e(p_j)$$

次に，FとF^p の一致度を評価するファジィ集合Dのメンバーシップ関数を$f_D(p)$，F^pの簡潔度を評価するファジィ集合Eのメンバーシップ関数を$f_E(p)$とする．

定義６．４：関数$f_D(p), f_E(p)\in[0,1]$

$$f_D(p)=\{d_M-d(p)\}/\{d_M-d_m\}$$

$$f_E(p)=\{e_M-e(p)\}/\{e_M-e_m\}$$

ただし，$d_M=\mathrm{Max}\{d(0), d(1/(N-2)^-\}$, $e_m=e(0)$, $e_M=e(1/(N-2)^-)$ とする．

ここで，メンバーシップ関数$f_D(p)$と$f_E(p)$のファジィ決定を$f_\alpha(p)=f_D(p)\wedge f_E(p)$ とする．

$f_\alpha(p)$の最大化決定p^*は，Fを近似するpの最適値と考えられることから，$p=p^*$ としたFのp－グラフをFの近似N値グラフとみなす．

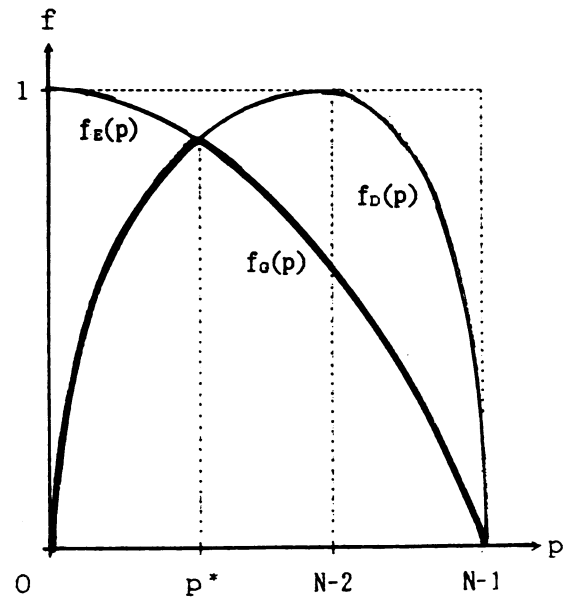


図６．１　ファジィ決定$f_\alpha(p)$

定理６．１：Fの近似N値グラフF^*_N

$$F^*_N=(f^*_{ij}),\ f^*_{ij}=r/2k,\ f_{ij}\in X^*_r$$

ただし，$r<N$，$r>[N/2]$のときは $X^*_r=(x^*_r, x^*_{r+1}]$，$r=[N/2]$のときは $X^*_r=[x^*_r, x^*_{r+1}]$，$r<[N/2]$とのときは$X^*_r=[x^*_r, x^*_{r+1}]$，また，$x^*_r=0.5+(r-N/2)p^*$，$x^*_0=0$，$x^*_N=1$である．

一般に，定理６．１より，あたえられたファジィグラフFを近似し，その近似N値グラフF^*_N，$N\geqq 3$，を求めることができる．

なお，$N=2$の場合は，ファジィグラフ$F=(f_{ij})$に関して，$f_{ij}\geqq 0.5$ のとき$f^*_{ij}=1$，$f_{ij}<0.5$ のとき$f^*_{ij}=0$として，$F^*=(f^*_{ij})$を求めればよい．

たとえば，図６．２のファジィグラフの近似N値グラフ（$N=2\sim6$）は，図６．３～図６．７のようになる．

また，近似３値グラフと近似４値グラフに関するファジィ決定の最大化決定は，それぞれ，図６．８と図６．９のようである．

近似N値グラフから，もとのファジィグラフの特徴をかなり適切に判断することができる．また，Nが大きくなるにつれて，近似N値グラフが，もとのファジィグラフの構造を，順次に正確に表すことも確認される．

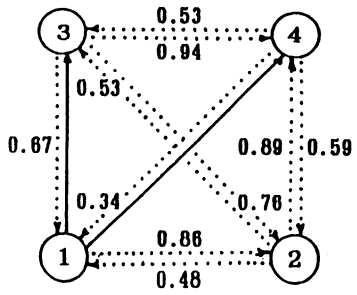


図６．２　ファジィグラフＦ

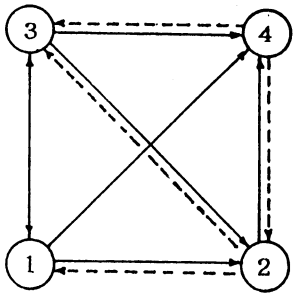


図６．４　近似３値グラフF^*_3

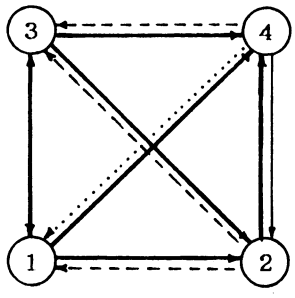


図６．６　近似５値グラフF^*_5

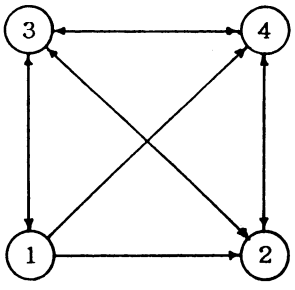


図６．３　近似２値グラフF^*_2

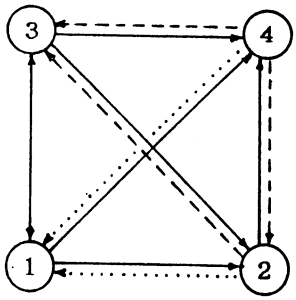


図６．５　近似４値グラフF^*_4

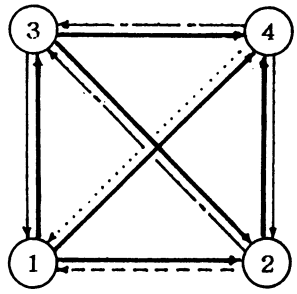


図６．７　近似６値グラフF^*_6

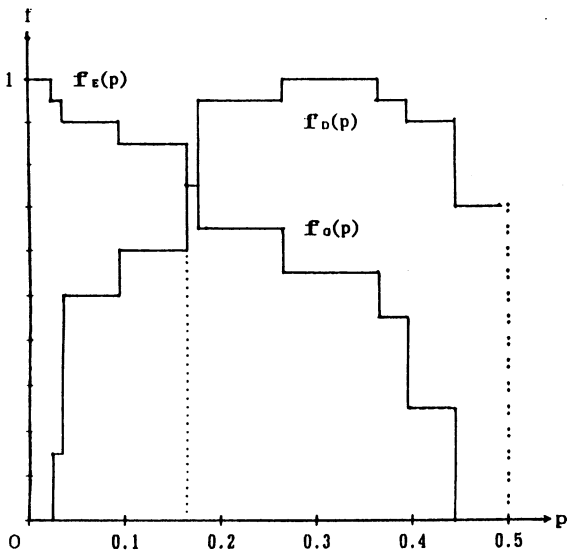


図６．４　ファジィ決定（Ｎ＝３）

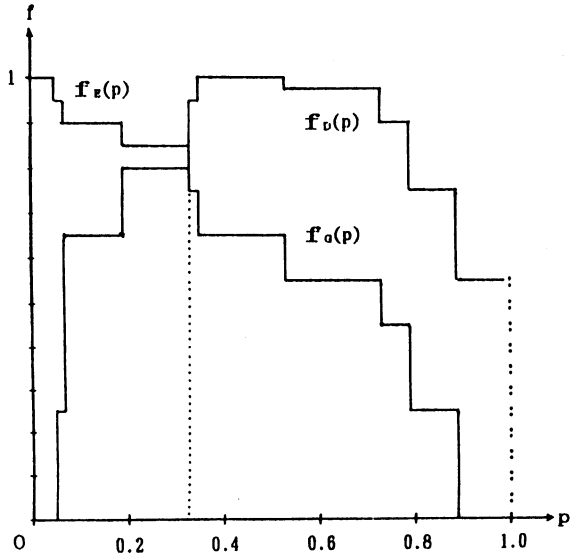


図６．５　ファジィ決定（Ｎ＝４）

一般に，近似Ｎ値グラフは，ソシオメトリー分析，意識調査，教材構造分析などに応用される．

［参考文献］

１．西田，竹田：ファジイ集合とその応用，森北出版，1978.

２．山下，勝又，津田：ファジィグラフの解析と応用，日本数学会大会応用数学分科会 F89-13，1989.

３．山下：Approximation Algorithm of a Fuzzy Graph and its Application, Int'l Congress of Fuzzy System Association Ⅲ p.492-495, 1989.

４．山下，滝沢：ファジィグラフの近似分析と応用 Ⅰ～Ⅳ，日本数学会大会応用数学分科会 S90-01，S92-22，F93-24，S94-34，1990～1994.

５．山下：ファジィグラフの近似構造分析と応用 Ⅰ～Ⅱ，電子情報通信学会技術研究報告 ET91-46，ET93-59，1991～1993.

６．山下，滝沢，他：Approximate Analysis of Fuzzy Graph and its Application, Int'l Congress of Mathematicians XXII PS18-102, 1994.

TC2-1

2種のメンバシップ関数同定法の客観的・主観的比較 ― ファジィグラフ評定尺度図法と境界漸近推定法について ―

Objective and Subjective Comparison between Two Methods for Identifying Membership Functions: Computerized Fuzzy Graphic Rating Scale and Boundary Asymptotic Estimation Method

吉川 歩 *Ayumi YOSHIKAWA*
藤本 大助 *Daisuke FUJIMOTO*
西村 武 *Takeshi NISHIMURA*

京都工芸繊維大学 工芸学部
Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology

Abstract: The computerized fuzzy graphic rating scale (*FGRS*) and the boundary asymptotic estimation method (*BASE*) are compared on subjective usability and their obtained membership functions under non-repeated and repeated identification of membership functions. The major results are that: 1) There is a tendency that the *BASE* is rated as more usable method than the *FGRS*. 2) The membership functions obtained from the two methods correspond except for irremovable disagreement caused by fundamental difference between them. 3) The *BASE* shows higher repeatability in identification of same membership functions than the *FGRS*.

1. まえがき

メンバシップ関数(以下*MF*)はファジィ集合の応用研究の基礎となるため，その測定法は重要である．このため現在までにさまざまな同定法が提案され，比較されている[1,2]．ところが従来の研究では同定法の使いやすさはほとんど考慮されていない．しかし特にノンエンジニアリング分野ではファジィ集合の同定に熟達していない回答者によってファジィ集合が同定される場合も多いため，使いやすさを考慮することが重要である．

吉川らは同定法の使いやすさを低下させる要因が①同定法のユーザ・インタフェースそのものと②同定の際にファジィ集合論に関する知識を要求する程度に関連することを指摘するとともに，よく利用されている同定法の1つであるファジィグラフ評定尺度図法[3](*FGRS*法)の使いやすさを改善した境界漸近推定法(*BASE*法)を提案している[4]．そして*BASE*法を計算機上に実装する際の考慮すべき事項を実験により検証している[5]．しかし*BASE*法と他の同定手法との間で，得られる*MF*の比較あるいは使いやすさの比較は行われていない．

そこで本稿では*BASE*法とその元となった*FGRS*法の両手法を用いた*MF*同定実験を通して，両手法の間の使いやすさ，得られる*MF*形状および反復同定の精度を比較することを目的とする．

2. 比較対象とした*MF*同定法

2.1 *FGRS*法

*FGRS*法は該当要素応答法[1]に分類される同定法である．この手法では，同定者に1レベル集合と台集合の2つのレベル集合の端点を全体集合に対応した数直線上に直接回答させ，それをもとに台形型*MF*を構成する．図1(b)は本稿で用いた*FGRS*法の画面である．画面上のカーソルをマウスによって移動させて，両端に言語アンカーを持つ尺度図(数直線，全長256[*pixels*]，約95[*mm*])の上，下に各レベル集合の2つの端点をマークする．本稿で用いたシステムでは，端点の位置は*pixel*(すなわち全体集合長の1/256)を単位として測定される．

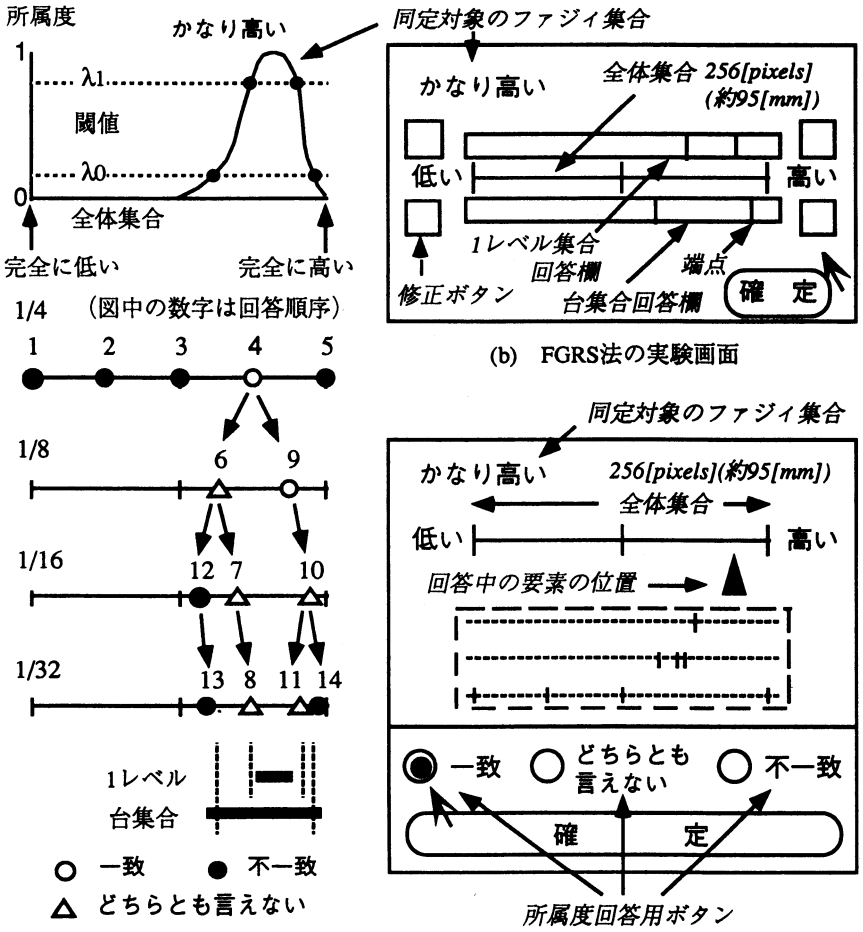
この手法は4点の位置を回答するだけでよいため簡便である．しかしその反面，レベル集合の回答が*MF*と閾値の比較に基づいて行われるため，回答に先立ち*MF*の形状がイメージされる必要がある．このことは回答者にファジィ集合に関する知識を要求することになり，使いやすさを低下させる一因となる．また4点のみで形状が決定されるため，各点の誤回答が形状に与える影響が大きいという問題点も持っている[4]．

2.2 *BASE*法

*BASE*法はシステムから示された数直線上の位置での所属度を3値評定(所属，非所属，どちらでもない)させ，その結果から上記のレベル集合の端点の存在する区間を狭めて漸近させる方法である．回答法そのものは呈示要素評定法[1]に属する．図1(a)は*BASE*法の原理，また(c)は本稿で用いたシステムの画面を示したものである．

レベル集合の端点は両端での評定が異なる区間内に存在する．そこで評価が両端で異なる区間を見いだし(例えば3-4)，その中点(6)を評定させ，さらにその結果から対象となる区間(4-6)の選択を行い，その中点(7)を回答させるという再帰的な操作により，区間幅を狭めていく．原理的には無限に繰り返すことが可能であるが，本稿で用いたシステムでは全体集合長256[*pixels*](約95[*mm*])を考慮して，区間幅が全体集合長の1/32に達したときに区間の細分割を終了するものとした．また回答履歴の表示法は要素位置とその評定内容を表示する方法を採用した[5]．

この手法では，呈示された要素の3値評定を行うことで同定できるため，レベル集合の理解や*MF*形状のイメージは要求されない．このためファジィ集合の知識を持たない同定者にも使いやすいという利点がある．その反面*FGRS*法に比べて回答回数が多くなるという欠点がある．



(a) BASE法の測定原理

(b) FGRS法の実験画面

(c) 図(a)の9の要素を回答中の画面

図1 BASE法によるMF同定の原理と両手法の実験用画面

表1 実験1および2における回答時間および回答回数

	実験順序	データ数	回答時間 [s] FGRS	回答時間 [s] BASE	回答時間 [s] BASE [s/要素]	BASE法の回答回数 [回]
実	B⇒F	78	20.34 (12.14)	44.69 (19.16)	3.34 (0.91)	13.2 (4.0)
験	F⇒B	78	13.01 (5.33)	39.60 (14.07)	3.33 (0.83)	11.9 (2.8)
1	Total	156	16.67 (10.04)	42.15 (16.95)	3.33 (0.87)	12.6 (3.5)
実	B⇒F	120	16.63 (12.27)	43.18 (17.74)	3.24 (0.79)	13.3 (4.7)
験	F⇒B	120	15.45 (12.32)	41.35 (15.73)	3.17 (0.79)	12.9 (3.2)
2	Total	240	16.04 (12.28)	42.27 (16.76)	3.20 (0.79)	13.1 (4.0)

3. 実験1：非反復実験

3.1 実験条件および方法

実験1の目的は，①両手法の主観的な使いやすさを実験を通して比較すること，②両手法から得られるMF形状の関係を明らかにすることにある．

実験には*Macintosh*上に実装された*BASE*法および*FGRS*法を用いた．なお実験に先立ち，計算機上に実装された*FGRS*法と回答用紙を用いた*FGRS*法を用いて比較実験を行い，前者が使いやすいと評価されることを確認している．同定対象として「ヘッジ＋高い」からなる言語的な高さの表現7種(きわめて(ダミー)，少し，けっこう，非常に，とても，ちょっと，だいぶん(呈示順序順))を使用した．29名の被験者にこれら7種の*MF*の関数形状を*BASE*法および*FGRS*法を用いて同定させた．両手法ともヘッジの呈示順序は同一とした．また被験者を2群に分け，一方は*BASE*法，*FGRS*法の順(B⇒Fと略)で，もう一方は*FGRS*法，*BASE*法の順(F⇒Bと略)で同定させた．なお全被験者ともファジィ集合に関する専門的な知識は有していない．測定項目は*BASE*法では各要素ごとの回答時間と3値評定結果および回答回数，*FGRS*法ではレベル集合の上限，下限位置と1ヘッジ当たりの回答時間である．解析はダミーを除いた6種について行った．また両実験終了後に同定法の使いやすさに関する主観評価を一対比較法により回答させた．

3.2 実験結果・考察

○主観的な使いやすさ：一対比較法により使いやすいと評価された手法は*BASE*法:19，差なし2，*FGRS*法:8[人]となった．差なしを除いた27名の比(19：8)に対する2点比較法[6]の検定結果は5%(両側)で有意ではなかったものの，*BASE*法が*FGRS*法よりも使いやすいと評価される傾向は認められる．これは使いやすさの改善に重点を置いて提案された*BASE*法が当初の目的通りに機能していることを示唆している．

●回答時間，回答回数：表1は両手法の回答時間および*BASE*法の回答回数を示したものである．表より1ヘッジ当たりの回答時間は*FGRS*法の16.67[*s*]に対して，*BASE*法は42.15[*s*]となっている．また*BASE*法の回答回数は約13[回]であることが見て取れる．また実験順序が回答時間に及ぼす影響についてみると，*BASE*法の1要素当たりの回答時間はF⇒B，B⇒Fとも約3.3[*s*]程度で影響を受けないが，*FGRS*法の1ヘッジ当たりの回答時間は先に*FGRS*法で同定した被験者群の方が13.01[*s*]で，逆順序の20.34[*s*]よりも回答時間が短くなることがわかる．この*FGRS*法の平均回答時間を両群の間で検定した結果，0.1%(両側)で有意な差が認められた．これ

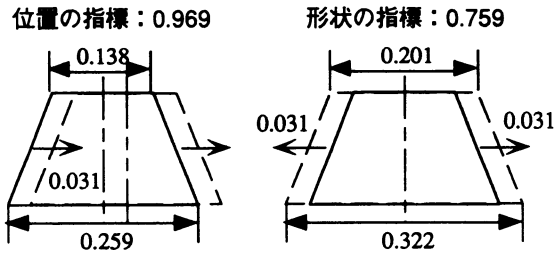
表2　実験1および2から得られたMF形状の関係を表す指標

	データ数		一致度	類似度	形状の指標	位置の指標	包含度(B⊃F)	包含度(F⊃B)
実	B⇒F	70	0.999 (0.010)	0.659 (0.159)	0.756 (0.135)	0.969 (0.025)	0.855 (0.168)	0.751 (0.157)
験	F⇒B	68	0.987 (0.066)	0.587 (0.195)	0.692 (0.163)	0.957 (0.036)	0.871 (0.192)	0.639 (0.193)
1	Total	138	0.993 (0.047)	0.624 (0.181)	0.724 (0.153)	0.963 (0.032)	0.863 (0.180)	0.696 (0.184)
実	B⇒F	120	0.995 (0.039)	0.680 (0.163)	0.743 (0.140)	0.972 (0.027)	0.910 (0.140)	0.733 (0.165)
験	F⇒B	120	0.995 (0.046)	0.638 (0.168)	0.712 (0.147)	0.970 (0.025)	0.904 (0.150)	0.687 (0.178)
2	Total	240	0.995 (0.043)	0.659 (0.167)	0.728 (0.144)	0.971 (0.026)	0.907 (0.145)	0.710 (0.173)

はB⇒Fの順に同定を行った方が*FGRS*法による同定の前に*MF*が得られているので回答時間が短くなるという予想と全く逆の結果となった．この結果に関する考察は4.2で反復実験結果をもとに再び考察する．

●形状に関する指標：両手法から得られた*MF*は相互に比較可能なように全体集合長を1に正規化した．これらの*MF*をもとに，両手法から得られた2つの*MF*の形状の関係を表す指標として一致度，類似度，包含度を算出した．さらに類似度の低下の理由を明らかにするために，形状の指標と位置の指標[7]を求めた．形状の指標は2つのファジィ集合の重心を一致させたときの類似度として与えられ，また位置の指標はは重心間距離を全体集合長で除したものを1より減じたものとして与えられる．両者とも1に近いほどそれぞれの意味において一致の程度がよい．

まず表2中の全データの平均値について考察する．29被験者の174データのうち解析可能なデータは138であった．一致度が0.993となったことからも明らかなように，両手法から得られた*MF*の大部分が，互いの1レベル集合の間に共通区間を有していることがわかる．一方類似度は0.624となり，両手法から得られた*MF*の関数形状は完全には一致していないことを示している．また形状の指標，位置の指標はそれぞれ0.724，0.963となったことから，類似度の低下には形状の差異と位置のずれの両者が関与していることがわかる．ところで*BASE*法から得られる*MF*端点位置は全体集合長の1/32，一方*FGRS*法では1/256であるため，両者から得られる形状の完全な一致は望めず，*BASE*法の1要素分程度の変動は避けがたい．これを考慮すると図2に示したように，上記の位置の指標の低下は*BASE*法の1要素分のずれ(0.031)に相当する．また形状の指標の低下は*BASE*法から得られた1レベル集合，台集合の平均幅が各々0.138，0.259であることを考慮すれば，レベル集合の各端点が1要素分広がったことによりに引き起こされる．したがってこの類似度の低下は両手法の要素の最小幅の差異として説明可能であり，この実験条件では不可避とも言える．



(a)　平行移動による位置の指標の低下　　(b)　幅の広がりによる形状の指標の低下

図2　BASE法の最小要素幅と位置，形状の指標の低下

また包含度について見ると，*BASE*法から得られた*MF*が*FGRS*法から得られた*MF*を含む度合いは0.863で，逆の場合の0.696よりも大きくなっていることが表2から見て取れる．これより*BASE*法から得られた*MF*が*FGRS*法から得られたものよりも幅が広くなる傾向があることを示している．

次に実験順序ごとに求めた平均値について考察する．表2よりB⇒Fの順で実験した場合の方が，逆の順序で実験した場合よりも各指標とも高くなる傾向がある．平均値の差をt-検定した結果，類似度，形状および位置の指標のそれぞれについて5%(両側)で有意差が認められた．この理由として，B⇒Fの順に同定を行った場合は，*FGRS*法で同定する前に*MF*の関数形状が意識上で具現化されているので，それをレベル集合の回答に利用できたことが挙げられる．またF⇒Bの順に同定を行った場合，*FGRS*法で適切な*MF*が得られていなければ，指標を低下させる一因となる．

4.　実験2：反復実験

4.1　実験条件および方法

実験2の目的は，①反復実験による回答時間および形状に関する各指標の変化を明らかにすること，②両手法の反復同定の同定精度を比較することにある．

実験課題は実験1と同様である．被験者は10名で，全員実験1にも参加していた．全被験者ともB⇒Fの順で2回，逆にF⇒Bの順で2回ずつ同定を行った．ただし各回とも必ず5名の被験者は*BASE*法から，残りの5名は*FGRS*法から行わせた．なお反復実験の第1回目のデータは実験1のデータを流用した．各実験の間隔は特に統制してないため被験者の実験間で異なっている．間隔は最も短いもので1時間程度，長いもので2週間程度であった．測定項目は，使いやすさの主観評価を第1回，第4回実験終了後のみとした外は，実験1と同様である．

4.2　実験結果・考察

○主観的な使いやすさの変化：第1回実験後の使いやすさの評価は*BASE*法：*FGRS*法=8:2[人]であったのに対し，第4回実験後の評価は5:5[人]となった．ただし*FGRS*法から*BASE*法へ変化した被験者は1名もいなかった．この評価の変化は，反復実験によりヘッジの*MF*の関数形状を想起することが容易になり，回答回数の少ない*FGRS*法が使い

表3　実験2における回答時間および回答回数の変化

実験回	第1回	第2回	第3回	第4回	全データ
FGRS [s]	18.7 (13.7)	16.9 (13.4)	16.0 (13.2)	12.5 (7.0)	16.0 (12.3)
BASE [s/要素]	3.40 (0.89)	3.17 (0.71)	3.16 (0.78)	3.09 (0.76)	3.20 (0.79)
回答回数[回]	13.5 (4.2)	13.7 (5.3)	12.7 (3.0)	12.7 (3.0)	13.1 (4.0)

表4　反復同定から得られたMF形状の関係を表す指標

データ数		一致度	類似度	形状の指標	位置の指標
BASE	360	0.994 (0.036)	0.768 (0.177)	0.832 (0.112)	0.975 (0.030)
FGRS	360	0.980 (0.113)	0.690 (0.211)	0.819 (0.113)	0.972 (0.028)

やすいと評価されるようになったものと考えられる．

●**回答時間の変化**：表3は両手法の回答時間および*BASE*法の回答回数の変化を示したものである．*FGRS*法の回答時間は実験回数を重ねるに従い，短縮されていることが見て取れる．実験回の回答時間の平均値間で有意差検定を行った結果，第1回－第4回の間で0.1%，第2回－第4回の間で5%，第3回－第4回の間で10%(いずれも両側)で有意な差が認められた．これに対して*BASE*法の1要素当たりの回答時間はほとんど短縮されず，約3[*s*]でほぼ一定の値となっていることがわかる．また*BASE*法の回答回数も約13[回]でほぼ一定となっている．このことは*FGRS*法の場合，*MF*の関数形状の具現化の有無が回答に重要であることを意味しており，吉川らの*FGRS*法に関する問題点の指摘[4, 5]の妥当性を支持する結果となっている．

また先の実験1で認められたF⇒Bの順に実験を行ったときの*FGRS*法の回答時間が逆の順序で実験を行った場合に比べて短くなるという結果は，表1からもわかるように，反復実験からはそのような傾向は認められない．これより，先の非反復実験から得られた結果は，偶然F⇒Bの被験者群に*FGRS*法の回答時間が短い者が多かったことが原因と考えられる．

●**手法間の形状に関する指標**：形状の解析に先立ち両手法から得られたデータのうち凸ファジィ集合となっていないものは，*FGRS*法では台集合を広げることにより，また*BASE*法では回答順序を考慮することにより，凸ファジィ集合となるように修正した．表2よりわかるように，全データに関する平均値は各指標値とも，ほぼ実験1と同様の値となった．また実験順序ごとの平均値は実験1で認められたような大きな差はないものの，B⇒Fの順に実験したものの方が，逆の順序で実験したものより，各指標の値が高くなる傾向が認められる(類似度，形状の指標は両側10%で有意差有り)．実験1に比較して差が小さくなった理由としては，反復実験を行うことにより各ヘッジの*MF*の関数形状を想起することが容易になったため，順序による影響が薄まったことが挙げられる．

●**反復実験間の形状に関する手法**：表4からわかるように，*BASE*法，*FGRS*法とも各手法内の反復実験間で求めた指標は先に考察した*BASE*法と*FGRS*法から求めた指標よりも高くなる傾向がある．また両手法間で得られた指標を比較すると，*BASE*法から得られた指標が*FGRS*法よりも高い値を取っており，特に類似度は0.1%，一致度は5%(いずれも両側)で有意差が認められた．これらより同一対象を反復測定する際の精度という点で*BASE*法が優れていることがわかる．

5. まとめ

*BASE*法，*FGRS*法を用いてヘッジの*MF*を非反復，反復同定させた実験から以下のことが明らかになった．

①*BASE*法が*FGRS*法よりも使いやすいと評価される傾向がある．特に*MF*の関数形状が意識上で具現化されていない場合には，その傾向が強い．

②両手法から得られる*MF*の関数形状は，両手法の同定原理の差異に起因する不可避な形状の不一致の影響を除けば，一致していると言える．

③*BASE*法は*FGRS*法に比べて同一*MF*を反復同定した際のの精度が高い．

④*FGRS*法では*MF*形状の意識上での具現化が回答に重要な意味を持つことが実験結果より実証された．

謝辞：本研究の一部は(財)立石科学技術振興財団平成6年度研究助成(登録番号941021)による．記して謝意を表す．

[参考文献]

[1]中村：ファジィ理論と人文・社会科学(第5章ファジィ理論と行動科学)，日本ファジィ学会編，189-240，日刊工業新聞社 (1994)

[2]山下：ファジィ －心理学への展開－，61-75，垣内出版 (1992)

[3]Hesketh et al.: An application of a computerized fuzzy graphic rating scale to the psychological measurement of individual differences, *International Journal of Man-Machine Studies*, **29**, 21-35 (1998)

[4]吉川ほか：計算機の援用によるメンバシップ関数同定法の改良，第4回FANシンポ予稿集, 7-12 (1994)

[5]吉川ほか：新しいMF同定法 －境界漸近推定法(BASE法)－ の実験的評価，第5回ノンエンジニアリングファジィワークショップ予稿集, 122-125 (1995)

[6]日科技連官能検査委員会編：新版 官能検査ハンドブック, 249-252，日科技連出版 (1973)

[7]吉川・西村：HI評価への適性と得られる主観量に基づいた3種の主観量測定法の比較，ヒューマン・インタフェース研究論文集, **4** (印刷中)

連絡先

吉川　歩（よしかわ　あゆみ）
京都工芸繊維大学　工芸学部　電子情報工学科
〒606　京都市　左京区　松ヶ崎　御所海道町
E-mail: ayumi@dj.kit.ac.jp，FAX: 075 - 724 - 7400

TC2-2

ファジィ推論によるMF構成法

Defining A Fuzzy Membership Function by using Fuzzy Inferences

小田哲久
Tetsuhisa Oda

愛知工業大学
Aichi Institute of Technology

Abstract: Several psychological measuring methods have been developed to define a membership function of the ambiguous concept of human judgement on everyday's life. In many cases, discrete data sets have been derived from the supporting sets that are either continuous or discrete. In this report, the systematic approach is proposed to define the form of a continuous membership function by using fuzzy inferences.

1 はじめに

これまでに考案された、各種の心理学的な実験による測定技法では、たとえ台集合が連続集合であっても、離散的測定になるのが一般的である。離散データのままでは利用しにくい場合、これまでは、一般的な補間法が採用されてきたが、MFには固有の問題があり、必ずしも適切な対策とはいえない。この点に対処するため、本研究では、かつて基本アイデアのみを開示したことのある、「ファジィ推論によるMF測定法」[1]を具体化し、離散的に測定されたMFデータから、ファジィ推論の機構を援用して、連続的なMFを構築する方法をシステム化して提案する。ここでは、システム構成上の考え方を提示する。

2 基礎データの収集

今、観測したいファジィ概念Aの台集合Xは、連続であるとする。また、Xの部分集合である、離散系列{X}が、実際に測定される各要素の台集合であるとする。すなわち、離散的な系列{X}の一つの値xをとる要素eを、概念AのラベルL_Aとともに被験者に与え、その要素eが、L_Aをラベルとして持つファジィ集合Aに属する度合yを得る。yの測定技法については、直接法でもよいし、Hersh&Caramazza流でもよい。また、反応時間法等でもよい。その他、様々な実験心理的測定手段が応用できる[1],[2],[3],[4]。いずれにせよ、系統的なxの系列について、(x,y)のペアが複数測定される必要がある。尚、xの系列は、yが0からはじまり、正の数を経て再び0になるまでの範囲をカバーする必要がある。xの間隔は、等間隔ないし、なんらかの代数的変換を施した時（対数化した場合等）に等間隔として扱えるような系列が望ましい。以下に一つの例を示す。

（例）自動車が低速走行している映画を見せて、そのスピードxを評定させる。

xがおおよそ10Km/hである度合yは、0.1
xがおおよそ20Km/hである度合yは、0.8
xがおおよそ30Km/hである度合yは、0.3

こうして、(x,y)のペアを得る。

3 MF構成法第1案

こうして得られた（x、y）について、xはFuzzy Numberであり、yはCrisp Numberであるとみなす。ただし、正規のMFを構成する必要がある場合、帰属度μについて、実数閉区間[0,1]の全領域に推論結果が現われるようにする必要がある。そのためには、推論の為のデータとして、y=1の点が最低でも1点は必要になる。ところが、測定しようとする概念のMFが正規であると仮定できる場合でも、測定が離散的なので、ちょうどy=1の点が観測されるとは限らない。そこで、実測データにy=1が含まれない場合、それを推定する方法として次の2つの案が考えられる。

(1A)案　最大のyの値ymaxをとるxで、μ=1となるように、全てのyをymaxで除算して、MFを規準化する。
(1B)案　データ系列（x、y）から、xの重心Gxを計算し、そこがy=1となるように設定する。（計算によって求めた(Gx,1)という点を、実データの系列に追加する。）

このうち、(1A)案は、シンプルであり、また、実現値以外のデータを付加しないですむ。そのため、MFの形状に歪みが入ることはない、という良さがあるが、MF形状が広がってしまう、いいかえると、構成されたMFが、本来の観測点そのものを通らないことになる、という問題点もある。

一方、(1B)案は、本来、観測されなかったデータについて、他の、実際に観測されたデータと同等の扱いをすることになる。この取扱いは、様々な問題を派生しうる。

y=1となる点をどのようにして実現するかにかかわらず、さらに2つの代表的なファジィ制御の手法を取り入れた、MF形

状構成法が提案できる。以下では、(1B)案を採用して、(Gx,1)点をデータに追加したケースについて、２つのMF形状構成法を示す。

(1Ba) 裁頭台形法

ファジィ制御における、MIN-MAX-重心法を意識して、制御ルールの後件部のみで構成する。おおよそxである度合がyであることを、三角ファジィ数yの頭切りで実現する。すなわち、中心x、頂点高1で、底辺がrの三角形MFを、高さy以上は切徐した台形のMFで実現する。底辺rは、チューニングパラメータであるが、xが等間隔であれば、その間隔の2倍以上とする。

全データから一つのMF形状を構成するためには、MAX演算が適用される。すなわち、図1の斜線部のほうらく線が、MFの形状を示す。

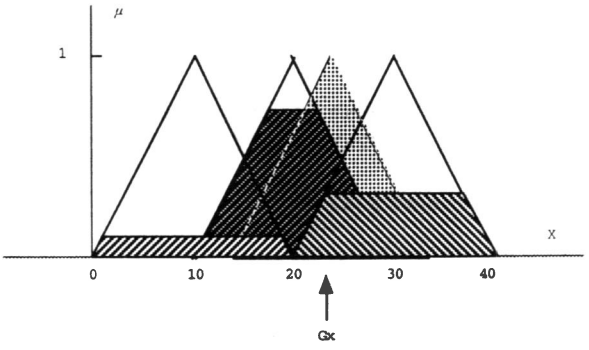


図1　裁頭台形法によるMF構成の概念図

(1Bb) 測定点連結法

測定点(x,y)に、(Gx,1)を追加して、それらの点を単純に連結（線形補間）する。この方法は、{x}が等間隔で、追加重心データが無ければ、次の(1Bc)で r=2 としたケースに一致する。(1Bc)で説明するように、重心が変化してしまうという問題がある。

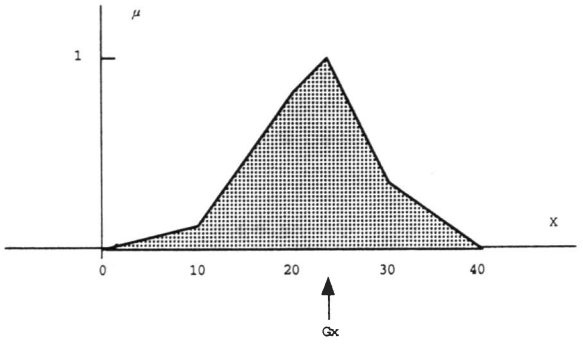


図2　測定点連結法によるMF構成の概念図

(1Bc)代数積-加算法

この方法は、ファジィ制御における、代数積-加算-重心法を意識して、制御ルールの後件部のみで構成した場合に相当する。そして、(1Bb)の特殊なケースと一致しうる。おおよそ

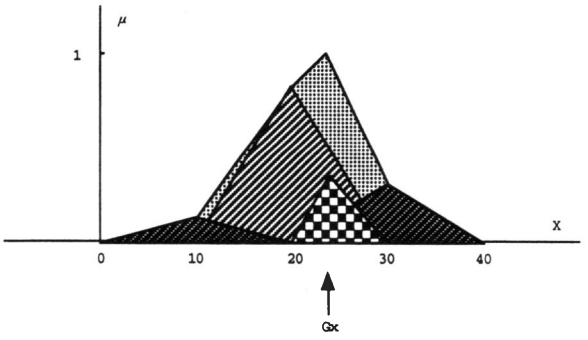


図3　代数積-加算法によるMF推定法の概念図

xである度合がyであることを、三角ファジィ数xを表わすMFにyを掛けること、すなわち、中心x、頂点高yで、底辺がrの三角形MFで実現する。底辺rは、チューニングパラメータであるが、xが等間隔であれば、その間隔の2倍以上とする。全データから一つのMF形状を構成するためには、代数和演算が適用される。すなわち、第2図の斜線部のほうらく線が、MFの形状を示す。ここで、市松文様にハッチングを施した三角形が、重心位置を1にするために追加されたことになる。一般的にはこの追加した図形が左右対称にならないので、構成されたMFからもう一度重心を計算すると、追加前とは違う値になってしまう。繰り返し演算で、収束させてゆくことも考えられるし、あらかじめ、左右対称図形を追加して、重心が変化しないように手続きを変更することも考えられる。

これらの方法のうちで、(1Ba)は、やや不自然の感をまぬがれない。それに比べて、(1Bb) は、はるかに自然な形状となり、実用的である。(1Bc)は、(1Bb)のファジィ制御的解釈を示すモデルであるともいえるが、追加重心データの問題を考える上で、有効なモデルである。

これらの構成法は直観的で単純であるが、MF形状が滑らかにはなりえない。また、測定されたyが、fuzzyな値ではなくcrispな値として扱われることにも問題がある。

4　MF構成法第2案

(x,y)のペアを、x,yともにファジィ数とみなす。また、xの系列の中間の値については、観測データにおけるxとyの関係をファジィルールとみなして、ファジィ推論でyの推定値を導出してゆき、MFの形状構成をする。

ファジィ推論のためのルールは、次のように設定する。

実観測データによるルール：

約10である度合は、約0.1：
If x is approximately 10 then y is approximately 0.1.
約20である度合は、約0.8：
If x is approximately 20 then y is approximately 0.8.
約30である度合は、約0.3：
If x is approximately 30 then y is approximately 0.3.

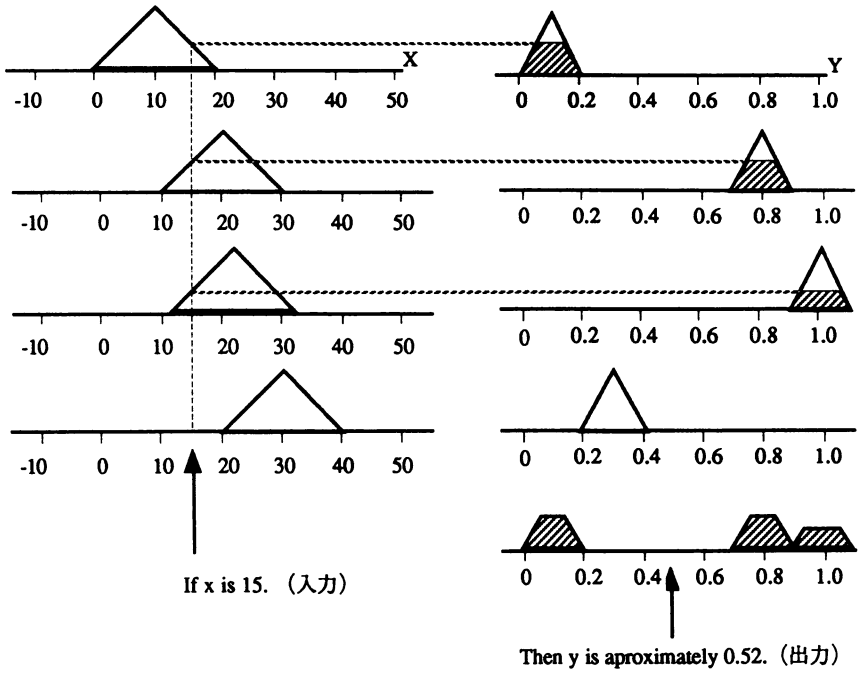


図4　MF推定法（第2案）の説明（ファジィ制御の図式による。）

境界条件ルール：通常は実測値があるが、もしも実観測が無い場合は追加ルールとなる。

約0である度合は、約0：
If x is approximately 0 then y is approximately 0.
約40である度合は、約0：
If x is approximately 40 then y is approximately 0.

追加ルール：yの観測値が1未満の場合、全観測値からGxを計算して、そこでのyの値を1とする。（MF構成の後、さらにGxを求めて再構成してゆく手続きをとった場合、Gxの値が収束するかどうかは、現時点では不明である。）

約Gxである度合は、約1：
If x is approximately Gx then y is approximately 1.

尚、もしも、yの観測値に1が一つ以上含まれるならば、この追加は不要である。

5　図式モデルによる説明

上記のルールを、ファジィ制御の典型的な図式で表わしてみる。（図4）　ここで、おおよそxを表わす三角Fuzzy数の巾r_xは、xの間隔dxの2倍、20とした。ファジィ推論のメカニズムによって、これ以上狭いr_xを与えると、yが連続でなくなる。もっと広いr_xを与えると、推定されるMF形状を滑らかにする、平滑作用が生ずる。なお、もとの観測値がMF上の点として実現されなくなる可能性がある。（要解析）

また、おおよそyを表わす三角Fuzzy数の巾r_yは、0.2とした。これは、この実験ではyの測定精度がy±0.1程度と仮定したからである。rの大きさを決める要因は、観測値の予想精度と、最終的に推定して得られるMF形状の滑らかさ、ならびに、Gxの推定値の一意性（安定性または収束性）である。

ここでは、x=15という、元の観測値に含まれないxの値に対して、y=0.52という、ファジィ推論結果が得られることが示される。具体的には、上図の左方下部にxの値を入力すると、その上の4つのルールのうち、上から3つだけが、マッチする。ただし、そのマッチングの度合は、上から、それぞれ、0.5 , 0.5 ,0.137である。

6　数値例

上記の数値例について、後件部を簡略化して、シングルトンにし、その重心をMF値として出力する、簡易MF構成プロ

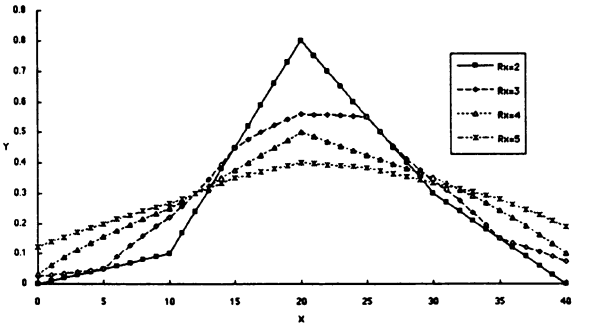


図5　数値例（巾r_xの平滑効果）

グラムを作成し、X=0からX=40まで、1刻みに計算した。ここでは、重心Gxのデータ追加を行っていない。巾rxを、Xの測定間隔の2倍、3倍、4倍、5倍としたケースについて、この操作を行い、グラフ化した。（図5）ここからは、rxの平滑効果がよくわかる。

7 研究課題

（1）重心データの追加は、さまざまな問題をはらんでいる。例えば、単峰のMFが仮定できるような対象にしか適用できないが、実際の心理学的測定は、yに測定誤差が加わっており、複数の頂点があるように見える可能性もある。また、正規でないMFが構成されるべき対象について、機械的に重心データを追加してしまう危険性もある。計算で求められたGxの値が、ちょうど、実観測値に一致したり、そのすぐ近傍になることもありうる。このように、適用にあたっては、重心データの追加は、あくまでも、離散的測定によって失われたデータの補助であるということを注意する必要がある。

（2）平滑化のチューニングパラメータとして、当面、rxとryの二つがある。これらの値が結果にどう影響するか、詳細に分析する必要がある。

（3）MIN-MAX-重心法の場合は、yの巾ryに大きい値を採用すると、合成過程で質量が非線形統合となり、重心位置が当初の位置からずれる。無限に推定を繰り返した場合の収束の様子を数理的解析またはシミュレーションで探る必要がある。（収束ではなく、発散、振動、あるいはカオス的挙動をしても不思議ではない。）

（4）小田の「ファジィ多項目並列評定法」（Fuzzy-set Concurrent Rating Method : FCR-法）は、[1Ba]案に近い。本研究のMF構成システムを適用することで、FCR法の適用範囲が広がる可能性がある[6]。

（5）α-カット法で測定したMFデータは、1価関数になっていない場合がありうる。すなわち、同一のxについて、複数のyの値が存在しうる[1]。この場合、そのままでは、MFとして採用できないが、本技法を採用して、なめらかな曲線を作れば、利用可能となりうると考えられる。このように、本技法が有効と思われる対象について、実データによる検証をする必要がある。

8 むすび

本技法は、ファジィ制御の応用でもあり、また、ファジィ推論を用いたデータ補間法の一種でもある。本システムの特徴は、工学的な応用が一般化したファジィ制御ないしファジィ推論のシステムを、そのファジィ制御の理論的基礎ともいうべきMF測定という課題に特化させて、実用的なMF測定法を確立しようとすることにある。MF測定に特化させることで、モデルが具体化し、単にファジィ推論でグラフを補間する場合と比べて、詳細なシステム設計が可能となった。

本技法が実際にMF推定に有効か否かを明らかにするには今後の実験的研究が必要である。これまでに行った、簡単な数値実験で見る限り、Gの追加は、MFの規準化以上に大きな問題をはらんでいる。単峰でなければナンセンスであるし、代数積加算重心法や、後件部をシングルトンにした簡略法では、何回計算を繰り返しても、Gの値が動かず、鋭い角が出たら、それがそのまま変わらないことになる。

もし、Gの機械的な追加が問題で、本技法が実際的な有効性を発揮できないとしたら、対象とするMFの概形や、分析局面でのG追加の適否等について、人間（研究者）とコンピュータが対話しつつ解析を進めるようなシステムを構築してゆく必要があるかもしれない。

参考文献

[1] 小田哲久：「人間行動モデルとしてのファジィ理論—適用の可能性と課題—」、日本経営システム学会誌、vol.10,No.1,pp.57-67 (1993)

[2] 日本ファジィ学会編：「ファジィ理論と人文・社会科学」、講座ファジィ１４、日刊工業新聞社、pp.98-99,pp.194-198 (1994)

[3] 中村和男：「メンバーシップ関数の諸測定手法の関連について」、第2回ノンエンジニアリング・ファジィワークショップ講演論文集、pp.66-67 (1992)

[4] 山下利之：「ファジィ—心理学への展開」垣内出版、pp.61-75 (1992)

[5] 吉川　歩,西村　武：「3種の主観量測定法の比較—各手法のHI評価への適性と得られる主観量の比較—」Human Interface News & Report Vol.9 (1994)

[6] 小田哲久、林　文俊：「FCR法（ファジィ多項目並列評定法）の心理学への適用」、日本ファジィ学会ノンエンジニアリングファジィ研究会第5回ワークショップ講演論文集、pp.104-107 (1995)

連絡先

〒470-03　愛知県豊田市八草町八千草1247

愛知工業大学　経営工学科

小田哲久

TEL 0565-48-8121　　FAX 0565-48-0077

E-mail　t-oda@aitech.ac.jp

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

TC2-3

台湾における消費者の多属性態度研究

―― ファジィ評定データの可能性線形回帰分析 ――

On the Study of Consumer's Multi-Attribute Attitudes in Taiwan: Possibility Linear Regression Analysis of Fuzzy Rating Data

○竹村和久　呉 俊彦　候 徳宇
Kazuhisa Takemura　Wo Jun Yen　Hou Te Yu

筑波大学社会工学系
Institute of Socio-Economic Planning,
University of Tsukuba

筑波大学大学院経営政策科学研究科
Graduate school of Management Sciences & Public Policiecy Studies,
University of Tsukuba

Abstract- Attitude is a central concept in consumer psychology, and defined as sum total of evaluation of the perceived attributes of alternatives. Althoguh insights into ambiguous nature of attitudes were identified early in the development of attitude measurement, the subsequent methods used failed to capture this ambiguity, no doubt because traditional mathematics was not well developed for dealing with ambiguity of judgment. We propose a fuzzy multiattribute attitude model (FMA model) for explaining shopping choice behavior. The FMA model is an extension of traditional multiattribute attitude model such as Fishbein model, and the application of the fuzzy set theory to the multiattribute attitude model. In order to test the FMA model, we use the fuzzy rating method (Hesketh et al., 1988; Takemura, 1992, 1993). The fuzzy rating scale presents respondents with the option of indicating a preferred point and then asks them to extend the rating to the left or light if they wish. By making certain simplifying assumption, the fuzzy rating data can be viewed as fuzzy numbers, hence making possible the use of fuzzy set theoretic operations. For the purpose of explaining shopping choice behavior, a survey study has been undertaken in Taiwan. Results of possibility linear regression analysis indicated fuzzy numbers as weights of attributes in consumer behavior.

1．はじめに

社会心理学やマーケティングの分野においては、Fishbeinらによって提唱された多属性態度モデルがある[1][5][8]。このモデルは、行動や行動意図の予測において有効性を示しているが、人間の評価や態度における曖昧性を考慮に入れていない。また、モデルを用いら実証研究においても、ＳＤ法などによる点推定の技法が用いられており、評価や態度における曖昧性が十分に測定されていない。竹村[10,11]は、この多属性態度モデルやその測定法の問題点を克服するために、態度をファジィ集合で表現したファジィ多属性態度モデルを提案し、このモデルに基づく購買目的地選択や店舗選択の分析をファジィ評定法[6]を用いて行っている。さらに、竹村[12]の研究では、日本の大学生を対象に調査を行い、入出力データおよび係数パラメータが左右対称なファジィ数（ＬＬファジィ数）である場合の坂和・矢野[9]による可能性線形回帰分析を左右非対称なファジィ数（ＬＲファジィ数）にも適用できるように拡張した可能性線形回帰分析を用いて、ファジィ多属性態度モデルの信念成分を推定し、行動意図の予測性を検討した。その結果、幾つかの興味深い知見が得られたが、この知見は調査対象者である日本の大学生の特性を示しているだけなのかもしれず、結果の一般性に疑問が残る。そこで、本研究では、日本とは、言語体系や文化も異なる台湾の社会人や学生を対象とした調査を行い、これまでに得られた知見が確認できるかを検討した。さらに、この検討をふまえて、心理評定データの可能性線形回帰分析を行う際の問題点を考察する。

2．ファジィ多属性態度モデル

これまでの多属性態度モデルに関する研究においては、多くがＳＤ法などにおけるように評価値を１つの数値で点推定させていたが、我々の日常生活における評価に関する表現を振返ると、評価は自然言語で表現されることが多く、また、数値で表現されるときでも区間で表現されることが多いように思われる[2]。これは、我々の判断の曖昧さに起因すると考えられる。我々の判断は、本来曖昧さを有しているにもかかわらず、従来の研究の多くは、その曖昧さを測定の段階で切捨てていたと考えることができる。

本研究では、竹村[10,11]と同様に、態度や評価における曖昧さをモデルに組入れるために、ファジィ集合論的アプローチを採用する。ファジィ多属性態度モデルは、ファジィ数[4]とその演算子を用いると、以下のように定式化できる。

$$A = (E_1 \otimes W_1) \oplus (E_2 \otimes W_2) \oplus, \ldots, \oplus (E_n \otimes W_n)$$

$$= \bigoplus_{i=1}^{n} Ei \otimes Wi$$

$$= \bigoplus_{i=1}^{n} Ai$$

ただし、Aは最終的な態度による評価反応（評価成分：ファジィ数）、E_iは対象iに対する評価（ファジィ数）、W_iは対象iに対する評価の全体的評価に寄与する重み(信念成分：ファジィ数)、であり、⊕と$\bigoplus$は、ファジィ数における加算、⊗は、ファジィ数における乗算である。また、A_iは重み付けられた対象iの部分的評価（ファジィ数）であり、

$$A_i = E_i \otimes W_i$$

である。

3．可能性線形回帰分析による評価成分の推定と行動意図予測性の検討法

ファジィ数で表現されるn個の属性により構成される信念変数のベクトル$W_i = (W_{i1}, \ldots, W_{in})$とファジィ数で表現される行動意図$B_i$の組としてのデータ$(W_i, B_i)$（iはオブザベーションの数であり、i=1,.....,k）が与えられたとき、ファジィ線形回帰式

$$B = E_0 \oplus W_1 \otimes E_1 \oplus \ldots \oplus W_n \otimes E_n$$

を仮定して、ファジィ数$E_0, E_1, \ldots, E_n$を推定する問題を考える。なお、ファジィ数で表現される定数項E_0は、ファジィ多属性態度モデルでは仮定されてはいないが、推定の精度を上げるために置くことにする。

ここで、簡単のために、ファジィ数B_i(i=1,,,k)，W_{ij}(i=1,,,k, j=1,...,n)，E_j(j=1,...,n)を、それぞれ、左右非対称な3角型ファジィ数とすると、以下のように、その代表値（3角型ファジィ数の頂点の値）、左の端から代表値までの幅、右の端からの幅を示すだけで、そのファジィ数の形状を特定できる。

$$B_i = (b_i, e_i^L, e_i^R),$$
$$W_{ij} = (W_{ij}, d_{ij}^L, d_{ij}^R),$$
$$E_j = (E_j, c_j^L, c_j^R)$$

と表現することができる。これによって、これらのファジィ数のαレベル集合は、代表値と左幅、右幅を用いて、次のように表現できる。

$$[B_i^L\alpha, B_i^R\alpha] = [b_i - (1-\alpha) e_i^L, \ b_i + (1-\alpha) e_i^R]$$

$$[W_{ij}^L\alpha, W_{ij}^R\alpha] = [W_{ij} - (1-\alpha) d_{ij}^L, \ W_{ij} + (1-\alpha) d_{ij}^R]$$

$$[E_j^L\alpha, E_j^R\alpha] = [Ej - (1-\alpha) c_j^L, \ E_j + (1-\alpha) c_j^R]$$

さらに、ファジィ数W_{ij}のαレベル集合は、任意のα□(0, 1]に対して非負であると仮定する。

αレベル集合を用いて確信区間に関する演算を行うと、坂和・矢野[9]の定理により、次の関係が見出される。

$$(E_0 \oplus W_1 \otimes E_1 \oplus \ldots \oplus W_n \otimes E_n)\alpha = [Z_i^L\alpha, Z_i^R\alpha]$$

ここで、

$$Z_i^L\alpha = \sum_{j=0}^{n} \{\min \{E_j^L\alpha \times W_{ij}^L\alpha, \ E_j^L\alpha \times W_{ij}^R\alpha\}\}, \quad i=1,\ldots,k.$$

$$Z_i^R\alpha = \sum_{j=0}^{n} \{\max \{E_j^R\alpha \times W_{ij}^R\alpha, \ E_j^R\alpha \times W_{ij}^L\alpha\}\}, \quad i=1,\ldots,k.$$

ファジィ線形回帰モデルと行動意図との適合度とみなされる以下の可能性測度の値がα以上である必要十分条件は、つぎのとおりである。すなわち、

$$Pos(B = E_0 \oplus W_1 \otimes E_1 \oplus .. \oplus W_n \otimes E_n) \geq \alpha$$

$$\Leftrightarrow B_i^R\alpha \geq Z_i^L\alpha \quad \text{かつ} \quad B_i^L\alpha \geq Z_i^R\alpha$$

可能性線形回帰分析は、上式の可能性測度に基づいてファジィパラメーターを推定する。非対称なメンバーシップ関数を仮定した可能性線形回帰モデルのファジィパラメーターベクトルを推定する問題FP（α）は、次の様に定式化できる。

$$FP(\alpha): \text{minimize} \quad J(E, c^L, c^R)$$
$$\text{subject to} \quad B_i^R\alpha \geq Z_i^L\alpha \quad i=1,\ldots,k$$
$$B_i^L\alpha \geq Z_i^R\alpha \quad i=1,\ldots,k$$
$$c_j^L \geq 0, \ c_j^R \geq 0 \ (j=0,1..n)$$

ただし、

$$J(E, c^L, c^R) = \sum_{i=1}^{k} \{(Z_{i1}^L - Z_{i0}^L) + (Z_{i0}^R - Z_{i1}^R)\}$$

この問題の目的関数および制約式を構成する$Z_i^L\alpha$、$Z_i^R\alpha$の内部には、最小化と最大化の演算が含まれており、このままでは、線形計画問題として解くことはできないので、坂

和・矢野[9]と同様な方法を用いて解いた。

4．調　査　研　究

方　法

調査対象者　台湾・台中市在住の一般市民 210名を調査対象とした。回収され有効であった調査票は173部であり、有効回収率は89.6%であった。

質問紙　質問紙は、台湾・台中市のデパートで衣服を購買することに関する態度と店舗での購買意図に関するものであり、ファジィ評定を行うようになっている（Fig. 1参照）。なお、態度に関する７属性は、筑波大学の台湾留学生42名を対象にした予備調査の結果から設定された。すなわち、(1)交通の便利さ、(2)価格、(3)品揃の豊富さ、(4)店員の対応、(5)品質、(6)店の雰囲気、(7)店の周辺環境であった。調査の対象とされたＲデパートは、台中市の代表的デパートであり、台中市の大学生計18名について、6名より構成される3グループでの台中市の代表的デパートを選ぶ集団討議の結果から採択された。

手続き　調査は、街頭面接調査であった。ただし、学生37名については、集団形式の調査を行った。

結果の処理　尺度上に回答されたマル印の上限、下限、及び斜線（／）の位置を最小値０、最大値 100として数値に変換した。

結果と考察

まず、各項目に対するファジィ評定の下限、上限、代表値の平均値および標準偏差値をTable 1に示した。

Ｔａｂｌｅ　1
ファジィ評定の平均値と標準偏差値

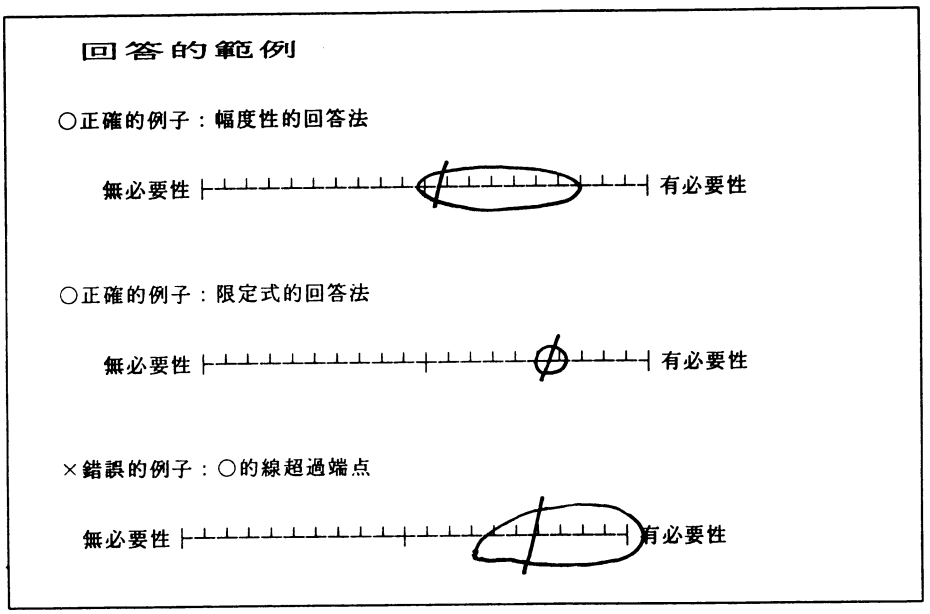
	下限	上限	代表値
交通の便利さ	64.1（11.5）	76.6（10.7）	70.4（10.9）
価格	63.8（10.2）	76.5（ 9.5）	70.3（ 9.7）
品揃の豊富さ	65.1（12.1）	78.2（11.9）	71.8（12.3）
店員の対応	66.2（14.3）	79.5（13.5）	72.7（14.3）
品質	66.9（11.2）	80.5（11.0）	74.1（11.1）
店の雰囲気	68.1（11.3）	81.8（10.6）	75.2（11.3）
店の周辺環境	69.2（11.4）	88.7（10.9）	75.7（11.2）
行動意図	52.2（12.1）	66.5（12.4）	59.8（12.3）

つぎに、代表値の下限と上限との間の相対的位置に関する以下の指標Ｄを求めた。

Ｄ＝　（代表値－下限値）／（上限値－下限値）

なお、指標Ｄは、０から１の値をとり、代表値が上限と下限の丁度真中にあるときに0.5の値をとる。

Ｄ値の平均値は、(1)交通の便利さでは0.501、(2)価格では0.512、(3)品揃の豊富さでは0.511、(4)店員の対応では0.493、(5)品質では0.538、(6)店の雰囲気では0.538、(7)店の周辺環境では0.332であり、Ｒデパートに衣服の購買に行くことの行動意図は0.531であった。このように、平均値においては、Ｄ値は0.5程度であることが多く、代表値がほぼ上限と下限の中央にあることを示している。



Ｆｉｇ．１．　ファジィ評定の教示例

つぎに、データの可能性線形回帰分析を行う。総合評価方式に線形モデルを用いるのは、過去の総合評価における研究においても概ねその頑健性が支持されているからである[3]。態度に関する７属性の信念成分（どの程度の当該のデパートが各属性を有しているかに関する信念）を説明変数とし、店舗での購買意図を被説明変数とした。可能性測度の値αを0.5として、非対称なメンバーシップ関数を仮定した可能性線形回帰分析を行った。その結果推定された評価成分のファジィパラメーターは、第１項を代表値、第２項を左幅、第３項を右幅とすると、(1)交通の便利さは(0.04, 0.09, 0.00)、(2)価格(0.15, 0.30, 0.00)、(3)品揃の豊富さ(0.18, 0.04, 0.00)、(4)店員の対応(0.00, 0.00, 0.00)、(5)品質(0.48, 0.96, 0.00)、(6)店の雰囲気(0.00, 0.00, 0.00)、(7)店の周辺環境(0.35, 0.71, 0.00)であり、定数項にあたるE。はいずれも0.000であった（なお、可能性測度の値αを、0.1, 0.2, 0.3., 0.4と変化させたが、結果の定性的な特徴はあまり変化しなかった）。また、行動意図の評定平均値は(59.82, 6.72, 7.58)であり、可能性線形回帰モデルによる予測値の平均は(91.67, 7.01, 155.04)となっており、代表値の推定、幅の推定ともに過大に推定されている。ただし、モデルのデータへの適合度（竹村、1992)の平均値は.78と極めて高い。

つぎに、信念成分をクリスプ数とした等平均モデル、代表値の重回帰分析より推定したクリスプな重みを用いた加重平均モデルの予測値と適合度を求め、可能性線形回帰分析の結果と比較する。等平均モデルの場合、行動意図の予測値の平均値は(75.68, 5.65, 5.78),加重平均モデルの場合、予測値の平均は(59.82, 5.93, 6.92)であり、特に加重平均モデルの場合、平均値においては、可能性線形回帰分析の結果よりも正確な予測をしていることになる。しかし、モデルのデータへの適合度の平均値は、等平均モデルが.07,加重平均モデルが.32であり、可能性線形回帰分析の結果よりかなり低い。以上の検討より、可能性線形回帰分析は、適合度の高い予測を行えるが、予測値やその幅が大きくなりすぎることが示唆された。予測値の幅が実測値よりも大きくなりすぎたという結果は、竹村[12]の研究でも認められているが、この原因の一つとして、人間の判断が拡張原理に適合していないことが考えられる。すなわち、心理的な評定においては、情報統合を行う際に拡張原理[13]のように評価の主観的幅（曖昧さ）を広げるのではなく、主観的幅をあまり変化させないことが指摘できる。拡張原理ではない情報統合の方式[7]などを参考にする必要があろう。心理評定データを用いて、人間の態度や行動を予測する場合、このような人間の評価形式の性質を考慮に入れて検討する必要があると考える。

参考文献

[1]Anderson, N.H., "A functional approach to person cognition". In T.K.Srull & R.S.Wyer (Eds.), Advances in social cognition. vol.1. Hiisdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1988, pp.37-51.

[2]Beyth-Marom, R.,"How probable is probable ?: A numerical translation of verbal probability expressions", Journal of Forecasting, 1, pp. 257-269 (1982).

[3]Dawes, R.M., "The robust beauty of improper linear models in decision making",. D.Kahneman, P.Slovic, & A. Tversky (Eds.), Judgment under uncertainty: Heuristics and biases, Cambridge: Cambridge University Press, 1982, pp.391-407.

[4]Dubois D.& Prade, H., Fuzzy sets and systems: Theory and applications, New York: Academic Press, 1980.

[5]Fishbein, M. & Ajzen, I., Belief, attitude, intention, and behavior: An introduction to theory and research, Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1975.

[6]Hesketh, B., Pryor, R., Gleitzman, M., & Hesketh, T., " Practical applications and psychometric evaluation of a computerised fuzzy graphic rating scale". In T. Zetenyi (Ed.), Fuzzy sets in psychology. New York: North Holland, 1988, pp. 425-454.

[7]Nakamura, k., "Canonical fuzzy numbers of dimension two and fuzzy utility difference for understanding preferential judgments", Information Sciences, 50, 1990, pp.1-22.

[8]杉本徹雄, "多属性態度モデルの妥当性研究",「実験社会心理学研究」、22, 1982, pp.37-48.

[9]坂和正敏・矢野均 ファジィ入出力データに対する多目的フ ァジィ線形回帰分析 日本ファジィ学会誌、1(1), 107-1 15 (1989).

[10]竹村和久 ファジィ多属性態度モデルによる購買目的地選択の分析について――― エリア・マーケティングのための消費者心理測定の提案――― 地域学研究, 22, 119-132 (1992).

[11]竹村和久 ファジィ多属性態度モデルによる店舗選択の分析 広告科学、27、89-93 (1993).

[12]竹村和久 ファジィ多属性態度モデルによる行動意図の予測 ――― ファジィ評定データの可能性線形回帰分析を用いて――― 日本行動計量学会大会発表論文抄録集 (1994).

[13]Zadeh, A. "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning", Information Sciences, 8, 1975, pp.199-249.

謝　辞

本研究で用いた可能性線形回帰分析の計算機プログラムは、当時筑波大学社会工学類４年生の鈴木博氏（現在東京工業大学大学院理工学研究科）が著者の指導による卒業研究において制作したものである。鈴木氏に深く感謝する。

連絡先

〒305 茨城県つくば市天王台１－１－１
筑波大学社会工学系
竹村　和久
TEL 0298-53-5168
FAX 0298-53-5070

TC2-4

腰部疾患データに基づく意思決定への可能性線形回帰分析の応用

Application of Possibilistic Linear Regression Analysis to Decision Making Based on Lumbar Disease Data

永井栄一* 奥田徹示* 満田基温**
Eiichi Nagai Tetsuji Okuda Motoharu Mitta
大阪工業大学* 神戸川崎病院**
Osaka Institute of Technology Kobe Kawasaki Hospital

Abstract: This paper presents indication to correct prognostication of doctors. The indication is based on a predictive model identified by a possibilistic linear regression method we proposed. The indication and the proposed method are shown using the operative cases of lumbar canal stenosis.

1．はじめに

医師は様々なデータをもとに予後を推定し，意思決定(治療方針の決定)を行うが，データが不十分なため，統計的手法でその推定が困難なことがある．その場合，経験や勘，知識をもとに予後を推定することがある．しかし，そのように推定した予後は，何らかの偏り(バイアス)[1]を含むことが多い．そこでここでは，提案する可能性線形回帰分析を用いて予後を予測するモデル(予後予測モデル)を同定し，そのモデルをもとに医師が自己の予測値と偏りを修正し，より的確な意思決定をするための指標を提示する．データが少なくまた不十分な例として，ある病院の腰部脊柱管狭窄症患者の手術を取り上げ，その方法を示す．

2．方法

2.1 予後予測モデルの対象

K病院における過去５年間(H元年～H５年)の腰部脊柱管狭窄症患者への手術１５例(表１)に対して，データが少なくまた不十分で，年齢，罹病期間などによる層別化が困難なため，予後を統計的手法で推定するのは困難と考えられた．

表１ データ

No	年齢	罹病期間	術前点数	術後点数	医師予測値
1	71	1	10	19	21
2	76	5	15	22	24
3	75	48	16	24	24.5
4	75	60	17	25	29
5	69	120	18	23	21.5
6	76	2	17	15	25
7	66	60	18	25	26
8	72	5	18	24	24
9	58	120	19	23	27.5
10	66	24	19	27	23.5
11	69	22	20	28	24
12	72	1	22	27	27.5
13	53	4	21	27	29
14	47	120	25	29	27
15	71	3	26	28	29

2.2 方法

予後は手術後の腰痛治療成績判定基準点数(日本整形外科学会の定める)とした．提案する可能性線形回帰分析(2.4に示す)を用いて，手術前の諸因子(x_1:年齢，x_2:罹病期間，x_3:手術前の腰痛治療成績判定基準点数)から，予後(y:手術後の腰痛治療成績判定基準点数)を推定するモデル(予後予測モデル)式(１)を同定した．モデルの同定には経験的知識(年齢，罹病期間の増加は予後に対して負に働く)を加えた．なお，データは実数，係数は三角形ファジィ数$A_j=(\alpha_j,c_j)$とした．

$$Y=A_0+A_1x_1+A_2x_2+A_3x_3 \qquad (1)$$

Y,A_0,A_1,A_2,A_3：三角形ファジィ数

手術を行った医師に手術前に予測した手術後の腰痛治療成績判定基準点数(医師の予測値)の聴取を行った．

予後予測モデルから得られた推定値と医師の予測値との関係から，医師の予測よりも良(悪)くなる可能性を算出し，医師の予測値，偏りの修正指標とした．ただし，推定値の上限は２９点(腰痛治療成績判定基準点数が２９点満点のため)とした．

2.3 医師の予測よりも良(悪)くなる可能性の算出

予後予測モデルの推定値が三角形ファジィ数で与えられることを利用した．図１のように推定値の上限と医師の予測値の間の面積を良くなる可能性，推定値の下限と医師の予測値との間の面積を悪くなる可能性と定め，その面積を算出した．

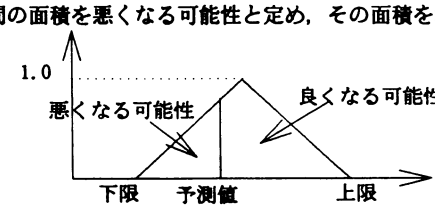


図１ 医師の予測値と推定値の関係

2.4 提案する可能性線形回帰分析

提案する手法は予測問題を対象に，今後生起するであろうデータの傾向の反映とモデルの幅の広がり過ぎを防ぐことを目的とする．本手法は，まず石渕の手法に準じて，まず異常値(ここでは飛び離れたデータ)を取り除く[2]．さらに経験的知識に一致するまでモデルに含まれるデータ数を減少し，今後生起するであろうデータの傾向の反映させたモデル(中間モデル)を求める．次に，その中間モデルをもとに，取り除かれたデータを再度取り込むようモデルの幅を広げ，適当な幅(広すぎない幅)を持つモデル(最終モデル)を同定する．モデルの幅はデータとモデル間の適合度により設定する．最終モデルの同定には，坂和らの手法に準じて，モデルの幅と適合度の間のトレードオフ比(大きくなり過ぎない方が良い)を指標にし[3]，できるだけ多くのデータを再度取り込むとともに，適合度が

大きくなり過ぎないようモデルを選択する．提案する手法の定式化を問題１に示す．なお，中間モデル(ｋ個のデータからｒ個のデータが取り除かれ，ｐ個のデータを含む可能性線形回帰モデル)が同定されたとし，適合度をｈ，再度取り込まれるデータ数をｔとする．

〈問題１〉

$$\min.h$$
$$\max.t$$
$$s.t.\ \left(\alpha x_i + L^{-1}(h)c|x_i| - y_i\right) \geq 0,\quad i = 1,2,\cdots,p$$
$$\left(\alpha x_i - L^{-1}(h)c|x_i| - y_i\right) \leq 0,\quad i = 1,2,\cdots,p$$
$$\left(\alpha x_i + \hat{c}|x_i| - y_i\right)v_i \geq 0,\quad l = 1,\cdots,r$$
$$\left(\alpha x_i - \hat{c}|x_i| - y_i\right)v_i \leq 0,\quad l = 1,\cdots,r$$
$$\sum_{l=1}^{r} v_l = t,\quad v_l = 0 or 1, l = 1,\cdots,r,\ c \geq 0$$

ただし，$\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_n)$, $x_i = (x_{i0}, x_{i1}, \cdots, x_{in})'$, $c = (c_0, c_1, \cdots, c_n)$, $|x_i| = (|x_{i0}|, |x_{i1}|, \cdots, |x_{in}|)'$ である．

また，最適なモデルの幅は次式から得られる．

$$\hat{c} = \frac{c}{L^{-1}(h)} \qquad (2)$$

なお，トレードオフ比は係数がここでは三角形ファジィ数であるので，次式より求められる．ここで$J(c_p)$は中間モデルの幅の総和を意味する．

$$\frac{\partial J(c_p)}{\partial h} = \frac{1}{(1-h)^2}\sum_{i=1}^{r} c|x_i| \qquad (3)$$

３．結果

提案手法のモデルによる推定値，医師の予測値，医師の予測より良(悪)くなる可能性の関係を図２に示す．また，提案手法，通常手法により同定されたモデルを表２に示す．

表２　予後予測モデル

提案手法	$Y = (13.849,0) + (-0.034,0.014)x_1 + (-0.010,0)x_2 + (0.772,0.098)x_3$
通常手法	$Y = (17.108,0) + (-0.159,0.063)x_1 + (0.005,0)x_2 + (0.870,0)x_3$

中間モデルは15個のデータから３個のデータが取り除かれ，12個のデータを含むモデルとなり，最終モデルは，表３のトレードオフ比から，再度取り込まれたデータ数ｔ＝２，適合度ｈ＝0.56が選択され，表２のモデルとなった．

表３　トレードオフ比

再度取り込まれたデータ数(t)と(データ)	適合度(ｈ)	トレードオフ比
1(No. 9)	０．５１	５９．５２
2(No. 9, No. 15)	０．５６	７３．８６
3(No. 9, No. 15, No. 6)	０．８８	９９２．３６

４．考察

4.1　医師の予測値，良(悪)くなる可能性について

経験や勘，知識をもとに推定された予後は何らかの偏り(バイアス)[1]が含まれることが多い．例えば，思い込みや最近治療を受けた患者をとりわけ重要視してしまったり，予後の良好例または悪化例を中心に予後を推定してしまうなどである．そのような偏りの影響を避けるため，実際のデータに基づく予後の推定は重要である．今回の例では，推定値が低いもの，すなわち年齢，罹病期間が大きく，手術前の状態が良くない患者に対して，医師の予測値が全体に高くなり，偏りが認められた．また，医師の予測よりも良(悪)くなる可能性の大小の傾向は，実測値と医師の予測値との差異にほぼ一致(15例中13例)し，医師の予測値の修正(意思決定)指標として有効と考えられた．医師は次の手術で，この予後予測モデルに基づく推定値と良(悪)くなる可能性から，自己の予測値と偏りを確認，修正し，より的確な意思決定が可能となると考えられる．

4.2　提案する可能性線形回帰分析について

データが不十分な場合の予後予測モデルの同定には，異常値を取り除くこと，ある程度予測の幅を広げること，経験的な知識を加えること，部分的な無知[4]が反映されることなどが必要である．なぜなら，モデルが異常値やデータ自体の偏りの影響を強く受け，予測の幅が広がり過ぎたり，今後生起するであろうデータの傾向を反映しないからである．また，モデルに取り込んだ要因以外の影響が考えられるからである．そのため，モデルの同定に可能性線形回帰分析を用いること，特に提案する手法を用いることは有効である．今回の例では，通常の手法により同定されたモデルは，飛び離れたデータ(表１，No. 6)の影響を強く受け，年齢へのあいまい度が大きく予測の幅が広がり過ぎ，経験的知識(年齢，罹病期間の増加は予後に対して負に働く)に一致していない．一方，提案手法によるモデルは，ある程度の幅を持ち，経験的知識にも一致し，予後予測モデルとして受け入れやすいモデルとなっている．

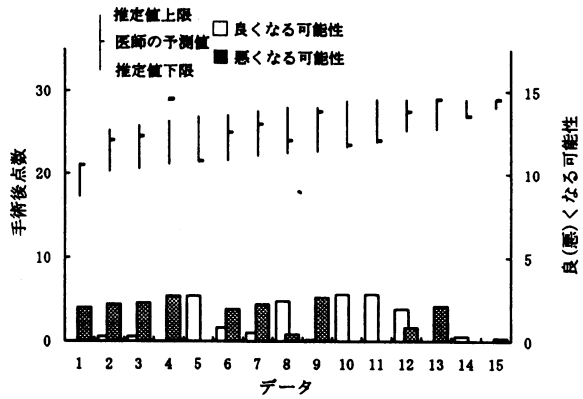


図２　推定値，医師予測値，予測より良(悪)くなる可能性

参考文献

1)久道 茂:医学判断学入門,南江堂,1990

2)石渕,田中:混合0-1整数計画問題による区間回帰分析,日本経営工学会誌,Vol. 40, No. 5, pp. 312-319, 1989

3)坂和,矢野:多目的ファジィ線形回帰分析とその応用,電子情報通信学会論文誌,Vol. J72-A, No. 5, pp. 778-785, 1989

4)田中,市橋:やさしいファジィ,日本電気文化センター,1992

連絡先

〒535 大阪市旭区大宮５-16-１
大阪工業大学経営工学科　奥田研究室
永井栄一
TEL:06-954-4328, FAX:06-952-6197

TC3-1

多重線型ファジィ積分の適用法
- ベクトル値被積分関数の評価 -

Application of multilinear fuzzy integral
- Evaluation of vector valued integrands -

松下 裕
Yutaka Matsushita
清水建設(株)和泉研究室
Izumi Research Institute, Shimizu Corporation

Abstract : The way of evaluating vector valued integrands called a *decomposition expression* (see Def. 2.4) is proposed for the additive case of our *ML (multilinear) fuzzy integral*. We show that distortional correlations between attributes cause the nonadditivity of fuzzy measures. This is derived from the fact that vector valued functions express correlations by the decomposition. In addition, the additive ML fuzzy integral of vector valued functions can be identified with a functional in the nonlinear utility theory, which has a nonlinear utility representation for joint probability distributions and a linear utility representation for marginal ones.

1. はじめに

既報[1]でvon Neumann - Morgensternの線型効用理論の多重線型効用関数に注目し、ベクトル値関数のファジィ積分の定式化を行ったが、被積分関数の評価方法を示しておらず、本理論の具体的な適用方法が明確になっていなかった。本稿では、このファジィ積分を加法形に限定して、ベクトル値関数としての被積分関数の評価方法を提案する。この評価方法に基づいて、属性の相関とファジィ測度の非加法性との関係についても調べる。さらに、非線型効用理論の立場から、ベクトル値関数のファジィ積分(加法形)の理論づけを行う。

2. ベクトル値関数のファジィ積分

2.1 多重線型ファジィ積分

属性全体の集合を$N=\{1,2\}$とし、N上の単純関数を$h=h_1\chi_{\{1\}}+h_2\chi_{\{2\}}(h_1,h_2\in\mathbf{R})$とする。ここに$\chi_{\{1\}},\chi_{\{2\}}$は集合$\{1\},\{2\}$の定義関数であり、$\mathbf{R}$は実数全体の集合である。

[定義2.1] 2^N上の集合関数μが次の条件を満たすとき2^N上のファジィ測度という：

(i) $\mu(\varnothing)=0$, $\mu(N)=1$.
(ii) $A,B\in 2^N, A\subseteq B$ならば、$\mu(A)\leqq\mu(B)$.

[定義2.2] 単純関数hのファジィ測度μによる多重線型ファジィ積分は次の式で定義される：

$$(\mathrm{ML})\int h\,\mathrm{d}\mu = h_1\mu(\{1\})+h_2\mu(\{2\}) + h_1h_2(\,\mu(\{1,2\})-\mu(\{1\})-\mu(\{2\})\,). \quad (1)$$

このファジィ積分は多重線型効用関数を特徴づける写像により得られたものであるが[1][2]、その写像は

$$\Phi(h_1,h_2)=h_1g_1+h_2g_2+h_1h_2g_{12} \quad (2)$$

と表される。ここに、g_1,g_2,g_{12}は係数であり、特に$0\leqq g_1\leqq 1, 0\leqq g_2\leqq 1$である。一般に$\Phi$は正規化($\Phi(1,1)=1$)されており、この場合、係数間に

$$g_1+g_2+g_{12}=1 \quad (3)$$

という関係が成り立つ。従って、多重線型効用関数を特徴づける写像とは(2),(3)式を満たす関数として定義できる。多重線型ファジィ積分とは(2)式の係数をファジィ測度で表した積分である。

ベクトル値関数のファジィ積分は写像Φをベクトル変数に拡張して得られたものである[1]。Vを$\mathbf{R}$上の2次元ベクトル空間、(e_1,e_2)をその基底とする。Vの任意の2つの元は次のように表される：

$$v_1=\xi_{11}e_1+\xi_{21}e_2,\ v_2=\xi_{12}e_1+\xi_{22}e_2\quad(\xi_{ij}\in\mathbf{R}).$$

これより、N上のベクトル値の単純関数を$v=v_1\chi_{\{1\}}+v_2\chi_{\{2\}}$と表す。

[定義2.3] ベクトル値の単純関数vのファジィ測度μによる多重線型ファジィ積分は次の式で定義される：

$$(\mathrm{ML})\int v\,\mathrm{d}\mu=(\xi_{11}+\xi_{12})\mu(\{1\})+(\xi_{21}+\xi_{22})\mu(\{2\}) + (\xi_{11}\xi_{22}-\xi_{12}\xi_{21})(\,\mu(\{1,2\})-\mu(\{1\})-\mu(\{2\})\,). \quad (4)$$

2.2 ベクトル値関数の評価方法

(4)式のファジィ積分において加法形の場合：

$$(\mathrm{ML})_{\mathrm{ad}}\int v\,\mathrm{d}\mu=(\xi_{11}+\xi_{12})\mu(\{1\})+(\xi_{21}+\xi_{22})\mu(\{2\}) \quad (5)$$

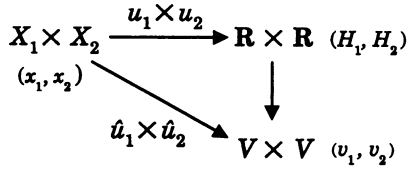
に限定して、ベクトル値関数vの評価法を考える。

2属性の結果集合を$X = X_1 \times X_2$と表し、その元(属性値)を$x = (x_1, x_2)$と書くことにする。(1)式および(4)式の単純関数h, vを、それぞれ写像$u_i : X_i \to \mathbf{R}$, $\hat{u}_i : X_i \to V$ ($i=1,2$)により$u_i(x_i)=h_i$, $\hat{u}_i(x_i)=v_i$として属性値に達成度を割り付けられたものと見なす。

[定義2.4] 属性の達成度$H_1, H_2 \in \mathbf{R}$が分解表示されるとは次で表されるときをいう:

$$H_1 = \xi_{11}+\xi_{12},\ H_2 = \xi_{21}+\xi_{22}.$$

分解表示において次の可換な図式が得られる:



なぜなら、(5)式の場合を問題にしているので(写像Φをベクトル変数に拡張したとき交代テンソルで表される項がなくなり[1]) $V \times V = V \oplus V$と考えることができ、

$$\begin{aligned}(v_1, v_2) &= v_1 + v_2\\ &= (\xi_{11}+\xi_{12})e_1+(\xi_{21}+\xi_{22})e_2\\ &= ((\xi_{11}+\xi_{12}), (\xi_{21}+\xi_{22})) = (H_1, H_2)\end{aligned}$$

となるからである。従って、任意のベクトル値関数vは適当な分解表示(H_1, H_2)により表されることになる。この結果、分解表示はベクトル値関数の一つの評価方法となる。分解表示の意味は、各属性の達成度は一般に他の属性をあるレベルに固定して測定されることが多いので、例えばξ_{12}は属性{1}の達成度として属性{2}からの寄与の成分と見なせるということにある。従って、分解表示においてξ_{11}, ξ_{22}を属性の直接的成分、ξ_{12}, ξ_{21}を間接的成分と解釈する。

[命題2.1] 分解表示のH_1, H_2を

$$\begin{cases}\xi_{11}=(k_1+k_{12}h_2)h_1,\ \xi_{12}=k_2h_2\\ \xi_{22}=(k_2'+k_{12}'h_1)h_2,\ \xi_{21}=k_1'h_1\end{cases} \qquad (6)$$

ただし$k_1+k_2+k_{12}=1$, $k_1'+k_2'+k_{12}'=1$

と評価すれば、$(\mathrm{ML})_{ad}\int v\,d\mu$に一つの$(\mathrm{ML})\int h\,d\mu$が対応する。逆に、$H_1$ (H_2)を(6)式の上段(下段)で定めれば、$(\mathrm{ML})\int h\,d\mu$に$(\mathrm{ML})_{ad}\int v\,d\mu$が一つ対応する。

命題2.1の主張は、Φ_1, Φ_2, Φを多重線型効用関数の写像とすれば

$$\lambda\Phi_1 + (1-\lambda)\Phi_2 = \Phi \quad (0 \leqq \lambda \leqq 1)$$

が成り立つということであり、このうち左辺は$(\mathrm{ML})_{ad}\int v\,d\mu$で記述でき、右辺は$(\mathrm{ML})\int h\,d\mu$で記述できるということである。ところで、分解表示は属性の達成度(H_1, H_2)の間の相関を表現できるから、命題は図1のような歪みのある属性間の相関はファジィ測度の非加法性を引き起こすことを示している。以上の概略を示すと次のようになる。

$(\mathrm{ML})_{ad}\int v\,d\mu$ ⇌ $(\mathrm{ML})\int h\,d\mu$

属性間の相関　　ファジィ測度の非加法性

[証明] $\mu(\{1\})+\mu(\{2\})=1$だから$\mu(\{1\})=\lambda$, $\mu(\{2\})=1-\lambda$ ($0 \leqq \lambda \leqq 1$)とおく。(5)式に(6)式を代入すれば、

$$\begin{aligned}&(\mathrm{ML})_{ad}\int v\,d\mu\\ &= ((k_1+k_{12}h_2)h_1+k_2h_2)\lambda+((k_2'+k_{12}'h_1)h_2+k_1'h_1)(1-\lambda)\\ &= (\lambda k_1+(1-\lambda)k_1')h_1+(\lambda k_2+(1-\lambda)k_2')h_2\\ &\qquad +(\lambda k_{12}+(1-\lambda)k_{12}'))h_1h_2\end{aligned}$$

となる。ここで$(\lambda k_1+(1-\lambda)k_1')+(\lambda k_2+(1-\lambda)k_2')+(\lambda k_{12}+(1-\lambda)k_{12}')=1$である。従ってファジィ測度$\mu'$の値を$(\lambda k_1+(1-\lambda)k_1')=\mu'(\{1\})$, $(\lambda k_2+(1-\lambda)k_2')=\mu'(\{2\})$で与えれば、$(\lambda k_{12}+(1-\lambda)k_{12}')=\mu'(\{1,2\})-\mu'(\{1\})-\mu'(\{2\})$とでき、$(\mathrm{ML})_{ad}\int v\,d\mu=(\mathrm{ML})\int h\,d\mu$となる。逆は、$\lambda=1$のとき明らかだから$\lambda \neq 1$として証明する。$(\mathrm{ML})\int h\,d\mu = h_1g_1+h_2g_2+h_1h_2g_{12}$ ($g_1+g_2+g_{12}=1$)と書き、これから(5)式の右辺第1項$(\xi_{11}+\xi_{12})\lambda$を差し引けば

$$\begin{aligned}&(\mathrm{ML})\int h\,d\mu-(\xi_{11}+\xi_{12})\lambda\\ &= (g_1-\lambda k_1)h_1+(g_2-\lambda k_2)h_2+(g_{12}-\lambda k_{12})h_1h_2\end{aligned}$$

となる。ここで、(右辺の係数の総和)$=1-\lambda$となるので、$\xi_{21}=(g_1-\lambda k_1)h_1/(1-\lambda)$, $\xi_{22}=\{(g_2-\lambda k_2)+(g_{12}-\lambda k_{12})h_1\}h_2/(1-\lambda)$とおけば、$(\mathrm{ML})\int h\,d\mu-(\xi_{11}+\xi_{12})\lambda=(\xi_{21}+\xi_{22})(1-\lambda)$となり結論を得る。■

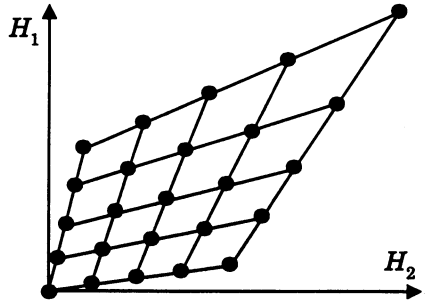


図1 歪みのある属性間の相関

3. 効用理論からの考察

3.1 線型効用理論

PをX上の単純確率分布全体の集合とし、$\succeq$をP上の2項関係(選好)とする。以下、Pの元をp, q, rで表し$0<\alpha<1$とする。さらに、$\succeq$から派生されるP上の2項関係$\succ$, $\sim$を次で定義する:

$$p \succ q \ \Leftrightarrow\ p \succeq q \text{ and not } q \succeq p,$$
$$p \sim q \ \Leftrightarrow\ p \succeq q \text{ and } q \succeq p.$$

von Neumann - Morgenstern の線型効用理論[3]は、$(P,\succeq)$がA1：弱順序、A2：独立性、A3：連続性の原理を満たすならばそのときに限り、

$$p \succ q \Leftrightarrow u(p) > u(q),$$
$$u(\lambda p+(1-\lambda)q) = \lambda u(p)+(1-\lambda)u(q)\ (0\leqq\lambda\leqq 1)$$

となる順序同型かつ線型なP上の実数値関数uが存在すること(線型効用表現)を保証している。さらに、このようなuは正のアフィン変換で一意的である；

$$v = au + b\ (a > 0). \tag{7}$$

さらに多属性の場合$(X=X_1\times X_2)$、uの分解表現が提案されている。多重線型効用関数もそのうちの一つであり、X_1とX_2が相互に効用独立であるという条件によって導かれる。概説すれば、X_1がX_2に効用独立であるとは

$$(p_1, x_2^0)\succeq(p_1', x_2^0)\ \text{for some}\ x_2^0\in X_2$$
$$\Rightarrow\ (p_1, x_2)\succeq(p_1', x_2)\ \text{for}\ \forall x_2^0\in X_2$$

ということである。ここに、(p_1, x_2)はPの特別な元であり、X_2上の確率は一点x_2で1、X_1上では周辺確率p_1となるものである。従って、(7)式より、X_2の値を一点で固定したときの効用関数は$u(p_1, x_2) = a(x_2)u(p_1, x_2^0) + b(x_2)$となるが、さらに$p_1$を$\xi_1\in X_1$で確率1に固定すれば

$$u(\xi_1, x_2) = a(x_2)u(\xi_1, x_2^0)+ b(x_2) \tag{8}$$

と書ける。(2)式の写像はさらにX_2がX_1に効用独立であることを要請して求められる。従って、線型効用理論の枠組みで効用独立を考えた場合、(2)式の実数変数の写像で十分ということになる。

3.2 非線型効用理論

線型効用理論において特に独立性の原理(A2)：

$$p\succ q\ \Rightarrow\ \alpha p+(1-\alpha)r\succ\alpha q+(1-\alpha)r\ (0<\alpha<1)$$

が問題視され、新たな枠組みで効用関数の存在に対する条件の研究が行われた[4]。

このうちの一つの効用関数の存在条件を述べる。

C1 連続性： $p\succ q\succ r\ \Rightarrow\ q\sim\alpha p+(1-\alpha)r$ for some α.

C2 凸性： $p\succ q, p\succeq r\ \Rightarrow\ p\succ\alpha q+(1-\alpha)r$,
$p\sim q, p\sim r\ \Rightarrow\ p\sim\alpha q+(1-\alpha)r$,
$q\succ p, r\succeq p\ \Rightarrow\ \alpha q+(1-\alpha)r\succ p$.

A1(~)： ~は推移的である.

[命題3.1][4 p.16] この原理において次が成り立つ：

R1 C1, C2 ⇒ C1のαは一意的である.

R2 C1, C2, A1(~) ⇒ $\succ$は推移的である.

[定義3.1] $(P,\succeq)$が**加算有界** (countable bounded) であるとは、Pの加算部分集合Qが存在して $\forall p\in P, \exists q, q'\in Q$ s.h. $q\succeq p\succeq q'$ を満たすときをいう。特にQが有限集合であるとき、$(P,\succeq)$は**有限有界**ということにする。

[定理3.1][4 p.116] $(P,\succeq)$がA1(~), C1, C2 を満たし加算有界であるならばそのときに限り、P上の実数値関数uが存在して次を満たす：

$$p\succ q\ \Leftrightarrow\ u(p) > u(q),$$
$$p\succ q\ \Rightarrow\ u(\lambda p+(1-\lambda)q)\ \text{は}\ \lambda\ (0\leqq\lambda\leqq 1)\ \text{に関して連続かつ増加関数である.}$$

従って、独立性(A2)が否定された場合でも、線型とは限らないが順序同型な効用関数の存在が保証される。この効用関数による選好の表現を$(P,\succeq)$の**推移的凸表現** (transitive convex representation) と呼ぶ。

3.3 $(ML)_{ad}\int v\,d\mu$ と非線型効用表現

任意の$p\in P$に対して$p\to(p_1, p_2)$と記述する。ここに、p_1, p_2はX_1, X_2上の周辺確率分布である。一般に周辺確率分布p_1, p_2が与えられても結合分布pは一意的に決定されるとは限らないことに注意を要する。そこで、この記述に意味を持たせるために、

$$p_i = q_i\ (i=1,2)\ \Rightarrow\ p\sim q$$

という条件を導入する。

ここで、結合分布$p\to(p_1, p_2)$には独立性(A2)を否定し、周辺分布$(p_1, x_2), (x_1, p_2)$には独立性(A2)を認める場合を問題にする。このとき、任意の(p_1, p_2)に対して、推移的凸表現の効用関数$u(p_1, p_2)$はx_1, x_2を適当に固定して得られる周辺分布の線型効用表現の効用関数$u(p_1, x_2), u(x_1, p_2)$によって

$$(p_1, p_2)\sim\lambda(p_1, x_2)+(1-\lambda)(x_1, p_2)\ (0\leqq\lambda\leqq 1)$$
$$\Rightarrow\ u((p_1, p_2)) = \lambda u((p_1, x_2))+(1-\lambda)u((x_1, p_2))\ (*)$$

と表されるかどうかを考える。ただしX_1, X_2に最良値、最悪値の存在を仮定する。もし、(*)が言えるならば周辺分布に対して効用独立の条件を考えることは意味があり(8)式において$a(x_2)u(\xi_1, x_2^0) = (k_1+k_{12}u_2(\xi_2))\,u_1(\xi_1), b(x_2) = k_2u_2(\xi_2)$と設定できるとき命題2.2の$(ML)_{ad}\int v\,d\mu$を$u$で表すことが可能になる。

[命題3.2] $(P,\succeq)$がA1(~), C1, C2 を満たし有限有界であるならば、推移的凸表現の効用関数において(*)のように表現できる。さらにこの効用関数は正のアフィン変換に関して一意的である。

[証明] 証明の方針は定理3.1と同様であるので、主に2属性の場合の標準列の作り方を説明する。$\succ = \varnothing$ の場合は明らかなので $\succ \neq \varnothing$ とする。

まず(*)の仮定が言えることを示す。任意に(p_1, p_2)を固定する。必要ならばx_1, x_2としてX_1の最良値, X_2の最悪値を選ぶことにすれば、$\succeq$の有限有界性と弱順序(R2)により $(p_1, x_2) \succ (p_1, p_2) \succ (x_1, p_2)$ or $(p_1, p_2) \sim (p_1, x_2)$ $((p_1, p_2) \sim (x_1, p_2))$ とできる。前者はR1より$\lambda \in (0, 1)$が存在して$(p_1, p_2) \sim \lambda(p_1, x_2) + (1-\lambda)(x_1, p_2)$ とでき、後者は$\lambda = 1$ (or 0) の場合である。

$Q_1, Q_2 \subset P$を次の形の元からなる有限集合とする:

$$Q_1 = \{ s_1{}^i = (p_1{}^i, x_2) \ (i=1,\cdots n) \},$$
$$Q_2 = \{ s_2{}^i = (x_1, p_2{}^i) \ (i=1,\cdots m) \}.$$

$(p_1, x_2) = \mathbf{p}^1, (x_1, p_2) = \mathbf{p}^0$とおく。このもとに、標準列$\{\mathbf{p}^i\}$を次のような手順:

$$s_1{}^k \succ \mathbf{p}^1 \Rightarrow \mathbf{p}^2 = s_1{}^k, \cdots, s_1{}^{k'} \succ \mathbf{p}^i \Rightarrow \mathbf{p}^{i+1} = s_1{}^{k'}$$
$$\mathbf{p}^0 \succ s_2{}^k \Rightarrow \mathbf{p}^{-1} = s_2{}^k, \cdots, \mathbf{p}^{-i} \succ s_2{}^{k'} \Rightarrow \mathbf{p}^{-i-1} = s_1{}^{k'}$$

(ただし, k, k' は上の関係を満たすQ_1, Q_2 の並びの中の最初の元の番号である.)

で構成する。x_1, x_2の最初の取り方に注意すれば全ての$(q_1, q_2) \in P$ に対して、$\succeq$の有限有界性と弱順序(R2)より、あるi(唯一) に対して$\mathbf{p}^{i+1} \succ (q_1, q_2) \succ \mathbf{p}^i$ or $(q_1, q_2) \sim \mathbf{p}^i$となり次のようにできる:

$$(q_1, q_2) \sim \mu\mathbf{p}^{i+1} + (1-\mu)\mathbf{p}^i \quad (0 \leqq \mu \leqq 1) \qquad (9)$$

従って、P上の効用関数を

$$u((q_1, q_2)) = u(\mu\mathbf{p}^{i+1} + (1-\mu)\mathbf{p}^i)$$
$$= \mu(i+1) + (1-\mu)i = \mu + i \qquad (10)$$

で定義すれば、C2と弱順序より $p \succ q \Leftrightarrow u(p) > u(q)$ となり順序同型性が示される。次に$u((q_1, q_2))$が(*)のように表示されることを示す。いま(q_1, q_2)に対して新たに$y_1 \in X_1, y_2 \in X_2$を固定すれば、$(q_1, q_2) \sim \alpha(q_1, y_2) + (1-\alpha)(y_1, q_2)$とできる。ここで$(q_1, y_2), (y_1, q_2)$を$(q_1, q_2)$に十分近づけて $\mathbf{p}^{i+1} \succ (q_1, y_2), (y_1, q_2) \succ \mathbf{p}^i$ となるように取れば、$(q_1, y_2) \sim \beta\mathbf{p}^{i+1} + (1-\beta)\mathbf{p}^i, (y_1, q_2) \sim \gamma\mathbf{p}^{i+1} + (1-\gamma)\mathbf{p}^i$ となる。従って、A1(~)より $(q_1, q_2) \sim (\alpha\beta + (1-\alpha)\gamma)\mathbf{p}^{i+1} + (\alpha(1-\beta) + (1-\alpha)(1-\beta))(y_1, q_2)$となり、(9)式とR1から、$\mu = \alpha\beta + (1-\alpha)\gamma$ が得られる。従って、$u((q_1, y_2)) = \beta + i$, $u((y_1, q_2)) = \gamma + i$ だから、$\alpha u((q_1, y_2)) + (1-\alpha)u((y_1, q_2)) = \mu + i = u((q_1, q_2))$ ((10)式) となる。最後に、$u((q_1, y_2))$ が線型であることを示す。標準列に対して$u(\mathbf{p}^i) = i$とすれば $u(\mu\mathbf{p}^{i+1} + (1-\mu)\mathbf{p}^i) = \mu u(\mathbf{p}^{i+1}) + (1-\mu)u(\mathbf{p}^i)$ $(i = 1,\cdots,n)$ は(10)式より明らかである。Q_1 の全ての元に対する線型性を示す。$i \geqq 1$では$\mathbf{q}^i = \mathbf{p}^i$とおき、また$Q_1$の$\{\mathbf{p}^i\}$以外の元については、先と同様な方法で、しかも

$$\mathbf{p}^1 \succ \mathbf{q}^0 \succ \mathbf{p}^0, \cdots, \mathbf{p}^{-i+1} \succ \mathbf{q}^{-i} \succ \mathbf{p}^{-i}$$

を満たすようにして新たな標準列$\{\mathbf{q}^i\}$を作る。このとき$u(\mathbf{q}^{-j}) = \alpha u(\mathbf{p}^{-j+1}) + (1-\alpha)u(\mathbf{p}^{-j})$とできるから$u(\mu\mathbf{q}^i + (1-\mu)\mathbf{q}^{-j}) = \mu i + (1-\mu)(\alpha - j)$ と定義すれば$u(\mu\mathbf{q}^i + (1-\mu)\mathbf{q}^{-j}) = \mu u(\mathbf{q}^i) + (1-\mu)u(\mathbf{q}^{-j})$ が成り立つ。$\succeq$の有限有界性と弱順序から任意の$(q_1, y_2) \in P$に対して$\mathbf{q}^{i+1} \succ (q_1, y_2) \succ \mathbf{q}^i$ or $(q_1, y_2) \sim \mathbf{q}^i$ となるから上の関係より$u((q_1, y_2))$ の線型性が示される。$u((y_1, q_2))$の線型性も同様に示される。さらにuが正のアフィン変換に関して一意的であることはその構成法より明らかである。 ■

5. まとめ

本稿では、ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分(加法形) の被積分関数の評価方法として分解表示を提案した。分解表示を適用することにより、歪みのある属性間の相関がファジィ測度の非加法性を引き起こすということを導いた(命題2.1)。さらに、非線型効用理論からの考察により、加法形のベクトル値関数のファジィ積分は、結合確率分布については非線型効用表現(推移的凸表現)を持ち、周辺確率分布については線型効用表現を持つ効用関数と同一視されることを示した。従って、命題2.1を言いかえれば、多重線型効用関数が推移的凸表現の特殊な場合と見なされるということになる。

謝辞

なお、この研究は通産省の産業科学技術開発プロジェクト「人間感覚計測応用技術の研究開発」の受託研究の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) および(社)人間生活工学研究センターに協力して行われたものである。

参考文献

[1] 松下 : ベクトル値関数のファジィ積分, 第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 (1994) pp.799-802.

[2] 松下 : 相互効用独立な効用関数のファジィ積分表示, 第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 (1993) pp.685-688.

[3] 市川編 : 多目的決定の理論と方法, 計測自動制御学会 (1980).

[4] P. C. Fishburn : Nonlinear preference and utility theory, Baltimore: John Hopkins Univ. Press. (1988)

問合せ先

〒100 千代田区内幸町2−2−2フコク生命ビル
清水建設(株)和泉研究室 松下 裕
Tel : 3508−8101 Fax : 3508−2196
E-mail : yutaka@ori . shimz . co . jp

TC3-2

多重線形型ファジィ積分の適用法
―直交多項式との比較―
Application of multilinear fuzzy integral
- Comparison with orthogonal polynomials -

○神原　浩，松下　裕
○ Hiroshi Kambara, Yutaka Matsushita
清水建設（株）和泉研究室
Izumi Reaserch Institute Shimizu Corporation

Abstract: This paper shows the consideration to the effects of the correlation between attributes on nonadditivity of fuzzy measures. Correlated input data can be composed of the attributes values expressed in decomposable forms. Then output data corresponding to those input data are created by fuzzy integral of vector valued functions. The relation between those output data and uncorrelated input data is investigated by fuzzy integral of real valued functions and orthogonal polynomials. Finally, we draws concludions from the comparison of those modeling methods.

1．はじめに

著者らは、これまでにファジィ積分を用いて主観的評価プロセスのモデル化[1]を行い良好な結果を得た。しかし、このとき、属性には相関がないものとして扱っているが、現実の評価問題では属性間の相関を無視できない場合も考えられる。本稿では、属性間に相関がある場合の評価プロセスのモデル化について留意する点を考察する。具体的には、ベクトル値関数のファジィ積分[2]、実数値関数のファジィ積分[3]、直交多項式[4]による手法の比較を行う。

2．多重線形型ファジィ積分と直交多項式

2.1　多重線形型ファジィ積分

以下では問題を2属性で考える。属性全体の集合を$N=\{1,2\}$としN上の単純関数を

$$h=h_1\chi(\{1\})+h_2\chi(\{2\}) \qquad (h_1,h_2\in \mathrm{R})$$

とする。ここで、Rは実数全体の集合、χはNの定義関数である。

多重線形型ファジィ積分は多重線形効用関数を特徴づける写像

$$\Phi(h_1,h_2)=h_1g_1+h_2g_2+h_1h_2g_{12} \qquad (1)$$

をファジィ積分表示[3]したものである。

[定義2.1] 単純関数hの2^N上のファジィ測度μによる実数値関数の**多重線型形ファジィ積分**は以下で定義される。

$$(ML)\int h_i d\mu = h_1\mu(\{1\})+h_2\mu(\{2\}) +h_1h_2[\mu(\{1,2\})-\mu(\{1\})-\mu(\{2\})] \qquad (2)$$

ベクトル値関数のファジィ積分は(1)式の写像をベクトル変数に拡張したものをファジィ積分表示したものである[2]。Vを2次元のベクトル空間、(e_1,e_2)をその基底としたとき、V上の任意の2つの元は

$$\begin{cases} v_1=\xi_{11}e_1+\xi_{21}e_2 \\ v_2=\xi_{21}e_1+\xi_{22}e_2 \end{cases} \quad (\xi_{ij}\in \mathrm{R})$$

で表される。ここで、N上のベクトル値の単純関数と$v=v_1\chi(\{1\})+v_2\chi(\{2\})$する。

[定義2.2] **ベクトル値関数**の単純関数vの2^N上のファジィ測度μによる**多重線型形ファジィ積分**は次で定義される。

$$(ML)\int v_i d\mu=(\xi_{11}+\xi_{12})\mu(\{1\})+(\xi_{21}+\xi_{22})\mu(\{2\}) +(\xi_{11}\xi_{22}+\xi_{12}\xi_{21})[\mu(\{1,2\})-\mu(\{1\})-\mu(\{2\})] \qquad (3)$$

2.2　直交多項式

実験計画法においてデータの構造を明らかにするための分析方法の一つとして直交多項式がある。直交多項式では実験データを一つの属性Xについて

$$y=b_0+b_1f_1(x)+b_2f_2(x)+b_3f_3(x)+\cdots \qquad (4)$$

$$\text{但し、}\sum_{v=1}^{k} f_i(x_v)f_j(x_v)=0$$

で示すように直交する関数に展開して表す。このとき$f_i(x)$はxに関するi次関数である。したがってデータの全変動は

$$S_T=Sx_1+Sx_2+Sx_3+\cdots$$

で示すように各項に起因する変動に分解することができる。ここで、S_Tは全変動、S_{xi}は関数$f_i(x)$による変動を表す。これにより、直交多項式では分散分析を用いて各項が実験データに対して有意に作用しているかを

検定し、有意な属性だけでモデルを構成することができる。

3．入力に相関がない場合のモデル化手法の比較

図1に示すような2元配置により表される実験データは、基本的に属性間に相関がない場合を扱うものである。このとき、2属性X_1, X_2による直交多項式は式 (4) をかけ合わせたものとして

$$y = g_0 + g_{10}f_1^1(x_1) + f_2^1(x_1) + g_{30}f_3^1(x_1) + \cdots$$
$$+ g_{01}f_1^2(x_2) + g_{02}f_2^2(x_2) + g_{03}f_3^2(x_2) + \cdots \quad (5)$$
$$+ g_{11}f_1^1(x_1)f_1^2(x_2) + g_{12}f_1^1(x_1)f_2^2(x_2) + \cdots$$

で表される。ここで$f_j^i(x_i)$はX_iのj次関数で属性間に相関がないことより$\sum_{u=1}^{n1}\sum_{v=1}^{n2} f_i^1(x_1^u)f_j^2(x_2^v) = 0$が成り立つ。いま、属性$X_1$, X_2において一次の関数とそれらをかけ合わせたものだけが有意であるとすると (5) 式は以下のようになる。

$$y_{ij} = g_0 + g_{10}(x_{1i} - \bar{x}_1) + g_{01}(x_{2j} - \bar{x}_2)$$
$$+ g_{11}(x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2j} - \bar{x}_2) \quad (6)$$
（$\bar{x}_i$はx_iの平均値）

ここで、$\bar{y} = 0, \bar{x}_1 = 0, \bar{x}_2 = 0$とすれば (6) 式は

$$y_{ij} = g_{10}x_{1i} + g_{01}x_{2j} + g_{11}x_{1i}x_{2j}$$

となる。さらに

$$g_{10} = \mu(\{1\}),\ g_{01} = \mu(\{1\})$$
$$g_{11} = \mu(\{1,2\}) - \mu(\{1\}) - \mu(\{2\})$$

を考えればファジィ積分モデルと同じ構造を示すことが分かる。

また、直交多項式では属性の寄与を変動で表すが、(6) 式のモデル式では回帰係数と変動には$S_{ij} = cg_{ij}^2$ (cは定数) の関係があり、変動によって回帰係数を表すことができる。このことは、変動によってファジィ測度が表現できることを示している。

		属性X_2の属性値			
		x_2^1	x_2^2	$\cdot\ x_2^j\ \cdot$	x_2^{n2}
属性X_1の属性値	x_1^1	y_{11}	y_{12}	$\cdot\ \cdot\ \cdot$	y_{1n2}
	x_1^2	y_{21}	y_{22}	$\cdot\ \cdot\ \cdot$	y_{2n2}
	$\cdot$ x_1^i $\cdot$	$\cdot$ $\cdot$ $\cdot$	$\cdot$ $\cdot$ $\cdot$	$\cdot\ \cdot\ \cdot$ $\cdot\ y_{ij}\ \cdot$ $\cdot\ \cdot\ \cdot$	$\cdot$ $\cdot$ $\cdot$
	x_1^{n1}	y_{n11}	y_{n12}	$\cdot\ \cdot\ \cdot$	y_{n1n2}

図1　2元配置

4．入力に相関がある場合のモデル化手法の比較

4-1　分解表示とベクトル表示

ある属性の達成度は他の属性をあるレベルで固定して求められる場合が多く、純粋にそれ自身の値というよりは他の属性からの影響込みの値と考えるほうが自然である。ここで、属性X_1, X_2の達成度h_1, h_2 ($h_1, h_2 \in \mathrm{R}$) を

$$\begin{cases} h_1 = \xi_{11} + \xi_{12} \\ h_2 = \xi_{21} + \xi_{22} \end{cases} \quad (\xi_{ij} \in \mathrm{R})$$

のように分解表示で与えた場合を考える。ξ_{ij} (i,j=1,2) を図2のように評価すると分解表示により属性間に相関のあるデータを構成することができる。

(3) 式のファジィ積分において加法形：

$$(ML)\int v_i d\mu = (\xi_{11} + \xi_{12})\mu(\{1\}) + (\xi_{21} + \xi_{22})\mu(\{2\}) \quad (7)$$

に限定して考える。このとき、分解表示は属性の達成度のベクトル値関数による表現を一つ与える。それは次のようにして説明できる。X_1, X_2の属性値にベクトルv_1, v_2 ($v_1, v_2 \in V$) を対応させれば、

$$(x_1, x_2) \mapsto (v_1, v_2) = (\xi_{11}e_1 + \xi_{21}e_2, \xi_{12}e_1 + \xi_{22}e_2)$$

となる。いま (7) 式の加法形を考えているので、さらに対応$(v_1, v_2) \mapsto v_1 + v_2$を考えれば上式右辺は$(\xi_{11} + \xi_{12}, \xi_{21} + \xi_{22}) = (h_1, h_2)$とみなすことができ、属性値$(x_1, x_2)$に分解表示による値$(h_1, h_2)$が対応することになる。

4-2　入出力系の構成

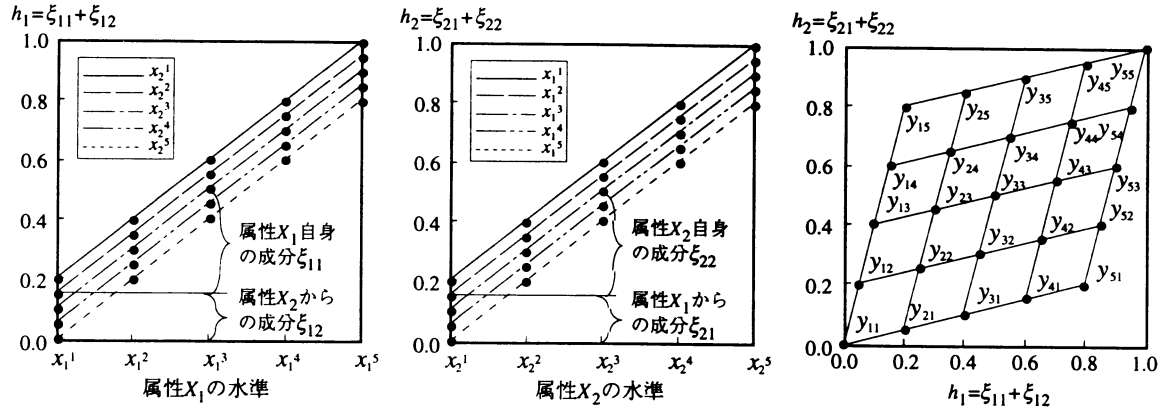
入力に相関があるデータの解析手法として、次のものが考えられる。

[1]　相関があるデータとしてモデル化。
[2]　相関がない形に修正してモデル化。
[3]　欠測値がある場合の直交多項式でモデル化。

一方、分解表示は属性間の相関を表現でき、分解表示でベクトル値関数は一意的に対応するので、ベクトル値関数のファジィ積分では入力に相関のある場合の入出力系をモデル化することができる。

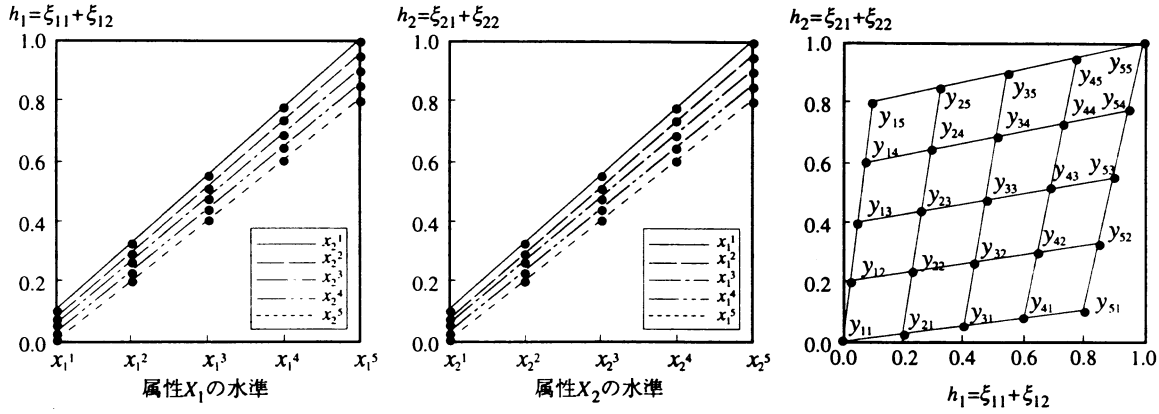
まず、入力の相関は図2、3に示すような2ケースを考える。Case-1は図2に示すように属性値の傾きが他の属性値によらず一定、すなわちξ_{11}, ξ_{22}が一定である場合であり、散布図は平行四辺形になる。Case-2は図3に示すように属性値の傾きが一定でない場合であり、散布図は歪んだ四角形になる。

次に、入力に相関がある入出力系を図4に示すように加法的なベクトル値関数のファジィ積分で構築する。このとき、各係数はg_1=0.7, g_2=0.3, g_{12}=0として



(a) 属性X_1の達成度　(b) 属性X_2の達成度　(c) h_1-h_2関係

図2　相関のある入力データ（Case-1）



(a) 属性X_1の達成度　(b) 属性X_2の達成度　(c) h_1-h_2関係

図3　相関のある入力データ（Case-2）

出力Eを求め、数値計算で扱う入出力系のうちの標準的な出力とする。

4-3　数値実験

上のようにして得られた出力Eに対して、実数値関数のファジィ積分と欠測値がある場合の直交多項式の2つの手法でどのようにモデル化されるかを数値実験により検討する。実数値関数のファジィ積分では図4の出力に対して、図5に示すように入力の属性の相関を無視した形で入出力系をモデル化したものである。この概略を図6に示す。欠測値のある直交多項式では、図7に示すように散布図の値を2元配置となるように並び替え、空欄には誤差変動が最小となるような値を与えて完全な2元配置としてモデル化する。

Case-1,2の出力に対して実数値関数のファジィ積分でモデル化した結果を表1に、直交多項式でモデル化した結果を2に示す。表中のRは重相関係数を示す。散布図において歪みのある入力の相関は、相関を

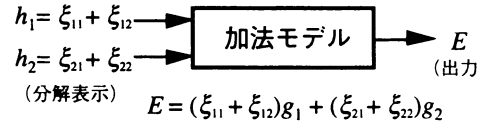


図4　入出力系の構成

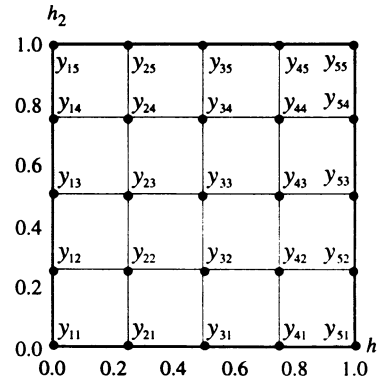


図5　相関のない入力データ

無視したファジィ積分においてファジィ測度の非加法性を引き起こしていることが分かる。直交多項式の結果は (6) 式を x_1, x_2 に関して整理した

$$y = g_0 + g_1 x_1 + g_2 x_2 + g_{12} x_1 x_2$$

の係数を表したものである。これよると、相関のあるデータを相関のないデータに加工してモデル化すると構造自体が大きく変わり、精度も悪くなることが分かる。

5．まとめ

入力の相関が入出力系のモデル化においてどのような影響を及ぼすかを検討し、以下の知見を得た。

[1] 入力に相関がない場合は、ファジィ積分モデルと直交多項式は類似した構造を示す。

[2] ベクトル値関数のファジィ積分で加法モデルで構成される出力を、実数値関数のファジィ積分でモデル化すると非加法的なモデルとなる場合がある。

[3] 入力の相関のうち、歪みのあるものはファジィ測度の非加法性を引き起こす。

[4] 入力に相関のあるデータを相関のないものに加工してモデル化すると構造が変わる。

以上から、入力の相関とファジィ測度の非加法性は互いに影響し合うことが分かり、実現象に忠実な評価構造を明らかにするためは相関と非加法性を合理的に取り扱うことのできる手法が必要となる。ベクトル値関数のファジィ積分はその解決手法として有効であると考えられるが、どこまでを相関として扱い、どこまでを非加法性として扱うかは今後検討していく必要がある。

文献

[1] 宮腰，松下，羽根：室内空間評価のファジィ測度による意識構造分析，第16回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集，1993年12月，pp.349-354

[2] 松下：ベクトル値関数のファジィ積分，第10回ファジィシステムシンポジウム，pp.799-802，1994年6月

[3] 松下：相互効用独立な効用関数のファジィ積分表示，第9回ファジィシステムシンポジウム，pp.685-688，1993年5月

[4] 田口：実験計画法, 丸善, pp.48-50(1977)

謝辞

この研究は通産省の産業科学技術開発プロジェクト「人間感覚計測応用技術の研究開発」の受託研究の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）および、(社)人間生活工学研究センターに協力して行われたものである。ここに謝意を表します。

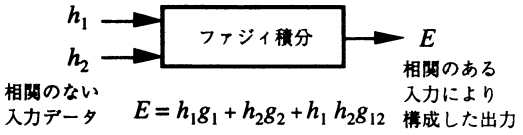


図6　入出力系のモデル化

	x_2^1	x_2^2	x_2^3	x_2^4	x_2^5
x_1^1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	欠測値	欠測値
x_1^2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}	欠測値
x_1^3	y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}	y_{35}
x_1^4	欠測値	y_{42}	y_{43}	y_{44}	y_{45}
x_1^5	欠測値	欠測値	y_{53}	y_{54}	y_{55}

図7　欠測値のある実験データ

表1　実数値関数のファジィ積分によるモデル化

	g_1	g_2	g_{12}	R
Case-1	0.62	0.38	0.0	1.0
Case-2	0.59	0.31	0.10	1.0

表2　直交多項式によるモデル化

	g_0	g_1	g_2	g_{12}	R
Case-1	0.101	0.252	0.061	0.700	0.898
Case-2	0.098	0.407	0.111	0.406	0.894

問合せ先

〒100　東京都千代田区内幸町2-2-2フコク生命ビル27F
清水建設(株)和泉研究室　　神原　浩
TEL (03)3508-8101　　FAX(03)3508-2196

TC3-3

室内空間の高さ感に対する評価プロセスのファジィ積分モデル
— 階層型モデルによる意識構造分析 —

Modeling of Subjective Evaluation Process for Height of a Living-room Based on Fuzzy Integral
— Preference Structural Analysis Based on Hierarchical Model —

宮腰淳一 Jun'ichi Miyakoshi　松下裕 Yutaka Mathusihta　神原浩 Hiroshi Kambara　羽根義 Tadashi Hane

清水建設株式会社
Shimizu Corporation

Abstract

The aim of this paper is accurate modeling of the subjective evaluation process with a few parameters, because we want to characterize the preference structure of the process more simply. First, we investigate that the hierarchical fuzzy integral is useful to modeling of the subjective evaluation process. To be concrete, we try to represent the hierarchical structure of the process by a fuzzy integral of vector valued functions. Next, we apply the fuzzy integral to the subjective evaluation problem, and we estimate the relation between the modelings to AIC, BIC and multiple correlation coefficients.

1．はじめに

ファジィ積分は属性間の相互作用を計量できるファジィ測度による積分であるため，主観的評価問題に有効な手法である[1]。しかし，多属性評価問題にファジィ積分を適用する場合，属性の数に対してパラメータの数がべき乗で増えてしまい，評価プロセスの構造が分かりにくくなる恐れがある。

本論文では，属性間の相互作用をみると同時に，評価プロセスを少ないパラメータで精度よくモデル化することを目的としている。そのために，ベクトル値関数のファジィ積分を用いて評価プロセスの構造を階層化することを試みる。そして統計の分野で通常用いられているAICおよびBICを評価尺度として，多重線型ファジィ積分とモデル化の精度を比較する。このとき，室内空間の高さ感に対する評価プロセスを3属性でモデル化することを考える。

2．ファジィ積分と評価指標

2.1 多重線型ファジィ積分とベクトル値関数の多重線型ファジィ積分

本論文では，3属性でのモデル化を考えるため属性の集合を$X=\{1,2,3\}$とする。

[定義2.1] ファジィ測度

$\mu: 2^X \to [0,1]$がファジィ測度であるとは，

(1) $\mu(\varnothing)=0,\ \ \mu(X)=1.$

(2) $A \subset B \in 2^X \Rightarrow \mu(A) \le \mu(B).$

を満足することをいう。2^XはXのべき集合である。

[定義2.2] 多重線型ファジィ積分[2]

$\boldsymbol{R}$を実数全体の集合とする。いま$h_i \in \boldsymbol{R}\ \ (i=1,2,3)$とするとき，多重線型ファジィ積分は次式で定義される。

$$(ML)\int h_i d\mu = h_1 g_1 + h_2 g_2 + h_3 g_3 + h_1 h_2 g_{12} + h_1 h_3 g_{13} + h_2 h_3 g_{23} + h_1 h_2 h_3 g_{123}. \quad (1)$$

ここで，

$$\begin{aligned} g_1 &= \mu(\{1\}), g_2 = \mu(\{2\}), g_3 = \mu(\{3\}), \\ g_{12} &= \mu(\{1,2\}) - \mu(\{1\}) - \mu(\{2\}), \\ g_{13} &= \mu(\{1,3\}) - \mu(\{1\}) - \mu(\{3\}), \\ g_{23} &= \mu(\{2,3\}) - \mu(\{2\}) - \mu(\{3\}), \\ g_{123} &= \mu(\{1,2,3\}) - \mu(\{1,2\}) - \mu(\{1,3\}) - \mu(\{2,3\}) \\ &\quad + \mu(\{1\}) + \mu(\{2\}) + \mu(\{3\}). \end{aligned}$$

であり，μはファジィ測度である。また，$h_1 = u_1(x_1)$，$h_2 = u_2(x_2)$，$h_3 = u_3(x_3)$は各属性値x_1, x_2, x_3に対してそれぞれ関数u_1, u_2, u_3によって割り当てられた実数値である。

[定義2.3] ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分[3]

$\boldsymbol{V}$は$\boldsymbol{R}$上の3次元ベクトル空間，(e_1,e_2,e_3)はその基底とし，(e_1^*,e_2^*,e_3^*)を(e_1,e_2,e_3)の双対基底とする。

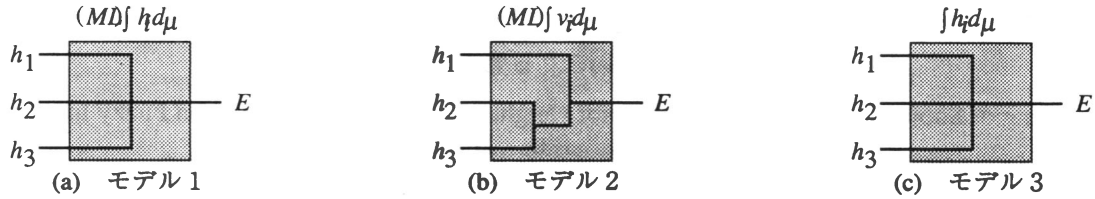


図1 評価プロセス

$v_i \in V$ $(i=1,2,3)$とするとき，ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分は次式で定義される。

$$(ML)\int v_i d\mu = \left\langle v_1+v_2+v_3 \middle| g_1 e_1^* + g_2 e_2^* + g_3 e_3^* \right\rangle_1 + \left\langle (v_1 \wedge v_2)+(v_1 \wedge v_3)+(v_2 \wedge v_3) \middle| g_{12} e_1^* \wedge e_2^* + g_{13} e_1^* \wedge e_3^* + g_{23} e_2^* \wedge e_3^* \right\rangle_2 + \left\langle v_1 \wedge v_2 \wedge v_3 \middle| g_{123} e_1^* \wedge e_2^* \wedge e_3^* \right\rangle_3 . \quad (2)$$

ここで，$v_1 \wedge v_2$，$v_1 \wedge v_2 \wedge v_3$などは交代テンソルである。

2.2 評価指標

本論文では，評価プロセスのモデル化に対する相対的な評価尺度としてAICおよびBICを用いる。AICは赤池によって提案されたもので，次式で定義される[4]。

$$\mathrm{AIC} = n\ln(S_e/n) + 2r \quad (3)$$

ここでnはサンプル数，S_eは目的変数と推定値の残差平方和，rはパラメータの数である。この値はトレードオフの関係にある残差平方和とパラメータの数とのかね合いをうまく表現した尺度であり，残差平方和が等しければパラメータの数が少ない方を良いモデルとするものである。また，BICは同じく赤池によって提案されたもので次式で定義される[5]。

$$\mathrm{BIC} = n\ln(S_e/n) - 2\ln n \cdot r \quad (4)$$

これらの指標は，値が小さいほど良いモデルである。

3．多重線型ファジィ積分による評価プロセスのモデル化

図1に3属性による評価プロセスの構造を示す。評価プロセスを図1(a)に示すような入出力系とみなしたとき，多重線型ファジィ積分でモデル化するということは，評価プロセスを(1)式と等価であるとみなすことである。以下，これをモデル1とよぶ。

つぎにモデル2は，図1(b)に示すように評価プロセスの構造を階層化したモデルである。いま(h_2, h_3)をベクトルとみなしたとき，階層構造を多重線型ファジィ積分でモデル化するということは，2個のベクトル値関数の多重線型ファジィ積分として次式のように書ける。すなわち，$v_1 = h_1 e_1$，$v_2 = h_2 e_2 + h_3 e_3$とするとき

$$\Phi(v_1, v_2) = \left\langle v_1+v_2 \middle| g_1 e_1^* + g_2 e_2^* + g_3 e_3^* \right\rangle_1 + \left\langle (v_1 \wedge v_2) \middle| g_{12} e_1^* \wedge e_2^* + g_{13} e_1^* \wedge e_3^* + g_{23} e_2^* \wedge e_3^* \right\rangle_2$$

$$= h_1 g_1 + h_2 g_2 + h_3 g_3 + h_1 h_2 g_{12} + h_1 h_3 g_{13} \quad (5)$$

である。評価プロセスの構造を階層化する利点は，パラメータの数が少なくなり，したがってその評価プロセスの構造がわかりやすくなることである。

最後にモデル3は，(1)式で示した多重線型ファジィ積分において属性間の相互作用を考慮しない場合であり，そのモデル式は次式で示す通常の線型重回帰式となる。

$$\Phi(h_1, h_2, h_3) = h_1 g_1 + h_2 g_2 + h_3 g_3 \quad (6)$$

この評価プロセスの構造を図1(c)に示す。モデル3は多重線型ファジィ積分との比較のために用いるものである。各モデルにおいて属性と目的変数の数は同じであるが，そのモデル式によりパラメータの数が異なり，したがって評価プロセスの構造が違ったものとなる。各モデルのパラメータの数を表1に示す。

表1 モデル式とパラメータの数

モデル	モデル式	パラメータの数
モデル1	多重線型ファジィ積分 (1)	7
モデル2	ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分 (5)	5
モデル3	線型重回帰式 (6)	3

( )は本文中の式番号を示す

表2　各属性の属性値

属性	I	II	III
天井高 (cm)	220	240	260
幅　(cm)	400	360	320
奥行き (cm)	320	300	280

表3　最大固有値と整合度

評価者	次元	最大固有値	整合度
評価者A	27	27.614	0.024
評価者B	27	27.803	0.031
評価者C	27	27.729	0.028

4．実験および結果・考察

4.1　室内空間評価の実験

室内空間の高さ感に対する評価プロセスを多重線型ファジィ積分でモデル化することを考える。この評価プロセスの属性として「天井高」，「幅」および「奥行き」の3属性を設定する。また代替案は，表2に示すように各属性をそれぞれ独立に3段階に変化させ，それらを全て組み合わせた27通りのリビングルームとする。以下では属性の集合$X=\{1,2,3\}$に対して，「天井高」が{1}，「幅」が{2}，「奥行き」が{3}に対応するものとする。

実験方法は文献[1]に示す方法でCGによる一対比較実験を行ない，リビングルームの高さ感である総合評価値Eを引き出す。このとき，ある条件の下では全ての一対比較を行なわなくともよい不完全一対比較行列を用いた固有値法により総合評価値Eを求める[6]。それぞれの実験結果から固有値法により求められた最大固有値と整合度を表3に示す。これより本実験で求めた総合評価値は十分信頼できるといえる。なお本実験での評価者は建築分野に携わる3人とした。

4.2　結果および考察

評価プロセスを表1に示す各モデル式でモデル化し，実験結果を用いてファジィ測度を同定する。このとき入力側の値は，表2に示した各属性の属性値に対して0.0，0.5，1.0という基準化された得点を割り当てる。また出力側の値は，一対比較実験から求めた重みを[0,1]に基準化した値で与える。各モデルでファジィ測度を同定した結果を表4に示す。また，モデル化の精度の尺度として2.2節で示したAICおよびBICの値を表5に示す。これより以下のことが分かる。

(a)　モデル1とモデル2を比較した場合，BICの値はモデル1の方が小さな値を示している。しかし，

表4　ファジィ測度

(a)　評価者A

評価者A	{1}	{2}	{3}	{1,2}	{1,3}	{2,3}	{1,2,3}
モデル1	0.097	0.000	0.000	0.245	0.513	0.005	0.933
モデル2	0.029	0.000	0.000	0.313	0.582	—	—
モデル3	0.336	0.026	0.160	—	—	—	—

(b)　評価者B

評価者B	{1}	{2}	{3}	{1,2}	{1,3}	{2,3}	{1,2,3}
モデル1	0.217	0.000	0.000	0.405	0.247	0.068	0.918
モデル2	0.093	0.020	0.020	0.525	0.367	—	—
モデル3	0.336	0.135	0.056	—	—	—	—

(c)　評価者C

評価者C	{1}	{2}	{3}	{1,2}	{1,3}	{2,3}	{1,2,3}
モデル1	0.156	0.000	0.013	0.244	0.560	0.022	0.866
モデル2	0.101	0.000	0.017	0.300	0.614	—	—
モデル3	0.353	0.425	0.171	—	—	—	—

表5　モデルの評価

(a)　評価者A

評価者A	AIC	BIC	R
モデル1	-119.3	-179.4	0.936
モデル2	-120.2	-163.1	0.931
モデル3	-91.5	-107.4	0.578

(b)　評価者B

評価者B	AIC	BIC	R
モデル1	-145.3	-205.5	0.967
モデル2	-129.5	-172.4	0.934
モデル3	-103.6	-119.4	0.631

(c)　評価者C

評価者C	AIC	BIC	R
モデル1	-129.6	-189.8	0.955
モデル2	-130.7	-173.6	0.951
モデル3	-101.2	-117.1	0.651

Rは重相関係数を示す

AICの値は評価者によってはモデル２の方が小さな値を示している。以上のことから，BICのみで評価するならば多重線型ファジィ積分の方が評価プロセスを精度良くモデル化しているといえる。しかし，その値の差はそれほど大きくなく，また階層化している分だけその評価プロセスの構造が分かりやすくなっていることを考えると，ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分も有効な手法であるといえる。

(b) モデル１とモデル３を比較した場合，各評価者においてAIC，BICの値はともにモデル１の方がかなり小さな値を示している。すなわち，本論文で扱うような主観的な評価問題のモデル化として多重線型ファジィ積分が非常に有効であるといえる。

つぎに，図2に示すような階層構造による評価者の意識構造を分析する。天井高，幅および奥行きの３属性で室内空間の高さ感を評価する場合，３属性が同じレベルで評価されるのではなく，幅と奥行きの組を一つの単位として，その組と天井高とによって高さ感を評価しているといえる。

5．まとめ

本論文では，少ない数のパラメータで精度良くモデル化することを目的として，ベクトル値関数の多重線型ファジィ積分により評価プロセスの構造を階層化した。これを室内空間の高さ感に対する評価問題に適用した結果，多重線型ファジィ積分よりも評価者の意識構造が分かりやすくなった。

また，モデル化の精度をBICで見たときは多重線型ファジィ積分によるモデルの方が精度は良かったが，AICでみたときにはベクトル値関数の多重線型ファジィ積分のモデルの方が精度が良い場合があり，評価プロセスを階層構造にすることの有効性が確かめられた。ここで用いた評価尺度は，パラメータの数と残差平方和とによって表わされているものであり，今後は評価プロセスの構造の分かりやすさを含めたかたちの評価尺度が必要である。

謝辞

この研究は通産省の産業科学技術開発プロジェクト「人間感覚計測応用技術の研究開発」の受託研究の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）および，(社)人間生活工学研究センターに協力して行なわれたものである。ここに謝意を表します。

参考文献

[1] 宮腰，松下，羽根：室内空間評価問題へのファジィ積分の適用－項目間の相互作用の計量－，第9回ファジィシステムシンポジウム，pp.337-340，1993年5月.

[2] 松下：相互効用独立な効用関数のファジィ積分表示，第9回ファジィシステムシンポジウム，pp.685-688，1993年5月.

[3] 松下：多重線型効用関数の拡張とそのファジィ積分表示（投稿中）.

[4] 中溝：信号解析とシステム同定，コロナ社，pp.201-207，1988年.

[5] 赤池：統計的検定の新しい考え方，数理科学，No.198，pp.51-57，1979年11月.

[6] 宮腰，松下，羽根：室内空間評価のファジィ測度による意識構造分析，日本建築学会・第16回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集，pp.349-354，1993年12月.

連絡先：

〒100 東京都千代田区内幸町2-2-2フコク生命ビル27F

清水建設(株)和泉研究室 宮 腰 淳 一

Tel 03-3508-8101 Fax 03-3508-2196

TC3-4

局所コンパクトハウスドルフ空間上でのファジィ測度とChoquet積分

Fuzzy measures and Choquet integral on locally compact Hausdorff space

○成川康男　菅野道夫
Yasuo NARUKAWA　Michio SUGENO
東京工業大学
システム科学専攻
Department of System Science,
Tokyo Institute of Technology

室伏俊明
Toshiaki MUROFUSHI
電気通信大学
電子情報学科
Deptartment of Communications and Systems,
University of Electro-Communications

Abstract This paper discusses fuzzy measures on locally compact Hausdorff space and Choquet integral with respect to fuzzy measures. The concept of regular fuzzy measures is proposed, and it is shown that a functional defined on the cone of positive continuous functions with compact support ,which is co-monotonically additive, positively homogenuous , is represented as a Choquet integral with respect to a regular fuzzy measure. It is also shown that the Choquet integral with respect to fuzzy measures is represented as a Lebesgue integral without changing integrands which are positive continuous functions with compact supports.

1 序章

菅野 [8] は非加法的な集合関数であるファジィ測度とファジィ測度による積分であるファジィ積分を提案した. ファジィ測度は確率測度から加法性を取り除き,単調性だけを残したものとして定義され, その条件の緩さのため, 柔軟であり, よりあいまいな状況に対処できるものとなっており, 数々の応用もなされている [9]. 一方, その条件の緩さのため, その扱いは困難で, 実際, 有限集合上で考察するか [1], ファジィ測度にある種の加法性 [6] や連続性 [10] を入れて考察することが多い. 本研究では, もととなる空間に局所コンパクト Hausdorff 空間の構造を入れてファジィ測度と Choquet 積分を考察する. まず, 第2章で, ファジィ測度とファジィ積分の一つである Choquet 積分を定義する. 第3章では, 正則ファジィ測度を定義し, コンパクトな台を持つ連続関数の集合上の汎関数としての Choquet 積分の特徴付けを行う. 汎関数としての Choquet 積分の特徴付けは,Schmeidler [7], 室伏ら [5] が, 一般的な空間で行っている. 第4章では, 被積分関数である（狭い意味での）共単調な関数の集合上の関数を変えずに Choquet 積分は, 普通の積分で表されることを示す. これは,Campos ら [1] が, 有限集合上で行ったことの拡張である. さらに, この結果を用いて Choquet 積分は,Radon 測度の線形和で表せることを示す.

2 数学的定義

本稿を通じて,Eを局所コンパクト Hausdorff 空間$\mathcal{B}$を, すべての開集合を含む E上のσ集合体とする.

定義 2.1 [8] $(E,\mathcal{B})$ 上のファジィ測度とは, 次の条件

(i) $\mu(\emptyset)=0$

(ii) $A,B\in\mathcal{B}$ に対して,$A\subset B$ ならば　$\mu(A)\le\mu(B)$

をみたす集合関数$\mu:\mathcal{B}\longrightarrow R^+\cup\{\infty\}$ をいう.

定義 2.2 [3] 可測関数 $f:E\longrightarrow R^+$ のファジィ測度 μ に関する Choquet 積分を

$$(C)\int f d\mu=\int_0^\infty \mu_f(r)dr$$

で定義する. ここで$\mu_f(r)=\{x/f(x)>r\}$ である.

定義 2.3 [4] 可測関数 fと gが共単調であるとは, 任意の $x,x'\in E$ について, $f(x)<f(x')\Rightarrow g(x)\le g(x')$ であることをいう.

また, $f(x)<f(x')\Leftrightarrow g(x)<g(x')$ が成り立つとき,fと gは狭義に共単調であるといい, $f\sim g$ で表す.

定理 2.1 [4] 可測関数 fと gが共単調であるとき,

$$(C)\int(af+bg)d\mu=a(C)\int f d\mu+b(C)\int g d\mu$$

3 汎関数としての Choquet 積分

以下では,Kをコンパクトな台を持つ E上の連続関数の集合とし,K^+を Kの部分集合で非負値の関数の集合とする. Kはベクトル空間で,$K^-=-K^+$とおくと, $K=K^+ + K^-$であり, $f\in K$とすると, $f=f^+-f^-,f^+=f\vee 0,f^-=(-f)\vee 0$ の形に一意的に分解できる.

定義 3.1 IをK^+上の非負値汎関数とする.

(i) Iが共単調加法的とは,fとgが共単調であるとき,
$I(f+g)=I(f)+I(g)$が成り立つことを言う.

(ii) Iが正斉次的であるとは,正の実数aに対して,
$I(af)=aI(f)$が成り立つことを言う.

(iii) Iが単調であるとは,$f\leq g$であるとき,$I(f)\leq I(g)$
が成り立つことを言う.

ファジィ測度に関するChoquet積分は,上記の条件を全てみたしているので,単調で正斉次的で共単調加法的な汎関数である.

定義 3.2 任意の$B\in\mathcal{B}$に対して

$$\mu(B)=\inf\{\mu(O)/O\text{は開集合},O\supset B\}$$

を満たすファジィ測度を,正則ファジィ測度という.

μが普通の測度の時は,正則測度となる.

以下で,単調で正斉次的で共単調加法的なK^+上の汎関数Iが,正則ファジィ測度に関するChoquet積分で表されることを示す.

このIについて,Oを開集合とするとき,

$$\mu(O)=\sup\{I(f)/0\leq f\leq 1,S(f)\subset O,f\in K^+\}$$

とおき,任意の$M\in\mathcal{B}$に対して

$$\mu(M)=\inf\{\mu(O)/O\supset M\}$$

とすると,μは$\mathcal{B}$上の単調な正則ファジィ測度となる.

このμに関して,次の命題が成り立つ.

命題 3.1

(i) $f\in K^+,A\in\mathcal{B}$に対して$A\subset\{x/f(x)\geq 1\}$がなりたつなら,$\mu(A)\leq I(f)$

(ii) コンパクト集合Cに対して$\mu(C)<\infty$

(iii) 開集合Oに対して,Cはコンパクト集合として,
$\mu(O)=\sup\{\mu(C)/,C\subset O\}$

証明) (i) $\epsilon>0$は任意の1より小さい実数として$O_\epsilon=\{x/f>1-\epsilon\}$とすると,$O_\epsilon\supset A$.

$g\in K^+$として,$0\leq g\leq 1$,$S(g)\subset O_\epsilon$なら,$x\in S(g)$のとき$f(x)/(1-\epsilon)\geq 1$となるから,$g\leq f/(1-\epsilon)$.
Iの単調性により,$I(g)\leq 1/(1-\epsilon)I(f)$.

gに関する上限をとって,$\mu(O_\epsilon)\leq 1/(1-\epsilon)I(f)$.

$\epsilon\longrightarrow 0$として,$\mu(A)\leq I(f)$

(ii) Eが局所コンパクトHausdorff空間であるから,任意のコンパクト集合Cに対して,$C\subset U$をみたすある開集合Uがあり$\mathrm{cl}(U)$はコンパクトとなる.このとき,連続関数fがあり,

$$f(x)=\begin{cases}0 & x\notin U\\ 1 & x\in C\end{cases}$$

が成り立つ.$\mathrm{cl}(U)$がコンパクトだから$f\in K^+$となる.(i)より,$\mu(C)\leq I(f)<\infty$

(iii) $0\leq f\leq 1,S(f)\subset O$なる$f\in K^+$をとる.任意の$S(f)\subset O_0$なる開集合$O_0$に対して,$I(f)\leq\mu(O_0)$だから,$\mu(S(f))$の定義より$I(f)\leq\mu(S(f))$.また$\mu$は単調だから,$\mu(S(f))\leq\mu(O)$.以上より$I(f)\leq\mu(S(f))\leq\mu(O)$.$\mu(O)$の定義と$S(f)$はコンパクトであることから,$\mu(O)\leq\sup\{\mu(S(f))/S(f)\subset O\}\leq\sup\{\mu(C)/C\subset O\}$(ただし,Cはコンパクト集合).

一方$C\subset O$だから$\mu(C)\leq\mu(O)$となるので,
$\sup\{\mu(C))/C\subset O,\text{C はコンパクト }\}\leq\mu(O)$. ∎

$f\in K^+,1\leq k\leq n$に対して,$C_{n,k}=\{x/f(x)\geq k/n\}$,$O_{n,k}=\{x/f(x)>(k-1)/n\}$とすると,$C_{n,k}$はコンパクト集合,$O_{n,k}$は開集合で,

$O_{n,k+1}\subset C_{n,k}\subset O_{n,k}\subset S(f)(=C_{n,0}$とおく$)$であり,$E$が局所コンパクトHausdorffであるから,すべてのn,kに対して$f_{n,k}\in K^+$が存在し,$0\leq f_{n,k}\leq 1,x\in C_{n,k}$なら$f_{n,k}(x)=1,S(f_{n,k})\subset O_{n,k}$が成り立つ.

この$f_{n,k}$について,次の命題が成り立つ.

命題 3.2

(i) すべてのk,jについて,$f_{n,k}$と$f_{n,j}$は共単調である.

(ii) $(f_{n,1}+f_{n,2}+\cdots+f_{n,k})$と$(f_{n,k+1}+f_{n,k+2}+\cdots+f_{n,n})$は共単調である.

証明) (i) 共単調という関係は反射律を満たすから$k=j$のときは,成立する.また,対称律も満たすので,$k<j$のときを証明すれば良い.

$f_{n,j}(x_1)<f_{n,j}(x_2)$とすると,$x_2\in S(f_{n,j})\subset O_{n,j}$となるから,$O_{n,j}\subset C_{n,j-1}\subset C_{n,k}$より,$f_{n,k}(x_2)=1$.

したがって,$f_{n,k}(x_1)\leq f_{n,k}(x_2)(=1)$.

(ii) 互いに共単調な関数どうしの和は,共単調となるので明らか. ∎

次に,$f_n=\sum_{k=1}^{n}(1/n)f_{n,k}$とおくと,$k/n\leq f(x)<(k+1)/n$のとき,

$x\in C_{n,k}\subset C_{n,k-1}\cdots\subset C_{n,0}$

かつ,$x\notin C_{n,k+1}\supset O_{n,k+2}\supset\cdots\supset O_{n,n}$となることより,$k/n\leq f_n(x)\leq(k+1)/n$となるから,$\|\cdot\|$をsupノルムとして,$\|f-f_n\|\leq 1/n$

このことより,次の命題が成り立つ.

命題 3.3

(i) $F\in K^+$で,次の条件を満たすものが存在する.

(a) $0 \leq F \leq 1$

(b) すべての n に対して,f_n と共単調.

(c) $S(f) \subset \{x/F(x) = 1\}$

(d) $|f - f_n| \leq (1/n)F$

(ii) $\lim_{n\to\infty} I(f_n) = I(f)$

証明) (i) Eが局所コンパクト Hausdorff で, $S(f)$ はコンパクトだから, $0 \leq F \leq 1$, $x \in S(f)$ ならば $F(x) = 1$ となる Fは存在する. 先に述べたことより, $|f - f_n| \leq (1/n)F$. $f_n(x_1) < f_n(x_2)$ とすると, $S(f_n) = S(f_{n,1}) \subset C_{n,0} = S(f)$ であるから, $x_2 \in S(f)$ となって $F(x_2) = 1$. したがって, $F(x_1) \leq F(x_2)$
(ii) (i)(d)より, $-(1/n)F(x) \leq f(x) - f_n(x) \leq (1/n)F(x)$. (i)(b)より, $I(f) \leq I(f_n) + (1/n)I(F)$. 一方,(i)(c)より $x \in S(f)$ なら $F(x) = 1$ であるから, fと Fは共単調となるので,$I(f_n) \leq I(f) + \frac{1}{n}I(F)$. $n \longrightarrow \infty$ として, 目的の式を得る. ∎

以上のことより, 次の定理が成り立つ.

定理 3.1
単調で正斉次的で共単調加法的な K^+上の汎関数 I に対して,$\mathcal{B}$上の正則なファジィ測度が存在して,

$$I(f) = (C)\int f d\mu$$

証明) すべての $x \in C_{n,k}$で $f_{n,k}(x) = 1$ であるから,
命題 3.1より, $\mu(C_{n,k}) \leq I(f_{n,k})$.
したがって,

$$I(f_n) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} I(f_{n,k}) \geq \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \mu(C_{n,k}).$$

$n \longrightarrow \infty$ として,

$$I(f) \geq \int_0^1 \mu(\{x/f(x) \geq \alpha\})d\alpha$$

一方, $S(f_{n,k}) \subset O_{n,k}$ より, $\mu(O_{n,k}) \geq I(f_{n,k})$.
したがって,

$$I(f_n) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} I(f_{n,k}) \leq \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \mu(O_{n,k})$$

$n \longrightarrow \infty$ として,

$$I(f) \leq \int_0^1 \mu(\{x/f(x) > \alpha\})d\alpha.$$

∎

任意のファジィ測度に関する Choquet 積分は, 単調で正斉次的共単調加法的な汎関数であるから, 次の系が成り立つ.

系 3.1 任意の $f \in K^+$の Choquet 積分の値を変えない正則ファジィ測度μ_r が存在する. すなわち, 任意の $f \in K^+$ に対して,

$$(C)\int f d\mu = (C)\int f d\mu_r$$

例 3.1 $E = [0,1]$ とし, この上での Borel 集合体を $\mathcal{B}$とする. $I = [0, \frac{1}{2}]$ として, 次のような集合関数を考える. $X \in \mathcal{B}$のとき,

$$\mu(X) = \begin{cases} 1 & X \cap I^c \neq \emptyset \\ 0 & X \cap I^c = \emptyset \end{cases}$$

このμはファジィ測度であるが正則でない. 実際, Oを開集合として, $I \subset O$とすると, Iは開集合ではないから, $I \neq O$, したがって, $\mu(O) = 1$, $\inf\{\mu(O)/O \supset I\} = 1$. 一方,$\mu(I) = 0$.
このμに対して, 任意の $f \in K^+$の Choquet 積分の値を変えない正則測度は, $J = (0, \frac{1}{2})$ として,

$$\mu_r(X) = \begin{cases} 1 & X \cap J^c \neq \emptyset \\ 0 & X \cap J^c = \emptyset \end{cases}$$

である.

4 被積分関数不変の Choquet 積分の Lebesgue 積分表現

本節では,Choquet 積分が, 被積分関数を変えることなく Lebesgue 積分で表されることを示す.
ここで, ファジィ測度の値は有限とする. K上の, 実数値汎関数 $p(x)$ を $p(f) = (\|f^+\| \vee \|f^-\|)\mu(E)$, $f = f^+ - f^-$ で定義する. このとき次の命題が成り立つ.

命題 4.1 $f, g \in K$として,

(i) $p(f+g) \leq p(f) + p(g)$,$\alpha P(\alpha f) = \alpha p(f)$

(ii) 任意の $f \in K^+$に対して,

$$(C)\int f d\mu \leq p(f)$$

さて, $f, g \in K^+$として, fと gが狭義に共単調という関係は, 同値関係であるので, K^+を分割し, $F^+ = \{g/f \sim g\}$ とおける. $f, g \in F^+$なら $f + g \in F^+$であることより, F^+は凸錘である. よって, $F = F^+ - F^+$とすると, Fは Kの線形部分空間になり, Choquet 積分の共単調加法性と命題 4.1 と Hahn-Banach の定理より次の定理が得られる.

定理 4.1 (被積分関数不変の積分表現定理)
$F^+ \in K^+/_\sim$とする. ファジィ測度μに対して (普通の) 正則測度μ_{F^+} が存在して, 任意の $f \in F^+$に対して,

$$(C)\int f d\mu = \int f d\mu_{F^+}$$

がなりたつ.

証明)

$$f \in F^+ \text{に対して}, I(f) = (C)\int f d\mu \text{とおく}.$$

任意の $f \in F$ に対して, $f = f_1 - f_2$ ただし, $f_1, f_2 \in F^+$ と分解できるので, F 上の線形汎関数 $\tilde{I}$ を $\tilde{I}(f) = I(f_1) - I(f_2)$ とおく. ここで, $f = f_1' - f_2'$ (ただし, $f_1', f_2' \in F^+$) と分解したときも, $f_1 + f_2' = f_1' + f_2$ となり, f_1, f_2, f_1', f_2' は全て狭い意味で共単調であるから, $I(f_1) + I(f_2') = I(f_1') + I(f_2)$ となるので, $\tilde{I}(f)$ はただ一通りに決まる.

このとき, 命題 4.1 の p に関して, 任意の $f \in K$ に対して, $\tilde{I}(f) \leq p(f)$ も成り立つので, $\tilde{I}$ は K 上の線形汎関数 $\hat{I}$ に拡張でき, $f \in F$ なら, $\hat{I}(f) = \tilde{I}(f)$ が成り立つ. ここで, Riesz の表現定理より (普通の) 正則測度 μ_F^+ が存在し, 任意の $f \in F$ に対して,

$$\hat{I}(f) = \int f d\mu_F^+$$

が成り立つ.

特に, $f \in F^+$ なら, $I(f) = \hat{I}(f)$ である. ∎

(普通の) 正則測度のことを Radon 測度とも言う. Radon 測度の空間を $\mathcal{M}^+(E)$ と書き, $\mathcal{M}(E) = \mathcal{M}^+(E) - \mathcal{M}^+(E)$ とおく.

$\mu \in \mathcal{M}(E)$ に対して,

$$\int f d\mu = \int f d\mu_1 - \int f d\mu_2; \quad \mu_1, \mu_2 \in \mathcal{M}^+(E)$$

とおくと, $f \in K$ に対して,

$$\varphi_f(\mu) = \int f d\mu$$

とおける. すべての $f \in K$ に対し φ_f を連続にする最弱な位相を $\mathcal{M}(E)$ に入れる. このとき, Dirac 測度によって生成されるベクトル空間は, $\mathcal{M}(E)$ において稠密である [2]. このことと, 定理 4.1 により, 次の定理が成り立つ.

定理 4.2 (Choquet 積分の近似定理)

任意の $f \in K^+$ と任意の $\varepsilon > 0$ に対して, ある n と $a_1, a_2, \ldots, a_n \geq 0; x_1, x_2, \ldots, x_n \in E$ が存在して

$$\left| (C)\int f d\mu - \sum_{i=1}^{n} a_i f(x_i) \right| < \varepsilon$$

系 4.1 $f \sim g$ とすると, f の時と同じ $\varepsilon > 0$, n と $a_1, a_2, \ldots, a_n \geq 0; x_1, x_2, \ldots, x_n \in E$ で

$$\left| (C)\int g d\mu - \sum_{i=1}^{n} a_i g(x_i) \right| < \varepsilon.$$

参考文献

[1] L.M.de Campos Ibañez, M.J.Bolaños Carmona, Representation of fuzzy measures through probabilities . *Fuzzy sets and System* . 31.(1989),23-36

[2] G.Choquet . *Lectures on analysis* . W.A.BENJAMIN,INC.(3rd printing,1976)

[3] T. Murofushi and M. Sugeno, An interpretation of fuzzy measures and the Choquet integral as an integral with respect to a fuzzy measure, *Fuzzy Sets and Systems* 29 (1989) 201-227.

[4] T.Murofishi,M.Sugeno A Theory of Fuzzy Measures:Representations, the Choquet intgral,and Null sets, *J. Math. Anal. Appl.* 159(1991),532-549

[5] T. Murofushi, M. Sugeno, and M. Machida, Nonmonotonic fuzzy measures and the Choquet integral, *Fuzzy Sets and Systems* 64,(1994)73-86.

[6] E.Pap Decomposotion of supermodular functions and □ - decomposable measures, *Fuzzy sets and Systems* 65(1994),71-83

[7] D.Schmeidler. Integral representation without additivity. *Proc.Am.math.soc.* 97.(1986),253-261

[8] M.Sugeno. *Theory of fuzzy integrals and its applocations.* Doctoral.Thesis,Tokyo Inst.of Tech. 1974

[9] K.Tanaka,M.Sugeno. A study on subjective evaluations of color printing images. *International journal of Approximate Reasoning.* 5(1991),213-222.

[10] Z.Wang, Absolute continuity and extension of fuzzy measure, *Fuzzy sets and Systems* 36(1990),395-399.

問合せ先 〒 227 横浜市緑区長津田町 4259
東京工業大学システム科学専攻菅野研究室 成川康男
Fax (045) 924- 5681 E-mail narukawa@sys.titech.ac.jp

TC4-1

λファジィ測度とショケ積分を利用した中央値、平均値の中間の評価
An Intermediate Evaluation Method among Average and Median using λ-fuzzy Measure and Choquet Integral

高萩栄一郎
Eiichiro TAKAHAGI
専修大学　商学部
School of Commerce, SENSHU University

Abstract- In this paper, we present an intermediate evaluation method among median, average and (maximum + minimum - median) using fuzzy measure and Choquet integral. The evaluation problem divide two sub-problem; upper evaluation problem (PU) which evaluate values above median and lower evaluation problem (PL) which evaluate values under median. The two sub-problems are evaluated using the intermediate evaluation among maximum, average and minimum evaluation method using λ-fuzzy measure and Choquet integral. The evaluation value of main problem is caluculated as PU - PL + median.
Keywords: fuzzy measure, Coquet integral, median, average, evaluation, robust, resistance

1　はじめに

1組のデータがあり、そのデータの代表値を求める問題を考える。もっとも一般的なものは、平均値であろう。他にも、中央値(median)、最頻値、区間中央値 ((最大値+最小値)/2) などが考えられる。

平均値は、もっともよく使われるが、その1組のデータに異常値や外れ値が含まれていると、平均値の値は、その値に引っ張られと言われている。それに対して、中央値は、異常値が含まれていても、それに対して引っ張られることは少ないと言われている。しかし、中央値は、平均値に比べて、中央値以外のサンプルの変化の影響をその代表値へ反映しにくい。あるサンプルの値が増大しても、そのサンプルが中央値より低いサンプルで中央値より大きくならない限り、(またはその逆でない限り) 代表値に影響を与えない。[1]では、このような異常値や外れ値に対して強い性質を抵抗性が高いと呼んでいる。すなわち、「データを集約して得られたある統計量が、一部の不適切なデータの影響を受けにくいことを、抵抗性(resistance)が高いという」[1]と述べられており、また、「統計的仮定からの逸脱の影響を受けにくい統計量は、頑健(robust)であるといわれている」[1]と述べられている。そこで、本稿では抵抗性という言葉を用いる。

測定の失敗などによる異常値の場合、もしその値が異常値であることが認識できれば、そのサンプルを除外して、分析を行えばよい。しかし、異常値であると認識することが難しい場合が多い。

外れ値の場合、そのデータの代表値への影響を小さくとどめたいのならば、中央値を用いればよい。しかしながら、中央値を用いると先程あげたような中央値以外あまり影響を与えないという弊害が起こる。

人は、ふだんは平均に近い評価をするが、外れ値や異常値がある場合、中央値に近い評価をしているのではないだろうか? 例えば、ある地域の年間の降雪回数が、90年は2回,91年が40回,92年が3回であったとする。このときの代表値を求めることを考える。平均をとれば9回, 中央値をとれば、3回である。「ここ数年、一冬にだいたた何回位の雪が降るか?」という問いに対して、人は、「4-5回」と答えるのではないだろうか? これは、91年が以上に多かったと判断して、平均の9回より小さい値を、でもたまには、大雪が降ることもあると考え、中央値の3より大きな数字をこと得たのではないだろうか

本手法は、代表値を中央値を用いる場合と平均値を用いる場合の中間のものを求めようとするもである。指標ξを用いて、0で中央値、0.5で平均値、その間を連続的に変化する評価値を求めようとするものである。この指標ξは、代表値や評価値を求める目的などによって、主観的に定めることになる。

2　最大値・平均値・最小値の拡張としてのファジィ測度とショケ積分

2.1　定義

一般的な定義にしたがって、ファジィ測度、ショケ積分を定義する。評価項目の集合Xをとし、評価項目の数は、有限個nとする。すなわち、$X=\{x_1,x_2,\ldots,x_n\}$とし、$F=2^X$とする。

ファジィ測度μは、次のように定義する。(正規性を仮定)

$$\mu : F \to [0,1] \tag{1}$$

$$A,B \in F, A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B) \tag{2}$$

$$\mu(\emptyset)=0,\ \mu(X)=1 \tag{3}$$

i番目の評価値を$h(x_i)$ $(i=1,\ldots,n)$とする。すなわち、

$$h : X \to [0,+\infty) \tag{4}$$

とする。

各評価項目の評価値の総合評価値は、ファジィ測度を用いてショケ積分を行うことにより求める。ショケ積分は、

$$z=(C)\int h d\mu \equiv \int_0^{+\infty} (\{x; h(x)>r\}) dr \tag{5}$$

と定義される。また、λファジィ測度は、

$$A, B \subseteq X, A \cap B = \emptyset \Rightarrow$$
$$\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) + \lambda\mu(A)\mu(B) \quad (6)$$
$$\lambda \in (-1, +\infty) \quad (7)$$

と定義する。

2.2 λファジィ測度による拡張

λを与え、シングルトンのファジィ測度が同じになるように、λファジィ測度により各ファジィ測度を同定し、ショケ積分を行えば、最大値、平均値、最小値の拡張となる。図1は、$X = \{x_1, x_2, x_3\}$ の場合、$\mu(\{x_1\}) = \mu(\{x_2\}) = \mu(\{x_3\})$ という関係を保つように、与えられたλで各ファジィ測度を求めたときの図である。

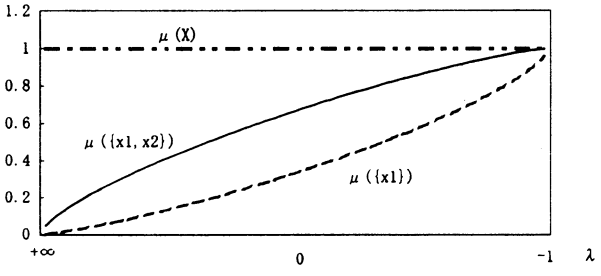


図 1: λとファジィ測度の関係

$\lambda = 0$ と $\lambda = +\infty$ の場合、それぞれの極限を求める。すなわち、$\lambda \to -1$ と $\lambda \to +\infty$ の値を $\lambda = -1$ と $\lambda = +\infty$ の時の値とする。

$$\lambda = -1 \Rightarrow \quad \mu(A) = 1, \quad \forall A \in F \setminus \emptyset \quad (8)$$
$$\lambda = +\infty \Rightarrow \quad \mu(A) = 0, \quad \forall A \in F \setminus X \quad (9)$$

この場合明らかに、最大値 ($\lambda = +\infty$)、平均値 ($\lambda = 0$)、最小値 ($\lambda = -1$) の拡張になっており、λをそれぞれの中間の値にすることにより、最小値と平均値の間の評価や平均値と最大値の中間の評価を行うことができる。

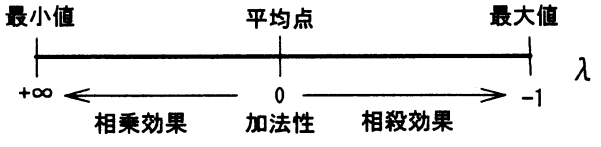


図 2: λファジィ測度の意味

ファジィ測度の計算は、塚本[3]のϕ_s変換を利用することができる。ϕ_s変換とは、

$$\phi_s : [0,1] \to [0,1], \ s \in [0, +\infty] \quad (10)$$

$$\phi_s(u) = \begin{cases} [u] & \text{if } s = 0 \\ u & \text{if } s = 1 \\ 1 - [1-u] & \text{if } s = +\infty \\ (s^u - 1)/(s-1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{where } [u] = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 < u \le 1 \\ 0 & \text{if } u = 0 \end{cases}$$

λ	$\lambda > 0$	$-1 < \lambda < 0$
一般的な呼び方	相乗効果	相殺効果
評価の場合	バランス重視 消極的な 慎重な 悲観的な	個性重視 積極的な 大胆な 楽観的な
極端な場合	AND,MIN	OR,MAX

表 1: 相互作用の呼び方

である。λファジィ測度との関係は、$s = \lambda + 1$ である。

ϕ_s変換は、任意の $0 \le a, b, c \le 1, c = a + b, s \in [0, +\infty]$ に対して、

$$\phi_s(c) = \phi_s(a) + \phi_s(b) + (s-1)\phi_s(a)\phi_s(b) \quad (12)$$

という性質を持っており、λファジィ測度に対応する。したがって、$s = \lambda + 1$ とし、$A \subset S$ のファジィ測度 $\mu(A)$ は、$\phi_s(|A|)$ ($|A|$ は、A の要素の数) として求められる。

相乗効果、相殺効果の呼び方は、評価の対象によって異なる。例えば、複数の科目の試験の総合評価の場合、相乗効果は、バランス重視の評価、相殺効果は、個性重視の評価となる。また、骨董品を複数の評価者で評価し、その総合評価値を求める場合、相乗効果は、「悲観的な評価」、相殺効果は「楽観的な評価」となる。実際にλを与え、ファジィ測度を同定する場合、λは人間の直観に合いにくい。そこで、次のような指標ξを使用する。

$$\xi(s) = 1/(1+\sqrt{s}) = 1/(1+\sqrt{\lambda+1}) \quad (13)$$

3 中央値・平均値の拡張としてのファジィ測度とショケ積分

3.1 中央値・平均値の中間の評価への拡張方法

まず、問題を2つ分ける。問題(P)を中央値を基準にして、中央値より大きなデータを評価する問題(PU)と中央値より小さなデータを評価する問題(PL)に分ける。

PU

$$h^U(x_i) = h(x_i) - \text{Median} \quad \text{if} h(x_i) \ge \text{Median} \quad (14)$$
$$h^U(x_i) = 0 \quad \text{if} h(x_i) < \text{Median} \quad (15)$$
$$z^U = (C)\int h^U d\mu \quad (16)$$

PL

$$h^L(x_i) = 0 \quad \text{if} h(x_i) \ge \text{Median} \quad (17)$$
$$h^L(x_i) = \text{Median} - h(x_i) \quad \text{if} h(x_i) < \text{Median} \quad (18)$$
$$z^L = (C)\int h^L d\mu \quad (19)$$

図3のような問題Pを図4のような中央値より上のデータを評価する問題PUと、図5のような中央値より下のデータを評価する問題PLに分ける。問題PUとPLそれぞれについて、あるξまたはλをを与え、$X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ として、ファジィ測度を同定する。すなわち $\mu(A) = \phi_s(|A|/n)$ とする。そして、それぞれの問題について、変換後の評価値を使って、ショケ積分を行い、それぞれの問題の総合評価値 z^U と z^L を求める。

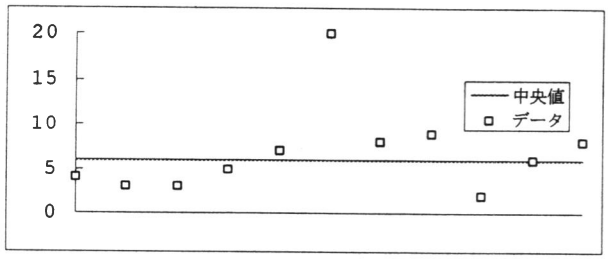


図 3: 問題P

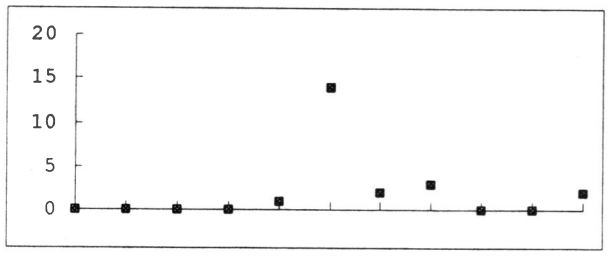


図 4: 問題PU(中央値より大きいデータを評価)

PUは、中央値より大きいデータの評価であり、それらのデータが中央値からどれくらい上に引っ張っているのかの評価である。$\xi = 0$ならば、上に引っ張る程度は、常に0であり、$\xi = 0.5$ならば、(PUの)データの平均である。また、$\xi = 1$ならば、最大値に等しい。同様に、PLは、下に引っ張る程度である。

全体の問題(P)の総合評価値は、中央値に、上に引っ張られる程度（PUの総合評価値z^U）と下に引っ張られる程度（PLの総合評価値z^L）を勘案したものであり、次式のようにする。

$$z = \text{Median} + z^U - z^L \tag{20}$$

$\xi = 0$ならば、上に引っ張る程度z^U、下に引っ張る程度z^Lはともに0であり、したがって、総合評価値zは、中央値に等しくなる。$\xi = 0.5$ならば、上に引っ張る程度z^U、下に引っ張る程度z^Lは、それぞれ、中央値からどれくらい離れているのかの平均値となり、総合評価値zは、平均値に等しくなる。また、$\xi = 1$ならば、上に引っ張る程度z^U、下に引っ張る程度z^Lは、それぞれ、中央値からもっとも離れている値となり、総合評価値zは、z = 中央値 + (最大値 - 中央値) + (最小値 - 中央値) = 最大値 + 最小値 - 中央値となる。

3.2 1回のショケ積分に統合

次に、2つの問題に分け、2回のショケ積分を行っていたものを、1つの問題(1回のショケ積分)の問題に変換する。この場合、2つ合わせた場合のファジィ測度μ^*をどのように割り当てるのかという問題になる。nが、奇数の場合と偶数の場合で異なるので、それぞれ示す。

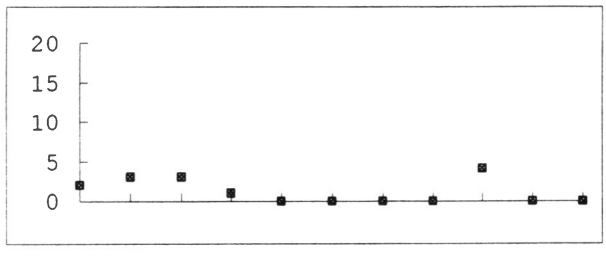


図 5: 問題PL(中央値より小さいデータを評価)

nが奇数の場合、$\forall A \subset X$について、

$$\mu^*(A) = \phi_s(|A|/n) \quad \text{if } |A| < n/2 \tag{21}$$
$$\mu^*(A) = 1 - \phi_s((n-|A|)/n) \quad \text{if } |A| > n/2 \tag{22}$$

とする。

nが偶数の場合、全体集合は、Xに中央値を加えたX^Eを利用する。すなわち、$\forall \subset X^E = X \cup \{x_{Med}\}$とし、$h(x_{mid}) =$ 中央値とする。

$$\mu^*(A) = \phi_s(|A|/n) \quad \text{if } |A| < (n+1)/2 \tag{23}$$
$$\mu^*(A) = 1 - \phi_s(((n+1)-|A|)/n) \quad \text{if } |A| > (n+1)/2 \tag{24}$$
$$h : X^E \to [0, \infty) \tag{25}$$

偶数、奇数の場合とも、

$$z = (C)\int h d\mu^* \tag{26}$$

とする、奇数の場合、明らかに中央値、平均値の拡張になっている。すなわち、$\xi = 0$の場合、

$$\mu^*(A) = 0 \quad \text{if } |A| < n/2 \tag{27}$$
$$\mu^*(A) = 1 \quad \text{if } |A| > n/2 \tag{28}$$

となり、中央値となる。また、$\xi = 0.5$の場合、

$$\mu^*(A) = |A|/n \quad \text{if } |A| < n/2 \tag{29}$$
$$\mu^*(A) = |A|/n \quad \text{if } |A| > n/2 \tag{30}$$

となり、平均値になる。偶数の場合、$\xi = 0$とすると、

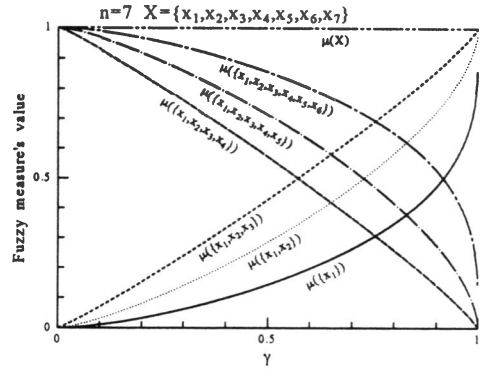


図 6: 奇数の場合のファジィ測度の変化

$$\mu^*(A) = 0 \quad \text{if } |A| < (n+1)/2 \tag{31}$$
$$\mu^*(A) = 1 \quad \text{if } |A| > (n+1)/2 \tag{32}$$

となる。この場合、要素の数が$n+1$個から$(n/2)+1$個までのファジィ測度の値が1になる。中央値は、大きい方から数えて$(n+1)/2+0.5$番目のデータであるので、必ず、中央値のファジィ測度の値から1になる。したがって、中央値となる。$\xi = 0.5$とすると、

$$\mu^*(A) = |A|/n \quad \text{if } |A| < (n+1)/2 \tag{33}$$
$$\mu^*(A) = (|A|-1)/n \quad \text{if } |A| = (n+1)/2 + 0.5 \tag{34}$$
$$\mu^*(A) = (|A|-1)/n \quad \text{if } |A| > (n+1)/2 + 0.5 \tag{35}$$

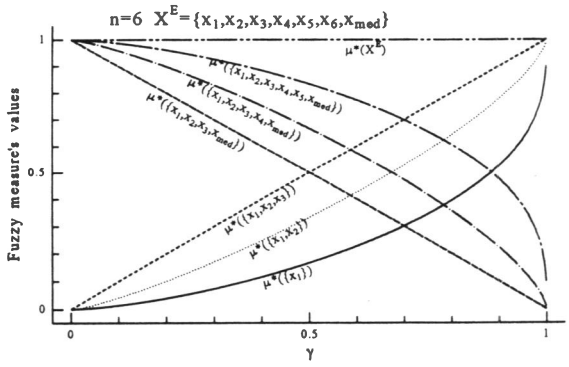


図 7: 偶数の場合のファジィ測度の変化

となる。この場合、大きい方から数えて$(n+1)/2+0.5$番目(中央値)に対応するファジィ測度と$(n+1)/2+0.5+1$番目に対応するファジィ測度は一致する。したがって、中央値は評価されず、平均値となる。7を見てもわかるように、$\xi > 0.5$で、ファジィ測度が単調性を満たさない部分が出てくる。すなわち、非単調なファジィ測度になっている。

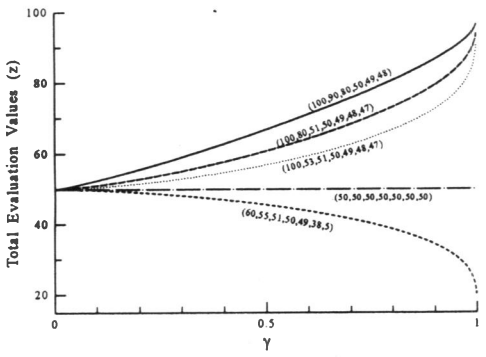


図 8: n=7の場合の総合評価値の変化()内は、評価値の組

4 他の抵抗性のある代表値との比較

また、[1]では、抵抗性が高い平均値の拡張としていくつか紹介されている。重みづけ平均値は、n個のデータ$(x_i, i = 1,\ldots,n)$に、重み$w_i, i = 1,\ldots,n$をつけて求める。すなわち、

$$\bar{x_w} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, \quad w_i = \frac{1}{\mid x_i - \text{Median} \mid} \tag{36}$$

$$\text{where} \quad w_i = 1 \text{ if } x_i = \text{Median} \tag{37}$$

とする。これは、中央値から離れれば、離れるほど、ウエイトが小さくなるようにしている。

また、体操やアイススケートの審査などで用いられている最低点や最高点を除いて、平均を求める方法などがある。最大値と最小値からそれぞれα%のサンプルを取り除いたデータの平均値は、α%調整平均値(α% trimmed mean)と呼ばれている。50%調整平均値は、中央値に等しくなる。

α%調整平均値は、それぞれα%のデータを取り除いたが、取り除かずに、残りのデータの最小値と最大値の等しい値に置き換えたものをウインザライズ平均値(Winsorized mean)と呼ばれている。

三項平均値(trimean)は、中央値Mと上ヒンジH_U(最大値から中央値のデータの中央値)と下ヒンジH_L(最小値から中央値のデータの中央値)の重みつき平均値

$$\bar{x_i} = (H_L + 2\text{Median} + H_U)/3 \tag{38}$$

である。

次に、これらの値の特徴を見てみよう。

重みづき平均値では、重みの決め方によって評価が異なる。上の例では、データと中央値の差の絶対値の逆数を取っている。しかし、データと中央値のさが1未満のとき、重みが1より大きくなるという問題が起こる。他にも、中央値からの近さの順位を無視しているという問題点をもつ。

α%調整平均値とウインザライズ平均値は、αを調整すれば、平均値と中央値の間の評価が可能である。しかしながら、調整時にデータが切り捨てられたり、残されたデータの最大値や最小値に一致させたりしている。したがって、中央値と同じように、切り捨てたデータの影響がその平均値に影響を与えないという欠点を持つ。

三項平均値も中央値と同様に3つの値以外の値がその平均値に与える影響は少ない。本手法は、重み付き平均値に近い。なぜなら、中央値との近さの順位によって、ファジィ測度が変化するからである。言いければ、重みつき平均法で、重みを中央値との近さの順位によって決定する方法である。ただし、その重みがかかる部分は、自分より1つ中央値に近いデータまでである。ウインザライズ平均値は、ショケ積分の形で表現すれば、次のようななる。本手法のPUとPLのそれぞれの問題のファジィ測度を次のように割り当てる。

$$\mu(\mid A \mid) = 0 \quad \text{if } \mid A \mid /n \leq \alpha/100 \tag{39}$$

$$\mu(\mid A \mid) = \mid A \mid /n \quad \text{if } \mid A \mid /n > \alpha/100 \tag{40}$$

これは、ファジィ測度をある段階から0を割り当てるという方法とも解釈できる。

参考文献

[1] 渡部洋、鈴木規夫、山田文康、大塚雄作「探索的データ解析入門」、朝倉書店,1985.

[2] 高萩栄一郎,ファジィ積分による多属性の特性値の総合評価法, 第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 日本ファジィ学会,813-816,大阪,1994.

[3] 塚本弥八郎、不確実性を伴う意思決定問題のファジィ測度論による分析、「ファジィ理論と人文社会科学」(講座ファジィ 14), 日刊工業新聞社,1994.

[連絡先]
〒214 神奈川県川崎市多摩区東三田2-1-1
専修大学　商学部　　高萩栄一郎
E-MAIL:takahagi@isc.senshu-u.ac.jp
TEL:044-945-8259

TC4-2

λファジィ測度とショケ積分を利用した最大値・平均値・最小値の中間の評価 -重要度を考慮した3つの方法-

Intermediate Evaluation Methods Using λ-fuzzy Measure and Choquet Integral: 3 methods to take into account the weight

高萩栄一郎
Eiichiro TAKAHAGI
専修大学　商学部
School of Commerce, SENSHU University

Abstract- In this paper, we present a total evaluation method among maximum, average and minimum evaluation using λ-fuzzy measure and rank dependent weights. After describe the properties of the λ-fuzzy measure method and rank dependent weights method, we introduce 3 criteria's to take into account the weight among individual evaluation items; the singleton fuzzy measure criteria, the input number criteria and the Shapley value criteria. We compare the 3 methods from 4 viewpoints. Lastly, it is difficult for rank dependent weight method to introduce the weights among indidiual evaluation items.

Keywords: evaluation, fuzzy measure, Choquet integral, weight, rank dependent, Shapley value, maximum, minimum, average

1　はじめに

ある対象を評価するとき、評価項目が複数あり、その総合評価値を求めたいことがある。この場合、よく用いられる総合評価値の指標は、各評価項目の評価値の平均（または合計）である。また、評価項目の重要度に差異があるときは、重みつきの合計（加重和）を総合評価値にすることもよく行われる。

また、どれかがよければよいという総合評価の場合、各評価項目の評価値の最大値を総合評価値とすることがある。逆に、どれもがよくなくてはならない総合評価の場合、各評価項目の評価値の最小値を総合評価値とすることがある。

本研究は、これら最大値・平均値・最小値の中間の総合評価をファジィ測度ショケ積分で行おうとするもである。λファジィ測度を用い、λを適当に与えて、総合評価を行う。しかし、評価項目の相互作用がある場合、この拡張であるファジィ測度とショケ積分を使った総合評価法がよいといわれている。実際に利用しようとすると、ファジィ測度をどのように設定するのかが問題になる。本稿では、どのようにファジィ測度を設定したらようかを考察する。

また、ファジィ測度とショケ積分を行う場合、各評価項目の値が満たしてなくてはならない条件がある。この点については、[3]を参照していただきたい。以下では、各評価項目の評価値が、[3]で述べた条件が満たされているものとして議論する。

2　ファジィ測度とショケ積分

本節では、一般的な、定義にしたがって、ファジィ測度、ショケ積分を定義する。

まず、評価項目の集合Xを定義する。評価項目の数は、有限個nとする。すなわち、$X=\{x_1,x_2,\ldots,x_n\}$とする。次に、Xのすべての部分集合からなる集合をF、すなわち、$F=2^X$とする。

ファジィ測度μは、次のように定義する。

$$\mu : F \to [0,+\infty) \tag{1}$$

$$A,B \in F, A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B) \tag{2}$$

$$\mu(\emptyset)=0 \tag{3}$$

i番目の評価項目の評価値を$h(x_i)$ $(i=1,\ldots,n)$とする。すなわち、

$$h : X \to [0,+\infty) \tag{4}$$

とする。

各評価項目の評価値の総合評価値は、ファジィ測度を用いてショケ積分を行うことにより求める。ショケ積分は、

$$z=(C)\int h d\mu \equiv \int_0^{+\infty} (\{x;h(x)>r\})dr \tag{5}$$

例えば、$X=\{x_1,x_2,x_3\}$で、$h(x_1) \geq h(x_2) \geq h(x_3)$の場合、

$$\begin{aligned} z &= [h(x_1)-h(x_2)]\mu(\{x_1\})+[h(x_2)-h(x_3)] \\ &\quad \mu(\{x_1,x_2\})+h(x_3)\mu(X) \end{aligned}$$

となる。

3　λファジィ測度による拡張

λファジィ測度は、

$$A,B \subseteq X, A \cap B=\emptyset \Rightarrow \mu(A \cup B)=\mu(A)+\mu(B)+\lambda\mu(A)\mu(B) \tag{6}$$

$$\lambda \in (-1,+\infty) \tag{7}$$

と定義されている。λファジィ測度を使って、ファジィ測度を同定するとは、ある1つのλを与え、すべてのファジィ測度の値が、式(6)の関係を満たすように同定することとする。ただし、1つのλを与えても、ユニークにすべてのファジィ測度が決定するわけではない。

λファジィ測度は、正規性もしくは、$\mu(X) \leq 1$を仮定しなくてはならない。もし、$\mu(X)>1$であると、同定されたファジィ測度が単調性を満たさない場合がある。

また、λファジィ測度を使って、その和集合のファジィ測度を計算した場合、その計算する順番によらないという性質を持っている。

3.1 λファジィ測度による最大値・平均値・最小値の中間の総合評価値

λを与え、λファジィ測度により各ファジィ測度を同定し、ショケ積分を行えば、最大値、平均値、最小値の拡張となることを説明する。まず、適当なλを与え、すべてのシングルトンの集合のファジィ測度に等しくし、正規性を保つようにファジィ測度を同定する。例えば、$X=\{x_1,x_2,x_3\}$で、$\mu(\{x_1\})=\mu(\{x_2\})=\mu(\{x_3\}),\mu(X)=1$としたとき、λと$X$の各部分集合のファジィ測度との関係を図1に示す。

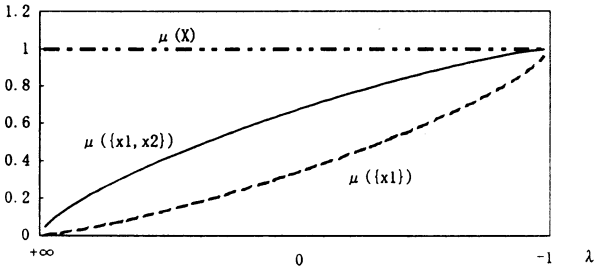


図 1: λとファジィ測度の関係

図1で明らかなように、$\lambda=0$ と$\lambda=+\infty$の場合、

$$\mu(A)=1,\quad \forall A\in F\setminus\emptyset \quad \text{if } \lambda=-1 \tag{8}$$

$$\mu(A)=0,\quad \forall A\in F\setminus X \quad \text{if } \lambda=+\infty \tag{9}$$

とする。

ファジィ測度の計算方法は、塚本のϕ_s変換[4]を使うと便利である。ϕ_s変換とは、

$$\phi_s:[0,1]\to[0,1],\ s\in[0,+\infty] \tag{10}$$

$$\phi_s(u)=\begin{cases}[u] & \text{if } s=0\\ u & \text{if } s=1\\ 1-[1-u] & \text{if } s=+\infty\\ (s^u-1)/(s-1) & \text{otherwise}\end{cases} \tag{11}$$

$$\text{where } [u]=\begin{cases}1 & \text{if } 0<u\le 1\\ 0 & \text{if } u=0\end{cases}$$

である。ただし、$s=\lambda+1$である。評価のモデルでは、すべてのシングルトンの集合のファジィ測度に同じ値を割り当てるのであるから、

$$\mu(A)=\phi_s(|A|/n)\ \text{ ただし}|A|\text{は、}A\text{の要素の数} \tag{12}$$

とする。図2は、この手法による総合評価の例である。

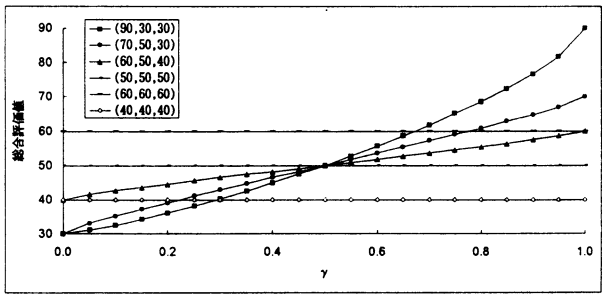


図 2: λ（ξ）を変化させたときの総合評価値の変化

3.2 人間の直観にあった相互作用の度合い

実際にλを与え、ファジィ測度を同定する場合、λは人間の直観に合いにくい。そこで、塚本のξを利用する。

$$\xi(s)=1/(1+\sqrt{s})=1/(1+\sqrt{\lambda+1}) \tag{13}$$

ξは0で完全に相乗作用、1で完全に相殺作用になり、0.5で加法的（平均）になる。

評価の問題で、ξの意味を考察すると、

$$A,B\in F, A\cap B=\emptyset \Rightarrow \xi=\frac{\mu(A)+\mu(B)}{2\times\mu(A\cup B)} \tag{14}$$

となり、$n=2$、すなわち、$X=\{x_1,x_2\}$で、$h(x_1)\ge h(x_2)$の場合、総合評価値をzとすると、

$$z=h(x_2)+(h(x_1)-h(x_2))\times\xi \tag{15}$$

となり、ξは、2つの評価値を按分する値になる。

4 順位により重みを変える方法

ファジィ測度とショケ積分による総合評価法は、OWAオペレター[2]と関係が深い。要素の数が同じファジィ測度には、同じ値を与えるとする。すなわち、$\forall A\in F$について、

$$\mu(A)=\delta_k,\quad k=|A| \tag{16}$$

$$\delta_0\le\delta_1\le\ldots\le\delta_n,\delta_0=0,\delta_n=1 \tag{17}$$

とし、v_1を$h(x_1),\ldots,h(x_n)$の最大値、v_2を$h(x_1),\ldots,h(x_n)$のうち2番目に大きい値、…、v_nを$h(x_1),\ldots,h(x_n)$のうちn番目に大きい値（最小値）とすれば、ショケ積分は、次のようになる。

$$\begin{aligned}z &= [v_1-v_2]\delta_1+[v_2-v_3]\delta_2+\ldots+[v_{n-1}-v_n]\delta_{n-1}+v_n\delta_n\\ &= \delta_1v_1+[\delta_2-\delta_1]v_2+\ldots+[\delta_n-\delta_{n-1}]v_n\end{aligned} \tag{18}$$

そこで、$\sigma_1=\delta_1\kappa,\sigma_2=(\delta_2-\delta_1)\kappa,\ldots,\sigma_n=(\delta_n-\delta_{n-1})\kappa,\kappa>0,\sum_{i=1}^n\sigma_i=1$となりように、適当な$\kappa$を定めれば、$z\kappa$は、OWAオペレーターによる演算結果となり、OWAオペレータは、ショケ積分の特殊な形として見ることができる。ϕ_s変換とOWAオペレータの関係は、塚本[5]に詳しい。

また、Tversky[1]もCumulative Prospect Theoryで、δから、σをもとめ、式(18)の加重和を行っている。

評価の問題でも、順位によって重みσを変えるという考え方を利用できる。例えば、評価項目が3つで、1位の評価値は3位に比べて2倍、2位は$\sqrt{2}$倍の重みをつけることが考えられる。このように、最大値に対するウエイトσ_1、最小値に対するウエイトσ_nを定め、その間を等比的にσを決めていく方法がある。この方法は、λファジィ測度でのファジィ測度の同定と異なる方法でのファジィ測度の同定となる。

最大値に対するウエイトと最小値に対するウエイトの比率$\alpha(=\sigma_n/\sigma_1)$を与え、最大値と最小値の間のウエイトを等比的に与え、正規性を仮定すれば、

$$\sigma_i=a_i/\beta,\quad \beta=\sum_{i=1}^n a_i,\quad a_i=\alpha^{\frac{i-1}{n-1}},\quad \delta_i=\sum_{k=1}^i\sigma_k \tag{19}$$

となる。

λファジィ測度と同様に、αにより、相互作用の度合いを表現することができる。すなわち、$\alpha=1$で加法性、$\alpha>1$で相乗効果、$\alpha<1$で相殺効果を表し、$\alpha\to+\infty$で、最小値での評価、$\alpha\to 0$で、最大値での評価になる。3.3おなじように相互作用の度合いρを定義する。

$$\rho=1/(1+\sqrt{\alpha}) \tag{20}$$

ρは、ξと同様に、0で完全に相乗作用、1で完全に相殺作用になり、0.5で加法的（平均）になる。図3に$n=3$で、ρを変化させたときのファジィ測度の変化を示す。

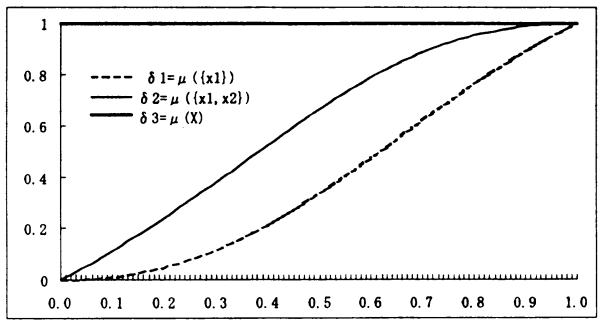


図 3: 順位による重みを等比的に与えた場合のファジィ測度の変化

5 重要度を加味

5.1 重要度を加味した場合、保持したい性質

第1に、最大値、平均値、最小値の拡張になるという性質である。図1で、各ファジィ測度は、λが−1に近ずくにつれ、1に近づき、λが+∞に近づくにつれ 0に近づくという性質である。

第2に重要度の比が XのShapley Valueの比になるという性質である。[6]によれば、Shapley Value の有用性は、その公準から、ファジィ測度のXの要素の平均効果の指標として利用できる。また、次のことをあげている。「関数をn次元確率変数と見なし、任意の順列$(i_1,\ldots,i_n)$に対して、$h(x_{i_1}) < h(x_{i_2}) < \ldots < h(x_{i_n})$が等確率で起こるとき、$x_i$のショケ積分におけるの関数値に対する重みの期待値は、Shapley Valueに等しい。」([6]より引用、一部、記号等を、著者が本稿にあわせた。)

第3に、Xの各部分集合の Shapley Value の比をその部分集合を構成する要素の重要度の比にすることである。ショケ積分を行う場合、ファジィ測度は、$\mu(X)$だけではなく、X の部分集合のファジィ測度も利用する。また、評価値の大小関係が等確率で起こるとは限らない。したがって、評価値込で、重要性を考えるならば、この性質が要請される。

第4に、シングルトンのファジィ測度の比が重要度の比になっているかという性質である。

5.2 シングルトンファジィ測度基準

この方法は、例えば、$X = \{x_1, x_2, x_3\}$とし、重要度の比を1 : 2 : 3にするときは、$\mu(\{x_1\}) : \mu(\{x_2\}) : \mu(\{x_3\}) = 1 : 2 : 3$となるように、λにしたがって、各ファジィ測度を定める。この場合、$\lambda = +\infty$の場合を除いて、重要度の比と各々のシングルトンのファジィ測度の比が等しくなる。

例えば、$\mu(\{x_1\}) : \mu(\{x_2\}) : \mu(\{x_3\}) = 1 : 2 : 3$とし、ξを変化させたときのファジィ測度の変化は、図4のようになる。図4で、$\mu(\{x_1\})$は、ξが1に近づくにつれ、1/3に近づく。シングルトン以外のファジィ測度でも、例えば、$\mu(\{x_1, x_2\})$のようにξが1に近ずくつれ、1に近づくかないものがある。(7/9に近づく) つまり、$\xi = 1$のときのファジィ測度は、$\lambda \to -1$としたときの極限値は、一般には、1には近づかないし、$\xi = 0$のときのファジィ測度は、$\lambda \to +\infty$としたときの極限値は、0に近づかない。したがって、第1の性質は、満たさない。また、第4の性質は、満たしているが、第2, 第3の性質については一般には満たさない。

5.3 入力の数基準

2つめの方法は、重要度を入力の数とする方法である。例えば、$X = \{x_1, x_2, x_3\}$で、重要度の比を1 : 2 : 3にするときは、

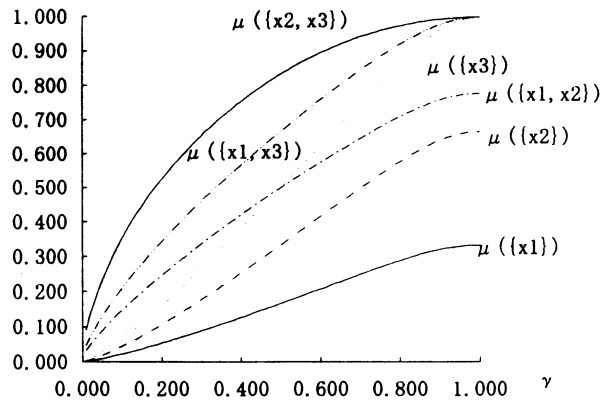


図 4: 重要度をシングルトンのファジィ測度の比にした場合

x_1の入力の数を1,x_2の入力の数を2,x_3の入力の数を3として3.1の方法で、ファジィ測度を割り当てるのである。すなわち、$X' = \{x'_{1,1}, x'_{2,1}, x'_{2,2}, x'_{3,1}, x'_{3,2}, x'_{3,3}\}$とし、また、$F' = 2^{X'}$とする。そして、すべての$X'$のシングルトンのファジィ測度に同じファジィ測度を割り当て、λファジィ測度でファジィ測度を同定する方法である。

ファジィ測度の計算方法は、ϕ_s変換を用いて計算できる。すなわち、$\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_n$を重要度とし、$A \in F$のファジィ測度は、

$$\mu(A) = \phi_s(\sum_{x_j \in A} \omega_j / \sum_{x_j \in X} \omega_j) \tag{21}$$

で求められる。

図5は、5.2 の場合と同様に、ξの変化と各ファジィ測度の変化をグラフにしたものである。ただし、$X = \{x_1, x_2, x_3\}$とし、重要度の比率を1 : 2 : 3とした。

ϕ_s変換の性質により、すべてのファジィ測度がξを1に近づけるにつれ、ファジィ測度も1に近づくという性質を持っている。シングルトンのファジィ測度の比は、ξによって異なる。0.5 (加法性が成り立つ場合) の場合を除いて、重要度の比とシングルトンのファジィの比は異なる。

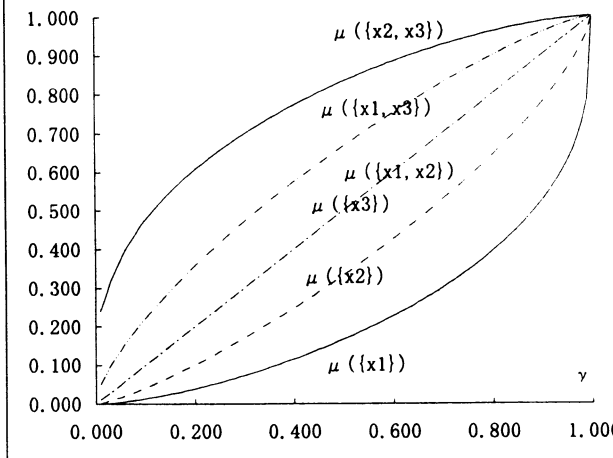


図 5: ξ とファジィ測度の関係 (重要度を入力の数)

次に、この方法とShapley Valueの関係を考察する。X'の要素のすべてのシングルトンのファジィ測度を同じするように、ϕ_s変換で求めたファジィ測度をμ'とする。すなわち、

$$\mu'(A') = \phi_s(\frac{|A'|}{|X'|}), \forall A' \in F' \tag{22}$$

とする。μ'のShapley Valueを計算すれば、すべてのの要素は対称であるので、すべてのの要素の Shapley Value は等しくなる。μ'の$x'_{i,j}$のShapley Valueを$\mathrm{sh}'_{i,j}(\mu')$と表記すれば、$\mathrm{sh}'_{i,j}(\mu') = 1/\mid X' \mid,\ \forall i,j$となる。したがって、各$i$について、

$$\sum_j \mathrm{sh}'_{i,j}(\mu') = \frac{\omega_i}{\sum_{k=1}^{n}\omega_k},\ \forall i \tag{23}$$

となり、その比は重要度の比になる。

また、空でない任意のXの部分集合Sについて、同様に$S' \subset X'$を求める。このS'を全体集合として、Shapley Valueを求める。すなわち、$\mu_S"(A') = \mu'(A')\ \forall A' \subset S'$として、各$x'_i$のShapley value $\mathrm{sh}_{i,j}(\mu_S")$を求める。全体集合が$X'$の場合と同様に、$S'$のすべての要素は、対称であるので、

$$\mathrm{sh}'_{i,j}(\mu_S") = 1/\mu(S) \tag{24}$$

となる。したがって、

$$\sum_j \mathrm{sh}'_{i,j}(\mu_S") = \omega_i/\mu(S),\ \forall x_i \in S \tag{25}$$

となり、その比は重要度の比になる。

しかしながら、XとμについてShapley Valueを計算しても一般には重要度の比にはならない。また、任意のiについて、$h(x_{i,j}) = h(x_{i,k}), \forall j,k$となり、任意の順列について等確率で起こることはない。したがって、この方法で同定したファジィ測度のShapley Valueが、平均的な指標となっているとは必ずしもいえない。

これを解決するために、入力の数を増やす場合、単純に同じ評価値で増やすのではなく、異なる評価値を用いるのである。例えば、入試の得点の総合評価で、数学の重要度を 2 にするとき、100 点満点の得点を 2 つ入力するのではなく、数学を代数と幾何の 2 つに分け、それぞれ 100 点満点の評価値とするのである。

5.4 Shapley Value基準

図14は、とし、重要度の比率を1 : 2 : 3とし、ξ (λ) を与え、XのShapley Value の比が重要度の比になるようにファジィ測度を求めたものである。この場合、明らかに最大値、最小値の拡張になっ

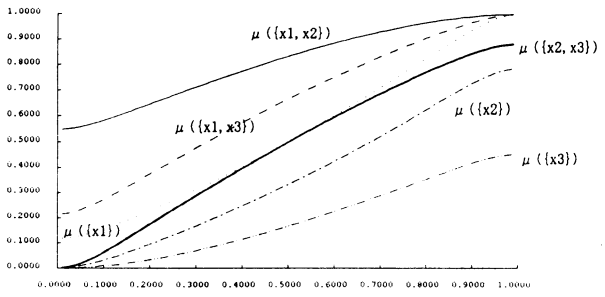


図 6: 重要度を Shapley Value にした場合

ていない。また、X の部分集合の Shapley Value が、その部分集合の要素の重要度の比になっているとも限らない。また、シングルトンのファジィ測度の比が重要度の比になっているとも限らない。

また、λ=+∞とλ=-1 の時の値は、極限値で与えるのが適当であろう。

5.5 順位による重みを変える方法による重要度の加味

4 の順位によって重みを等比的に変える方法へ評価項目間の重要度をいれる方法として、自然な方法は、各評価項目の評価値への係数を順位による重みと評価項目間の重要度の積にすることだろう。$\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_n$を順位による重み、$\omega_1, \ldots, \omega_n$を評価項目間の重要度し、$R(i)$を評価値がi番目に大きい評価項目の番号とする。例えば、$R(1) = 3$は、評価値が最大の評価項目が3番目の評価項目であることとする。するとこの方法は、

$$z = \sigma_1\omega_{R(1)}v_1 + \sigma_2\omega_{R(2)}v_2 + \ldots + \sigma_n\omega_{R(n)}v_n \tag{26}$$

と表現できる。

しかしながらこの方法はファジィ測度とショケ積分の形にするとき、ファジィ測度をユニークに同定できないという欠点を持つ。もし、ショケ積分の形ではなく、式(26)で評価を行った場合、個々の評価値を連続的に変化させていったとき、総合評価値が不連続に変化したり、その不連続の点で、総合評価値がユニークに定まらないという欠点も持つ。

	性質1	性質2	性質3	性質4
重要度無	○	○	○	○
シングルトンファジィ測度基準	×	×	×	○
入力の数基準	○	△	△	×
Shapley Value基準	×	○	×	×

表 1: 各手法の比較

6 おわりに

λファジィ測度の性質と、そのショケ積分による総合評価が最大値、最小値、平均値による総合評価の拡張であることを示した。また、その評価に重要度を加味するとき 3 つの方法その特徴をしらべた。その結果を表1に示す。

参考文献

[1] A. TVERSKY, Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty, Journal of Risk and Uncertainty, Vol.5, 297-323, 1992.

[2] R. R. YAGER, On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decisionmaking, IEEE Transactions, Systems, Man, and Cybernetics, Vol.18, No.1, 183-190, 1988.

[3] 高萩栄一郎, ファジィ積分による多属性の特性値の総合評価法, 第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 日本ファジィ学会,813-816, 大阪,1994.

[4] 塚本弥八郎、不確実性を伴う意思決定問題のファジィ測度論による分析、「ファジィ理論と人文社会科学」(講座ファジィ 14), 日刊工業新聞社,1994.

[5] 塚本弥八郎、ショケ積分とOWAオペレータ、第3回ファジィ・ワークショップ in 伊豆 論文集, 86-90, 1994.

[6] 室伏俊明、ファジィ測度を読む技術(I) ファジィ測度の Shapley 値, 第2回ファジィワークショップ講演論文集,39-48, 長岡,1992.

[連絡先]
〒214 神奈川県川崎市多摩区東三田2-1-1
専修大学　商学部　　高萩栄一郎
E-MAIL:takahagi@isc.senshu-u.ac.jp　　TEL:044-945-8259

TC4-3

非加法的確率測度と統計的決定問題
Non-Additive Probability Measure and Statistical Decision Problem

前田　豊　　田中　英夫
Yutaka MAEDA Hideo TANAKA
大阪府立大学工学部
College of Engineering, University of Osaka Prefecture

Abstract: In this paper, we propose the method for posterior analysis under the situation where a data distribution can not be represented as one probability distribution. From viewpoint of a set of probability distributions, belief functions can be applied to statistical decision problems.

1．はじめに

統計的決定理論[1]では，不確実性の数学的表現方法として確率を使用している．しかしながら実際には，システムの複雑さや観測の不正確さなどから，情報自身があいまいである場合や複数の専門家による情報分析の結果が一様にならない場合が多い．このような場合には，データの分布や事前情報を一つの確率分布としてではなく，確率分布の集合として同定する方が適切となる．ビリーフ測度[2]は，両立確率測度と呼ばれる確率分布の集合と結び付いているので，ビリーフ測度により，このような知識を表現することが可能になる．

本研究では，事前分布と条件付分布がそれぞれ，ビリーフ測度として表現される場合に，この確率分布の集合としての観点からの事後分布の導出方法を定式化する．その過程で，事前分布と条件付分布がビリーフ測度で表されていても，一般的に，結合分布がビリーフ測度とはならないことが明らかにされる．

2．数学的準備

確率測度は，次の３つの性質

$$P(\varnothing)=0 \tag{1}$$

$$P(\Omega)=1 \tag{2}$$

$$E\cap F=\varnothing \Rightarrow P(E\cup F)=P(E)+P(F) \tag{3}$$

を満たす非負実数値集合関数Pである．ここで，Ωは対象となる事象の全体集合を表している．(3)式は加法性と呼ばれる性質である．確率測度は加法的で非負値をとるので，単調性

$$E\subset F \Rightarrow P(E)\le P(F) \tag{4}$$

を満たす．加法性を満たさない非負実数値集合関数が，非加法的確率測度であり，例えば，(1)(2)および(4)式を満たす非負実数値集合関数は，ファジィ測度[3]と呼ばれる．ファジィ測度以外の非加法的確率測度には，上下界確率，可能性・必然性測度，区間値確率，ビリーフ・プローザビリティ測度などがある．

Ω上のビリーフ測度は次の条件を満たす非負実数値集合関数Fである．

$$F(\varnothing)=0 \tag{5}$$

$$F(\Omega)=1 \tag{6}$$

$$F(\cup_{i\in I} A_i)\ge \sum_{\varnothing\neq J\subset I} (-1)^{|J|+1} F(\cap_{i\in J} A_i) \tag{7}$$

ここで，$A_i\subseteq\Omega$，$I=\{1,\ldots,n\}$であり，|J|はIの部分集合Jの濃度を表している．Fに対して，基本確率割当と呼ばれる集合関数mが存在する．

$$F(A)=\sum_{B\subset A} m(B) \tag{8}$$

Ω上のビリーフ関数は2^{Ω}上では密度関数mを伴う確率測度となる．また，ビリーフ測度と両立する確率測度の集合が次式で定義される．

$$\mathbf{P}_F=\{P:F(A)\le P(A)\ \forall A\subseteq\Omega\} \tag{9}$$

この$\mathbf{P}_F$からFを再構成することができる．

$$F(A)=\inf\{P(A):P\in\mathbf{P}_F\} \tag{10}$$

3．事後分布の導出

統計的決定問題では，事後解析を行うた

めに，事前分布と条件付分布とを結合して同時分布を求める．事前および条件付分布がビリーフ測度で表される場合に確率分布の集合という観点からは，それらの同時分布がビリーフ測度では表せないことを示す（Kybuyg [4] 参照）．

2つの袋a，bに1から4の数字のt付いた玉が表1の割合で含まれていて，一方の袋から玉を1つ取り出すものとする．

表1　玉の含有割合

	1	2	3	4
a	0.25	0.25	0.25	0.25
b	0.6	0	0	0.4

a，bのどちらから玉が取り出されたのかは未知とする．これは，vacuous ビリーフ関数または，未知比率p $(0 \le p \le 1)$ でaが選ばれる状態としてモデル化される．このとき，同時分布は，表2のようになる．

表2　同時分布

	1	2	3	4
a	0.25p	0.25p	0.25p	0.25p
b	0.6(1-p)	0	0	0.4(1-p)

ここでa（b）からiの出る事象をa_i（b_i）とする．$A=\{a_1,a_2,b_1,b_2\}$，$B=\{a_2,a_4,b_2,b_4\}$ のとき，$A\cup B$，A，B，$A\cap B$ の下界確率 P_* は

$$P_*(A\cup B)=\min(1-0.25p)=0.75$$
$$P_*(A)=\min(0.6-0.1p)=0.5$$
$$P_*(B)=\min(0.4+0.1p)=0.4$$
$$P_*(A\cap B)=\min(0.25p)=0$$

と計算され，

$$P_*(A\cup B)<P_*(A)+P_*(B)-P_*(A\cap B)$$

となる．ところで，(7)式より，

$$F(A\cup B)\ge F(A)+F(B)-F(A\cap B)$$

が導かれるので，P_* はビリーフ測度ではない．この未知比率を用いた確率をKyburgは確率の凸集合と呼んでいる．一般に，ビリーフ測度は確率の凸集合の下限値で表現できるがその逆は成り立たない．特別なケースとして，次の命題が成立する．

命題1： *2つの要素の集合上の確率測度の凸集合の下限値はビリーフ測度となる．*

次に，事前ビリーフF(A)と条件付ビリーフ$F_a(B)$が与えられていて，Fの両立確率分布を$\mathbf{P}_F$，F_aの両立確率分布を$\mathbf{P}_{Fa}$とすると，それらの同時分布は，

$$S_p=\{P(A,B)\,|\,P(A,B)=\sum_{a\in A}P(a)\cdot P_a(B)\}$$

と表される．ここで，$P\in\mathbf{P}_F$，$P_a\in\mathbf{P}_{Fa}$である．事後分布は，この$\mathbf{S}_p$内の確率分布をベイズ定理で条件付けることにより導かれる．つまり，事後分布の集合$\mathbf{S}_{P(I)}$は，

$$\mathbf{S}_{P(I)}=\left\{P(A|B)\,\middle|\,P(A|B)=\frac{P(A,B)}{P(A,B)+P(A^c,B)}\right\}$$

となる．ここで，$P(A,B)\in\mathbf{S}_p$であり，A^cはAの補集合である．この下限値は，

$$\inf_{P(I)\in S}P(A|B)=\inf\frac{P(A,B)}{P(A,B)+P(A^c,B)}$$
$$=\frac{\sum_{C\subseteq A}m(C)\cdot\min_{c\in C}F_c(B)}{\sum_{C\subseteq A}m(C)\cdot\min_{c\in C}F_c(B)+\sum_{C\not\subseteq A}m(C)\cdot\max_{c\in C-A}(1-F_c(B^c))}\quad(11)$$

となる．このとき，次の命題を得る．

命題2： *(11)式により得られる測度は，ビリーフ測度となる．*

参考文献

[1] 松原 望：意思決定の基礎，朝倉書店(1988)

[2] G. Shafer : A Mathematical Theory of Evidence, Princeton Univ. Press (1976)

[3] 菅野 道夫，室伏 俊明：ファジィ測度，日刊工業新聞社(1993)

[4] E. Kyburg : "Bayesian and non-Bayesian evidential updating", Artificial Intelligence, 31, pp. 271-293 (1987)

連絡先　〒593　大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学工学部経営工学科
前田　豊
TEL：0722-52-1161（内）2377
FAX：0722-59-3340
e-mail : hideot@center.osakafu-u.ac.jp

TC4-4

ファジィ測度の視覚的表示

Visual Representation of Fuzzy Measure

宮岡 政夫 † 室伏 俊明 ‡ 菅野 道夫 †
Masao Miyaoka Toshiaki Murofushi Michio Sugeno

†東京工業大学 Tokyo Inst. Tech.
‡電気通信大学 Univ. of Electro-Communications

Abstract— **This paper proposes an algorithm for drawing Venn diagrams to show the relations between subsets represented by a fuzzy measure. The algorithm consists of two phases; the first phase finds the simplest measure-representation of a given fuzzy measure, and the second phase generates a Venn diagram based on the measure-representation.The presented algorithm for the first phase is more efficient than the previously proposed one.**

1 はじめに

ファジィ測度は，部分集合間の相互作用，つまり要素の組合せによる効果を表している．例えば，主観的評価問題の解析にこのファジィ測度が利用されている．しかし，ファジィ測度は数値だけで表されており，それだけではファジィ測度の特徴を把握しづらい．そこで，直観的にその特徴を把握できるようにするためには，図による表示が有効的であると考えられる．

以前の研究 [2] では，ファジィ測度を入力するとVenn図を表示するための前処理を行なうアルゴリズムの提案がなされたが，効率が悪く実用的でなかった．また，Venn図を自動描画するシステムの研究もなされていなかった．そこで本論文では，シンプレックス法の導入による前処理の効率化と自動描画システムを提案する．

2 数学的準備

定義 1 [ファジィ測度][1] Xを空でない有限集合とするとき，μが2^X上のファジィ測度であるとは，μが2^Xから$[0,\infty)$への関数であって，次式を満たすことである．

$$\mu(\emptyset) = 0 \tag{1}$$

$$A, B \in 2^X,\ A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B) \tag{2}$$

ここで式 (2) は単調性と呼ばれている．

定義 2 [セミフィルタ][1] Xを空でない有限集合とするとき，Xのセミフィルタとは，次の3条件を満たすXの部分集合族θのことである．

$$\emptyset \notin \theta \tag{3}$$

$$X \in \theta \tag{4}$$

$$A \in \theta \ \&\ A \subset B \in 2^X \Rightarrow B \in \theta \tag{5}$$

定義 3 [普遍枠][1] Xを空でない有限集合とするとき，Xのセミフィルタ全体の集合をΘ_X，写像$H_X : 2^X \to 2^{\Theta_X}$を

$$H_X(A) \triangleq \{\theta \in \Theta_X | A \in \theta\} \quad \forall A \in 2^X \tag{6}$$

と定める．このとき(Θ_X, H_X)をXの普遍枠と呼ぶ．

定理 1 2^X上の任意のファジィ測度μに対して，2^{Θ_X}上の測度mがあって，次式が成り立つ．

$$\mu(A) = m(H_X(A)) \quad \forall A \in 2^X \tag{7}$$

図1に$X = \{x_1, x_2\}$の普遍枠を示す．セミフィルタは$\theta_0 = \{\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_1, x_2\}\}$，$\theta_1 = \{\{x_1\}, \{x_1, x_2\}\}$，$\theta_2 = \{\{x_2\}, \{x_1, x_2\}\}$，$\theta_3 = \{\{x_1, x_2\}\}$ の4個である．

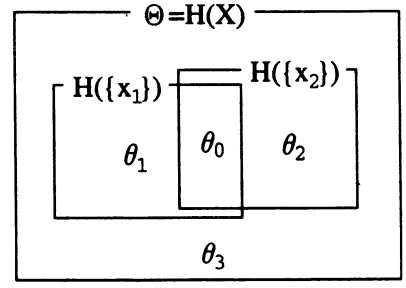


図 1: $X = \{x_1, x_2\}$の普遍枠

3 ファジィ測度の視覚的表示 [2]

一般に，ファジィ測度は式 (2) だけしか仮定しないので$A \cap B = \emptyset$の時，$\mu(A \cup B)$と$\mu(A) + \mu(B)$の間の大小関係については一意に定まらず，次のような3つの場合が起こりうる．

$$\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) \tag{8}$$

$$\mu(A \cup B) > \mu(A) + \mu(B) \tag{9}$$

$$\mu(A \cup B) < \mu(A) + \mu(B) \tag{10}$$

式 (8) は，加法性が成り立っている場合であり，AとBは独立で相互作用がないことを表している．式 (9) は，AとBの間に相乗作用があることを表しており，優加法性と呼ばれている．式 (10) は，AとBの間に重複作用があることを表しており，劣加法性と呼ばれている．

この関係を読み取れるようにするために，それぞれをVenn図で図2のように表示する．

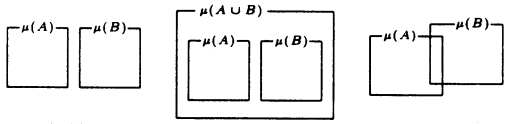


図 2: ファジィ測度の Venn 図表示

4 Venn 図表示するための前処理

本節では，数値で表されたファジィ測度を Venn 図によって視覚化するシステムの前処理の部分について述べる．

4.1 Venn 図とセミフィルタ

X 上の任意のファジィ測度 μ に対して，セミフィルタの集合 Θ_X 上の測度 m が存在して (Θ_X, m, H_X) が，μ の測度になる．したがって，任意のファジィ測度はセミフィルタにより表現可能となる．そこで $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ の場合の普遍枠は図 3のように 18 個のセミフィルタで表せる．(本研究では 3 要素の場合だけをとりあげたが，2 要素の場合もアルゴリズムの流れは基本的に同じである)

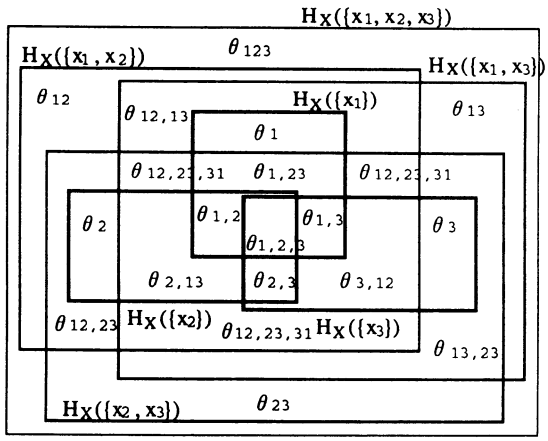


図 3: $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ の普遍枠とセミフィルタ

この時，セミフィルタの測度を 18 次元ベクトル

$$\boldsymbol{x} = [\, m(\{\theta_1\})\ \ m(\{\theta_2\})\ \ \cdots\ \ m(\{\theta_{123}\})\,]^T \qquad (11)$$

で表し，またファジィ測度をベクトル

$$\boldsymbol{b} = [\, \mu(\{x_1\})\ \ \mu(\{x_2\})\ \cdots\ \mu(\{x_1, x_2, x_3\})\,]^T \qquad (12)$$

で表すと，表現は次のように表すことができる．

$$\boldsymbol{Ax} = \boldsymbol{b} \qquad (13)$$

ここで，$\boldsymbol{A}$ は H_X から定まる 7×18 の行列である．

式 (12) に具体的にファジィ測度の値を代入して式 (13) を解けば，高々7 個のセミフィルタで表現することができる．

3 要素の普遍枠は図 3のように平面上に表現することができる．すなわち，式 (13) を $\boldsymbol{x}$ について解くことによってセミフィルタの測度を求めれば，任意のファジィ測度を Venn 図表示することが可能となる．

一般に式 (13) の方程式は，等式 7 つ，変数 18 個なので無数の非負解 $\boldsymbol{x}$ を持つ．当然解の選び方で Venn 図が変わってくる．見やすい Venn 図を表示するためには解をどのように効率良く選ぶかが問題となってくる．

4.2 線形計画法

$n > m$ とするとき，$\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{R}^n, \boldsymbol{b} \in \boldsymbol{R}^m, \boldsymbol{c} \in \boldsymbol{R}^n$ を用いて，

$$\text{条件式} \qquad \boldsymbol{Ax} = \boldsymbol{b} \quad (\boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{0}) \qquad (14)$$

$$\text{目的関数} \qquad Z = \boldsymbol{c}^T\boldsymbol{x} \longrightarrow min. \qquad (15)$$

と表したものを，線形計画問題の標準形という．ただし，$\boldsymbol{A}$ は $m \times n$ の係数行列である．

線形計画法の基本定理より，基底変数は条件式の変数行列 $\boldsymbol{A}$の rank によって定まることがわかっている．そして，線形計画問題の無数の可能解のうち，可能基底解のみを，効率良く探索して最適解を求める方法が，シンプレックス法である．

式 (13) が式 (14) と同じ形をしていることから，シンプレックス法によってセミフィルタの値を求めることを考える．このとき係数行列 $\boldsymbol{A}$ は 3 要素の普遍枠から一意に定まっており，その rank は 7 である．よって，基底変数は 18 個あるセミフィルタのうち高々7 個で構成され，それ以外のセミフィルタの測度は 0 になる．そしてこの最適解の探索は，目的関数を元におこなわれるため，目的関数をどう定めるかが重要になってくる．

式 (13) を条件式として用いる場合，目的関数は次の形で表される．

$$Z = c_1 m(\{\theta_1\}) + c_2 m(\{\theta_2\}) + \cdots + c_{123} m(\{\theta_{123}\}) \qquad (16)$$

つまりこの係数行列 $\boldsymbol{c} = [c_1, c_2, \cdots, c_{123}] \in \boldsymbol{R}^{18}$ を定めるわけだが，次のような性質を利用する．目的関数の値 Zが小さくなるようにするわけだから，係数を大きく設定されたセミフィルタの測度は基底に選ばれにくくなる．

ここで，図のわかりやすさという観点から 7 個のセミフィルタを選ぶ基準を考え，さらに上の性質も考慮しつつ係数行列 $\boldsymbol{c}$を決定する．

- 図が単純になるようなセミフィルタを選ぶ．
- 部分集合間に加法性が存在する場合，それらの部分集合が交わらないように表示されるセミフィルタを選ぶ．

例えば図 4は，ファジィ測度が $\{x_1\}$ と $\{x_3\}$ に関して加法的 (独立的) になっている例である．$H_X(\{x_1\})$ と $H_X(\{x_3\})$ は，(1) では交わっているが，(2) では交わっていない．図 2 を見れば明らかなように (2) の方が独立であることを表している．また (2) の図の方が単純である．

以上 2 つがわかりやすさの基準と考えられ，これから係数の大小関係を次のように設定した．

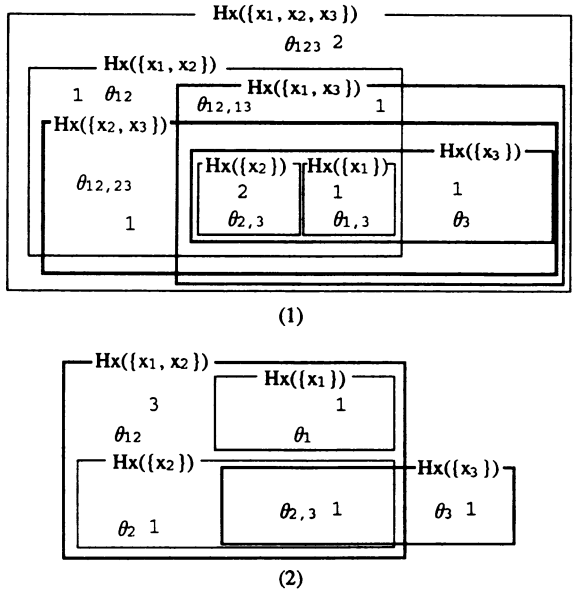


図 4: ファジィ測度の Venn 図表示

$$c_1, c_2, c_3 < c_{12}, c_{13}, c_{23} < c_{123} < c_{1,2,3} < c_{1,2}, c_{1,3}, c_{2,3} < c_{12,13}, c_{12,23}, c_{13,23} < c_{12,13,23} < c_{1,23}, c_{2,13}, c_{3,12} \quad (17)$$

なお，対称な関係にあるセミフィルタの係数は等しくする．

$$c_1 = c_2 = c_3\ ,\ c_{12} = c_{13} = c_{23}\ ,\ c_{1,2} = c_{1,3} = c_{2,3}\ ,\ c_{1,23} = c_{2,13} = c_{3,12}\ ,\ c_{12,13} = c_{12,23} = c_{13,23} \quad (18)$$

式 (17),(18) に基づき，見やすいと思われる Venn 図がわかっているファジィ測度を入力し，同じ図が描かれるように目的関数の係数の範囲を求める．幾つかのファジィ測度でこの作業を行ない，その結果に基づき次のように定めた．

$$\begin{aligned} c_1 = c_2 = c_3 &= 1 \\ c_{12} = c_{13} = c_{23} &= 50 \\ c_{123} &= 30 \\ c_{1,2} = c_{1,3} = c_{2,3} &= 10 \\ c_{1,2,3} &= 15 \\ c_{1,23} = c_{2,13} = c_{3,12} &= 150 \\ c_{12,13} = c_{12,23} = c_{13,23} &= 100 \\ c_{12,13,23} &= 120 \end{aligned} \quad (19)$$

5 ファジィ測度の Venn 図表示

5.1 Venn 図の自動描画

§4 の前処理より求まったセミフィルタの測度より，Venn 図表示を行なう．Venn 図を表示する際には，セミフィルタの測度をなるべく面積に対応させる．そうすれば，測度の大小関係からファジィ測度の特徴を理解しやすくなると，考えられるからである．なお，作図に用いる領域の輪郭線は以下の理由より長方形を用いる．

- 2 点の座標を決めれば表示が可能．
- シンプルな図形の方が見やすい．

おおまかなアルゴリズムは，下記のような手順に従う．

1．読み込み
前処理で選択されたセミフィルタに対応している測度を読み込む．

2．描く領域の判別
各々の領域の輪郭線について，描くか描かないかの判別を行う．その領域だけに含まれるセミフィルタの測度が全て 0 である場合は輪郭線は描かない．

3．幅の比の計算
セミフィルタの測度から幅の比を計算する．図 3より，横方向の幅を決定するセミフィルタと，縦方向の幅を決定するセミフィルタに分けてある．始めに $H_X(\{x_1\}), H_X(\{x_2\}), H_X(\{x_3\})$ を構成しているセミフィルタの測度より，横方向の比，縦方向の比をそれぞれ求める．次にその計算された比と $H_X(\{x_1, x_2\})$, $H_X(\{x_2, x_3\}), H_X(\{x_1, x_3\}), H_X(\{x_1, x_2, x_3\})$ を構成するセミフィルタの測度より，横方向の比，縦方向の比をそれぞれ計算する．

4．実際の幅への変換
表示画面は (570×400) の座標をもたせている．計算で求めた幅の比を，座標上の長さに直す．

5．座標決定
領域の示す座標を，先に求めた座標上の長さから求める．

6．領域をずらす
座標決定したものをそのまま表示すると，領域の輪郭線どうしの重なりができて見にくい図になってしまう．また，枠の包含関係を明確にするためにも，座標をずらす処理を行う．

7．領域の表示
領域の輪郭線の重なりをなくした最終的な座標より，領域を表示させる．このとき枠のラベルの表示，セミフィルタの測度の表示も行う．

5.2 見づらい Venn 図の再表示

上の手順に従って Venn 図を自動描画すれば，どのセミフィルタが存在しているのか，またその測度がいくつなのかもわかるようになっている．しかし，いろいろなファジィ測度を入力して Venn 図を表示させてみると，必ずしも見やすいものを表示するとは限らない．

本研究では Venn 図を自動描画する際に，セミフィルタの測度を面積に対応させるようにした．しかし，セミフィルタの測度の最大値と最小値の比が非常に大きい場合，正確な表示をすると，領域も測度も見にくくなってしまう場合が多い．我々の感覚はそれほど厳密ではないので，正確に表示さ

せる必要性はない．そこで，見にくいVenn図が表示された場合，ある程度データを加工しておおまかな測度の大小関係がわかるVenn図を表示させることもできるようにした．

6 実行例

ここで，実際にファジィ測度を入力し，選出されたセミフィルタとその測度，および出力されたVenn図を示す．まず入力するファジィ測度を次のように定める．

$$\mu(\{x_1\}) = 0.915 \quad \mu(\{x_2\}) = 0.511$$
$$\mu(\{x_3\}) = 0.762 \quad \mu(\{x_1, x_2\}) = 1.372$$
$$\mu(\{x_1, x_3\}) = 1.386 \quad \mu(\{x_2, x_3\}) = 1.062$$
$$\mu(\{x_1, x_2, x_3\}) = 1.999$$

これをもとに，前処理で選択されたセミフィルタ，およびその測度は次のようになる．

$$m(\{\theta_1\}) = 0.624 \quad m(\{\theta_2\}) = 0.300$$
$$m(\{\theta_3\}) = 0.314 \quad m(\{\theta_{123}\}) = 0.313$$
$$m(\{\theta_{1,3}\}) = 0.237 \quad m(\{\theta_{2,3}\}) = 0.157$$
$$m(\{\theta_{1,2,3}\}) = 0.054$$

また，Venn 図は図 5のようになる．ただし，領域 $H_X(\{x_1, x_3\})$ の輪郭線は $\{1,3\}$ で示している．θ の数値の入る場所は図 3 に従う．また，図に表示してあるセミフィルタの測度は実際の値の1000倍である．なお，$m(\{\theta_1\})$ と $m(\{\theta_{1,2,3}\})$ との差があるので，再表示してある．

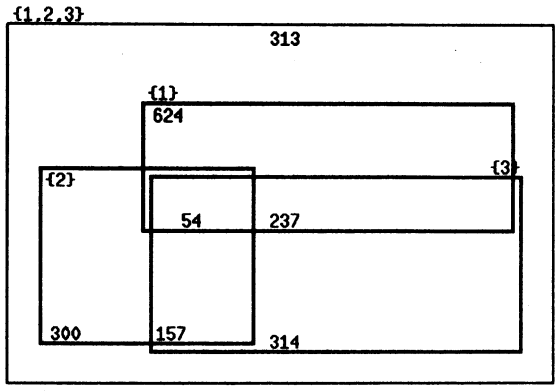


図 5: 実行例

7 Venn図の複数表示

本研究では，同一ディスプレイ上に複数のVenn図を表示することを可能にした．

以前の研究 [2] 及び本研究では3要素集合上の場合を取り上げたが，これは2次元表示では3要素集合までが限界で，4要素集合を1つのVenn図で表示しようとするとかえって見づらくなってしまうからである．そこで，Venn図を複数表示できることを利用すれば，4要素集合上のファジィ測度の図示も可能となるのである．つまり，3つの部分集合 (要素，または要素を組み合わせたもの) 間のVenn図をいくつも描き，総合的に判断するのである．

8 おわりに

本論文ではまず，$X = \{x_1, x_2, x_3\}$ 上のファジィ測度をVenn図表示するための前処理 (表現に用いるセミフィルタの値の算出) を，線形計画問題のシンプレックス法を用いて高速化した．次に，前処理から得られたセミフィルタとその測度を，Venn図に自動描画するアルゴリズムを考案した．この2つより，ファジィ測度を入力すればVenn図が自動描画されることになる．

前処理に関しては，§6 ばかりでなく他のファジィ測度を用いても，ほぼ満足のゆく結果が得られた．しかし，Venn図の自動描画には表示方法に問題点がある．

まず，セミフィルタの測度の比をVenn図の面積比に対応させようとした．しかし，必ずしも思いどおりものが描けるとは限らず，大小関係が逆転してしまう場合があった．これでは，部分集合間の関係が誤解されてしまう危険性がある．またいくつかのVenn図のうち，どれが見やすいものであるかという判断は，ある程度ユーザーに委ねられている．そこで，ファジィ測度を入力したら，セミフィルタの組合せをある程度選べるようにしたが，思い通りにはいかなかった．この2点に関して，Venn図表示のアルゴリズムを改善していかなくてはならない．

本研究では $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ の場合だけを表示させたが，Venn図を同一ディスプレイ上に複数表示することが可能になったので，$|X| \geq 4$ の場合のVenn図表示も可能となった．部分集合間の関係を素早く読みとれるようにするにはどの様にすればよいか，など具体的な方法を考案しなければならない．

本研究の前処理と描画アルゴリズムは，それぞれ川島拓，瓦林弘之両氏の1993年度卒業研究をもとにした．両氏に感謝する．

参考文献

[1] 菅野道夫，室伏俊明，ファジィ測度，日刊工業新聞社，1993.

[2] 室伏俊明，浜田英嗣，ファジィ測度を読む技術 (II) 視覚的表示，第9回ファジィシステムシンポジウム，1993，689-692.

[問い合わせ先]
〒227 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259
東京工業大学システム科学専攻 菅野研
宮岡 政夫
tel 045-924-5645
fax 045-924-5681
E-mail miyaoka@sys.titech.ac.jp

TD1-1

波動場を用いたアメーバ様探索行動のモデル化と応用

Amoeba-like searching behavior Model using Vibrating Potential Field

横井浩史*，水野敬文*，滝田正寿*，嘉数侑昇**
Hiroshi YOKOI, Takafumi MIZUNO, Masatoshi TAKITA Yukinori KAKAZU
* 生命工学工業技術研究所
National Institute of Bioscience and Human Technology
** 北海道大学工学部
Hokkaido University

Abstract

This paper presents one approach to modeling life using a field technic, so called as vibrating potential field.

In recent years, modeling of life is drawn much attention in many fields. The behavior of life is complex and interesting. All life must have some intelligence for making its own life cycle stable and adept to changing environment. It will be very useful if we can draw this life's know how. This study tries to model mathematically the formation of a specific part of living cells. For this purpose, we prepare an adequate mathematical model of physical interactions on many different properties. The mathematical model presents parallel distributed processing system that exchanges information through vibrating potential field (VPF) and life's kinetics. Using VPF and life's kinetics, the computer simulations shows the behaviors of artificial life that conservates its own energy level and tunes its configurations or location of its parts.

1．はじめに

生体は化学物質の結合およびその組み合わせにより構成された物質であるゆえ，生体を構成する原子またはその化合物の組成や状態を知ることにより，局所的相互作用の集大成として理解することが可能であり，ボトムアップ的手法によりモデル化できるものと考えられてきた．このようなボトムアップ的なアプローチは生体を構成する要素（原子，分子）の精密な状態を観測し，再構成することが現在の技術ではかなりの困難を伴うなどの問題点を抱えており，別の視点からのアプローチが必要とされてきた．特に生体の恒常性を説明するために仮想的ではあるが，大局的境界条件や制約条件などの重要性なども指摘されており，生体の大局的な状態，たとえばエントロピーの変化などに着目した有力なモデルなどが提案されている．これら２つのアプローチは本来，相補的関係にあるはずであり，独立に議論されるべき課題ではないと考える．よってここでは，これら局所的相互作用と大域的状態保存の考え方を融合させることにより，生命体のモデル構築を試みる．モデル化の目的のために，生体の動力学的状態が場所と時間の関数であることを重視して，生体の存在する場を用いることとする．用いた場は，生体の処理対象となる情報の多様性を保証するために，多重ポテンシャル場を提案するものとし，ここではこれを波動場と呼ぶものとする．波動場については３章以降で，その詳述を行うものとする．また，波動場を用いることによって，細胞性粘菌（アメーバ）を対象として粘菌の探索行動のモデル化を試みる．

2．細胞性粘菌の特徴

具体的なモデル化の対象として，ここでは粘菌(キイロタマホコリカビ, Figure.1 ）の探索行動を対象とする．粘菌の基本的特徴として，

1）生活環に単細胞の時期と多細胞体（あるいは多核体）の時期が存在する．

2）栄養摂取はファゴサイトーシスによる．

3）栄養増殖体は発達した細胞壁を持たず，多くの場合アメーバー状である．

4）耐性型の細胞（胞子）を形成する．

すなわち，粘菌はプロトプラスの状態においてはアメーバ状の探索行動様式をとりファゴサイトーシスを行うと形態及び行動学的特徴づけされており，図に示されるように糸状仮足（ディクチオ型細胞性粘菌）を細胞表面から延ばすことにより周囲の探索と歩行を実現している．このような行動様式は細胞の移動や捕食行動などの基礎機能であるという重要な特性を持っている．アメーバ以外の生物にも共通する代表的な特性をアルゴリズムを併記しながら列挙すると表１のごとくなり，空間的な相互作用と場の情報処理過程として統一的にアルゴリズム化する

関数により波動場を用いたシステムが構築される．次章では，個々の環境のエネルギー源，ユニットの情報，ユニットパラメータの調整規則を設定し，ユニット群の振る舞いを検証することによって，モデルの基礎的な性質を示す．

4．アメーバモデルの探索行動

ユニット群を駆動するエネルギーは，全て波動により伝達されるゆえ，ユニットiに流入する量$E_i(r)$はしきい値THに対して(6)式と書かれる．

$$E_{in} = \oint H(r,\phi,t)\chi(\phi)\,d\phi - TH \qquad -- (6)$$

ポテンシャル関数とユニット群を用いてアメーバ運動のシミュレーションを実行する．ところで，しきい値THがユニットに対するエネルギーの流入の原点を定めるゆえに，ユニット群の解探索の様相はTHの正負によって大きく異なる．TH≦0の場合には，ユニット群へのエネルギーの流入量がいたるところで正となり，常にユニット間の相互拘束力が強まった状態でエネルギー源を巡回するような探索行動をすることとなる．実験では100個のエネルギー源に対する探索様式をFigure7(a),(b)に示す．Figure7はユニット群の探索軌跡を表示しており，実験(a)はユニット数を8個とし，実験(b)は25個のユニットを用いた．(a),(b)に示されるユニット群の軌跡から，ユニット数が多いほど大域的な情報にしたがって巡回することがわかる．また，結果より，環境の温度の高いところを避けながら，エネルギー源に接近する様子も示されている．このような特性はユニット群が局所最小に囚われることなく全空間を探索できる能力を有することを示している．すなわち，この場合ユニット数を制御変数として空間探索を実行すれば大局的な探索と局所的な最適化の両者を同時に合わせ持つ空間探索法を実現することができる．しかしながら，このような方法を経路探索問題などに適用する場合には問題固有の制約条件(一巡閉路)を保証するための問題を残している．

さらに，TH≧0の場合について巡回セールスマン問題への適用も試みられており，USA532や円環状都市配置などにたいして良好な結果を探索できることが確かめられている(Figure 8).



(a)Unit number = 8　　(b) Unit number = 25

Figure7. Simulation results of Amoeba model

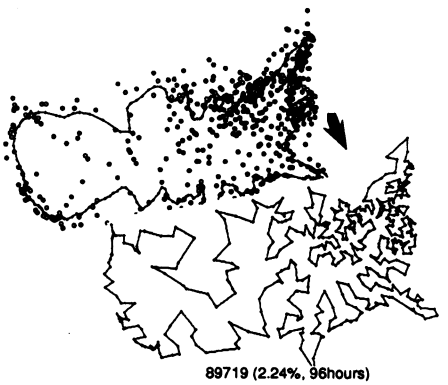


Figure 8. USA532 usingAmoeba model

5．まとめ

場を用いて構成された群システムは環境からの呼びかけに応じて動作するという意味で他律的であり，自ら環境に働きかけることにより能動的に環境を変えるといった自律性を具備する．よって場を用いることにより自律性と他律性が表現され，結果としてシステムが群としてまとまりを持ちながら問題解決に向かう傾向が実現される．問題解決のための方法論としては場を用いることによって大域的な制約を容易に設定でき，システムと構成要素の再帰的な関係を記述できるなどという利点がある一方で，構成要素の普遍的な目的関数の設定法が明らかでないや大量の計算容量を必要とするなどの問題点を残している．

参考文献

[YOKOI 92] YOKOI,H., and KAKAZU,H., "An Approach to the TSP by a Bionic Model," HEURISTICS, The J. Knowledge Engineering, pp.13-27, 1992.

連絡先： 〒060 札幌市北区北１３西８　北海道大学大学院 工学研究科 複雑系工学 自律系　　横井浩史
Tel:011-706-6446, E-mail:yokoi@complex.hokudai.ac.jp

3．波動場を用いたシステム

波動場ではシステムをユニット群によって構成し，ユニット同士を場を介して相互作用させることにより，システムとして自律性と他律性を有する行動の実現が試みられている．

ここで，波動場を利用した個々のユニットの動作メカニズムは以下のようになっている．まず，場の関数Hはユニットの出力する波動情報と濃度情報の重ね合せにより構成されており，ユニットにたいして環境情報を提供する．ユニットは場の観測結果H，ユニットに固有のパラメータK，ユニットのエネルギー状態Q，の3項目によって定まる行動pにしたがって動作することとなる．また，ユニットに固有のパラメータKはユニット位置のエントロピーの増加量を最小化するように逐次決定される変数であり，Kによって適応的行動が実現される．各変数H,K,Q,pの数理表現式は(1)式から()式のごとく設定される．

a) 情報処理の場

すなわち，各ユニットにそれぞれ適当な情報(h,w,E,hl)と情報の伝播するユニット座標軸(ψ,χ,τ,ϕ)を定義することにより，式(1)のごとく全体の場$H(r,\phi,t)$は数式表現される．

$$H(r,\phi,t)=\sum_{i}^{\text{Unit number}}\left\{h_i(r,t)\,\psi(\phi)+w_i(r,t)\chi(\phi)+\sum_j \hbar l_{ij}(r,t)\varphi_i(\phi)\varphi_j(\phi)\right\}+E(r,t)\tau(\phi) \quad --(1)$$

固有の場$h(r,t), w(r,t), \hbar l(r,t)$は，空間的な情報の伝播状態を表現する必要があるゆえに，これらを代表してu=u(r,t)とすると偏微分方程式を用いて(2)式のごとく数理表現されている．

$$\alpha\frac{d^2u}{dt^2}+\beta\frac{du}{dt}+\gamma\nabla^2u+\delta\nabla u+\varepsilon u=0 \quad \nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial r_x^2}+\frac{\partial^2}{\partial r_y^2}+\frac{\partial^2}{\partial r_z^2} \quad -(2)$$

b) ユニット

ユニット行動を決定するために必要となる変数はユニット行動p(t)，場の関数（情報）$H(r,\phi,t)$，ユニットから環境へ流出するエネルギーEout=Eout(r,t)，ユニットパラメータK(t)より構成される．そこで$H(r,\phi,t)$，Eout，K(t)をユニットに対するポテンシャルとみなすことにより，ユニットの運動量p(t)は(3)式となる．

$$\dot{p}(t)=M\cdot\nabla\oint H(r,\phi,t)\left(\zeta(\phi)+\varphi(\phi)\right)d\phi\cdot E_{out}\cdot K(t) \quad -(3)$$

ただし，式(3)に於て，$M=(m_x,m_y,m_z)$は慣性質量，$v(t)=\dot{r}(t)$は速度ベクトル，$p(t)=M\cdot v(t)$は運動量ベクトル，Eout(r,t)はユニットから環境へ流出するエネルギー．

c) 情報（ポテンシャル関数）

ユニット情報はユニット間の物理的相互作用と，ユニット間の情報交換を数理表現するために，すべての情報は仮にユニットから発生しその強度が物理的距離に応じて減衰する伝播情報として設定される．数理表現のために(2)式に示した偏微分方程式を用い，(2)式のパラメータ$\alpha,\beta,\gamma,\delta,\varepsilon$を適当に設定することにより，濃度的特性を持つ伝播情報h(r,t)，E(r,t)，波動的特性を持つ情報w(r,t)，ユニット間弾性ポテンシャルhl(r,t)，の4種類の情報が設定される．

d) 目的関数

問題環境下においてユニット群の適応的行動を実現するために，ユニット群の目的関数として生体の力学が導入されている．以下ではユニットと環境のエネルギーの入出力関係からエントロピーの変化量dsを定義した上で，ユニットパラメータをK(t)としてK(t)の調整法が提案されている．エネルギーの入出力関係はユニットの状態変数と環境変数によって記述され，状態変数としてユニットiに流入する熱量Ein=Ein(ri,t)，エネルギー蓄積量Q=Qi(t)，ユニットのなす仕事量W=Wi(t)，ユニットから流出する熱量Eout=Eout(ri,t)，環境変数として環境の熱分布Eenv=Eenv(r,t)を用いている．上記4個の状態変数から，ユニット群が熱源Eenvに接する場合とエントロピーの変分は(4)式となる．

$$ds=\frac{dE_{out}-dE_{in}}{T(E_{env})} \quad --(4)$$

そこで，情報に対するユニット行動を支配するパラメータK(t)に対して，(5)式がユニット群のパラメータ調整法として導出される．

$$\frac{\partial K(t)}{\partial t}=-\frac{\partial\, ds}{\partial K(t)} \quad --(5)$$

以上，情報処理の場，ユニット，情報，目的

ことが可能であることがわかる．

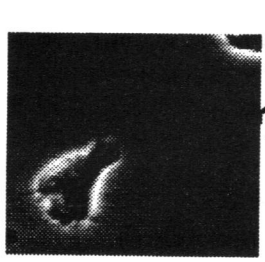


Figure1. Photo-Image of Amoeba

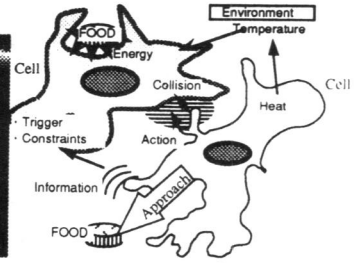


Figure2. Behavior Model of Amoeba

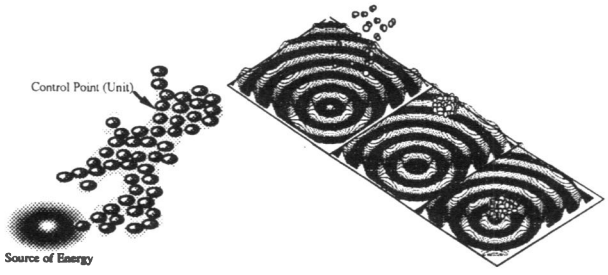
ここでは表１に示された基礎行動を表現し得るような特性のモデル化の方法を模索するものとする(Figure.2)．アメーバ行動のモデル化のために必要となる基礎行動として次の4モデルが考えられる．

Table 1. Behavior of amoeba and it's algorithm

アメーバの基礎行動	アルゴリズム
仮足（またはべん毛）による運動	幾何的変形と移動
捕食	エネルギー源への接近と栄養の獲得
分泌	情報の授受（空間的情報伝播）
接触	干渉（幾何的相互作用）
代謝	排熱（空間的熱拡散）

(1)．粒子群モデル

細胞内部には栄養分，老廃物，水，タンパク質，核酸などの機能粒子の集合体であるゆえ，仮想空間上に設定された複数粒子の空間的ポテンシャル相互作用として数理表現される(Figure.3)．



(a) (b)

Figure 3. Unit group model

(2)．弾性ネットモデル

アメーバの細胞表面はその形状を自由に変形しながら移動するという特性を持つゆえ，この特性をモデル化するためには，隣接する粒子間に弾性ポテンシャルを定義することによって仮想的な弾性リングとして細胞表面のモデル(Figure 4)が数理表現される．

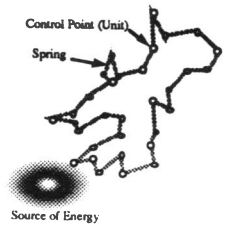
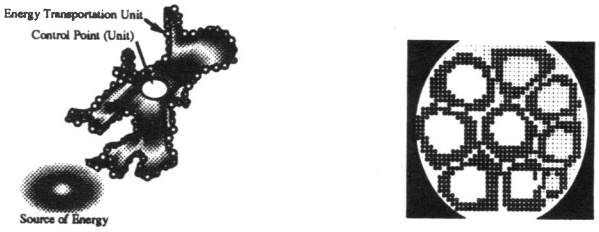


Figure 4. Elastic net model

(3)．エネルギー輸送モデル（恒常性の維持モデル）

アメーバに限らず，すべての細胞は代謝によって内部のエネルギー状態を一定に保っており，このエネルギー代謝機能が細胞の恒常性の維持といわれる生命体の最も重要な性質を実現している．ここではこの代謝機能を輸送機能，変換機能，調整機能に分解して表現されるものとし，これら輸送，変換，調整機能を仮想空間上のエネルギーの移動，変換，エネルギーの変化に基づくシステムパラメータの調整により数理表現することによって，恒常性の維持機能をモデル化する(Figure.5)．



(a) (b)

Figure.5. Homeostasis model

(4)．合成モデル

上記粒子群モデル，バネモデル，恒常性の維持モデルの３モデルを合成することによってより精密なアメーバモデルが構築される．これら３モデルを同一空間上で統一的に処理するためには，そこで必要となる表現方法を整理する必要がある．すなわち，モデルを構築するために必要となる要素は情報伝播のための場(Field)，情報処理主体である粒子(Unit)，情報の授受(Interaction)，情報処理の目的関数(Adaptation)の４項目に要約される(Figure 6)．

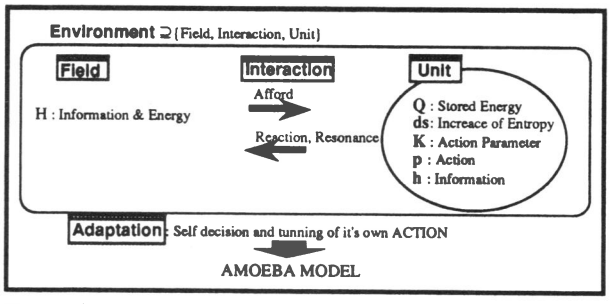


Figure 6. Elements of amoeba model

TD1-2

進化するハードウェアとその応用

—— パターン認識とロボット制御 ——

Evolvable Hardware and its applications to pattern recognition and robot control

樋口哲也，岩田昌也（電総研），平尾友二(徳島県工業技術センター)

Tetsuya Higuchi, Masaya Iwata (Electrotechnical Laboratory), Yuji Hirao (Tokushima Prefectural Industrial Center)

Abstract - This paper describes the Evolvable Hardware (EHW) and its applications to neuralnet-like pattern recognition and adaptive control of prototypical welding robot. EHW can change its own hardware structure to adapt best to the environment using Genetic Algorithms and software-reconfigurable Gate Array technology.

1．はじめに

本論文では、進化するハードウェアとその応用について述べる。進化するハードウェアというと、ＳＦ小説の類いが連想されるかもしれないが、これは遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）や人工生命を背景とした、全く新しいハードウェア技術の流れであり，人工生命の目標の一つである自律的なシステムを構築する上での基盤的技術となることを目的としている。ここ２、３年で日本、スイス、英国を中心に活発な研究がなされており、この秋には第一回の国際会議も開催される予定である。進化するハードウェアを技術的に支えているのは、近年急速な進歩を見せている、書き変え可能型ゲートアレイＬＳＩ技術、特にＦＰＧＡ(Field Programmable GateArray)の進歩である。端的にいえば、進化するハードウェアは、ＦＰＧＡに代表されるプログラム可能型論理素子 (Programmable Logic Device;PLD)のハードウェア技術と遺伝的アルゴリズム(GA)とを組み合わせたものである。

進化するハードウェア(Evolvable Hardware; EHW)は、環境に応じてハードウェア構造が自ら進化することを目的として、PLD上の論理回路を、GAを用いた学習で再構成していく。PLDは、ハードウェア構成を指定するビット列であるアーキテクチャビットをダウンロードすることによって様々な論理回路を構成できる。EHWでは、このアーキテクチャビットを染色体と見なしてGAにより、環境に最適なアーキテクチャビット、つまりハードウェア構成を見つけ、そのとおりに回路を再構成する。

EHWの特徴は、学習の結果がハードウェア構造自体で表現されるため実行時間が極めて速いと共に、再構成をダイナミックに（学習と回路動作が並行する）行うため、適応型アーキテクチャを構築するための基盤技術となりうる。

このようなEHWの特徴を生かした応用として現在取り組んでいるのは、ニューロ的なパターン認識器を目指す研究と、故障時にも回路を再構成できる適応的アーキテクチャの研究である。後者は、V溝トレーサと呼ぶ溶接ロボットの一部として実装されつつある。本稿ではまず２章でFPGAについて述べた後，３章で進化するハードウェアの基本的アイデアについて述べる．４章ではニューロ的なパターン認識器，５章ではV溝トレーサについて述べる。

2．ＦＰＧＡとは

ＦＰＧＡは回路を記述したソフトウェアプログラムを作成、ダウンロードすることで任意のハードウェアが実験室レベルで簡単に作れてしまうゲートアレイＬＳＩである。しかも何度でも変更、作り直しがきくという利点がある。

ＦＰＧＡの構造は図１に示すように、一般に機能ブロック(Functional Block)とデータ接続ラインとから成る。機能ブロックは、その中にある特定のビット列を書き換えることでさまざまなハードウェア機能を実現できる。またデータ接続ラインは、機能ブロックへ、外部からどういうデータ信号を入力するか、あるいは出力するかを決定するもので、具体的には黒丸で示した１ビットのスイッチのオンオフによって実現する。

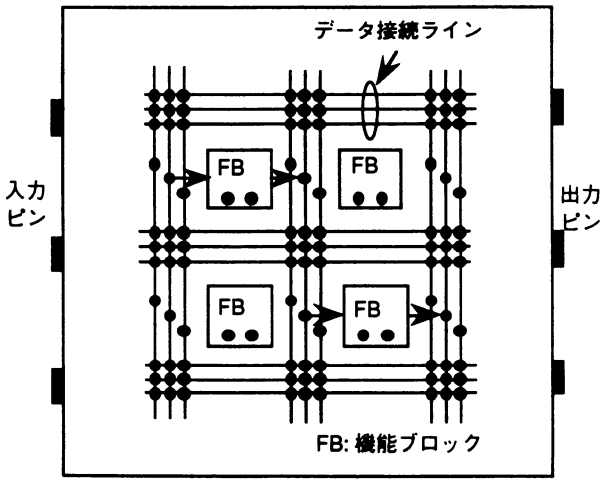


図１　FPGAチップのイメージ図

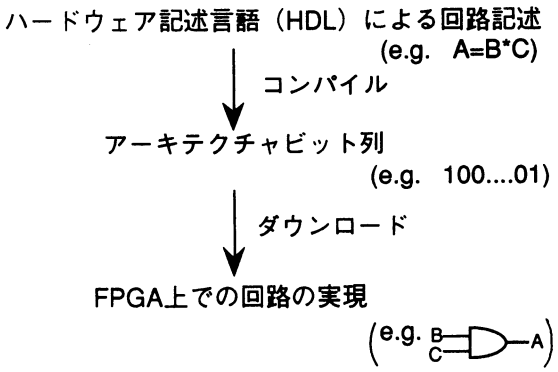


図２　FPGA上でのハードウェアの実現手順

これらのスイッチ群の情報も２進ビット列で表現される。つまりＦＰＧＡのハードウェア機能を決定するものは、機能ブロック、データ接続ラインとも、２進ビット列であり、これをアーキテクチャビットと呼ぶことがある。また図２はＦＰＧＡ上にハードウェア回路が実現されるまでの流れである。最近では図式的な入力ではなく、文章型のハードウェア記述言語で回路記述を入力する傾向にあり、それをコンパイルしてアーキテクチャビット列に落した後、ＦＰＧＡにダウンロードする。

３．ハードウェア進化のアイデア

図２で示したようにＦＰＧＡのハードウェア記述は文章型言語によるが、アーキテクチャビットも、下位の表現ではあるが、ハードウェア表現そのものである。ハードウェア進化の基本的なアイデアは、このハードウェア表現自体を遺伝的学習の染色体とみなして進化させ、より目的にかなうハードウェア回路を実現しようというものである。一旦そういう表現が見つかれば、あとはＦＰＧＡにダウンロードすればすぐにハードウェアができあがる。一例としてアーキテクチャビットのレベルでハードウェア進化を行なう場合を図３に示す。この例ではアーキテクチャビットを遺伝的アルゴリズムの染色体として扱っている。

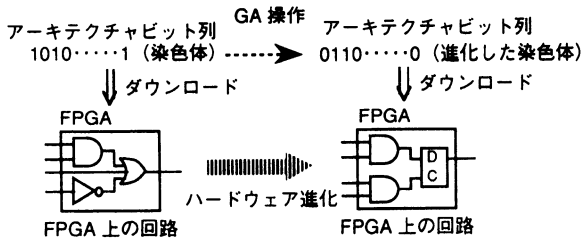


図３　ハードウェア進化のイメージ

ハードウェア進化の目的、利点としては次のことがあげられる。

(1)真に適応的な機械の実現：学習結果がハードウェア構成の変化そのもので蓄積され、実時間の高速性が達成される。また未知の環境に置かれてもハードウェア自身が適応するので、フォールトトレラントなシステムとなりうる。

(2)新しいハードウェア設計手法：人手によらない回路設計の可能性を与える。

４．ニューロ的なパターン認識器

パターン認識ではノイズが加わり不完全な入力パターンでも、学習済みのパターンとの類似性から正しく識別する機能が必要である。これは引き込みと呼ばれ、ニューラルネットワークの特徴的機能であるが、これをEHWによって実現したい。

一般的なパターン認識問題を扱うためには、２次元特徴空間で非線形分離可能なパターンを識別できることが必要条件である。この非線形分離可能性を調べる典型的な問題はXOR問題であり、以下ではEHWによるXORの学習と引き込みのシミュレーション結果について述べる。

４．１実験の概要

EHWに表１のXOR問題を学習させる。入力に加わるノイズを表現するため、入力値を３ビットで表す。学習完了後、学習パターンから入力値を１刻みで変化させたときのEWHの出力値を調べることにより特徴分離面（決定表面）を求める。

表１　学習パターン

X	Y	Z	
000	000	0	$Z = X\overline{Y} + \overline{X}Y$
000	111	1	X:($X_2X_1X_0$)
111	000	1	
111	111	0	Y:($Y_2Y_1Y_0$)

比較のため、他の学習アルゴリズムであるANN (Artificial Neural Network), ALN(Adaptive Logic Network), CS(Classifier System)についても同様の学習を行う。CSについてはBOOLEを用いた。

４．２　実験結果

各学習アルゴリズムのパラメーターを表２から５に示す。学習完了後も理想的な決定表面が得られるまで学習を繰り返した。１０回実験を行い、EHW, ALN, CSはそれぞれ平均1204,299,484世代で図４(a)の決定表面を得た。ANNはBPで10000回の学習で図４(b)の決定表面が得られた。なお、各アルゴリズムにおける１世代の処理量は異なるため、世代数の差は処理時間の

表2 EHW のパラメータ

集団サイズ	50
染色体の長さ	104
交叉率	50%
交叉型	2 点交叉
突然変異率	0.5%

表3 ANN のパラメータ

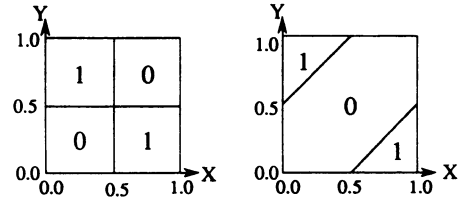
学習率	0.5
モーメント	0.3
中間層数	1
中間ノード数	2

表4 ALN のパラメータ

入力ノード数	16
ノード型	AND, OR, LEFT, RIGHT

表5 CS のパラメータ

集団サイズ	400
交叉率	50%
交叉型	1 点交叉
突然変異率	0.5%
報酬	1000
誤り減衰率	80%
ワイルドカードバイアス	4



(a) EHW, ALN, CS　　(b) ANN

図4　実験で得られた決定表面

差を示すわけではない。EHW,ALN,CSが同じ決定表面となったのはこれらが同一の論理関数を学習したためである。つまり、$Z=X_2\overline{Y}_2+\overline{X}_2Y_2$であり、この関数は入力の最上位ビット 間のXORであり、これらのビットのみがパターン認識に関係した場合に理想的な引き込みが行われることを示す。このことは図4 (a)の決定表面の境界が X_2, Y_2 の値が変わる境界と一致することからもわかる。

5．適応型システムの構築

EHWを用いて故障や環境の変化にも対応できる適応型システムの構築を目的として、現在V溝トレーサと呼ぶ溶接ロボットの一部分を作成している。目的はEHWによって故障時に動的な回路の置き換えが可能になることを示すことである。その基本となるのはEHWを用いた補償回路のアイデアである。これを図5に示す。

EHWは図5に示すようにGA学習部、適応度評価部、回路生成フィールド部の3つからなっており、対象回路の入出力パターンを繰り返し学習することによって、回路生成フィールド上に、対象回路の入出力を満足する回路を構築する。もし対象回路が故障すると、対象回路の出力をEHWと置き換えることで、システムを正常な状態に保つことができる。このような動的な再構成能力をハードウエア自体に持たせることによって、宇宙や深海における計算機回路など、一度地上を離れたら手の届かない環境下での耐

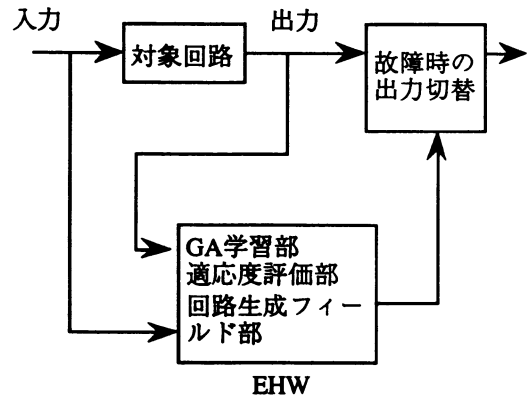


図5　補償回路

故障性を実現することが将来可能になることが期待される。

図6はV溝トレーサーの概要を示すものである。これはV字状の断面を持つ対象物の底部を長さ方向にトレースするもので、自動溶接ロボットの開先倣い制御に使われている溶接線検出法の原理を簡略化したものである。図7は現在構築中のシステムの外観である。

EHWはこのシステム中で溝の中心部を見つけるためのコンパレータ回路のバックアップとして機能し、このシステムでは主回路を意図的に故障させ、EHWによる動的な適応可能性を実験することができるよう

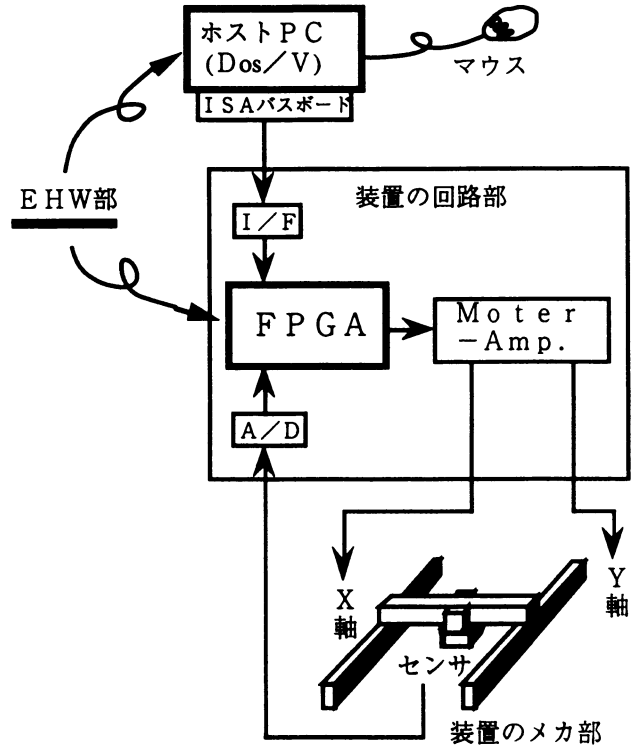


図6　V溝トレーサの全体構成

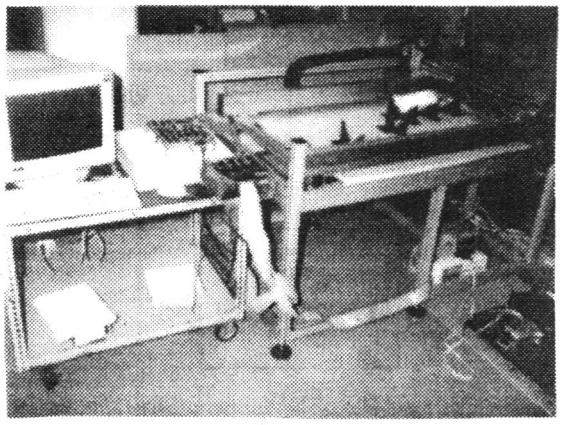


図７　V溝トレーサ外観

に設計されている。EHWの実現は Xilinx 社の FPGA (Field Prccr ammable Gate Array)を用いている。

６．おわりに

進化するハードウェアは、人工生命のみならず、機械学習、パターン認識、CADアルゴリズム、ロボット制御、VLSI技術など広範囲の領域にまたがる新しい研究分野であり，現在４つの研究機関がこれに関連する研究を行なっている。日本ではＡＴＲとＥＴＬ、スイスの Swiss Federal Institute of Technology、英国のSussex大学である。以下，研究動向と概要を簡単にまとめる。

ＡＴＲではＳＦＬというハードウェア記述言語によるハードウェア表現を進化させるAdamと呼ぶシステムを開発している。手法としてはKozaの遺伝的プログラミングの一般化ともいえるPGA (Production Genetic Algorithm)を用いている。[1,4]

ＥＴＬは本論文で述べたようにアーキテクチャビット列レベルでＧＡを用い回路を進化させる。溶接ロボットの制御回路を故障時に補償する「進化するハードウェア」を実装すると共に、同ハードウェアをニューラルネットの代替となる柔軟なパターン認識器としても構築中である。[2,3,6,7]

スイスの研究はＢＤＤ(Binary Decision Diagram）と呼ぶハードウェア表現を、専用に設計するＦＰＧＡ上に展開し、自律的にハードウェアを構築させようとする。進化的手法は用いていないが、ＢＤＤを染色体のようにコード化し、これをＦＰＧＡ内で複製、伝搬させる[5]。

Sussex大学の研究は、ゲートレベルでのハードウェア表現を染色体とみなし、ＧＡを用いるもので、オッシレータ、ロボットの制御回路を実装しようとしている。[6]

進化するハードウェアという言葉の響きは、その実現性に関して誤解を招く可能性があるが、ハードウェア化を常に前提としている以上、実証的なアプローチをとらざるをえず、その点で、しばしば人工生命の弱点とされる工学的応用の見えにくさを克服するものとも言える。

参考文献

[1] H.Hemmi, J.Mizoguchi, K.Shimohara: "Development and evolution of hardware behaviors", Artificial Life IV, MIT Press, 1994.

[2] T.Higuchi, T.Niwa, T.Tanaka, H.Iba, H.Garis, T.Furuya: "Evolving hardware with genetic learning: a first step towards building a Darwin Machine", SAB92, MIT Press, 1993.

[3] T.Higuchi, H.Iba, B.Manderick:"Evolvable Hardware", in "Massively Parallel Artificial Intelligence"(ed. H.Kitano) MIT Press, 1994.

[4] J.Mizoguchi, H.Hemmi, K.Shimohara:"Production genetic algorithms for automated hardware design through an evolutionary process",Proc. of the First IEEE Conf. on Evolutionary Computation, Orlando, IEEE,1994.

[5] P.Marchal, C.Piguet, D.Mange, A.Stauffer, S.Durand: "Embryological development on silicon", Artificial Life IV, MIT Press, 1994.

[6] 樋口他　”進化するハードウェア”，「グランドチャレンジ」（北野編），共立出版，1993.

[7] 樋口他　”遺伝的学習によるハードウェア進化の基礎実験”，「遺伝的アルゴリズム」(北野編），産業図書，1993.

連絡先

〒305　茨城県つくば市梅園 1 - 1 - 4

電子技術総合研究所

情報アーキテクチャ部　計算機構研究室

樋口哲也

TEL 0298 - 58 - 5868（直通）

FAX 0298 - 58 - 5871

TD1-3

VPMにおける構成エージェントの獲得に関する研究

A study on Agent synthesis for VPM

山田孝治 Koji YAMADA
琉球大学工学部 Univ. of Ryukyus

横井浩史 Hiroshi Yokoi
北海道大学工学部 Hokkaido Univ.

嘉数侑昇 Yukinori KAKAZU
北海道大学工学部 Hokkaido Univ.

Abstract In this paper, we discuss the synthesis of agents for vibrating potential method. We have proposed the VPM as a new problem solver using field interaction. Many engineering problems can be easily applied to this method. We dealt with this method as multiagent system that had mechanisms of adaptation of life phenomenon. This paper shows the definition of the agent and how to construct the agents group. Then we discuss its parameters and set up them by evolutionary approach.

1. はじめに

自然界において生ずる様々な現象は我々に多くの物事を教える．計算機の能力の向上に伴い，成長から進化，個体から群へと広がりを見せる計算機上の仮想世界では，このような時空のシミュレーションをして初めて「創発」なる現象が獲得できる可能性が示されてきた．

振動ポテンシャル法（Vibrating Potential Method, VPM）は，生命現象における適応能力のメカニズムをアナロジーとした場の相互作用に基づく自律分散モデル構築のための一手法である．本手法により工学的諸問題に対し，解空間特性を内包する連続空間構成として振動ポテンシャル場を導入した情報場を新らたに定義することで，解空間の大域的及び局所的な情報を統合的に利用した動的探索による解決を可能としている．VPMの一般化モデルでは連続関数を扱う(1-3)．しかし，問題解決への実際の適用には場のエネルギー伝達の制限を設けることで同定を簡素化する必要がある．これまで我々は，処理要素をエージェントと定義し，波動場の重ね合わを利用した問題表現をマルチエージェント群の相互作用として扱ってきた．すなわちエージェントは特定の波動場で定義され，観測される場のエネルギーにより場の状態を遷移させる．このようなエージェント群による自律分散的な系を制御するために，場のエネルギーから求められるエントロピーを算出する．エージェント群はエントロピーが増大しないよう場を構成する目的関数が与えられている．よって問題に最適な場をいかに設定するかが問題となっている．ここでは，ロボット経路計画を対象として，有効な場の構成をエージェントの構成として獲得することを目的とする．

2. VPM

以下ではVPMを用いた数理モデルを定義する．ここでは環境をエネルギー場として統一的に記述するため，波動情報を波動関数の重ね合わせにより定義する．すなわち，環境は，連続状態空間とする．

各構成エージェントは観測可能なさまざまな状態量によって分散表現されるものと定義する．構成要素をエージェントaと記述すると構成要素の空間的状態を表す状態支配関数としてポテンシャル関数$h(r)$および伝達波動関数$w(r)$を適用することにより，連続状態空間内にエージェント固有の場を設定する．すなわち，

$$a_i = \sum_j h_j(r)\psi_j(v) + \sum_k w_k(r)\chi_k(v) \qquad (1)$$

h_{ij}：波動j上のエージェントiの支配関数，
w_{ij}：波動j上のエージェントiの場への出力波動関数，
r：位置ベクトル，ψ,χ：固有波動，
i：ユニット番号，j,k：波動番号．

つぎに，エージェント群の場を重ね合わせることにより全体の場すなわち環境を表す変数Hを定義する．

$$H(r,v) = \sum_i a_i = \sum_i \left\{ \sum_j h_{ij}(r)\psi_{ij}(v) + \sum_k w_{ik}(r)\chi_{ik}(v) \right\} \qquad (2)$$

この枠組みにより，各エージェントが全体の場との関係のみで他のエージェントとの関係を間接的に観測可能な情報処理機構を提供することが可能となる．すなわち，各エージェントは場を通じて状態支配関数により，状態を表現し，かつ他のエージェントと相互作用を行う．また，伝達波動関数により他のエージェントの支配関数に影響を与える性質を有する．

エージェントの状態支配関数h，および出力伝達波動関数wを図１のように定義する．各エージェントはこのような場を多重に構成し，空間上の制約を表現している．

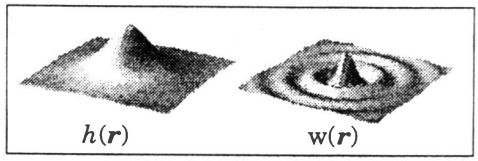


図1　Potential function h and output wave function w

エージェント群の状態空間内での運動を以下に定義する．場Hをポテンシャル場とみなし，ラグランジュの運動方程式より，エージェントの運動量$p(t)$

$$\dot{p}(t) = M\frac{\partial\oint H(r,v)\psi(v)dv}{\partial r} \quad (3)$$

により求められる．ここでM：慣性.
この時，この運動に伴うエネルギーを算出できる．エージェント群の熱量をE，エージェント群のなす仕事量をWとすると，エージェント群周囲の場における熱量E_{in}は，場の波動エネルギーを周回積分することにより算出する．

$$E_{in} = \oint_{r=z}\oint H(r,v)\psi(v)dvdz \quad (4)$$

よって，エージェント群の境界内部と外部環境においてエネルギーの流れが生じ，エントロピーが算出可能となる．エージェント群のエントロピー変化は，

$$dS = \frac{d(E + E_{in} - W)}{E_{in}} \quad (5)$$

により求められる．ここで，前述の生体メカニズムにおける恒常性機能を考慮する．すなわち，エントロピー変化量を最小化する．すなわち，エージェント群支配パラメータをαとすると，エージェント群の目的関数は，

$$\frac{\partial dS}{\partial \alpha} \le 0 \quad (6)$$

(6)式により，エージェント群は空間的状態量を維持する範囲で運動を行う．また，(6)式を満たすようにαを決定することにより，場に存在する特定の熱源に向かって進行することが可能となる．以下で2次元経路探索のための構成を検討する．

3. エージェント構成

エージェントは以下の動作を行う．(1)処理エージェントは特定の集団で観測エネルギーを共有し，その重心位置を内部環境として内部エネルギーを算出する．(2)各エージェントは半径rの周囲の場のエネルギーを観測し外部環境から流入するエネルギーとしてエントロピーdSを求む．(3)dS>0のときエージェントの運動エネルギーを減少させる．よってエージェントの制御パラメータは，エージェント数n，エージェント相対位置(R, θ)，観測半径r，加速係数A，減速係数Bが必要となる．またエージェント出力波動に関して減衰率，周波数，振幅に関するパラメータ設定が必要である．本論文では場における経路探索を行うためこのエージェント集団をひとつの移動ロボットとする．経路上にはエージェント同様ポテンシャル場で構成された障害物が置かれ，回避動作を行う必要が生ずる．本来，回避予測が必要であるが，ここでは場の連続的な変化をエージェントが観測可能なため障害物への接近行動から回避行動へ転換が期待できる．

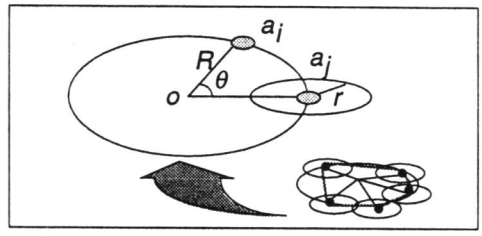


図2　Sturcture of a group of agent

本手法ではパラメータの探索はGAで行う．回避行動に関するパラメータは，その行動を誘発する環境が設定されない場合に獲得が困難であるため，用意する地勢情報の検討も必要である．計算機実験の結果は当日発表する．

4. おわりに

VPMを構成するエージェントの獲得に関して，ここでは経路計画問題を対象とした制御パラメータの獲得に関する検討を行った．従来，VPMによる問題解決はパラメータの設定が課題となっていたが，取り扱う対象を限定することでパラメータを特定することが可能となる．今後，複数エージェント群間の共進化による自律的な制御量の獲得を検討し，VPMにおける創発性を考察したい．

参考文献

(1) 横井，嘉数，波動場を用いた情報処理に関する基礎研究（多重波動場モデルの構築），機論No.92-0712，(1993), 147
(2) 横井，嘉数，波動場における自律機械群に関する基礎研究（ジョブショップスケジューリング問題へのアプローチ），機論No.92-11358, (1993), 320.
(3) 横井，嘉数，波動場を用いた自律的情報処理に関する基礎研究（障害物回避問題へのアプローチ），機論No.92-1889, (1993), 82.
(4) 山田，横井，嘉数，波動表現に基づく情報処理モデルに関する基礎研究（自律機械群の経路探索問題へのアプローチ），機論No.94-0415（1994）

連絡先
山田孝治
E-mail: koji@ie.u-ryukyu.ac.jp
〒903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地
琉球大学 工学部 情報工学科
Tel: 098-895-2221(Ext.3261) Fax:098-895-2688

TD2-1

集餌環境における集団形態の発生
Emergent Group Morphology on Competitive Foraging Environments

○久保正男（北大院） 嘉数侑昇（北大）
Masao KUBO Yukinori KAKAZU
Complex Systems Engineering
Hokkaido University

Abstract - In this paper, a new idea to construct an emergent system of group behavior is proposed. In a team game that requires sufficient cooperative behavior, our agents acquire suitable actions and transition of group behavior using adaptive communication. When a set of natural creatures throws into some environment, sometimes, they organize by themselves to live. After organization, the team would metamorphose to unimaginable unique formation from former.

On our system, there are two teams of agents and they compete only one ball on 2D continuous plane like soccer game. The ball moves dynamically by the effect of agent's action. This game setting contains statistical factor and sometimes the ball changes the movement. So, we think that one of suitable group behavior is the passing offense of soccer game. However, it is too difficult to realize this formation because entertainment of common recognition about situation is indispensable to generation of such formation. Concretely, when one agent will pass the ball and the other one will receive the ball, these 2 agents must entertain the only one idea about the pass course. This is one of major topic of multi-agent system.

1. はじめに

近年，Artificial Life(以下ALife)の一環として自然現現象のシュミレーションが試みられている．本論文は特に群形態の創発的シュミレーションにアプローチする．ローカルなインタラクションのみが規定された個体群を環境に放ち，創発した群れとしての自己組織化形態についての議論を試みる．これまで一生物の形態を扱った研究や群れとしての問題解決能力のマクロな検証は行われてきたが(6)(2)，個体が群れとして振る舞いはじめる時に生まれてくる個性や役割，さらに群れがもつ多彩な機能を扱った研究は少ない．

また工学的にみても集団の形態発生は興味深い話題を提供する．たとえば、近年、比較的単機能なビークルを複数用意し、これらを一つの群として扱い問題解決を試みるマルチエージェントシステムでは、システムに適した学習メカニズムやリソースの割り当てが課題とされているが、ここで扱う集団の形態発生はこれらを解決する上で重要な役割を果たすに違いない．学習における強化信号の伝播メカニズムや役割分担は、群が適用を迫られた環境に応じて変化するべきであり、デザイナーがこれを直接決定することは好ましくない．

特にここでは集餌行動にヒントを得たゲーム環境で群形態の創発を試みる．この場合，群形態は集団としての集餌戦術すなわちフォーメーションに対応する．ここで対象とした集餌ゲーム環境は，2次元連続空間に置かれた唯一の餌を，集団であるコロニー単位で奪い合うものである．個体である蟻の機能は限定されており自力では餌を巣まで運ぶことが困難な設定になっている．このため他の蟻との適切なフォーメーション形成が要求されるのである．これまでフォーメーションの形成が必要なタイプのゲーム環境は扱われていない．

本論ではフォーメーション形成を実現するためにFig.1に示すエマージェントシステムの概念に基づいてモデルを構築し，生成されたフォーメーションを吟味するアプローチをとる．エマージェンスとは単純なローカルルールのインタラクションによって系全体に及ぶような現象が現われることをいい，各個体を単純かつローカルなルールとすると，群における創発は本論でのモチベーションであるフォーメーションに対応する．各個体がローカルに環境を観測し，観測結果に基づいて行動を起こす．その結果，様々なインタラクションが発生し，このインタラクションを再びエージェントが観測する．このサイクルを通してローカルな観測-行動から想像を越えた全体挙動であるフォーメーションの発生を試みる．

次節では本論で扱うゲーム環境を設定する．

2．サッカーゲーム環境

ここで用いる集餌環境はサッカーゲームと酷似している.つまり、敵対する群れ数に応じた数のゴールが２次元連続平面上におかれ、唯一のボールに見立てた餌を自軍のゴールへ運びこんだ数を競うゲームである.当然のことながら、餌は確率的な影響を含んだ力学的な運動をするものとする.具体的には、餌はビークル等から加えられた力学的な作用と確率的な力学的作用にしたがって運動する.したがって餌の速度や方向は一定ではなく、ビークルは力学的作用をコントロールすることによりある程度餌の挙動を制御できるが、完全に予測することはできないものとなる.以下では実機ではなく、コンピュータシミュレーションによる検証のみをおこなうが、その際、題意に影響を与えない詳細なインプリメントを実施するために、ビークルの物理的拘束条件のうちで大きさと方向性のみを取り扱うものとする．また干渉計算の設定には、各ビークルでの計算量に比例したプライオリティを導入し、思考時間が短いものほどすばやく振る舞うことが可能にした.図１に本ゲームの概略を示す.

またビークルに与える情報に関しては、ボールやゴールといったオブジェクトの判定は可能としたが、ビークル同士を区別することはできない.また位置情報については、絶対座標系での位置情報は与えないものとする.

ここで扱うビークルの能力としては移動および餌への力学的作用、最後にコミュニケーション媒体であるフェロモン添付である.フェロモン添付は昆虫等でのスティグモジーとして代表的なものであり、また将来的にハードで実現可能であるので、実機を作成する上で適当である.

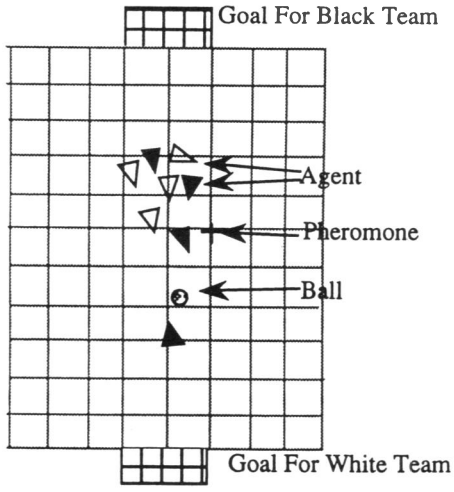


Fig.1 Soccer Game Environement

さてこのゲーム環境の特徴としては、つぎのようなことが考えられる.サッカーでいうパスはこのゲームでも非常に効率のよい戦術である.つまりビークル群はほとんど移動せずに餌をゴールまで運べるからである.しかし、これを実行するためには高度なプランニング能力が各ビークルに要求される.なぜならば力学的作用を高め餌の移動速度をあげるにしたがって、移動速度と餌の速度のミスマッチにより、フィジカルに分散したビークルでのシンプルなリアクティブプランニングでは時間的に実行できないからである.つまり高度なパスフォーメーションを実行するためには、各ビークルが群全体としてのビヘイビアに対し共通のイメージを抱く必要があり、環境変化に応じて適宜相互にこの共通イメージを修正・具体化する必要がある.

ところが環境に適したイメージを適宜作り出すためには、従来のフィジカルに独立したビークル等で行われてきたリアクティブプランニングで使用してきたスキーマ数を上回るスキーマを使用しなければならない.これまででは自己の近傍状態のみからスキーマを抽出してきたわけであるが、共通のイメージを作り出すスキーマがさらに必要となるからである.しかし、ビークルが保存できるスキーマ数は限定されているのが一般的であり、マルチエージェント系としての適切なスキーマ保存メカニズムが必要である.

また絶対座標位置を知り得ないこと、ビークル同士を区別できないことは、より実機に近いシミュレーション環境を提供する.実際には相対的にも距離はほとんど知り得ないわけではあるが、絶対座標位置を実機で獲得することはまったく不可能である.このようにここでアプローチするゲームは多くの未解決の問題が同居しており、困難な課題と考える.つぎには、まず構築にあたっての前提要素について述べた後、集団の形態発生について触れる.

はじめに前提として、先験的な知識の除去があげられる.本来、マルチエージェントシステムは動的に変化する多様性を持った環境への適応を目的として提唱されたシステムであり、問題環境の動的な多様性を限定するような先験的知識のインプリメントは可能な限り取り除くべきである.これを踏まえた上で、共通の群としてのビヘイビアイメージを修正・具体化するリアルタイムな機構としてここではフェロモン添付によるスティグモジーをおこなう.ただし、前提よりこのスティグモジーにおいてシンタックスは与えるがセマンティクスは学習による獲得を試みる.これは問題環境に応じた適切なコミュニケーション言語体系の確立を試みることに対応する.

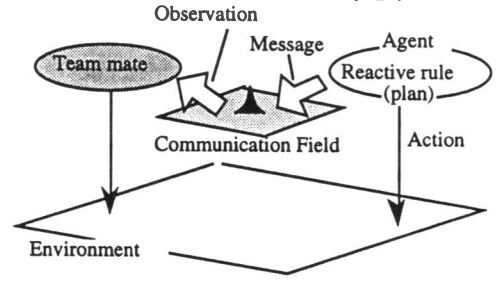


Fig.2 Concept of Agents

ここでは生物集団にみられる形態発生に着目する.生物集団における役割分担、例えば蟻や蜂の社会では適宜環境に応じた社会が形成され、群としての内部状態を一定に維持して外界の変化に対応している.個体の記憶や行動の能力はそれぞれの要素自体は外界に対して無力な部類に属すると思われるが、群として効率よく社会形成メカニズムがインプリメントされていると考えることが可能である.この姿はここで扱おうとするマルチエージェントシステムがおかれている状況に酷似しており、この形態発生、具体的には役割分担の発生メカニズムの考察は将来的な自動プログラミングシステム構築の礎となる期待が持てる.つまり、学習機能をもつビークルにとって、獲得した知識の保存と再利用は現状における重要な課題のひとつであり、役割分担による適切な知識の保存と再利用を可能とするメカニズムの考察を進める.

3. インプリメント

ここでは各ビークルを強化学習エージェントとして構成する.またビークル群はフェロモン制御によるコミュニケーションを通じて評価値（リワード）を相互に伝播し、ビヘイビアを獲得する.この学習を通じ、各エージェントは自己の意に添うように他のエージェントの支配を試みる.この学習法を以下ではBrainwashing Learning(BL)と呼ぶことにする.この競合学習過程を通じて役割の固着を試み、生物に見られる集団形態を形成するメカニズムを構築する.

BLの概略を以下の図を用いてサッカーを例に説明する．エージェントA1がアクションを実行した結果，Goalにボールが入り，システムからリワードがエージェントA1におくられた状況を前提とする．この時，ゴールへボールを蹴りこんだアクションを生成したスキーマをA11,A12,A13の重ね合わせとするならば，システムからあたえられたリワードはA11,A12,A13に分配される．次にこのスキーマの発火のきっかけとなったスキーマをコミュニケーションフィールド上のポテンシャルを鍵に探索する．見つかったスキーマをエージェントA2がもつA21とすると，これに時間減衰率を掛けたリワードを与える．

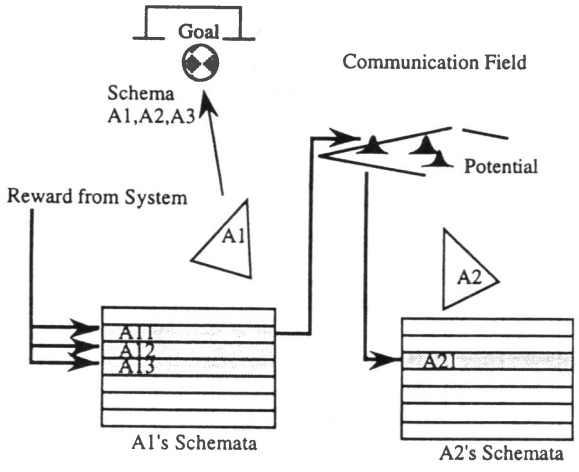


Fig.3 Reward Flow of Brainwashing Learning

4 計算機実験

黒と白で色分けしたコロニーを用いて集餌競争を行った．各個体の能力は，12m-20m/stepの範囲等で乱数で発生した．餌は速度に応じて速度及び方向変化を与えた．パラメーターは各ポテンシャルスキームにふくまれるプリミティブポテンシャルスキームの数40，フェロモンポテンシャルの減衰係数0.8，SLAのReward Rate0.18, Penalty Rate 0.6, SLAの状態数18，PSの数8，学習信号の時定数k, 0.8,Field Size 80m ×60m, Nest size 20mと定めた．干渉判定は1/100ステップごとに行った．

4.1 形態

ここではコロニーの幾つかの形態をあげ，主観的ではあるが吟味する．以下のグラフ中で幾つかの擬人化した用語が使用されているが，これは説明のためであり，このような先験的なヒューリスティックは用いていない．また幾つかの特殊な記号をある．"+"は高いフェロモンが多量にある地点を示し，また"FT"は餌が個体からの作用を受け運動していることを示す．また図中にある格子は距離を示している．

はじめに敵コロニーの行動に適応した結果を紹介する．ここでは各コロニーは2つの個体から構成した．イニシャライズとして，黒蟻コロニーの個体についてはこれまでの実験同様の初期化を行った．一方，白蟻の個体には餌へ移動する傾向を強めたPPSを数多く混入した．この設定下で行った結果をFig.4に示す．913ステップにおいて黒蟻コロニーはフェロモンを用いた”センタリング”形態に到達した．個体Aが餌を保持し，敵を引き寄せた後，A,Bによって生成したフェロモンに向かって餌を送る．これをBがうけとり，巣に運んだ．フェロモンコミュニケーションによってコロニー内に構造が生成されている．このような形態が生まれた理由としては，Aは餌をFTによって負の報酬を自身が発生してしまうが，学習Tour1および2によってBから正の報酬が送られてくることによりトータルとして正の報酬を受け取るからである．以下でもこのような正の報酬によって個体間関係が構成されてゆく．

次に，特にフィールドの特殊なルールに適応したコロニーの形態を挙げる．ここでの個体数はFig.4と同様，各コロニーは2個体からなる．フィールドのルールとは餌が矩形のフィールドのそとにでた時には，相手の1m近傍に餌が突然現われるというものである．この設定のもとで実験を行い得られた形態をFig.5に示す．3936ステップで白蟻Xが餌をフィールド端へ，アウトオブバウンズにならないよう餌を送った．餌は端で停止した．もし餌の取り扱いに個体Aが失敗し，餌がフィールド外にでてしまったら，餌は白蟻のX,Yのいずれかの近傍に出現する．従ってX,Yは巣の前へと移動した．しかし，個体Aは餌をフィールド外にだすことなく，個体Bに送り，Bは餌を”センタリング”形態を用いて巣に運んだ．この白蟻Xはこの場外ルールに適用していると思われるが，白蟻Yの運動は非常に冗長である．非常に興味深いのは黒蟻がフェロモンコミュニケーションをおこなっていないことである．個体の機能は使用する機能が限定された場合（つまり移動を行わない等）には行使された機能の精度を向上するよう設定したが，フェロモン使用をやめることによりFTの精度を挙げていると思われる．

最後に，より複雑な形態例を挙げる．ここでは4個体からなるコロニーを用意し，初期化では十分に学習した結果得られたPSを与えた．この段階で断続的にではあるが獲得していた形態は次の様なものである．

1) しばしば巣の前に留まる個体が現われた．運ぶべき巣の前に留まる個体のほうが頻繁に現われた．
2) フェロモンを使用せずにマンツーマン的に運動する個体が複数現われた．

Fig.6はこのような設定下で2737ステップからの形態を示したものである．2737ステップ直前ではFig.6からもわかるようにA以外の個体はマンツーマン的に運動している．までには2737ステップで餌が白蟻の巣近辺まで運動し，これを黒蟻個体Aがレシーブした．Aは前述の巣の前に留まっていた個体である．この時点で黒蟻側の高フェロモン地点が生成された．個体Aはこれに向かって餌を送った．次に餌を受け取った個体Bは餌をレターパスのように黒蟻の巣近辺にある高フェロモン地点に送った．個体AはB方向へ餌を送ったあとこの高フェロモン地点へと向かった．この間その他の黒蟻はこのフェロモンとは無関係のようにマンツーマ形態を続けている．つぎの2738ステップではフェロモンは消え，すべての個体は移動を行っていなず，個体Aは独力で餌を巣に運べる位置にある．しかし，2739ステップでは個体Aは巣へ餌を運ばず，味方方向へと輸送してしまい，白蟻に餌を奪われてしまった．

4.2 まとめ

計算機実験より，以下のことが実現できた．

1) 2個体からなるコロニーを用いた集餌競争環境において敵コロニーの戦術に対し適切な形態を創発的に発生できた．

2) 2個体からなるコロニーを用いた集餌競争環境において環境のもつ特殊な性質に対し適切な形態を確認できた

3) 4個体からなるコロニーを用いた集餌競争環境において，集団にとって有効と思われる個体の特殊化が断続的ではあるが見られた．また局面変化に対し適切な形態変化が行われれる可能性をしめした．これらの結果は本モデルが創発的群形態の為の多くの条件を満たしていると思われる．

課題も多く存在する．システムの構成の課題としては他の競争環境モデルと同様コロニーの進化は次第に停滞して行くためにある形態に固着してしまうことが挙げられる．個体表現に関する課題としては，他のコロニーの個体に餌が支配されているときには本設定では学習信号に反映されない．したがって，敵が持っている餌を奪うことが積極的におこなわれていない．このことは餌の奪取形態から巣への輸送形態，再び餌の奪取形態という一連の集餌サイクルが実現できないことを意味する．

5. 結言

本論では，集団における形態発生という新たな概念の提起および一実現手法を提案した．2節で人工生命分野における形態シュミレーションとグループ行動から，本モデルを位置づけ，3節では集餌競争環境および個体を定義し，最後に計算機実験において適切な群形態の創発的発生に成功した．

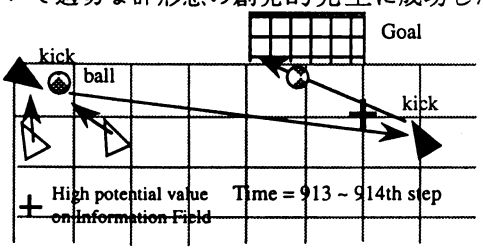


Fig.4 Cetering

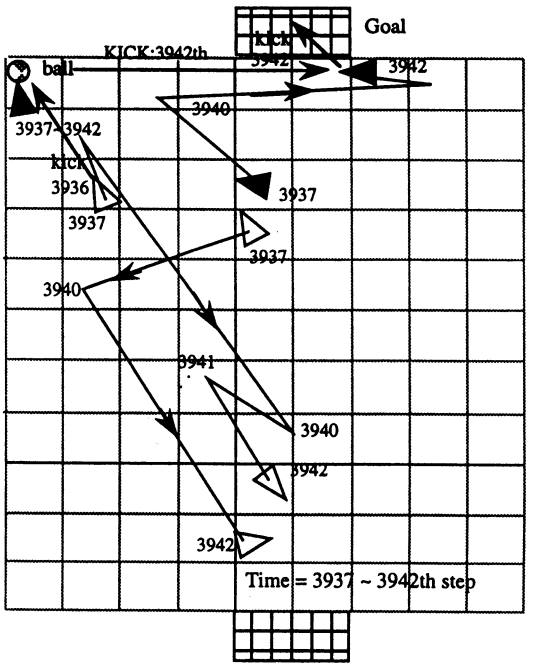


Fig.5 Prospection

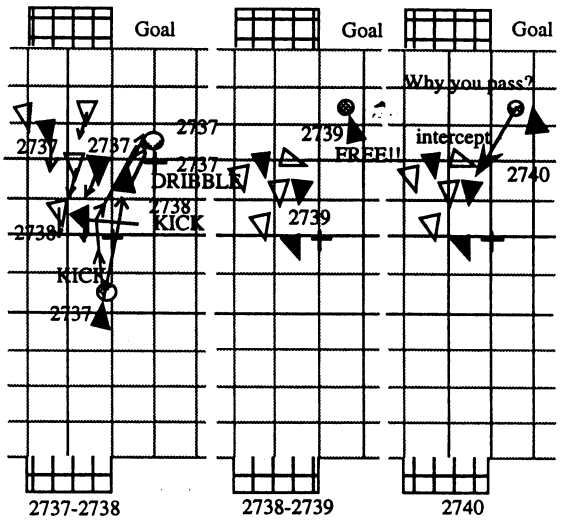


Fig.6 Phase Transition

連絡先
久保正男，060-北海道大学工学部工学研究科
情報エレクトロニクス専攻複雑系工学講座
自律系工学分野 tel 011-706-6445

TD2-2

行動ネットワークの構成とその振る舞いに関する考察

A Study on Autonomous Agents with Behavior Network

鈴木恵二　　嘉数侑昇
Keiji SUZUKI　　Yukinori KAKAZU

北海道大学工学部
Facaluty of Engneering, Hakkaido University

Abstract-- In this paper, we propose the associative behavior network for the autonomous agents. The node of the network consists of the neurons as the sensors and the actions. The connections of the network has two sets. One set is for the selection of the action with the self sensor status and the status of other agents. Namely, the action selection is referred and performed through the status of the other agent. By refer to the other agents, the group of the agents can be expected to perform the cooperative behaviors. In addition, to increase the adaptability, another type of connections prepared to create the above connections reflecting the temporal status of agents. We apply the behavior network to the simple navigation problem to discuss the ability of the proposed network.

1 はじめに

本稿はアニマットアプローチに基づく自律的エージェントの構成として行動選択ネットワークに基づいた協調的行動選択機構の実現を目的とする．この目的のために，自己の行動を選択する際に自己の状態とともに他のエージェントの状態を入力として，出力としてとるべき行動を連想によって選択する機構を提案する．さらに，タスク処理への柔軟性を向上させるために，連想時に他のエージェント入力に対する重み付けを，自己の内部状態に応じて可変とする機構を付加する．これによって，複雑で多目的なタスク処理を行う協調的行動選択機構の実現が期待できると考えられる．特に，本稿では提案するネットワークに基本的能力を検証することを目的に，簡単なナビゲーション問題を対象に，遺伝的アルゴリズムによる学習能力を検証する．

2　提案ネットワークの構成

ネットワーク内の活性伝播によって行動を選択するものには，Behavior Network [1]などがあり，その利点として

・探索，推論，逐次的マッチングを行わない．
・behaviorの削除，付加が容易．
・単純素子による並列分散処理により実現される．
・motivationとして目的行動を組み込むことが可能．
・リンクの重みとしてヒューリスティックスを組み込むことが可能．

といった点が上げられている．

ここではさらに，群としての協調行動を可能とし，複雑なタスク処理に対応させることを目的として，他のエージェントの内部状態を自己の状態依存のリンク重みを通して参照し，互いに次に取るべき行動を連想し，行動決定を行うネットワークを提案する．

提案ネットワークは，センサーユニットS^iとニューラル素子からなるアクションユニットA^i，およびリンクとしては，エージェントに固有なリンクW^iと，ニューラルネットワークにおけるシナプスに相当し，固有リンクとセンサー状態によって即時的に生成される可変リンクL^iからなる．図1に概念図を示す．

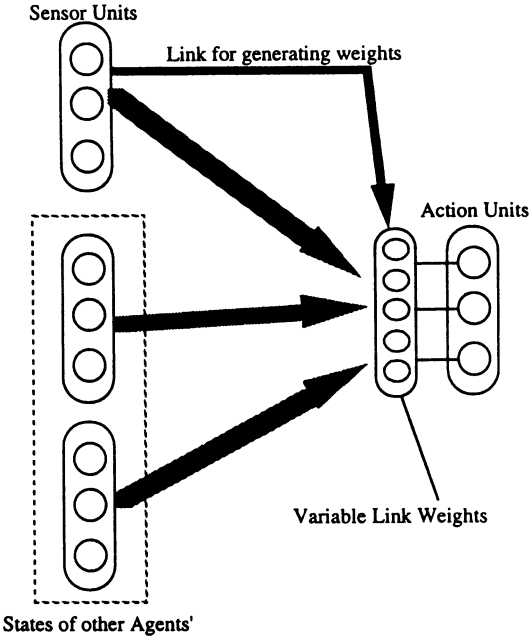


図1 Conceptual view of proposed behavior network structure.

この提案ネットワークによる，行動選択について次に示す．

3．行動選択

エージェントAg^iの行動選択は次のようにして得られる．

0）センサー情報S^iの取得

1）L^iの生成：現在のS^iとW^iから状況を反映した他のエージェント状態の参照を行うためのL^iを以下の式で生成する．

$$L^i = f\left(W^i S^i\right) \tag{1}$$

ここで，S^iはベクトルでありW^iはS^iおよび他の参照するエージェントのS^j，A^jの要素数の総和に等しい要素を持つベクトルL^iを生成するための行列．

$f(x)$はシグモイド関数である．

2）A^iの想起：S^iと参照するS^j，A^jによって構成されるベクトルをI^iとして

$$A^i = f\left(S^{iT} I^i\right) \tag{2}$$

とする．この出力を相互に参照ながら各エージェントにおいてn回繰り返すことによって，次に選択すべき行動を想起させる．

以下ではこの機構の動作確認として，簡単なナビゲーション問題を取り扱う．

4．実験

エージェントの環境として図2に示すグリッド空間を考え，Sとして示したスタート地点から，各グリッドの位置座標を観測しながら，ゴール地点Gを探させる．このとき，タスクとして2エージェントを用い，この両者で2つあるゴールを同時に占めることを目的とする．

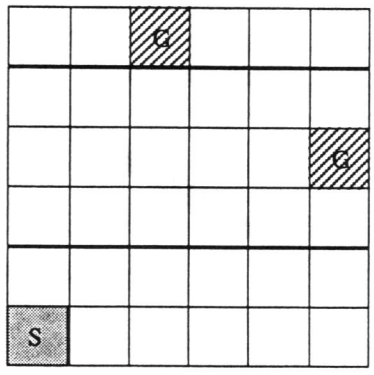


図2　Grid world for simple navigating problem.

エージェントの学習方法の実現として，遺伝的アルゴリズムを用い，実数コーディングした遺伝子によってW^1, W^2を表現し，探索を行う．

エージェントは縦横4方向に1ステップずつ移動できるものとし，30ステップの移動で1回の試行とする．

評価関数Eは両エージェントにおいて壁に衝突した回数Hとそれぞれのゴールに着いた回数R，タスクとしての同時に別のゴールに居た回数Tから，

$$E\left(Ag^1, Ag^2\right) = \frac{R+T*30+1}{H+1} \tag{3}$$

として設定した．

遺伝的アルゴリズムとしては，単純GAを用い集団数50，実数値交叉を使用した．図3に探索過程の結果を示す．

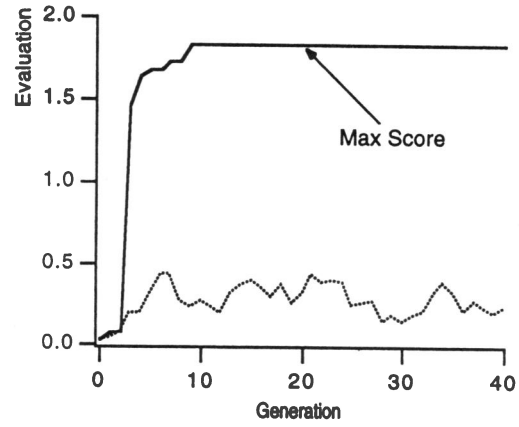


図3 Search progress of GA for task processing of agents.

実験結果から，スタート地点から出発して各エージェントは最小ステップで各自が占めるべきゴールを発見することができた．しかしながら，ゴール発見後，そこに留まる行動選択が十分に獲得できなかったために，残りのステップ時間内に壁と衝突し，評価値を下げる結果となった．この行動パターンは行動獲得に用いたGAの探索が局所解に落ちたために，改善が成されなかった．

4．まとめ

ネットワークに基づく協調的行動選択のためのネットワーク構成を提案し，単純なナビゲーション実験により，適応性を確認した．

参考文献

1) Meas, P., *Learning Behavior Networks from Exprience*. Proc. of 1st ECAL, MIT Press, 48-57, 1991.

2) Meyer, J.A., Guillot, A., *Simulation of adaptive behavior in Animats:Review and prospect* , From Animals to Animats, 2-14, 1990.

3) Terzopoulos, D., Tu, X., Grzeszczuk, R., *Artificial Fishes with Autonomous Locomotion, Perception, Behavior, and Learning in a Simulated physical World* , Artificial Life IV, MIT Press, 17-27, 1994.

TD2-3

協調システムのファジーネス
Fuzziness of Collaborative Systems

ヤリ・ワーリオ* 下原 勝憲**
Jari Vaario* and Katsunori Shimohara**

*奈良女子大学理学部情報科学科
*Information and Computer Science Department, Nara Women's University

**ATR 人間情報通信研究所
**ATR Human Information Processing Research Laboratories

Abstract – In the paper we discuss about an evolutionary approach to create collaborative systems providing fuzzy – in the sense not being well and prior determined – behavior. A collaborative system is defined as a collection of simple 'autonomous agent'-like entities, that stick together forming a communicating cluster. Some of the entities specialize for specific environmental signals providing input to the cluster, some specialize to provide output, and some to provide a connective network. Each entity consists of genetic information determining how to act in the current state, and a connective surface to the world outside. In addition, a virtual world is needed to create a topological space, where the entities can "float". In the paper we give an overview of these concepts, and discuss how these can be applied in application fields.

1 Collaborative Systems

Collaborative systems are viewed in this paper as a collection of abstract objects that are somehow clustered together [2]. The clustering mechanism could be based on some mathematical simulation mechanism [4, 3], or it could be viewed simply as neural connectivity [5, 1].

Whatever the mechanism is the main point is *not* to define exactly (explicitly) what elements communicate with each other. Doing this we would end to design the whole communication network with all relevant signals and interactions. Although this could be possible with simple systems, our interest is to find a general mechanism to automate the design process. The proposed approach is to let the network to self-organize in the environmental perturbations, and using genetic information as a memory of successful configurations of the previous generations.

Thus we define genetic information as a control string for local actions at particular environmental conditions. Traditionally in genetic algorithms the genetic information has provided the complete phenotype description. However, this approach leads to grammar-like systems where the initial string with the used grammar rules determines the final string. The system is closed from environmental effects.

A new feature, however, is provided by the self-organization concept. The idea is that the environment effects directly the creation of each individual system. The changes in the environment will change also the individual. If the self-organization is capable of creating an organism that is able to maintain its self-consistency, *i.e.*, clusters, then it is viable. Otherwise it will diffuse into the environment. By this kind of selection process we can reach adjustment to the environmental changes without any changes in the genetic information. We have a collaborative system capable of adapting to the environmental changes.

The above process could be viewed from the control theory point of view where the system is constructed by using raw materials available from the surrounding environment, and ejecting not needed (garbage from the system point of view) back into the environment. If the input is greater than the output, the system is growing. When the output is greater than input, then the system is not able to maintain anymore its consistency, and it is diffusing into the environment. Because stabile structures are difficult to create and maintain, it is favorable to have systems to reproduce themselves in order to start once again from scratch. This defines the concept of life cycles.

The adaptation of the collaborative system is in principle fuzzy. It is not easy, or even desirable, to define what kind changes in the environment cause what kind changes in the behavior. In the most engineering applications this kind chaotic changes

of the behavior is something to be avoided. This method, however, could be used as a creative design tool providing that the systems are small enough to be able to model in large scale in computer. This is the focus of on-going research.

2 Neural control systems

One possibility is to consider neural network as a self-organizing collaborative system. These neural networks inspired by biological developmental process (BNN) are unlike to the usually understood artificial neural networks (ANN). The difference comes from the idea of learning. In ANN the plasticity is thought to be result of a learning phase. For learning you need input and output pattern that is "memorized" by the network through a learning algorithm. Even in the self-organizing neural networks the principle idea is how once given input could be reproduced later by, for example, a partial input.

In BNN the learning phase is part of the growth process. The idea is that the neural structure is important, and that is the result of developmental process. Thus, while the developmental process is effected by environment, it could be called as a learning algorithm itself (developmental learning algorithm - DLA). This, combined with genetic learning algorithms (GLA, genetic based variations and selection of neural structures) and synaptical plasticity (the traditional approach for implementing learning in neural networks), provides a similar learning phenomena to the biological systems.

The useful learning tasks for DLA are control systems, where, for example, the growing connections are directed by gradient fields created by active sensors. This will lead to our next point. We have to model the environment together with the system. This approach is computationally heavy, and there is no concept how engineering problems could be abstracted into the environmental model.

3 Current research

In the current research we have modeled environment through gradient fields. The idea is that through the gradient fields two fundamental forces of collaborative systems can be modeled: *attraction* and *repulsion*. Higher level behaviors could be modeled as a combination of these forces. The genetic information in the modeled system is used to control when and what gradient fields are used. The environment model takes care of the actual movement of elements in the environment.

For example, the movement of multicellular system is a result of attraction and repulsion forces of "muscle" cells when they shrink and expand in size. The cellular structure must provide a correct form to make this to move the whole system.

The shrinking and expansion of "muscle" cells could be controlled by neural network system. When the multicellular system is formed some cells will become neural cells. These cells will start to grow connections ending to the "muscle" cells and sensory cells. It is responsible of this connective structure to make the correct response to a particular stimulus. How the connections are grown and what kind of reactive behaviors could be created in this method is described in [1].

4 Conclusion

In this short report we described the basic motive for using the ideas of self-organization in creating collective structures. The fuzziness of such systems is created by not designing the control system in detail, but letting it to self-organize under environmental influence. This could be called as "natural" fuzziness.

It is interesting to notice that in the traditional fuzzy research the same need for "non-exactness" has been recognized already a long time ago. The approach has been to relax the mathematical "exactness" by the fuzzy theory. In our approach the same fuzziness is a result of "emergence" concept.

Our work continues by applying the concepts in engineering problems. In this direction the most urgently to be solved is how the problems are abstracted into a environmental description.

References

[1] Jari Vaario. From evolutionary computation to computational evolution. *Informatica*, 18(4):417—434, 1994.

[2] Jari Vaario. Modeling adaptative self-organization. In Rodney Brooks and Pattie Maes, editors, *Artificial Life IV*, pages 313—318. The MIT Press, 1994.

[3] Jari Vaario and Katsunori Shimohara. On formation of structures. In *The 3rd European Conference on Artificial Life*. Springer-Verlag, 1995.

[4] ヤリ・ワーリオ, 溝口 潤一, and 下原 勝憲. 創発と進化. シミュレーション, 13(4):302–310, 1994.

[5] ヤリ・ワーリオ and 大須賀節雄. 知的人工物の自己組織化. *Computer Today*, 5, 1994.

連絡先

〒630 奈良市北魚屋西町
奈良女子大学理学部情報科学科
ヤリ・ワーリオ
Tel/Fax: 0742-20-3443
jari@ics.nara-wu.ac.jp

TD2-4

行動型ハードウェアの進化

Evolution of Hardware Behaviors

逸見 均　　下原 勝憲

Hitoshi Hemmi　Katsunori Shimohara

ATR 人間情報通信研究所

ATR Human Information Processing Research Laboratories

Abstract— A new evolutionary methodology is proposed to enable electronic circuit (hardware) to adapt automatically to unknown or changing environment. In the proposed system, high level sepcification of hardware behaviors are successfully manipulated in the evolutionary process by using Hardware Description Language (HDL). The key techniques are introduction of HDL-programs development process, and genetic operations combined to that process. Those techniques should be also applicable to wide variety of programing languages incluting ordinary computer languages like "C".

1　はじめに

マイクロプロセッサをはじめとするディジタルの電子回路（ハードウェア）はいまやあらゆる人工システムで制御の中枢として使われている。我々はそれらハードウェアを構成する手段に生物のメカニズムを導入する研究を行なっている。目標とするのは、環境または目的に応じて機能を拡張・適応する柔軟性を持ち、かつ非常に高速に動作する、いわばエレクトロニクス生命体とも言うべきシステムである。

一方工学的な応用という観点で見れば、自然界の状況をそのまま模倣するのではなく、各々のメカニズムをより効率的に適用するための工夫が必要である。本稿では、制御の中枢としてのハードウェアで最も重要視されるべき、動作そのものを直接進化プロセスで適応させる手段を紹介する。

2　ハードウェア進化システム

生物と違い、ハードウェアは普通文字どおり固い素材(シリコン)で作られる。もし、柔軟なハードウェアシステムを構築しようとするならば、少なくともあらかじめハードウェアに可変な機構が組み込まれている必要がある。さらにその柔軟性は単なるパラメータの「調整」と見做されないほど大きくなければならない。樋口らは FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いたハードウェア進化システムを提案している。[1] そのようなシステムでは進化プロセスが適用される対象は論理ゲートの接続情報などの基本的なハードウェアの構造である。

我々はより高度な記述が可能な高級なハードウェア記述言語 (HDL) を用いて、ハードウェア進化システムを構築した。HDL は LSI-CAD に使われる一種のプログラム言語で、ハードウェアの構造はもちろんその動作による記述も行なえる。また、HDL で記述されたハードウェアはソフトウェアと同等の柔軟性をもっていることになる。

HDL プログラムからはシンセサイザ (コンパイラ) 等を用いることにより、回路図、FPGA アーキテクチャビット、LSI 製造用マスクパタンなどを生成できる。本システムでは HDL プログラムをハードウェアと同一視し、生物のメカニズムを取り入れてその自動生成を行なっている。

図 1 にシステムの概念図を示す。

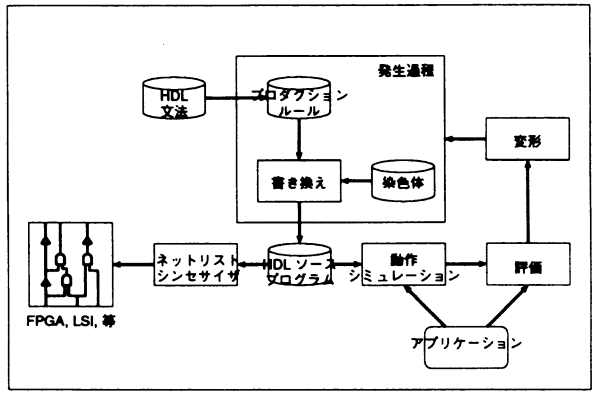


図 1: システム概念図

3 HDL プログラムの発生

コンピュータのマシン語と違い、HDL 等の高級言語のプログラムは繊細であり、不用意な変形により容易に非文法的となる。そこで、本システムでは HDL の文法を定義するプロダクションルールのセット (BNF 記法) をもとに文法的に正しいプログラムの発生を行なう方法を提案する。

```
(r0.0)  sfl_desc   →   seq0_mod_def

(r1.0)  seq0_mod_def   →   empty
(r1.1)  seq0_mod_def   →   seq0_mod_def   mod_def

(r2.0)  mod_def   →   K_MODULE  mod_name  K_LBRACE  seq0_submod_type_OR_fc_type_def \
          seq0_mod_component_def   seq0_mod_ctrl_pin_arg_def   seq0_stage_and_task_def \
          seq0_mod_act_with_ctrl_pin_def   seq0_stage_act_process_def \
        K_RBRACE

(r3.0)  mod_name   →   nm_mod

(r4.0)  nm_mod   →   NM_MOD
          :

(r15.0) formula   →   monomial   |   formula   /* or */
(r15.1) formula   →   monomial   @   formula   /* exr */
(r15.2) formula   →   monomial   &   formula   /* and */
(r15.3) formula   →   monomial   ||  formula   /* concatenation */
(r15.4) formula   →   monomial   +   formula   /* addition */
          :
```

図 2: BNF 記法で書かれた HDL 文法

図 2 に本システムで使用している HDL の文法の一部を示す。HDL 文法の BNF 表記を用い次のようにプログラムを発生させることができる。

1 個の記号 (sfl_desc) を用意し、それを 2 のルールにしたがって書き換えて行く。全ての記号が HDL の keyword・変数名等の記号 (終端記号) に置き代わったところで 1 つの文法的に正しいプログラムができあがる。

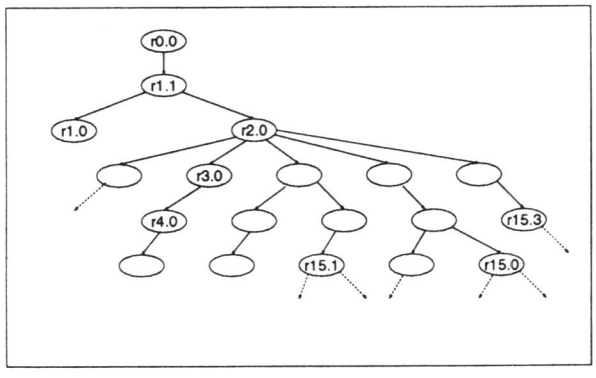


図 3: 染色体

発生の各過程で使用できるルールには自由度がある。ルールを取り代えると、発生されるプログラムも変わる。本システムでは各過程で使用するルールのインデックスを tree 構造に配置したデータを染色体として発生を制御する (図 3)。同じ染色体からは、一意に HDL プログラムを発生できる。

4 HDL プログラムの進化

発生された HDL プログラム集団は、問題・環境に応じて動作シミュレーションされ、それぞれ評価値を与えられる。評価値に基づき淘汰が行なわれ、残った個体プログラムに遺伝的操作が施されて、次世代のプログラム集団が作られる。

本システムでは 5 種類の遺伝的操作を用いている。そのうち交叉について説明する。交叉は親染色体中の文法的に等価な 2 つの sub tree を入れ換える操作である (図 4)。

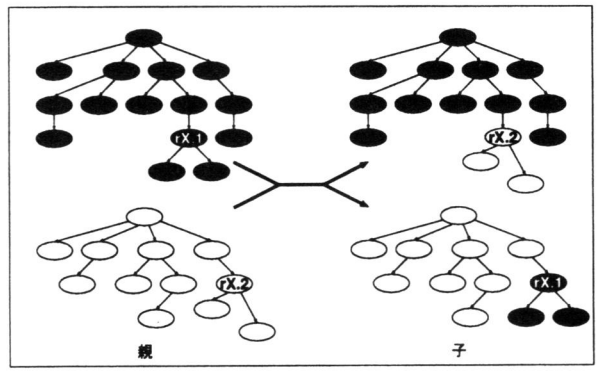


図 4: 交叉操作

5 まとめ

HDL を用いることにより、動作レベルで進化を行なうことのできるハードウェア進化システムについて、そのメカニズムを説明した。なおここで述べた技術は、広い一般性を持つ強力なもので他の分野の進化システム構築にも容易に応用できると考えられる。

参考文献

[1] T. Higuchi et al. "Evolvable hardware–genetic based generation of electric circuitry at gate and hardware description language (HDL) levels", ETL Tech. Report, 93-4, 1993.

[2] H. Hemmi, J. Mizoguchi, K. Shimohara. "Development and Evolution of Hardware Behavior", Artificail Life IV, pp. 371–376, MIT Press, 1994.

連絡先
〒 619-02 京都府相楽郡精華町光台 2 丁目 2 番地
ATR 人間情報通信研究所 進化システム研究室
逸見 均
Tel. 0774-95-1071 Fax. 0774-95-1008
E-mail hemmi@hip.atr.co.jp

TD3-1

多重連結型移動車両の知的ハイブリット制御
ールールベースによるクランク走行とGAによる衝突回避ー

Fuzzy Control of Multi-Trailer and Truck via GA and Rule Base.

田中　一男[1]　　吉岡　啓輔[2]
Kazuo TANAKA　　Keisuke YOSHIOKA

1　金沢大学 (Kanazawa University)
2　三菱電機 (Mitsubishi Electric Corp.)

Abstract - Automobile robot navigation systems are required two important tasks:trajectory control and obstacle avoidance. Fuzzy trajectory control of a computer simulated truck with five trailers, which is non-linear and unstable, is realized by applying a design technique of model-based fuzzy control. The simulation results show that the designed fuzzy controller effectively realize the trajectory control of the truck with five trailers. Next, GA is used to find a semi-optimum path from initial points to a goal point under the restriction of obstacle avoidance. GA works well so as to minimize a given performance function (i.e. maximize a defined fitness). Simulation results show that GA can find a semi-optimum path from initial points to a goal point.

1.　はじめに

トレーラ・トラックタイプのロボットの後退制御に関して様々な試み[1-7]がなされている。文献[4-6]では、制御系の安定性が解析されている。とくに、文献[5-7]では、シミュレーションではなく実際にトレーラ・トラックの模型の制御を行っている。文献[8,9]では、シミュレーション実験のみであるが、5台、10台のトレーラを連結させたトラックの後退運転をファジィ制御で実現した。トラックとトレーラ、及び全てのトレーラ間のジャックナイフ状態を回避しながら、直線軌道に追従する必要があるため、シミュレーションでもこの制御の実現は容易ではない。5台の直線追従後退運転制御のファジィ制御器設計の詳細については、文献[8,9]で述べられている。この設計には、並列分散的補償[10-12]という概念が用いられている。本研究では、この直線軌道追従用のファジィ制御器を用い、3章ではルールベースによるクランク走行、4章ではGAによる障害物回避経路選択についてのシミュレーション結果を述べる。

クランク走行においては、目標軌道変更の簡単なルールを作成し、このルールを適用することにより、クランクを抜けることを試みる。障害物回避による経路選択には、移動空間内の各エリアでの適切な目標軌道を選択するために、遺伝的アルゴリズム（GA）を適用する。

2．　ルールベースによるクランク路走行運転

Fig.1に制御対象のモデルとその座標系を示す。

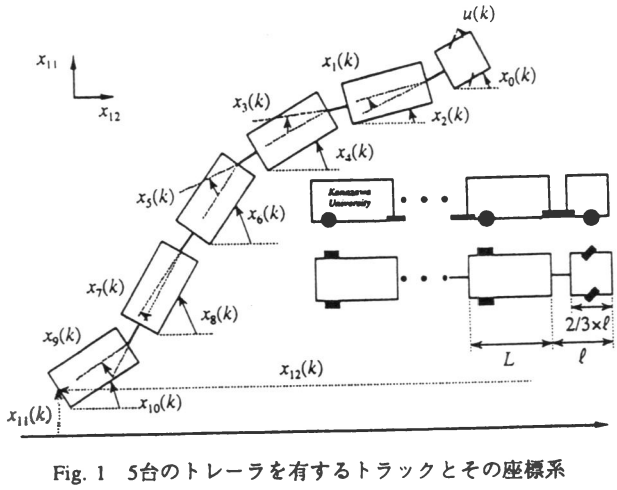


Fig. 1　5台のトレーラを有するトラックとその座標系

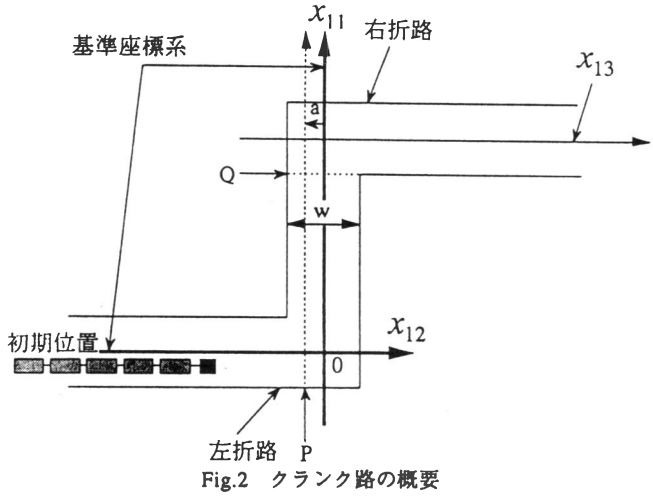


Fig.2　クランク路の概要

2.1　目標軌道変更のルール　　想定するクランク路の概要をFig.2に示す。5台のトレーラを連結させたトラックのクランク走行の場合、後方に連結車輌があるため、内壁、あるいは外壁への衝突を起こす危険性が車輌が1台の場合に比べ高い。本研究では、それを回避するために状況に応じて目標軌道の変更を行うルールを作成した。シミュレーションでは、前進でクランクを抜ける場合と後退で抜ける場合を行う。前進時に壁へ衝突した場合はある程度まで後退し、目標軌道を修正後再び前進する。後退の場合にはある程度まで前進し、目標軌道を修正後再び後退する。

ここでは、前進運転の左折時について述べる。その他の場合も同様の考え方を用いることができる。アルゴリズムの基本的な考え方は2分法である。まず、目標軌道をx_{12}、x_{11}、x_{13}の軸上に設定する。トラックの先端がP地点を通過するまで、x_{12}の軸を目標軌道とする。この点を通過した後は、x_{11}に目標軌道を変更する。右折時においての目標軌道の切り替えも、Q地点においてx_{11}からx_{13}の軸に切り替える。

左折時において、外側の壁に衝突した場合は、今までの目標軌道x_{11}と内側の壁とのちょうど中間地点に新たな目標軌道を設定する。従って、その目標軌道変更量aはa=-w/4となり、変更後の目標軌道は現在の目標軌道にaを加えることで算出する。ここで、wは道幅である。一方で、内側の壁に衝突した場合は、今までの目標軌道x_{11}と外側の壁とのちょうど中間地点に新たな目標軌道を設定する。従って、その目標軌道変更量aはa=w/4となり、変更後の目標軌道は現在の目標軌道にaを加えることで算出

する。このような操作を繰り返すことによりコーナーを抜ける。

2.2 シミュレーション実験（前進運転） Fig.3、Fig.4、Fig.5にシミュレーション結果を示す。初期位置は３つの場合ともFig.2の座標を基準としてx_{11}=0[m]、x_{12}=-40[m]としている。初期状態のトラックの状態は各図に示してある。クランク路の幅は3種類であり、Fig.3ではw=17.5 [m]、Fig.4ではw=15.5[m]、Fig.5ではw=15[m]である。なお、トラックの全体は初期状態とクランク路を抜けた後の最終状態のみを表示し、途中の走行経路は最前部の軌跡のみを表示してある。移動速度は一定でv=0.5(-0.5)[m/s]、サンプリングタイムはt=1.0[sec]とする。

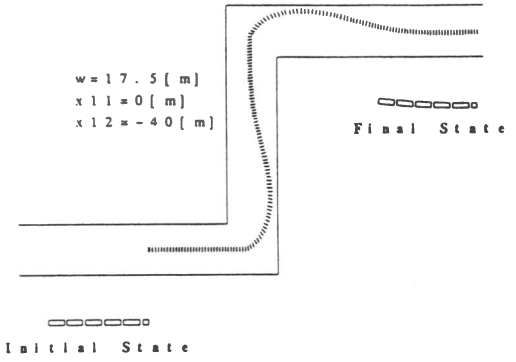


Fig. 3 シミュレーション結果（前進１）

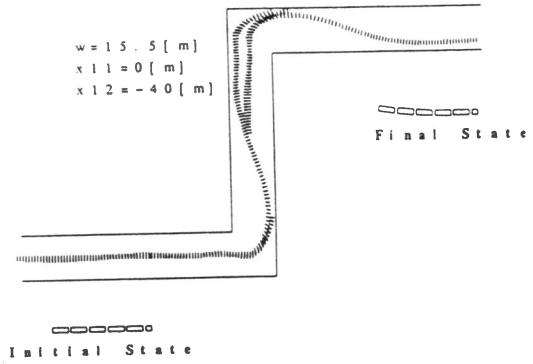


Fig. 4 シミュレーション結果（前進２）

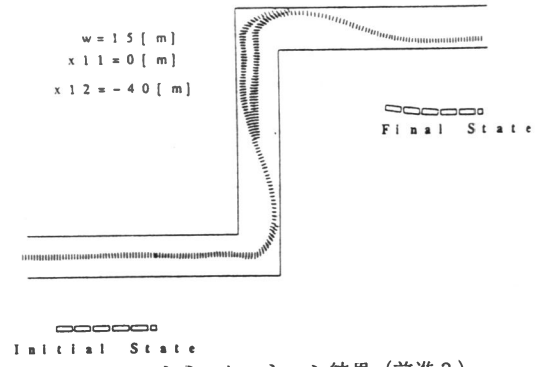


Fig. 5 シミュレーション結果（前進３）

Fig.3は道幅を広く設定してあるので、オーバシュートを起こすことなくなめらかにクランクを抜けていることがわかる。Fig.4では左折時に基準座標軸ではオーバシュートして壁へ衝突するので、一度後退したのち、目標軌道を変更し右折を可能としているのがわかる。Fig.5では、左折時はオーバーシュートによる目標軸の変更で左折し、右折時においてはオーバーシュートによって2回の目標軌道変更を行って右折しているのがわかる。これらのシミュレーション結果より、提案した比較的簡単なルールである程度の路幅であれば、クランク走行が可能であることがわかる。

2.3 シミュレーション実験（後退運転） Fig.6、Fig.7にシミュレーション結果を示す。初期位置はどれも図の基準座標においてx_{11}=0[m],x_{12}=60[m]である。後退運転でクランクを抜ける場合には、ジャックナイフ現象を回避する必要があるため、前進の場合に比べてはるかに難しい。したがって、道幅は前進の時よりも広く設定してやらねばならない。

クランクの路幅は2種類を用意した。Fig.6では30[m]、Fig.7では21.25[m]である。これらは前進運転の場合と同様で初期状態とクランク路を抜けた後の最終状態だけを表示し、トラックの最後尾の軌跡を表示している。またトラックの移動速度、サンプリングタイムは前進運転と同様とする。Fig.6は路幅を広めに取っているのでオーバーシュートを起こすことなく滑らかに走行していることがわかる。Fig.7では右折時にはオーバーシュートなく走行しているが、左折時に1回オーバーシュートを起こし前進で左折路まで戻り再び目標軸を変更して左折に成功していることがわかる。これより提案したルールはある程度の道幅ならばクランク路走行に対して有効であることがわかる。

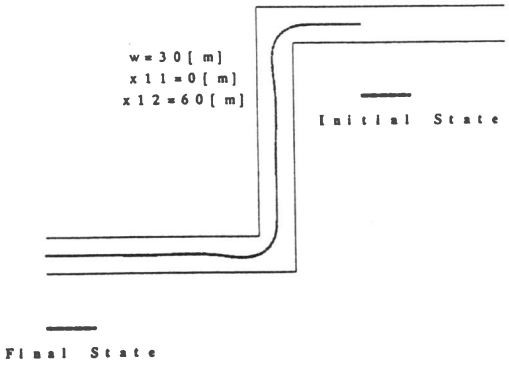


Fig. 6 シミュレーション結果（後退１）

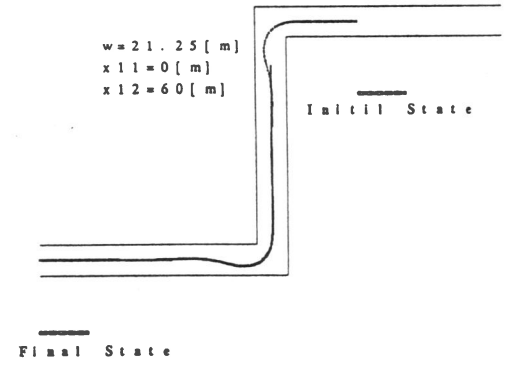


Fig. 7 シミュレーション結果（後退２）

3. 障害物回避を考慮した走行経路探索へのGAの適用

3.1 GAの適用方法 本研究では、単純GAを適用する。Fig.8はトレーラ・トラックの走行平面の概要と適応度を計算するときに必要となるパラメータd1、d2を示している。前進の場合は左上が出発点、右上が目標地点となり、後退の場合はその逆となる。

目標地点到達までの走行経路をGAの個体として表現するために、Fig.8に示すように走行平面を縦方向y個，横方向x個のメッ

シュで区切る。各メッシュに目標軌道の方向(Dxy)を与える。Fig.10に示すように、Dxyとして16方向を設定し、0～15の整数を割り当てる。水平右向きを0°とし反時計回りにDxy×360／16（度）の方向を与える。このDxyの配列がGAにおける表現型となる。この表現型を遺伝子の配列である染色体に変換するために、Dxyを２進数で表す。１６方向は4ビットで表現できる。一方、ここではx×y個のメッシュがあるので、１つの目標軌道方向パターンを記述している個体は4×x×yビットで表現できる。

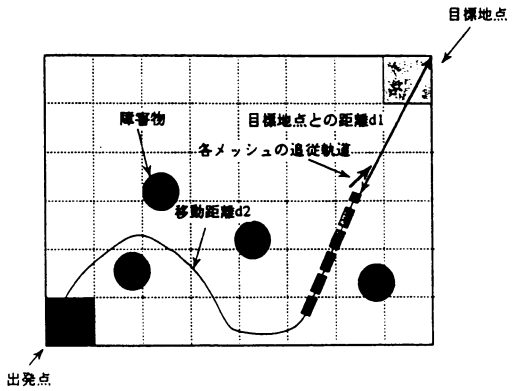


Fig.8　走行平面の概要（前進の場合）

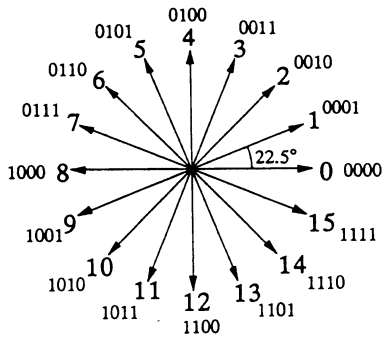


Fig.9　各メッシュの目標軌道方向とその２進数表現

トラックの先端部が属するメッシュに記述されている目標軌道方向へ追従するように、文献[8,9]で設計されたファジィ制御器によりトレーラトラックを制御する。ここでは、

(1)障害物をさけて目標地点へ到達する

(2目標地点へ到達する走行距離をできる限り短くする

という2つを満足する目標軌道パターンを決定することが目的である。したがって、2つを満足するような走行パターンに高い適応度を与えて次世代にその個体を残す必要がある。逆に、これらを満足しない走行パターンには低い適応度を与えて消滅させる必要がある。このような観点から次のように適応度fを定める。

(1)ロボットが目標地点に到達する場合　f=1/d2

(2)障害物に衝突または平面より逸脱または

ジャックナイフ状態になる場合　　$f = 1/d1^2$

ここで、d2はトラックの移動距離であり、d1は障害物への衝突、走行平面からの逸脱、ジャックナイフ現象等に陥った地点から目標値点までの距離である。(1)は走行距離が短く目標位置に到達したものを次世代の個体として残し、(2)は目標位置に到達しなくても目標位置の付近まで達したものは次世代に残す確率を高くする。

走行平面の分割数を縦4、横8とし、円形の障害物を発生させた。ロボットの移動速度はv=1.0[m/s]、t=2.0[sec]（後退の場合は-2.0）とする。突然変異率は2%、交差の方法は1点交差とする。また個体数50、世代交代数100回とし世代交代が終了した時点で最大の適応度をもつ個体の遺伝子型を最終的に採用する。

3.2　シミュレーション実験（前進）　Fig.10に初期世代における最高の適応度をもつ個体を採用した場合の制御結果、Fig.11に全世代における最大の適応度をもつ個体を採用したときの制御結果を示す。Fig.10では初期世代において最大の適応度をもつ個体といえども目標地点に到達せず障害物を回避できていない。Fig.11では、うまく障害物を回避しながら目標地点へ到達していることがわかる。

3.3　シミュレーション実験（後退）　後退運転の場合、トラックとトレーラ、および、各トレーラ間のジャックナイフ現象を回避する必要があるため、前進の場合に比べてはるかに難しい。Fig.12に初期世代における最高の適応度をもつ個体を採用した場合の制御結果、Fig.13に全世代における最大の適応度をもつ個体を採用したときの制御結果を示す。

4　まとめ

本研究では、文献[8,9]で示されている直線軌道追従用のファジィ制御器を用い、ルールベースによるクランク走行、GAによる障害物回避経路選択についてシミュレーションによりその有効性を示した。

参考文献

[1]D.Nguyen and B.Widrow, The truck backer-upper:An example of self-learning in neural networks, Proc. Int. Conf. Neural Networks (IJCNN-89), Vol.2, pp.357 - 363 (1989)

[2]S.G.Kong and B.Kosko, Adaptive Fuzzy Systems for Backing up a Truck-and-Trailer, IEEE Transaction on Neural Networks, Vol.3, No.2, pp.211-223 (1992)

[3]徳永、市橋、ニューロ・ファジィ最適制御によるトレーラ・トラックの後退運転、第８回ファジィシステムシンポジウム、pp.49-52 (1992)

[4]K. Tanaka and M. Sano, A Robust Stabilization Problem of Fuzzy Control Systems and Its Application to Backing up Control of a Truck-Trailer, IEEE Tran. on Fuzzy Systems, Vol.2, No.2, pp.119-134 (1994)

[5]M.Sampei et al.:Path Tracking Control of Trailer-Like Mobile Robot, Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.193-198 (1991)

[6]田中、佐野、モデルに基づくファジィ制御による模型トラック・トレーラの後退制御、第１０回ファジィシステムシンポジウム (1994)

[7]K. Tanaka: Model-based Fuzzy Control of a Trailer Type Mobile Robot,4th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (To appear)

[8]K. Tanaka and K.Yoshioka, Design of Fuzzy Controller for Bucker-Upper of a Five Trailers and Truck, Proc. of FUZZ-IEEE'95, To appear (1995)

[9]田中、吉岡、10台のトレーラを連結させたトラックの後退運転制御、第１１回ファジィシステムシンポジウム(1995)

[10]田中、アドバンストファジィ制御、共立出版 (1994)

[11]H. Wang, K. Tanaka and M. Griffin, Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems via Takagi-Sugeno Fuzzy model, Proceedings of FUZZ-IEEE'95, To appear (1995)

[12]K.Tanaka, T. Ikeda and H. Wang, "Fuzzy Controller Design for Stabilization of a Class of Nonlinear Systems, IEEE Conf. on CDC'95 (To be submitted).

[問い合わせ先]

〒920　金沢市小立野2-40-20

金沢大学工学部機械システム工学科

田中　一男

Tel & Fax 0762-34-4736

Email　tanaka@kicews2.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

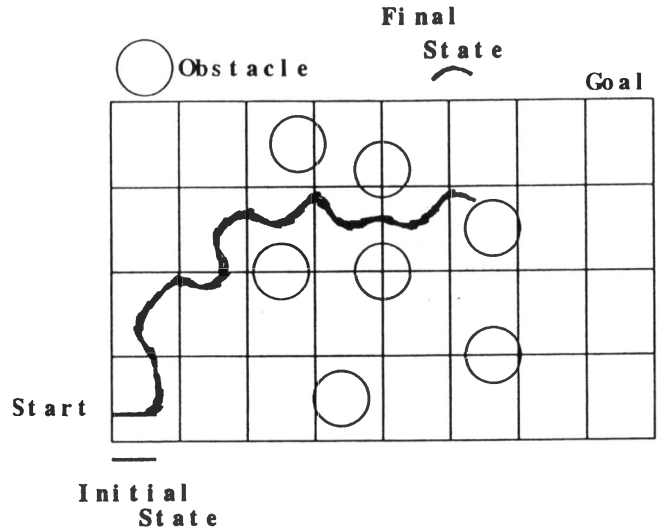


Fig. 10　初期世代での適応度最大（前進の場合）

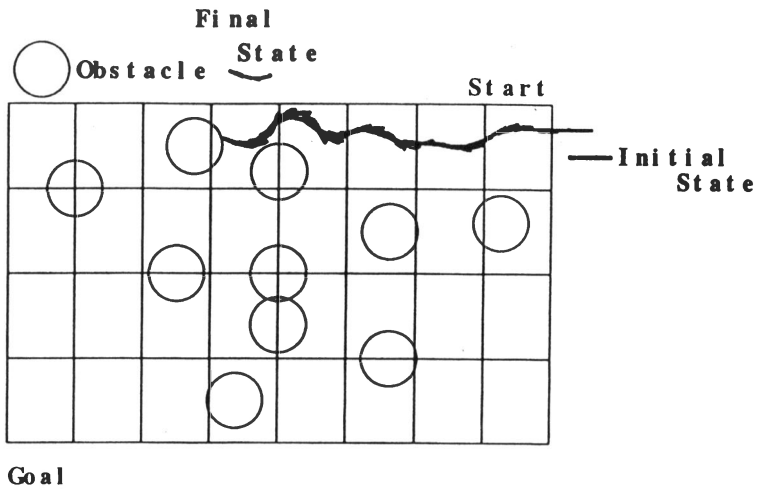


Fig. 12　初期世代での適応度最大（後退の場合）

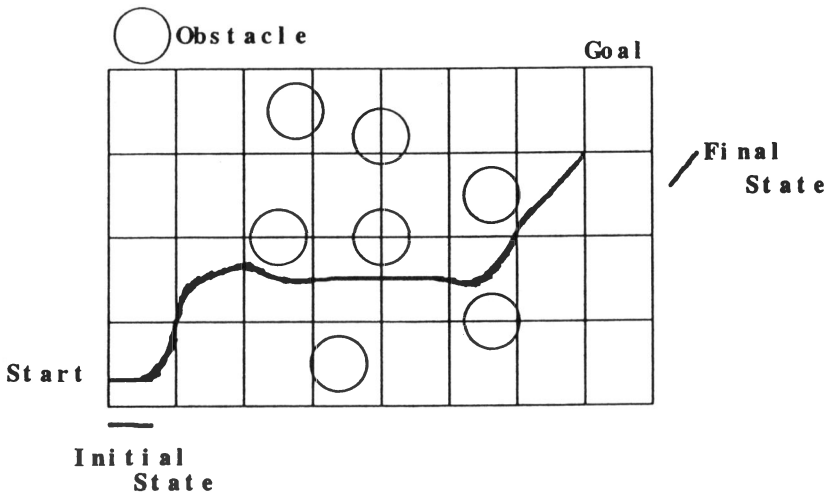


Fig. 11　全世代での適応度最大（前進の場合）

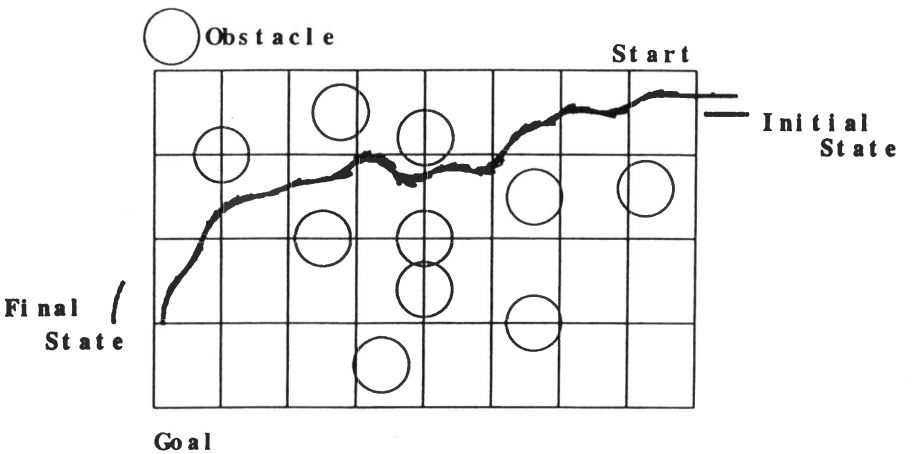


Fig. 13　全世代での適応度最大（後退の場合）

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

TD3-2

遺伝的アルゴリズムに基づく経営政策の決定手法

Decision Making of Business Strategy based on Genetic Algorithm

松田 浩，水沼 洋人，和多田 淳三
Hiroshi MATSUDA, Hiroto MIZUNUMA, Junzo WATADA

大阪工業大学
Osaka Institute of Technology

Abstract —The objective of this paper is to propose a method which select the best with a better return out of several business strategies under the consideration of market risk estimated by time series data of its market growth and which affords us to reduce market risk by the selection. In the method, genetic algorithm is employed to efficiently reduce the computational cost for obtaining its solution. As its application the proposed method is applied to a personal allocation problem. It is realized in the method the possibilities included in personal resources and allocation constraints are taken into account and the aspiration level of a decision maker is satisfied in the solution.

1 はじめに

企業の経営政策には，マーケティング計画，人員計画，組織計画，財務計画，設備投資計画，研究開発計画など広範囲な領域に関係している．ここで，経営政策とは，経営戦略や経営管理を含む広い概念を意味している．これらの経営政策は人員，設備，技術，資本の資源投下をともなう問題となることが多い．特に，これら経営政策には，技術の変化による不確実性，景気変動による不況，競争業者の政策や顧客欲求の変化などの環境変化に企業全体を適応させる環境適応の機能が重要であると考えられている [1],[2]．しかしながら，環境変化は本質的に将来に関わる問題であるため，常に不確実性がともなう．

一方，企業が経営政策問題を立案する際に適用される従来の手法では，固定化された条件の下での最適解の導出に重点がおかれている [3]．さらに，そこでの目的は，利益最大もしくは費用最小としたものが少なくない．しかしながら，固定化された条件には，不確実性要素に対する配慮が欠けているため，求められた最適解には政策のリスクに関する十分な考慮がなされていない．

このため本研究では，経営政策問題を扱う一手法として，市場における成長性の時系列データを基に市場リスクを算出し，リスクを軽減する経営政策決定手法を提案する．その際，遺伝的アルゴリズムを適用することによって，計算コストを減少する効率的な解法を提案する．特に，資源の可能な配分条件に可変性の幅をもたせた経営資源の配分を実現している．なお，解の評価としては，期待値およびリスクに対してファジィ概念を適用した意思決定者の希求水準の満足化による方法を用いている．

2 計画モデルの構築

2.1 モデルの定式化

本研究では，市場リスクを考慮するため，各地域ごとの売上高伸び率の時系列データを基にして，期待値およびリスク (分散) を求める．このとき，目標とすることは，『市場リスクをできるだけ小さくし，期待値をできるだけ大きくする.』ことである．従って，リスク最小および期待値最大とする二目的計画問題として以下のように定式化するのが妥当である．

[定式 1]

$$\text{min.} \quad V(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{Q^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sigma_{ij}x_i x_j$$

$$\text{max.} \quad E(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{Q}\sum_{i=1}^{n}\mu_i x_i$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{n} x_i = Q$$

$$x_i \geq 0 \qquad (i = 1,2,\cdots,n)$$

ただし，$V(\boldsymbol{x})$ は市場リスク，$E(\boldsymbol{x})$ は期待値，n は地域数，σ_{ij}は第 i 地域と第 j地域との共分散，μ_iは第 i 地域の期待値，Q は配分可能量である．また，x_iは第 i 地域への配分量であり，応用例のように適用する問題によっては x_iは整数となる．

2.2 ファジィ二目的計画問題への変換

ところで，二目的計画問題 [定式 1] を解くことによって何らかのパレート最適解が得られるが，通常は一回の演算で求められた解が意思決定者にとっての満足解となることは少ない．これは，意思決定者がリスク下で代替案の選択を行う際に，過去の経験・情報および現状と照らし合わせて，得られる結果を評価しているためであると考えることができる．換言すれば，意思決定者はあらかじめリスクおよび期待値に対して，ある希求水準を有するためと考えることができる．その希求水準はあいまいな言語表現「だいたい～」で表現できる．そのため，目標リスク $V(\boldsymbol{x})$ および目標期待値 $E(\boldsymbol{x})$ に対してファジィ概念の適用を試みる．

従来のファジィ数理計画問題では，議論を容易にするため線形型のメンバーシップ関数を用いることが多い．しかしながら，線形型のメンバーシップ関数を用いることは解の存在に問題が生じる [4]．このため，本研究では非線形のシグモイド関数型メンバーシップ関数を適用する．このシ

グモイド関数型メンバーシップ関数を用いるとリスク $V(\boldsymbol{x})$ に関しては小さい方が好ましいため以下のようになる.

$$\mu_V(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{1+\exp\left[\alpha_V\{V(\boldsymbol{x})-V_M\}\right]}$$

また, 期待値 $E(\boldsymbol{x})$ に関しては大きい方が好ましいため以下のとおりである.

$$\mu_E(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{1+\exp\left[-\alpha_E\{E(\boldsymbol{x})-E_M\}\right]}$$

ここで, V_Mは目標リスクに対する帰属度が 0.5 となるリスクの値, E_Mは目標期待値に対する帰属度が 0.5 となる期待値の値, α_Vおよびα_Eは形状に関するパラメータで, ともに$\alpha_V > 0$, $\alpha_E > 0$ である.

以上のメンバーシップ関数と Bellman-Zadeh の最大化決定 [5] により, [定式 1] は以下のファジィ二目的計画問題として定式化される.

[定式 2]

$$\begin{aligned}
\text{max.} \quad & \lambda \\
\text{s.t.} \quad & \lambda + \lambda\exp\left[\alpha_V\{V(\boldsymbol{x})-V_M\}\right] \le 1 \\
& \lambda + \lambda\exp\left[-\alpha_E\{E(\boldsymbol{x})-E_M\}\right] \le 1 \\
& \sum_{i=1}^{n} x_i = Q \\
& \lambda \ge 0 \\
& x_i \ge 0 \qquad (i=1,2,\cdots,n)
\end{aligned}$$

ここで, ファジィ二目的計画問題 [定式 2] は実質上帰属度 λに関する一目的計画問題となるため, 次節で述べる遺伝的アルゴリズムの適用が容易になっている.

3 遺伝的アルゴリズムの適用

遺伝的アルゴリズムは最適化問題に対して有効な手法である. しかしながら, 個々の問題に応じてコーディングやパラメーターの設定をする必要があるため, 現在では試行錯誤的あるいは, 経験に基づいて設定してやらなければならない. また遺伝子は, 通常 0,1 のビットパターンで表現される場合が多い. しかしながら本研究の問題に対しては, 配分可能量があらかじめ決定しているため, 0,1 のビットパターンでは, 致死遺伝子 (実行不能解を表す遺伝子) の生じる可能性が高くなるため非効率的である.

染色体構造の一例を表 1 に, 問題空間と遺伝的アルゴリズム空間との対応関係を表 2 に示す.

表 1　染色体構造の一例

遺伝子座	1	2	3	4	5
遺伝子	1	4	9	9	15

上の例では, 配分可能量 Q は 5 であり, 地域 1,4,15 に 1, 9 に 2 配分することを意味している.

表 2　問題空間と遺伝的アルゴリズム空間との対応関係

問題空間	遺伝的アルゴリズム空間
配分地域	遺伝子
配分可能量	染色体長
配分地域の組合せ	個体
配分地域の組合せの集合	集団
帰属度	適応度関数

以上より, 本研究では致死遺伝子を全く生成しないコーディングを実現している. さらに, 染色体長が直接配分可能量に対応しているため, 配分可能量が可変になった場合を考慮することが容易になっている.

なお, 数値例に関しては紙面の都合上, 割愛する.

4 おわりに

本研究では, 経営政策の決定方法として, 市場における成長性のデータを基に期待値およびリスク (分散) を算出することによって, リスク最小および期待値最大の両者を目的とした数理計画問題へ帰着させる方法を提案した. その際, 遺伝的アルゴリズムを適用することによって, 配分可能量に柔軟性をもたせた配分を実現した. また, 本研究で提案した手法が効率的に解を得ることを示し, 有効であることを実証した.

参考文献

[1] 占部 都美 : 「経営戦略と経営計画」, 白桃書房 (1971)

[2] 福川 忠昭 : "経営計画と多目的数理計画法", オペレーションズ・リサーチ, Vol.27, No.6, pp.320-324(1982)

[3] 清水 龍瑩 : 「数学・統計を活かす　経営計画入門」, 中央経済社 (1978)

[4] 水沼 洋人, 松田 浩, 和多田 淳三 : "ファジィ満足度を考慮したポートフォリオ分析", 第 10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.735-738(1994)

[5] R. E. Bellman and L. A. Zadeh : "Decision Making in a Fuzzy Environment," *Management Science*, Vol.17, pp.B141-B164(1970)

[6] 北野 宏明編 : 「遺伝的アルゴリズム」, 産業図書 (1993)

問い合わせ先

〒535　大阪市旭区大宮 5-16-1
大阪工業大学　経営工学科
和多田　淳三
TEL : 06-954-4327(dial-in)
FAX : 06-952-6197
e-mail : watada@nak101.dim.oit.ac.jp

TD3-3

遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークを用いたＳＰ戦略策定システム

A Sales Promotion Planning Support System by Genetic Algorithms and Neural Networks

高嶋　守* 板垣朝子* 西尾チヅル** 中西祥八郎***
Mamoru Takashima* Asako Itagaki* Chizuru Nishio** Shohachiro Nakanishi***

日本ナレッジインダストリ株式会社* 筑波大学大学院** 東海大学工学部***
Japan Knowledge Industry Co.,Ltd.* University of Tsukuba** Tokai University***

Abstract- It is a very difficult to find Sales Promotion (SP) patterns which meet planner's purpose by computer system because SP planning works must be taking account of many factors. So, the authors propose a SP planning support system. The system proposed in this paper is consist of two processes. First process is a knowledge acquisition process by neural networks and learning type fuzzy inference, and second process is to generate appropriate SP patterns by GA. The knowledge acquired in first process is applied to evaluation of SP patterns generated by GA. We apply this system to scan panel data of instant coffee category. As the result, we get some SP plans which is reasonable in our experience.

1　はじめに

ファジィ推論・ニューラルネットワーク（以下、ＮＮ）・遺伝的アルゴリズム（以下、ＧＡ）を用いることにより、従来の手法では困難であったような複雑な対象の知識の獲得・表現ができるようになってきた。これに伴い複雑な情報処理も可能になってきた。

事例の学習をベースとして、知識を獲得するＮＮは、生物形がもつ脳や神経系の優れた情報処理能力をモデル化したもので、診断・分析・予測・制御などにおいて多くの研究が報告されている。ＮＮの大きな利点は、何等かの因果関係があるが、その構造が複雑で捉えられないような対象に対して、適切な入出力パターンを与えることで、その関係を非線形なモデルとして同定できることである。しかし、一方で内部構造の説明が困難であるという問題が指摘されている[1]。

曖昧な表現を許容し処理するファジィ推論は、経験的知識を、ファジィ集合を含むルールの形で表現して推論する方法である。ファジィ推論は、知識をメンバーシップ関数と if-then 形式のルールに表現ができるので、処理内容が理解しやすい。しかし、ファジィ集合やファジィルールの調整を、人手に頼っていた。そこで、ＧＡやＮＮの学習機能を利用して、ファジィ推論のメンバーシップ関数やルールの調整を自動的に行う研究が、近年報告されてきている[2-3]。

ＧＡは、生物の進化の原理に着想を得たアルゴリズムであり、スケジューリング問題等の組合せ最適化を行う一手法である。近年ＧＡを発想支援に用いる研究も進められている[4]。ＧＡは、進化の過程で様々な染色体を生成できるので、意思決定を行うような局面において、様々な計画案を出力できるシステムを実現できると考えられる。

本研究では、ファジィ推論・ＮＮ・ＧＡのそれぞれの利点と課題を踏まえた上で、それぞれを融合して意思決定を支援する戦略策定システムを提案する。さらに、実際に本システムをセールスプロモーション（以下、ＳＰ）戦略策定に適用したので、そのシステムの概要と、実際に適用した結果について報告する。

2　戦略策定システム

戦略を策定するためには、大きくわけて次のような３つのことが必要であると考えられる。第１は、対象についてよく知る必要がある。すなわち、対象に対する知識が必要となる。

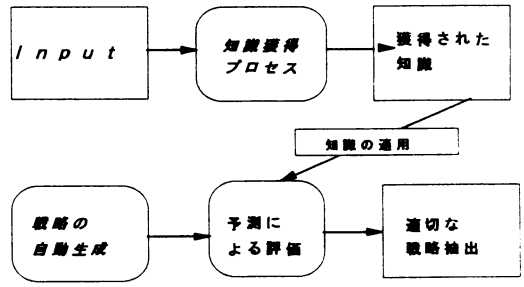


図１ 戦略策定システム

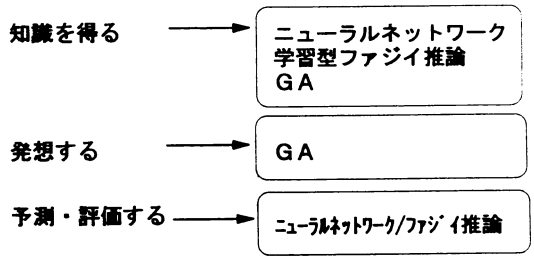


図２ 戦略策定システムとの位置付け

第２は、あらゆる可能性の中から、戦略を発想する必要がある。最後に、発想した戦略の効果を予測し、その発想を評価して、適切な戦略を決定する必要がある。しかし、今日の情報システムの高度化により日々大量に発生するデータから、的確にかつ迅速に対象に対する知識を獲得することは、従来の手法では困難である。また、データの膨大さのため人手よって発想された戦略は、局所的になりやすい。そこで、予測を評価するために、人間が与えていた戦略を、様々な可能性の中から自動的に生成する仕組が必要になってきている。本研究では、知識獲得から発想，予測・評価までを自動的に行うことができるシステムを提案する。システムの概念構成を図１に示す。このシステムは、対象についてのデータから自動的に知識を獲得し、あらゆる可能性の中から発想された戦略を、獲得した知識により評価し、適切な戦略を抽出するシステムである。処理を自動化するために、本システムではＮＮやファジィ推論およびＧＡを用い、それらの役割を図２のように位置付けて利用する。

3 ＳＰ戦略策定システムの概要

本システムは、スキャンパネルデータからＳＰ戦略を生成するためのものである。つまり特定の消費者に対して効果的なＳＰ戦略を自動的に生成するシステムである。企業がＳＰ戦略を策定するためには、標的とする消費者の購買行動の把握が必要不可欠である。しかしながら、購買行動のモデル化にあたっては、ＳＰだけではなく、消費者の異質性や市場の競合状態など多くの変数の影響を受けており[6]、そのモデル化は、従来の方法では困難であった。また、ＳＰ戦略の策定を支援するためには、消費者の購買行動に関する情報を利用して、あらゆる可能性の中から効率的に代替案を生成し、評価できるような仕組みが必要である。

本研究では、ＮＮと学習型ファジィ推論を用いて、消費者の購買履歴が得られるスキャンパネルデータから、消費者の購買行動をモデル化する。ここでは、局所的な知識の獲得にＮＮを利用し、それらの統合に学習型ファジィ推論を用いる。次にＧＡにより発生されたＳＰ戦略の代替案を、獲得された消費者行動に関する知識を用いて評価し、目的に応じたＳＰ戦略を自動的に作成するシステムを構築する。

システムの全体像を図３に示す。このシステムは、消費者の購買行動のモデル化プロセスとＳＰ戦略抽出プロセスの２つプロセスから構成されている。消費者の購買行動のモデル化プロセスは、戦略策定における知識獲得プロセスに相当する。消費者購買行動のモデル化には、ＮＮと学習型ファジィ推論を用いている。このプロセスは大きくわけて、２つのステップになっている。第一ステップでは、スキャンパネルデータから学習パターンを作成する。学習パターンは、消費者の購買属性と購買時のＳＰ状況および各ブランドの選択確率から構成される。第二ステップでは、この学習パターンの消費者の購買属性と購買時のＳＰ状況を入力変数とし、出力を各ブランドの選択確率とするモデルを、ＮＮと学習型ファジィ推論を用いて作成する。これにより消費者の購買行動に関する知識を獲得することができる。

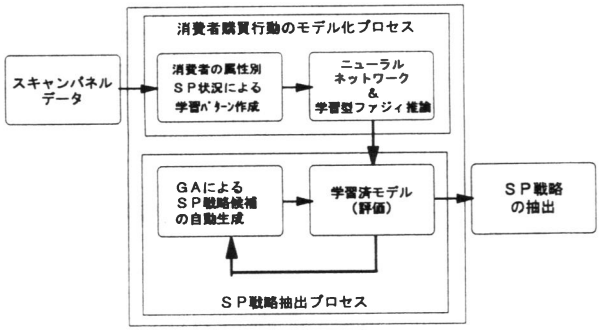


図３ ＳＰ戦略策定システム

ＳＰ戦略抽出プロセスは、戦略策定における発想，予測・評価プロセスに相当する。ＧＡによりＳＰ戦略の候補を自動生成（発想）し、獲得された消費者の購買行動に関する知識により評価することで、適切なＳＰ戦略を抽出するプロセスである。ＧＡでは、従来フィットネス関数は人間が与えていたが、ここではこれを自動的に構成している。すなわち、ＧＡのフィットネス関数のかわりに獲得した知識を用いて適合度を判断している。ＧＡにＳＰ戦略の候補を発想させることにより、人間の経験的発想と異なり、あらゆる可能性の中から戦略を抽出することができる。

3-1 消費者購買行動のモデル化プロセス

ここでの知識獲得は、消費者の購買行動の（モデル）特徴とパターン抽出である。また、データソースとしてスキャンパンネルデータを用いる。このプロセスでは、前述したように、まずスキャンパネルデータから学習パターンを作成する。学習パターンは、消費者の購買属性とＳＰ状況および各商品の選択確率から構成される。モデルは、消費者の購買属性とＳＰ状況を入力変数とし、出力変数に各商品の選択確率を与えることで、因果関係を表わす。入力変数である消費者の購買属性には、表１に示すようにブランドロイヤリティと特売反応性の２つの消費者属性を用い、ＳＰ状況には各商品の値

表１ 入力変数の構成

入力変数		コーディング
消費者属性	ブランドロイヤリティ	0：低い ／ 1：高い
	特売反応性	0：低い ／ 1：高い
ＳＰ状況	値引	0：小さい／ 1：大きい
	エンド	0：無 ／ 1：有

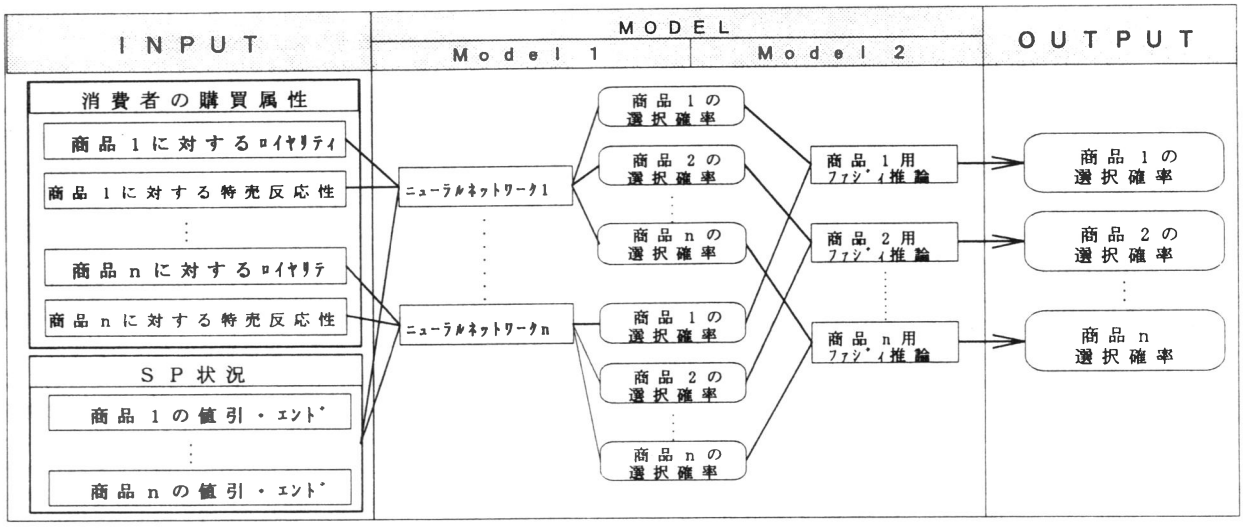


図４ 消費者購買行動プロセス

引の程度とエンドを用いる。ブランドロイヤリティは、一定期間の購買機会のうち各商品をどの程度購買したかで表わす。また特売反応性は、一定期間に購買した時の最高価格で表わす。例えば、対象とする商品数が６個ときの実際のコーディングは、以下のように表わせる。

101000010001 101011101010

これは、前半１２ビットが消費者の購買属性を表わし、後半１２ビットがＳＰ状況を表わしている。例えば１ビット目は、商品１のブランドロイヤリティが高いことを示し、２ビット目は、商品１に対し特売反応性が低いことを示している。また、１３ビット目は、商品１の値引が大きいことを示し、また１４ビット目は、商品１のエンドが実施されていないことを示している。

このプロセスの構成を図４に示す。内部的には、複数のＮＮと、複数のファジィ推論により構成されている。各ＮＮは、それぞれ各商品に対応している。すなわち、商品の数がＮＮの数となる。まず、１つのＮＮには、対応する商品の購買属性と対象とするすべての商品のＳＰ状況を入力とし、各商品の選択確率を教師信号として学習される。すなわち、各ＮＮは各商品単位毎に消費者の購買行動をモデル化している。前述の学習パターンのコーディングを例に、このＮＮの入出力関係を図５に示す。学習パターンは、前述のように２４ビットで構成されている。しかし、実際に１つのＮＮに入力されるビット数は、１商品に対する消費者の購買属性と対象とする６商品のＳＰ状況を合わせた１４ビットである。このようにして１商品単位に獲得された知識を（各々の消費者はすべての商品に対して購買属性を持っているので）統合する必要がある。この知識の統合に、ファジィ推論を用いる。前述の学習パターンのコーディングの商品１を例に、その入出力関係を図６に示す。各商品の購買属性別に、各ＮＮにより出力される各商品の選択確率を、このファジィ推論の入力とし、対象とする商品の購買属性を全て考慮した選択確率を出力とする。本研究で用いるファジィ推論は、学習型ファジィ推論である[7]。

3-2 ＳＰ戦略抽出プロセス

このプロセスは、目的に応じたＳＰ戦略を抽出するプロセスである。ＳＰ戦略を抽出するためには、ＳＰ計画を生成（発想）する必要がある。生成されるＳＰ計画は、あらゆる可能性が考慮されていることが重要である。そこで計画の生成にＧＡを用いる。前プロセスの知識の獲得に用いた学習パターンの入力変数である消費者の購買属性とＳＰ状況を、遺伝子として染色体をコーディングする。例えば、対象とする商品数が６個の場合、前述の学習パターンのコーディング例が、そのままＧＡの個体となる。但し、非現実的な計画は意味をなさないので、ＧＡにより生成された計画を評価する必要がある。そこで、評価に前プロセスで獲得された知識を用いる。従って、今までＧＡのフィットネス関数は、人間が与えなければならなかったが、ＮＮとファジィ推論により獲得された知識を用いることにより、フィットネス関数の構成を自動的に行うことができる。また、遺伝的操作をＧＡの個体の前半部分である消費者の購買属性に行うか、後半部分であるＳＰ状況に行うかにより、抽出される戦略は異なる。例えば、前半の消費者の購買属性に遺伝的操作を行うと、設定したＳＰ計画に対し反応が高い消費者のグループを明確にする戦略が抽出される。しかし、後半のＳＰ状況に遺伝的操作を行うと、ターゲットに設定した消費者グループに対して効果的なＳＰ戦略を抽出できる。つまり、システムのユーザーは、標的の市場ごとにＳＰ計画を策定できる。

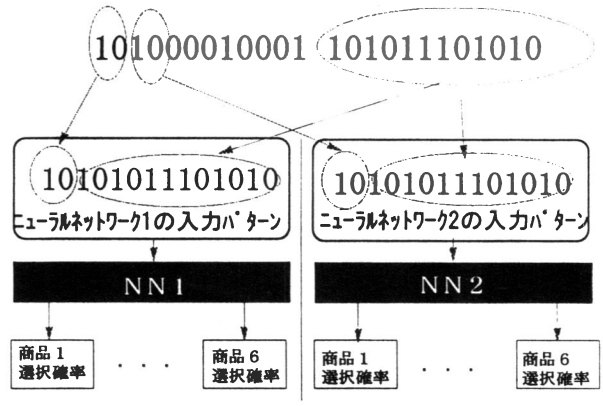


図５ ＮＮの入出力パターン

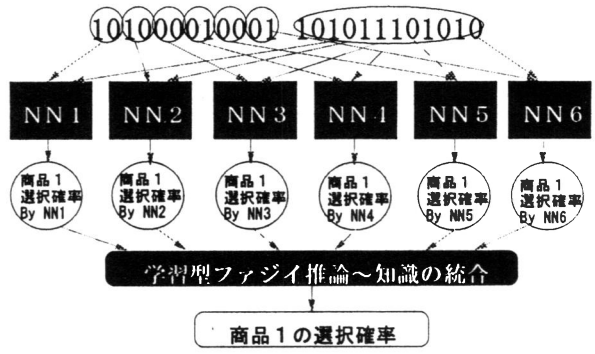


図６ 学習型ファジィ推論の入力パターン

4 インスタントコーヒー販売戦略への応用

4-1 使用データ

今回用いたスキャンパネルデータは以下のとおりである。

対象商品　：インスタントコーヒーの６商品
対象パネル：７９６世帯
データ期間：１９９３年１月～１２月の１年間（学習用）
　　１９９４年１月 ～ ７月の６ヶ月（評価用）

4-2 消費者購買行動モデルの精度

１９９３年１年分のスキャンパネルデータを、前述の通り学習用にパターン化したところ１９４７件となった。モデルの出力値と実績値の平均二乗誤差は 0.003 であり、かなり高い精度のモデルが作成できた。

さらに、モデルの外挿データに対する精度をチェックするため、１９９４年１月～７月までのスキャンパネルデータを用いて検証した。モデルによる各ブランドの出力値と実績値を図７に示す。モデルの出力値と実績値の平均二乗誤差は、0.035 となり、予測に際しても十分汎化能力があるモデルを構成できた。これは、学習用データから消費者の購買行動の特徴が、十分把握できていることを表している。言い換えれば、消費者の購買行動に関して、適切な知識を獲得していることを意味している。

4-3 ＳＰ戦略の生成例

本システムのモデルは、消費者の購買属性別に、各商品の状態や商品間の因果関係を学習している。そこで、例えば普段競合商品を利用している消費者をターゲットに、対象商品を購買させるＳＰ戦略や、対象商品を普段利用している消費者をターゲットに、より確実に対象商品を購買させるような

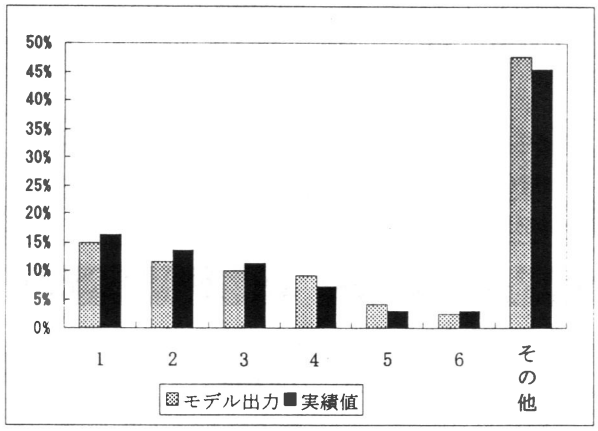


図７　９４年シェアの予測結果

表２　Case1:トップメーカーのＳＰ戦略

	商品１		商品２		商品３		商品４		商品５		商品６	
	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ
1	小	有	小	有	小	無	小	有	大	無	小	無
2	小	有	小	有	小	有	大	有	小	有	小	有
3	小	有	大	無	小	有	大	有	大	無	小	無
4	小	有	小	有	小	無	小	無	小	有	小	無
5	小	有	小	有	小	無	小	無	小	有	小	有
6	小	有	小	有	小	無	小	無	小	無	小	無
7	小	有	小	有	小	無	小	無	小	無	小	有
8	大	無	小	無	大	無	大	無	大	無	小	無
9	小	有	小	無	小	無	小	無	大	無	小	無
10	大	有	小	有	小	無	小	無	小	有	大	無

表３　Case2:競合メーカーのＳＰ戦略

	商品１		商品２		商品３		商品４		商品５		商品６	
	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ	値引	ｴﾝﾄﾞ
1	小	有	小	無	大	無	大	有	小	有	小	有
2	小	無	小	無	小	有	大	無	小	無	小	無
3	小	無	大	無	小	有	大	無	小	無	小	有
4	小	無	小	無	小	無	大	無	小	無	小	無
5	小	無	小	有	大	無	大	無	大	無	小	有
6	小	無	小	有	小	無	大	無	大	無	小	有
7	小	無	小	無	小	無	大	無	小	無	小	有
8	小	無	小	無	小	無	大	無	大	無	小	有
9	小	無	小	有	小	無	大	無	大	有	小	有
10	大	無	小	無	大	無	大	無	小	無	大	有

ＳＰ戦略等、様々な目的に応じた戦略を生成することができる。今回は、トップブランドを普段利用する消費者をターゲットにして、以下の２つのケースの戦略を生成し、抽出された戦略を検証する。

Case1:トップブランドのシェアを、９３年の実績よりも上げるＳＰ戦略を生成する。つまり、より確実にトップブランドを購買させるトップブランドのメーカーにおける戦略といえる。ＧＡの適合度は、トップブランドのシェアで表わす。従って適合度が高いほどトップブランドのシェアが高くなる。トップブランドは、図７の商品１と商品２である。商品１と商品２はサイズは異なるが、同一ブランドである。

Case2:トップブランドと競合しているブランドのメーカーにおける戦略を生成する。つまり９３年の実績より、トップブランドのシェアを下げて、競合ブランドのシェアを上げるＳＰ戦略を抽出する。ＧＡの適合度は、競合ブランドのシェアからトップブランドのシェアを引いたもので表わす。競合ブランドには、図７の商品４を用いる。

4-4 抽出されたＳＰ戦略の吟味

Case1:生成されたＳＰ戦略を適合度が高い順に表２に示す。この結果より、９３年の実績よりもトップブランドのシェアを上げる戦略は、トップブランドの値引を大きくし、エンドを実施することが必要である。さらに２番手ブランド（図７の商品３）の値引を小さくすることも条件の１つであることが明確になった。

Case2:生成されたＳＰ戦略を適合度が高い順に表３に示す。この結果より、９３年の実績よりも競合ブランドが、トップブランドのシェアを奪った上で、シェアを上げる戦略は、競合ブランドの値引が大きく、トップブランドの値引が小さいことが条件である。但し競合ブランドのエンドを実施しなくても、トップブランドのシェアを奪えることが明確になった。従って競合メーカーは、エンドを行わなくても、効果的なＳＰ戦略があることを各店舗に対し要請することができる。

5 まとめ

ＮＮと学習型ファジィ推論およびＧＡを組合わせて、戦略策定システムを構築する方法を示した。本システムでは、局所的な知識の獲得にＮＮを利用して、それらの知識の統合に学習型ファジィ推論を用いている。そして、戦略の発想にはＧＡを用い、個体の評価に獲得した知識を利用している。実際に本システムを適用したところ、予測精度が高いモデルが得られた。さらに異なる目的に応じて、特定ターゲット向けの戦略を抽出することができた。

参考文献

[1]甘利俊一，向殿政男；『ニューロとファジィ』，培風社(1994)
[2]中西祥八郎；『ファジィ推論とニューラルネットワークおよび遺伝的アルゴリズムの融合について』，バイオメカニズム学会誌，Vol. 18, No. 3, pp. 136-143(1994)
[3]市橋秀友，渡辺俊彦；『簡略型ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御』，日本ファジィ学会誌，Vol. 2, No. 3, pp. 429-437(1990)
[4]吉川大弘，古橋武，内川嘉樹；『遺伝的アルゴリズムのプリント基板自動配置への応用』，電気学会論文誌，Vol. 114-D, No. 4, pp. 387-392(1994)
[5]西尾チヅル；『ニューラルネットワークを用いたセールスプロモーション戦略決定支援システム』，東海大学紀要工学部，31-2，PP. 187-195(1992)
[6]恩蔵；『セールスプロモーション研究の発展過程と今後の課題』，早稲田商学，第338，339合併号，pp. 219-248(1990)
[7]A. Itagaki, M. Takashima, Y. Ashino, C. Nishio and S. Nakanishi ；"Fuzzy Inference Systems by Genetic Algorithm and Factor Analysis -Causal Modeling for Multi-variate Complex Systems-", in Proceedings of IEEE Symposium on Emerging Technorogies & Factory Automation, pp. 194-205(1994)

連絡先
〒141 東京都品川区西五反田 7-22-17 ＴＯＣビル
日本ナレッジインダストリ株式会社
シンクファクトリ事業本部
高嶋　守
TEL03-3494-5444（内）231
FAX03-3495-0888

TD3-4

遺伝的アルゴリズムによる腕の形態と投球動作の進化

Evolution of Morphology and Throwing Motion using Genetic Algorithms

宮田 裕次郎　古橋 武　内川 嘉樹
Yujiro MIYATA　Takeshi FURUHASHI　Yoshiki UCHIKAWA
名古屋大学工学部
Faculty of Engineering Nagoya University

Abstract This paper describes an evolution of arm shape and throwing motion using the parallel genetic algorithm. The extensions to the classical genetic algorithms is "local hill climbing for each individual". The evolution of the arm morphology and the throwing motion for throwing a ball under limited link torques is simulated. Then many combinations between the arm shape and throwing motion is obtained.

1 はじめに

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm ; GA) は生物進化の工学的なモデルの一つであり、進化／適応システムの構築に対する有力なツールである。この GA の新しい手法として、筆者等は染色体の局所改善を効率良く行なうアルゴリズムを提案してきた[1],[2]。

本稿では、この局所改善型の GA に山登り法を導入した、新しいアルゴリズムを提案する。各個体それぞれに山登りを行なう手法は既に提案されているが[3],[4]、本手法では各個体の局所ごとに山登りを行なうところに特徴がある。

Karl Sims は仮想生物の形態及び動作の共進化について考察している[5]。本稿では、物を遠くに投げるという動作を取り上げ、物を投げるのに適した形態及び行動を本手法によって進化させる。本手法により、様々な制約条件に応じた形態及び行動が得られることを示す。

2 局所改善型 GA + 山登り法

図 1に本手法の基本的フローを示す。

1. **初期集団の作成**：問題の解を染色体にコーディングし、ランダムに n_{chr}個の染色体を生成する。
2. **遺伝的演算**：各個体に対して、以下のような遺伝的演算を施し、次世代の個体を生成する。
   (a) 細胞レベルの突然変異を考える。まず一個の個体を取り出し、N_p個の部位に分割する。これら各部位が表現する遺伝子にそれぞれ以下のような山登り法を適用する。
      i. 部位のコピーを作り、コピーに対して一定の確率で突然変異を施す。
      ii. コピーをその置かれた環境において評価する。評価は各部位特有の環境による評価と、その個体全体の環境による評価の両方が有り得る。
      iii. コピーの適応度とオリジナルの個体のそれを比較し、適応度の高い方を選択する。
      iv. i に戻る。

      各部位の遺伝子を集約し、新しい個体が生成される。この操作を全ての n_{chr}個の個体について繰り返す。
   (b) **淘汰・増殖**：各個体それぞれの適応度に応じて増減を行なう。各個体の適応度は各部位ごと

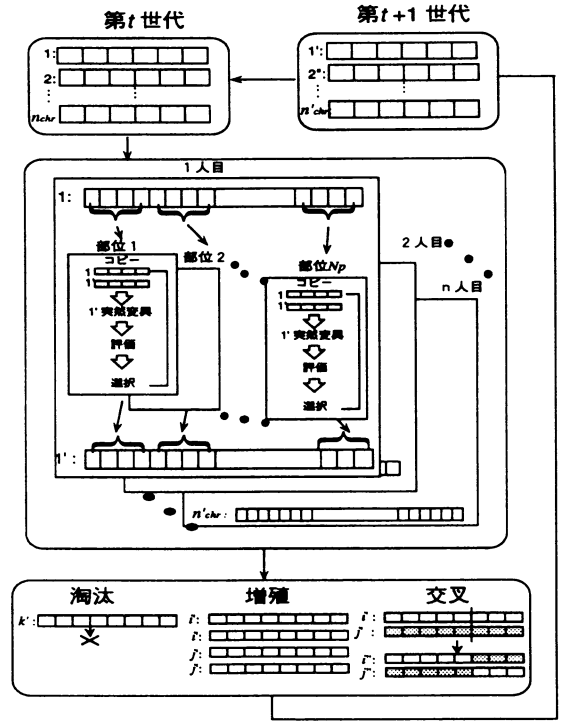


図 1: 局所改善型 GA+山登り法のフロー

の評価値の総和、各個体の置かれる環境での評価値もしくはその両者の和が用いられる。図1においては、個体k'が淘汰され、i'、j'が増殖される。

(c) 交叉： 個体レベルでの交叉を行なう。

この局所改善型GAは山登り法によって速やかに進化が進む。

3 シミュレーション

3.1 投球動作

Fig.2に腕のモデルを示す。腕は3つのリンクで構成されており、リンク1、2、3の長さをそれぞれl_1、l_2、l_3とした。ボールはリンク3の先端にある。腕は$X-Y$平面内を動き、重力は$-Y$方向にかかるものとした。この、各リンクの長さ及び投球方法を遺伝的に決定した。各リンクの重心はリンクの中心にあるとし、その質量は長さに比例させた。今回はリンク1[m]あたり1[kg]の質量を与えた。各関節の長さは0.25[m]から1[m]の間で変化させ、関節1の支持軸は地上から3.5[m]の位置に固定されているとした。

各関節は図3に示すような指令値に対して比例制御を行うものとした。図3において$\Delta d_{ij}(i = 1,2,3, j = 1,\ldots,20)$は関節角の指令値の変化量、$t_j(j = 1,\ldots,20)$は各指令値の継続時間とした。各指令値の継続時間は最大60[msec]とした。

各関節に与える最大トルクは関節1、2、3それぞれに40、30、20 [Nm]とした。

3.2 コーディング

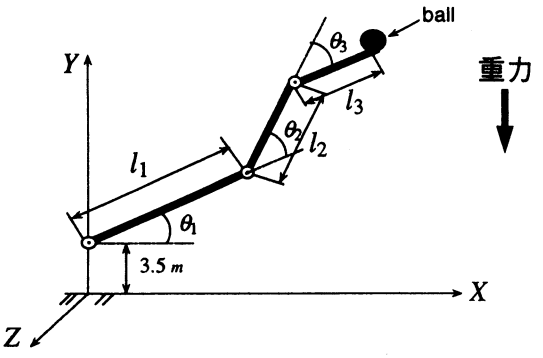


図 2: Three link arm

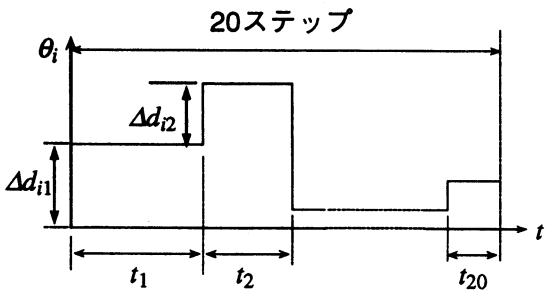


図 3: 指令値

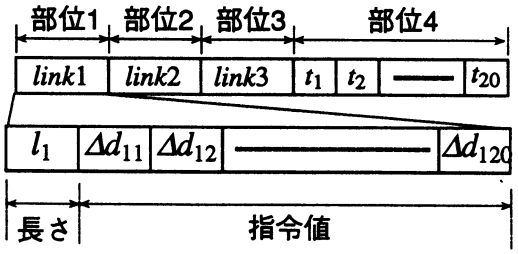


図 4: コーディング

腕の形態及び投球動作をFig.4のように染色体にコーディングした。まず、各染色体は4つの部位からなるとした。部位1、2、3は各リンクの長さと各関節角の位置指令値の変化量で構成される。部位4は位置指令値の継続時間で構成される。

部位1、2、3の1番目の遺伝子座はそれぞれの長さ$l_i(i = 1,2,3)$であり、続く20個の遺伝子座は関節角の指令値の変化量$\Delta d_{ij}(i = 1,2,3, j = 1,\ldots,20)$である。

腕ははじめX軸に平行な状態にあるとした。ボールは20ステップの指令値を与えた後投げられる。各個体の全てのパラメータはランダムに初期化され、$20\times4+3 = 83$個のパラメータを前述の遺伝的アルゴリズムによって決定した。

3.3 遺伝的演算

シミュレーションを行なうに当たって、個体数は30個とした。各個体の各部位に対して山登り法をそれぞれ5回適用した。その後淘汰、増殖、交叉を行なった。淘汰は適応度の低いものから6個の個体を削除し、残りの24個の個体からランダムに4個の個体を増殖し、これらの間で1点交叉を行うことによって新しい個体を生成した。

シミュレーションは300世代まで行った。

3.4 評価

今回評価は2種類設けた。ボールの飛距離のみで評価する場合と、一定距離離れた場所に設置された壁にボールが到達するまでの時間を加味した場合である。従って前者の場合、評価値 f は到達距離 D とし、後者の場合は

$$f = \begin{cases} D & if D < D_w \\ D_w + T/t & if D \geq D_w \end{cases} \quad (3.1)$$

とした。ここで D_w は壁までの距離、T は定数、t[sec] は壁までの到達時間である。今回は $D_w = 20.0$[m]、$T = 30.0$ とした。

3.5 結果及び考察

3.5.1 飛距離による評価

図5にシミュレーション結果を示す。時間は左から右へ、上から下へと経過していく。図中の t はシミュレーション時間を表し、単位は秒である。各時刻の腕のにおいて、支点は白丸で示し、関節は黒丸で示してある。ボールは図の右方向に飛んで行く。評価は飛距離のみで行ない、300世代での飛距離は137[m] であった。

図より、この場合いわゆるアンダーハンドで投球し

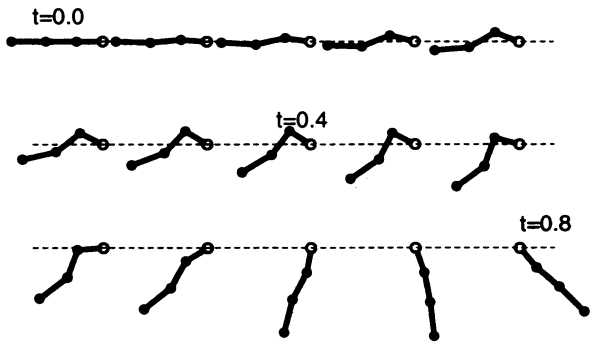


図 5: 腕の動き

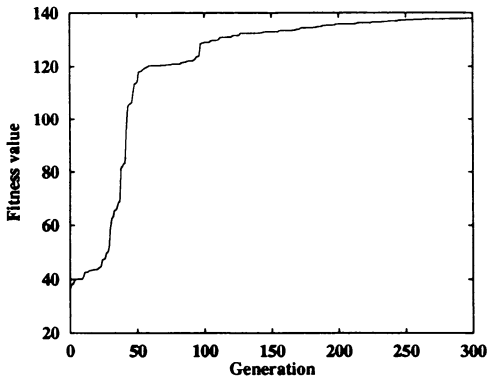


図 6: 適応度の推移

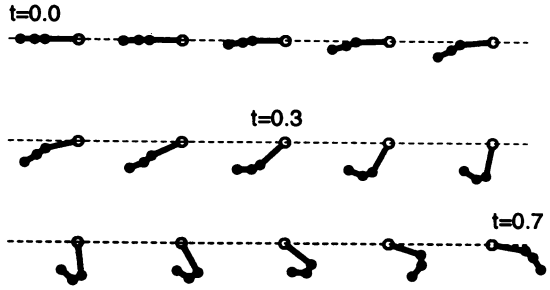


図 7: 腕の動き（トルク半減）

ていることがわかる。そして、ボールが水平から45度前後の角度で飛んでいくタイミングでボールを放している。この時の各リンクの長さはリンク1、2、3、それぞれ 0.74[m]、0.87[m]、0.99[m] であった。

投球動作は、一端、リンク1、2を支点より高く持ち上げ、その落下を利用してより速く腕を回転させている様子が見てとれる。図6は適応度の推移を示す。横軸が世代数で縦軸が適応度、すなわちこの場合は飛距離である。

次に、各関節に与える最大トルクを関節1、2、3それぞれ20、15、10[Nm] とした場合を図7に示す。得られた各リンクの長さはリンク1、2、3 それぞれ 0.97、0.29、0.43[m] であった。この場合も基本的にアンダースローであるが、トルクが半減した分リンク2、3が短くなって腕を軽くし、腕の先を回転しやすくしている様子がうかがえる。そして、各関節に与えるトルクが半減したのでリンク1、2を一旦持ち上げる動作は見られないが、るが、ボールを放す瞬間にスナップを効かせている様子が見てとれる。

3.5.2 壁への到達時間による評価

図8に壁までの到達時間を評価に加えた場合の結果を示す。この時の各リンクの長さはリンク1、2、3、それぞれ 0.68、0.61、1.00[m] であった。この場合もリンク1、2を一旦持ち上げ、アンダースローで投げていることに変わりはないが、ボールを放す瞬間にボールがほぼ水平に飛んでいくように投げている。この時の適応度は 70.0 で式 (3.1) により、0.60[sec] で壁に到達していることが分かる。図9は壁までの到達時間の推移である。34世代目で壁まで到達するようになり、以後到達時間は急速に短くなっている。

3.5.3 重力補償

ここまでで得られた結果はみなアンダースローによる投球であった。これは重力を利用することによって腕の回転を加速するのが合理的であることによる思われる。そこで、各関節に重力補償をするトルクを加え、

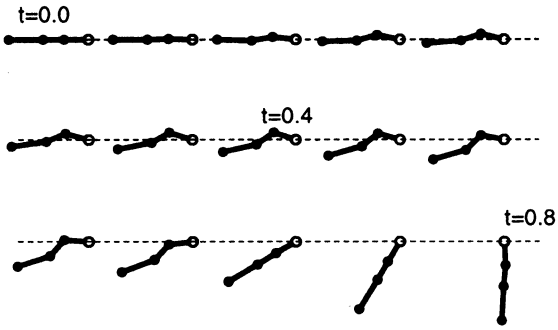


図 8: 腕の動き

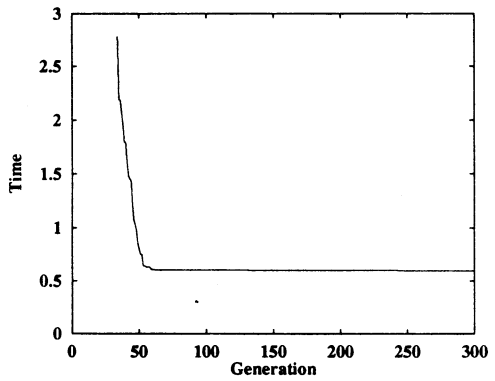


図 9: 壁までの到達時間の推移

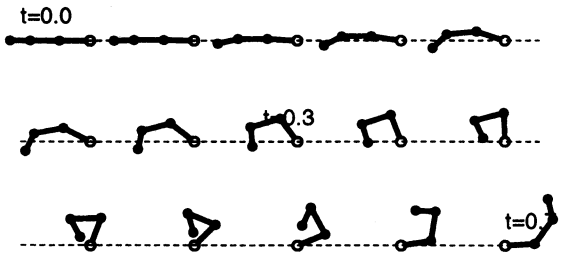


図 10: オーバーハンド

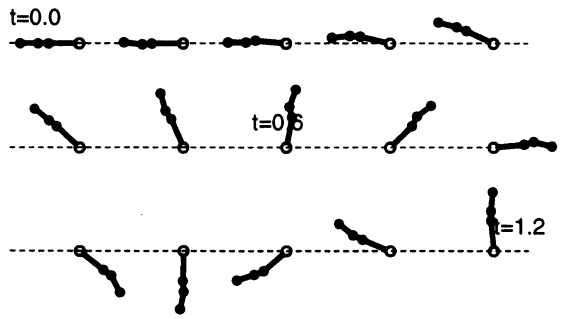


図 11: 回転

重力を無視出来るようにしたところ、図10、図11のようなオーバーハンドもしくは腕を回転させるようなパターンも得られた。

4 まとめ

本稿では局所改善型GAに山登り法を導入した新しいアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムをボールを遠くまで投げるための腕の形態及び動作の進化に適用した。腕の形態及び動作は与えられた条件のもとで様々なパターンのものが得られた。従って、本稿のアプローチは設計支援などに有効であると期待している。

今後の課題としては、局所改善型GA+山登り法の有効性の詳細な検討と、本アプローチの具体的な設計支援システムへの応用などが挙げられる。

参考文献

[1] T.Furuhash, K.Nakaoka, Y.Uchikawa, "A New Approach to Genetic Based Machine Learning and an Efficient Finding of Fuzzy Rules", Proceedings of WWW'94, pp.114-122, 1994

[2] T.Furuhashi, Y.Miyata, K.Nakaoka, Y.Uchikawa : "A New Approach to Genetic Based Machine Learning for Efficient Improvement of Local Portions of Chromosomes", Proceedings of ETFA'95,pp.458-465,1995

[3] H.Mühlenbein : "Parallel Genetic Algorithms, Population Genetics and Combinatorial Optimization", Proceedings of ICGA'89, pp.416-421, 1989

[4] D.E.Goldberg : "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addision-Wesly, 1989

[5] K.Sims : "Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition",Artifial Life IV Proceedings, pp.28-39, 1994

問い合わせ先

〒 464-01 名古屋市 千種区 不老町
名古屋大学 工学部 電子情報学科 内川研究室
宮田 裕次郎
TEL (052)789-2793
FAX (052)789-3166
e-mail miyata@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

TD4-1

ファジィ並列推論のための並列アキテキチャ

Parallel Architecture for Fuzzy Parallel Inference

李相球* 宋正永** 秋月影雄***

Lee Sang-Gu Song Jeong-Young Akizuki Kageo

* 韓國 韓南大學 工學部
Han-Nam University, Korea
** 韓國 忠南産業大學 工學部
Chung-Nam Sanup University, Korea
*** 早稻田大學 理工學部
Waseda University, Japan

Abstract - For the fuzzy logic control, the performance of controller is dependent upon the method of fuzzification, inference and defuzzification. Especially, fuzzy inference method affects the performance of controller greatly, basically requires parallel characteristics and is possible in parallel processing manner. This paper shows a novel SIMD-like parallel fuzzy inference architecture. The proposed parallel fuzzy architecture brought a relatively higher speed-up, compared with the single processor. Also, this parallel fuzzy inference architecture can be used for a system requiring a rapid inference time in real-time system and/or a large expert system that has many inference variables in condition part and consequent part.

1. はじめに

ファジィ論理制御において制御の性能は推論方法にかかっている. 推論方法は制御におけるその性能に多くの影響をおよぼし,根本的に並列(parallel)性をしており,これには並列處理が可能である. 本論文はSIMD方式の並列ファジィ推論architectureに對する研究である

ファジィ論理制御の本となるファジィ論理は傳統的な論理體系より人間の思考と自然言語にみっせつな關係がある. ファジィ論理制御は制御システムの動特性に對する專門家の知識を言語的形式に表現した規則に基づいている.

制御規則は

IF (a set of conditions are satisfied)

THEN (a set of consequences can be inferred)

の形式を取っている.

このような制御規則の集合が知識ベースとなり, 2つの入力と1つの出力を持ったファジィ制御システムの場合, その知識ベースは次の通りである.

R_1 : if x is A_1 and y is B_1 then Z is C_1.
R_2 : if x is A_2 and y is B_2 then Z is C_2.
. .
. .
. .
R_n : if x is A_n and y is B_n then Z is C_n.

ここで, x, y, zは2つのprocess state variableらと1つのcontrol variableを表現しているlinguistic variableらであり, A_i, B_i, C_iはそれぞれuniverse of discourse U, V, Wにおけるlinguistic variable x, y, zのlinguistic variableである. 従って, process state variable數がn個であり, 各 variableに對するm個の linguistic valueがあれば生成可能な最大制御規則數はm^nとなる. また input variableのvalue間の重複されるoverlap factorが 固定されていなければ, 最大の制御規則數のm^nだけを推論するべきである.

従って, このように多くの數の規則を serialな方法に基づいてFAM(fuzzy associative memory)方法でsearchする方法はぼうだいな時間を要するので, 高速なファジィ推論の必要なsystemや大規模のfuzzy expert systemには適切でない.

これゆえに,高速のファジィ推論をなしとげるためには並列處理のためのfuzzy 並列architectureが要求されている.

2. ファジィ推論 の 並列化

ファジィ制御規則における入力變數の數を a, 出力變數の數を b, 全體規則數を Nとするとき, ファジィ推論の並列化方法は Fig. 1のようである.

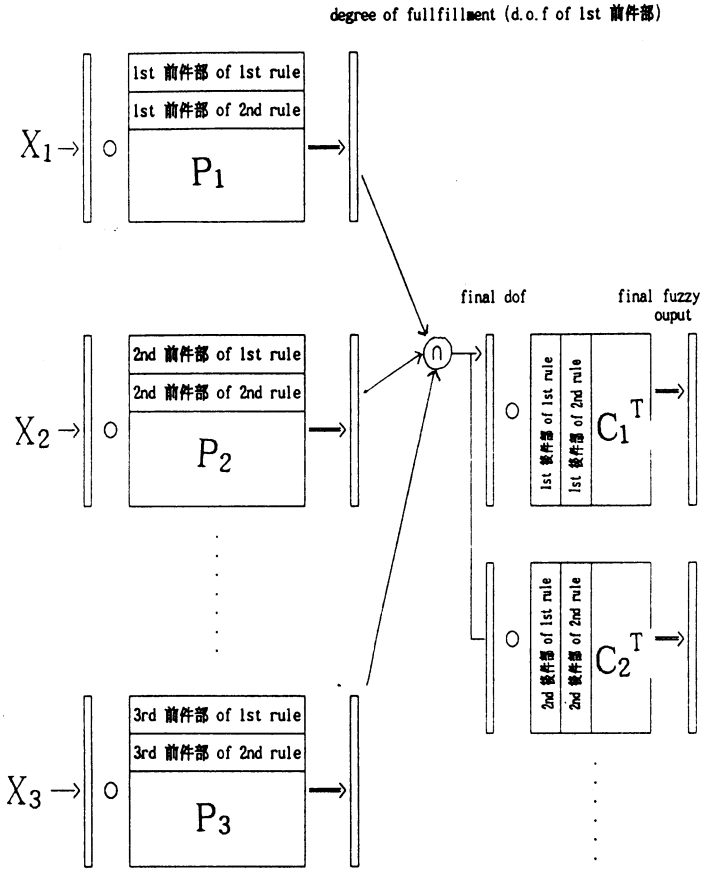


Fig. 1 Parallelization of fuzzy inference

ここでは　FAMの方式とは違って前件部と後件部の變數を獨立させ，それぞれの規則に對し前件部・後件部の變數を並列に推論することになる．ここで○表示はmin, maxの演算を表している．ファジィ化された sensing入力 X_1とP_1を○演算すると，第1回目の前件部の degree of fullfillmentが出てくる．

同様に　X_2とP_2を○演算すると第2回目の前件部のdegree of fullfillmentが出てくる．従って，出力行列はrule數だけのentryを持つことになる．

このような方法を復うと，並列に演算された i 個の degree of fullfillmentを　Min演算を取ると全體規則に對する最終dofが出てくる．これを後件部變數の個數だけbroadcastし，後件部の各變數と○演算を取ると，最終的なファジィ出力が後件部變數の個數だけそれぞれ計算される．

3. SIMD方式のファジィ並列コンピュータの構造

ここでは前節で 述べたファジィ推論の並列化に對するSIMD方式を持つ並列コンピュータの構造について述べる． 提案されたファジィ並列コンピュータ構造はFig.2のようである． 提案されたファジィ並列コンピュータ構造は入力變數，出力變數，規則の數に關係なく一般化された構造となっており，必要になっては簡單に擴張させることが可能である.ここでは入力變數が3個，出力變數が2個，規則數が512個，ファジィ化されたdataは64-bit sizeを持ったsystemと假定されている．

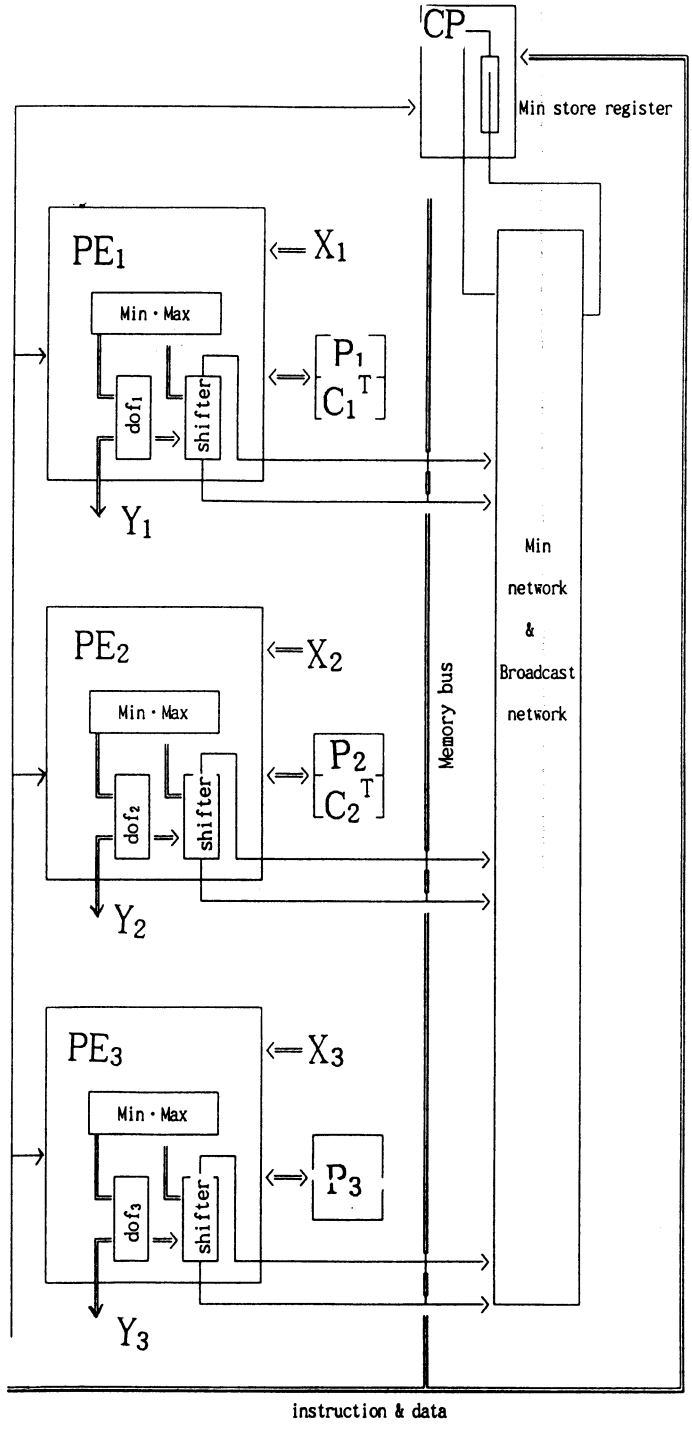


Fig. 2 Fuzzy parallel computer

このようなファジィ並列コンピュータの動作手順は次に示す通りである.

① sensingされた fuzzy化 入力を X_iに貯藏する.(並列)

② X_iとP_iの○演算を實行し,それぞれの後件部の變數に當るdofを 計算する.(並列)

③ それぞれのPE_iで演算されたdofをshift registerにうつす.(並列)

④ それぞれのdofを min演算するためMin networkを 通しbit-wiseで規則數だけの minmum valueを求める.(serial)

⑤ step ④で求またminimum valueが全て求まるとCP (control processor)の Min strore registerに貯藏する.

⑥ CPのMin strore registerに貯藏されたdataをbit-wiseで broadcast networkを通しそれぞれの PE_iにbroadcastする.(並列)

⑦ broadcastされた全體規則の最終 dof とC_i^Tを○演算し, 最終ファジィ outputを求める.(並列)

4. おわりに

實時間處理が要求されるファジィ制御装置における推論段階は制御性能に多くの影響を およぼし,根本的に並列性を要求しており,これは並列處理が可能であることを示した.實際にファジィ推論chipの内部には min, maxの機能を持つblockらが内藏されてはいるが, hardwareが固定されており擴張性がほとんどないのが現實である.

また, 多くのファジィ推論systemはファジィ規則に對し1つのruleを單位として推論の實行を行う. しかし, 高速にファジィ推論を要求するsystemや大規模の專門家systemにおいては實時間内に推論を行えるようにファジィ推論での並列化が必ず必要である

本論文ではファジィ規則前件部と後件部についてそれぞれの變數を並列に推論できるSIMD形式の並列コンピュータの構造を提案した.

このような並列推論コンピュータにおいては前件部變數の最終dof valueを求める時だけ serialに動作し, 他の部分では全部並列に動作するので, single-processorで推論することにより當然高いspeed-upを得ることができる.

参考文獻

[1] Chuen Chien Lee, "Fuzzy logic Control Systems:Fuzzy Logic Controller-part I, II," IEEE Trans. Syst. Man Cybern, vol. 20, No.2, pp.404-435, Mar./Apr. 1990

[2] Michio Sugeno, "An Introduction Survey on Fuzzy Control," INFORMATION SCIENCES 36, pp.59-83, 1985

[3] Nathan Pfluger ,John Yen and Reza Langari, "A Defuzzification Strategy for a Fuzzy Logic Controller Employing Prohibitive Information in Command Formulation," IEEE International Confer. on Fuzzy Systems, 1992.

[4] Ebrahim H. Mamdani, "Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis," IEEE Computer, Vol C-26, No.12, Dec., 1992

[5] Takeshi Yamakawa, "A Fuzzy Inference Engine in Nonlinear Analog Mode and Its Application to a Fuzzy Logic Control," IEEE Trans. on Neural Networks Vol.4, No.3, pp.496-522, May 1993

[6] Tzi-Cker Chiueh, "Optimazation of Fuzzy Logic Inference Architecture," Computer, pp.67-70, May, 1992.

[7] Michael J.Quinn, "Parallel Computing Theory and Practice," McGRAW-HILL,INC, 1994

[8] Harold S. Stone, Tien Chi Chen, Michael J. Flynn, Samuel H. Fuller, William G. Lane, Herschel H. Loomis, jr., William M. McKeeman, Kay B. Magleby, Richard E. Matick, Richard Sites, Thomas M. Whitney, "Introduction to Computer Architecture," Science Research Associates. INC, 1980

[9] Okihiko Ishizuka, hohichi Tanno, Zheng Tang, Hipoki Matsumoto, "Optimum Control Based on Fuzzy Inference and its Simulation," Proceedings of the Int'l Confer. on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp.61~64 , July 1990

[10] Abraham Kandel, Lihong Liand Zhigiang Cao, "Fuzzy Inference and its Applicability to Control Systems," "Fuzzy Sets and Systems 48, pp 99-111, 1992.

[11] M.Sugeno and M.Nishida, "Fuzzy Control of Model Car," Fuzzy Sets and Systems 16, pp.103-113, 1985.

[12] J.Zhou and P.Coiffet, , "Fuzzy Control of Robots," IEEE Interational Confer. on Fuzzy Systems, 1992.

[13] Jacob M.J.Murre, "Transputers and Neural Networks : An Analysis of Implementation Constraints and Performance," IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 4, No.2, pp.284-292, Mar.1993.

[14] Kai Hwang, " Advanced Computer Architecture : Parallelism, Scalability, Programmability," McGRAW-HILL International editions, 1993

[15] L.X. Wang, "Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonliner Systems," IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.1, No.2, pp.146-154, 1993

[16] Kai Hwang, Faye A. Briggs, "Computer Architecture and Parallel Processing,", McGRAW-HILL, 1984

[17] 李相球, "Transputer를 利用한 Fuzzy 推論의 並列化," 韓國Fuzzy System學會誌, 1994.12, vol 4., No.4

[18] 李相球, "Transputer를 利用한 並列 Fuzzy 推論 System에 關한 硏究," 韓南大 論文集, 1994.04

[19] Lee Sang-Gu, "A Parallelizing method of fuzzy Inference," Int. Conf. Parallel And Distributed Computing Systems, 1994.10, Washington D.C., USA

[20] Lee Sang-Gu, "Parallelization of Fuzzy Inference using Transputers," SICE '94, july 26-28. Tokyo, pp. 789-794

連絡先

300-791

韓國 大田廣域市 大德區 梧井洞 133

韓南大學 工學部 電子計算工學科

李 相 球

Tel : 042-629-7551

Fax : 042-629-7658

本論文は韓南大學産業技術研究所のfuzzy情報處理のためのfuzzy computer systemの具現及び應用に關した研究の2次年度研究費支援により修行された.

TD4-2

補間機能を持たせた多入力ファジィ推論回路
Virtual Paging Fuzzy Inference Circuit with Interpolation Algorithm

湯場崎直義　大谷正幸　芦田隆次　易建強　武藤章　石岩
Naoyoshi Yubazaki　Masayuki Otani　Takatsugu Ashida　Jianqiang Yi　Akira Muto　Yan Shi
マイコム株式会社
Mycom,Inc.

廣田薫
Kaoru Hirota
東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

Abstract — "Virtual Paging Fuzzy Inference Board with Interpolation Circuit", which was proposed before, realized its interpolation by using the values of defuzzification. Although it worked well for most of the input data, in some special situations it may make big difference between interpolated results and actual fuzzy inference results. In this paper, we propose a new interpolation method of solving the above stated problem. This method uses the composition results of fuzzy sets in the conclusion part of fuzzy production rules for interpolation. By this method, the interpolated data are almost the same as those obtained directly through fuzzy inference for all the possible cases. Moreover, memory requirement can be decreased a lot compared with that of the previous method. The effectiveness of the proposed method is proved by simulation results.

1．はじめに

仮想ページング方式のファジィ推論法[1-4]は既に報告している。この方式は事前に前件部の全ての組み合わせのファジィ推論結果を用意しておき、ファジィ前件部のデータが確定した時にファジィ推論を行わなくても用意していた結果を引き出すことのみで推論結果を導きだし推論時間を飛躍的に向上させる手法である。しかし、この手法の問題は前件部の項目数が多くなると組み合わせが大きくなり用意しておくデータが指数的に増加する点である。

この問題の改良案として、同じく我々は補間機能を持たせることによってデータの指数的爆発を抑える手法を提案した。[5,6] この手法では、入力条件の代表点の組み合わせの数のファジィ推論結果を用意しておきその代表点から選択した２点と実際の入力との差を補間によって演算する手法であった。この手法では、非ファジィ化データを補間演算に使用しているため演算によって得られる結果と真のファジィ推論結果には差が発生する。また、発火ルールが無い前件部条件の代表点と発火ルールがある代表点間の補間では非発火時の結論に引きずられて真のファジィ推論値とは大きく異なることになる。従ってこの手法ではファジィ推論パラメータの同定の際には、非発火になる条件を作らない様に配慮するなどの制約を加える必要があった。

本稿では、非ファジィ化データによって補間演算を行うのではなくファジィ集合である情報を元に補間を行うことにより補間演算精度を向上させる手法を提案する。また、シミュレーションを行い提案手法の有効性を実証した。

2．提案手法の基本構成

2-1.基本アルゴリズム

提案手法の基本構成を図2-1に示す。

一般的な構成と説明を分かりやすくするためＮ入力１出力のファジィ推論器を考える。例えば出力項目数を増やす場合には、図2-1の構成図のメモリ以降を出力項目数分増やす必要がある。

演算アルゴリズムは図2-1に示すように左から右に行われる。図の詳細な説明をする。

Step 1. 前件部の全ての入力値が確定し、ファジィ推論器に入力される。

Step 2. 各入力項目の代表点を抽出する。（入力値に一番近い代表点２点）
入力項目がＮだから2^N個の代表点が抽出される。

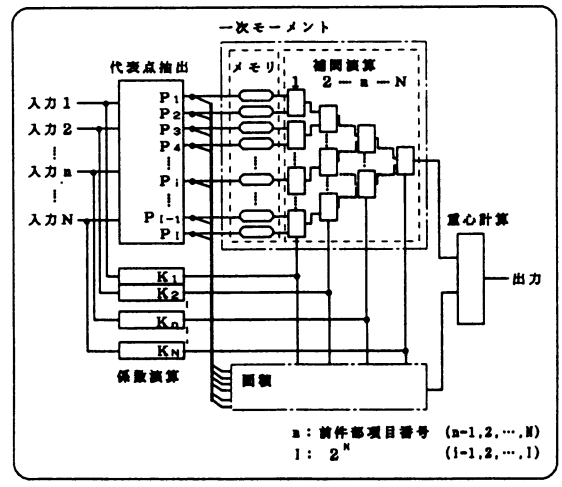


図2-1.基本構成

Step 3. 代表点２点と各入力データとの距離（偏差）を算出し係数K_nを得る。

Step 4. 2^N個の代表点のファジィ推論結論をメモリより読み出す。
この時に非ファジィ化データではなく１次モー

メントと面積データを使用する。

P_i点の１次 ﾓｰﾒﾝﾄ　：$yz_i=\int_Y y\cdot C_i(y)dy$　(1)

P_i点の面積　：$z_i=\int_Y C_i(y)dy$　(2)

P_{i+1}点の１次 ﾓｰﾒﾝﾄ：$yz_{i+1}=\int_Y y\cdot C_{i+1}(y)dy$　(3)

P_{i+1}点の面積　：$z_{i+1}=\int_Y C_{i+1}(y)dy$　(4)

Step 5. Step 4.で得られたデータの内、順に選択した２点(P_i,P_{i+1})および係数K_iで式(5),(6)により第１段目の補間演算し第２段目の補間演算用データを得る。

P_i点とP_{i+1}点の補間

１次モーメント：$yz_q=f(yz_i,yz_{i+1},K_i)$　(5)

面積　：$z_q=f(z_i,z_{i+1},K_i)$　(6)

$(q=1,2,\cdots,I/2)$

代表点はＩ点存在するので、Ｉ／２個のyz_qおよびz_qを得られる。

Step 6. 第ｎ段目の補間演算では前段までに得られたデータによって補間演算を行う。

ここで前段で得られたデータをｓ(s=1,2,…S)とし、係数K_nと式(7),(8)により補間演算する。

１次モーメント：$yz_v=f(yz_s,yz_{s+1},K_n)$　(7)

面積　：$z_v=f(z_s,z_{s+1},K_n)$　(8)

$(v=1,2,\cdots,s/2)$

Step 7. 最終段Ｎでは、前段の演算結果は２個になり求める値（ｙｚ，ｚ）を得る事が出来る。

ここで前段で得られたデータをｗ,ｗ＋１とし、係数K_Nとを式(9),(10)により補間演算する。

求める１次モーメント　：

$yz=f(yz_w,yz_{w+1},K_N)=\int_Y y\cdot C(y)dy$　(9)

求める面積　：

$z=f(z_w,z_{w+1},K_N)=\int_Y C(y)dy$　(10)

Step 8. ｙｚ　とｚ　により制御量ｕを重心法によって求める。

$$u=\frac{yz}{z}=\frac{\int_Y y\cdot C(y)dy}{\int_Y C(y)dy}$$

2-2.補間演算

基本構成のイメージを図2-2に,補間アルゴリズムの概念を図2-3に示す。

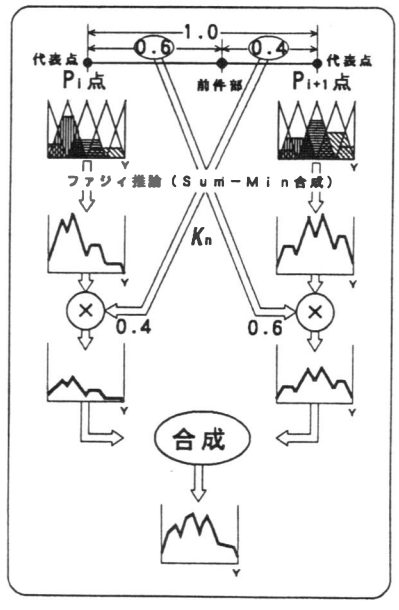


図2-2.基本構成イメージ図

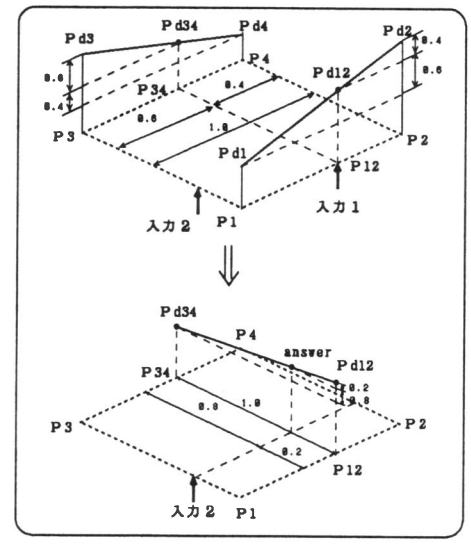


図2-3.補間アルゴリズム概念図

２入力１出力での補間演算のアルゴリズム(図2-3)を例によって説明する。

入力値が確定すると$2^2=4$点(P_1,P_2,P_3,P_4)の代表点が抽出される。この４点を各入力項目の要素毎に分解して補間演算する。

Step 1. 先ず入力１に関する要素で補間演算する。

P_1,P_2間の距離を１．０とし､入力１の値とP_1,P_2との距離はそれぞれ０．６と０．４とする。

P_{d1}とP_{d2}(ここでP_{d1},P_{d2}はP_1,P_2のデータとする)間の１次モーメントと面積データは直線的な変化をしていると仮定してこの間を直線補間し(図2-2)P_{d12}を求める。

同様にP_{d3},P_{d4}間で補間演算しP_{d34}を求める。

Step 2. Step 1.で求めたP_{d12}とP_{d34}から入力２の要素で補間演算する。

P_{12}とP_{34}との距離を１．０とし入力２の値とP_{12},P_{34}間の距離は０．２と０．８とする。

Step 1.と同様にこの間を直線補間し求める値(answer)を得る。

前件部の項目数が２以上の時もこのアルゴリズムを拡張する事で対応できる。

図2-2の例では各代表点でのファジィ推論は加算－論理積合成で行っているが、どのような推論方式であっても提案手法を採用することが可能である。

3．４入力１出力 ファジィ推論器

3-1.ファジィ推論器仕様

	前件部	後件部
項目数	4	1
ラベル数	7(*1)	任意
ビット数	12(*2)	12(*2)
ラベル形状	台形(*3)	任意

表3-1.ファジィ推論器前後件部仕様

(*1):最大７ラベル
(*2):最大１６ビット
(*3):各ラベルのグレードの総和が１になるよう制限

3-2.代表点抽出アルゴリズム

ここではまず各前件部の代表点候補についての定義を説明する。

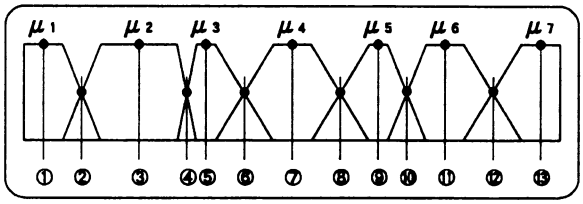


図3-1.代表点候補の概念

前件部のメンバーシップ関数の形状は台形とし、ある台集合上の値Ａに対して各ラベルのグレードの総和は、

$$\sum_{n=1}^{7} \mu n\,(A) = 1.0 \qquad (12)$$

とする。つまり、隣同士のメンバーシップ関数の変曲点の位置は同じになるように制限を行う。また図3-1でラベル数が７ラベルの時①から⑬の１３点を代表点候補とする。

４入力を考えた時各代表点が１３点であるから、全ての代表点の組み合わせは、$13^4 = 28561$通りである。この組み合わせ全てのファジィ推論結果の１次モーメントと面積データを事前に用意しておけば良いことになる。

補間演算時の各代表点と真の入力データとの差の情報は、①，③，⑤，⑦，⑨，⑪，⑬の場合のメンバーシップ関数はグレード１．０の所なので、真の入力データ側の端からの差とするように配慮する。

3-3.ブロック図

図3-2にファジィ推論器のブロック図を示す。

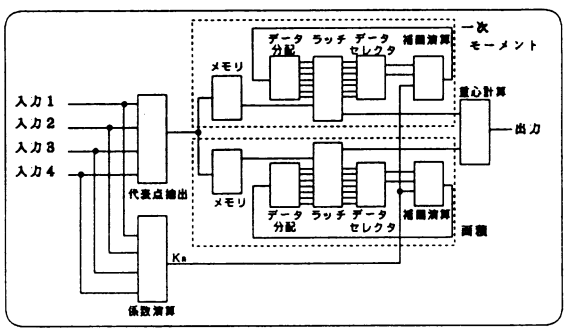


図3-2.ブロック図

補間演算回路はＶＬＳＩなどで実現する場合多くのゲート数(図2-1の補間演算部のように４入力の場合（2^4-１)×２の回路)が必要になる。この問題を解決するために補間演算回路を２回路としタイムシェアリング的に処理する構成とした。

3-4.シミュレーション

図3-2のブロック図の構成で、補間演算が妥当であることをシミュレーションによって検証した。シミュレーションでは、マウンテンークラスタリング手法[7]とニューラルネットワーク手法[8,9]を使用して線形制御パラメータと非線形制御パラメータを各々２種類と３種類作成し、そのパラメータによってシミュレーションを行った。

シミュレーション方法は各入力を１/２００の間隔で推論し、通常の推論結果と提案手法との比較を行った。

Ⅰ.各パラメータを作成するため使用した関数は以下の通り。

ここで Xi(i =1,2,3,4)は各入力項目を表す。

線形関数

1. $y=(3\times X1+0.7\times X2-0.2\times X3+X4+29.2)\div 58.8$ (13)
   $Xi \in [-6,6]$ i=1,2,3,4
   $y \in [-6,6]$
2. $y=3.264(3\times X1+0.7\times X2-0.2\times X3+X4+51)$ (14)
   $Xi \in [0,4095]$ i=1,2,3,4
   $y \in [0,4095]$

非線形関数

3. $y=(3\sin x_1+0.7\times X2^2-0.2\div(1+X3^2)+1\div(1+e^{-X4})+3.2)\div 8.5$ (15)
   $Xi \in [-6,6]$ i=1,2,3,4
   $y \in [-6,6]$
4. $y=16(2\log(X1+7)+0.3\times X2\times X3+10e^{-X4}+40)$ (16)
   $xi \in [0,4095]$ i=1,2,3,4
   $y \in [0,4095]$
5. $y=4(0.00002\times X1^3+3\times X2\div(7+X3)+2\times X4+73.1)$ (17)
   $Xi \in [0,4095]$ i=1,2,3,4
   $y \in [0,4095]$

Ⅱ．各パラメータの作成条件

No.	ラベル形状	ラベル数	
		前件部	後件部
1	三角形	5	5
2	台形	7	7
3	三角形	5	5
4	台形	7	１１
5	台形	7	１１

表3-2.各パラメータの作成条件

共通データ

前件部 ： ４項目 • 後件部 ：１項目
台集合の分解能 ： ４０９６分解能
ルール数 ： １００ルール

Ⅲ.シミュレーション結果

演算誤差 （通常の推論結果と提案手法の推論結果との差）

	1	2	3	4	5
誤差範囲	-46	-73	-116	-159	-99
	+60	+99	+99	+143	+141
標準偏差	1.9993	1.5509	2.1047	4.5549	3.703
平均値	0.0126	0.0028	-0.0015	-0.0852	-0.007

表3-3.誤差範囲

シミュレーションの結果、誤差範囲は(表3-3)出力項目の分解能の幅の 4%以内に納まった。

3-5. 提案手法の特徴

Ⅰ.メモリ容量

仮想ページング方式[1-4]で４入力１出力各分解能１６ﾋﾞｯﾄを実現するためには 式(18)で示すように約１．８×１０^{19}ﾋﾞｯﾄのメモリが必要となる。

$$65536^4 \times 16\text{bit} = 1.844674407 \times 10^{19}\text{bit} \quad (18)$$

本アルゴリズムでは、式(19)で示すように1,377,584ﾋﾞｯﾄのメモリで実現でき、その比率は約１兆分の１の容量と大幅に低減している（式(20)）。

$$(384_{(*1)} + 1280_{(*2)}) \times 4\text{入力} + (13^4 \times 24\text{bit})_{(*3)} \times 2 = 1,377,584\text{bit} \quad (19)$$

$$(1.844674407 \times 10^{19}) \div 1377584 = 1.339064919 \times 10^{13} \quad (20)$$

(*1) メモリアドレス計算用データ （代表点データ）
(*2) 係数作成用データ
(*3) 仮想ページング方式用データ

Ⅱ.実行速度

パイプライン処理により、３２回のメモリアクセス時間内で推論可能であり、アクセスタイム１００nsのROMを使用したときの推論時間は約３２００nsである。その他の処理時間はメモリアクセス時間内で処理可能で、実行時間に影響を与えない。さらに、ルール数も実行時間に影響を与えない。

Ⅲ.使用可能なルール数

無制限でかつ後件部のラベル数の制限はない。

4. まとめ

仮想ページング方式[1-6]における新たな補間演算方法によって、同方式の問題点を解消しかつ補間による誤差も６種類のシミュレーション結果より実用レベルにある。提案手法は最終段の非ファジィ化演算をパスして１次モーメントと面積で出力すれば、複数のファジィ推論結果を統合することが可能なので多入力１出力のファジィ推論器も容易に実現が可能である。

また、複数のファジィ推論結果に重みを加えた学習型ファジィ推論器への展開も行える。[10]

今後、提案手法のＶＬＳＩの設計およびそのＩＣを搭載したファジィ推論器の設計を予定している。

参考文献

[1] H. Arikawa, K. Hirota: "Fuzzy Inference Engine by Address-look-up Paging Method", Proc. International Workshop on Fuzzy System Applications, Iizuka Japan, pp.45-46, 1988.

[2] H. Arikawa, K. Hirota: "Virtual Paging Fuzzy Inference Chip & Fuzzy Work Station as Emulation Enviroment", Proc. The 28th SICE Annual Conference, Matsuyama Japan, pp.1351-1354, 1989.

[3] 廣田監修，大谷：「ファジィ制御技術と応用 第３章 開発環境～ファジィ制御応用製品の開発支援システム事例」，㈱トリケップス，pp.81-92, 1990.

[4] 廣田編著，大谷：「ファジィ技術の実用化応用 第４章 ファジィ開発ステーションとファジィ推論プロセッサ」，シュプリンガー・フェアラーク東京㈱，pp.55-83, 1992.

[5] M. Otani, T. Ashida, S. Hachisu, N. Yubazaki, K. Hirota: "Fuzzy Inference Engine Board Using Virtual Paging Fuzzy Chip & Interpolation Circuits", Proc. NAFIPS'90, Tronto Canada, pp.25-28, 1990.

[6] 大谷，芦田，蜂巣，廣田：「補間機能を持たせた多入力ファジィ推論ボード」，第６回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，東京，pp.283-286, 1990.

[7] R.R. Yagar and D.P. Filev, "Generation of fuzzy rules by mountain clustering", Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, Vol.2, pp209-219, 1994

[8] H. Ichihashi, "Iterative fuzzy modeling and a hierarchical network", Proceedings of the Fifth IFSA Congress, Vol. Engineering, Brusserls, pp.49-52,1991

[9] S. Araki, H. Nomura, I. Hayashi and N. Wakami, "A self-generation method of fuzzy inference rules", Proceedings of IFES'91, Japan, pp.1047-1058, 1991

[10] N. Yubazaki, M. Otani, T. Ashida, K. Hirota: "Dynamic Fuzzy Control Method and Its Application to Positioning of Induction Motor", Proc. The International Joint Conference of The 4th IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The 2nd International Fuzzy Engineering Symposium, Yokohama Japan, pp.1095-1102, 1995.

[11] 水本，仲田，有川：「多入力ファジィシングルトン型推論法に対する回路設計」，第１０回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，大阪，pp.67-70, 1994.

[12] Y. Nitta, K. Shimomura, N. Sakashita: "A High Performance Fuzzy Inference Processor", Proc. The International Joint Conference of The 4th IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The 2nd International Fuzzy Engineering Symposium, Yokohama Japan, pp.1613-1620, 1995.

連絡先
〒616 京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町12
マイコム株式会社 中央研究部
芦田隆次
TEL 075-882-3601（代）
FAX 075-882-6531

TD4-3

有機物の堆肥化を目的とする処理システム構成のための検討

An Automatic Fermenting and Drying System for Organic Waste Matters

松永隆昌* 酒井義郎**
Takamasa Matsunaga Yoshiro Sakai

* 宇部テクノエンジ株式会社 UBE Techno Eng.CO.,LTD
** 山口大学工学部 Yamaguchi University

Abstract — Generally, the animal and vegetable waste is disposed of by fire. Recently, we asked for a new system to make better use of valuable natural resources. In this paper, we will tell you about a new equipment and process for disposing of animal and vegetable waste. This system is to automatically ferment and dry organic waste materials, rather than dispose of them by fire. The equipment first ferments and then dries the material automatically. We monitor the efficiency of the equipment and process at the enterprise.

1．まえがき

われわれの日常生活では様々な物資が消費されている。その内、最も基本的な消費物資である動物性や植物性食品廃棄物に魚肉、野菜くず等がある。また加工食品の製造時にも多くの不可食部が発生し、これらのほとんどが利用されること無く焼却処理されている。市町村によって回収され焼却処分される一般廃棄物の量が年々増え、焼却設備を含めた回収及び処理コストも年々増大している。このため、ゴミとして排出し焼却するだけの処理方法から資源を捨てないで有効に使う必要性が叫ばれている。今まで堆肥化の方式、装置が提案されてきたが、広く普及していないのが現状である。堆肥化の装置が普及していない理由を整理してみると、その処理所要時間が長いこと、さらに処理対象がゴミであることから悪臭や汚物感があることである。従って、処理装置に求められる要件は、短時間に大量の廃棄物を処理でき、かつ処理物の悪臭や汚物感を減少し扱いやすくすることである。

そこで、本研究では有機廃棄物を焼却処分せず、土壌微生物による堆肥化と汚物感の減少を目的とした乾燥を連続して行う処理機の開発を目指して、発酵から乾燥までの一連の処理システムの基本構成について検討した。特に処理作業に要するコスト（人件費）を低減するために運転の自動化を目指した。

2．有機肥料の効果について [1) 2) 3) 4)]

土壌中の有機物は植物の生育を促進するために重要な役割を担っている。この有機物濃度の低下に伴う地力の低下を補い農業の生産性を維持するために、有機肥料は有効であるといわれている。有機質廃棄物を貴重な資源として活用する方法に土壌微生物を利用した堆肥化の方法がある。堆肥（コンポスト）とは人工的に作られた腐植のことで、その有効性はつぎのように分類される。

①農作物に対する肥料成分のバランスが良く、長期にわたって養分の放出がおこなえる。
②堆肥化処理中の高温により、有害な生物や病原菌・雑草の種子等を死滅させる。
③有害ガスの発生がすくないため、発芽発根に対する影響が少ない。
④土の団粒構造を促進し、通気性や透水性が改善され保水性も高まる。
⑤悪臭や汚物感が減少し扱いやすくなる。

有機物を単に乾燥させたものは植物に与える害が大きいので、発酵処理は必要である。以上のことをふまえておこなった発酵および乾燥実験を紹介する。

3．発酵実験

実験用発酵槽を使った発酵実験を行った。以下、実験の結果をまとめた。発酵に影響を与える要因は ① 発酵過程 ② 発酵時間 ③ 発酵環境 ④ 発酵菌 がある。

①発酵過程 [4)]

発酵熱の時間変化は次の４段階に区分できる。

- ・誘導期（中温菌活動期）
- ・発酵加速期（高温菌活動期）
- ・発酵減衰期
- ・発酵持続期

② 発酵時間

運転開始後、誘導期と加速期を経過し発酵減衰期に移行した時点を発酵の第１段階としこれを一次発酵という。

③ 発酵環境

発酵時発熱するがその温度のピークは約７０℃である。発酵槽の環境温度は４０－５０℃が良く、最初から７０℃にしても発酵しない。発酵は誘導期（中温菌活動期）を経て発酵加速期（高温菌活動期）に移行する。

④ 発酵菌

原料から培養した菌を循環使用すると誘導期がきわめて短くなる効果が得られた。実験結果から発酵の経過は温度変化によって判断でき、仕込後約２日位で温度がピークに達した後、温度が下降しはじめることを確認した。これを一次発酵呼び、本研究では処理物の悪臭が減少し植物への害が少なくなる一次発酵を終了した時点で乾燥工程に移行させた。一次発酵によって得られた有機肥料の効果および害を調べるために栽培試験をおこない、実験結果から一次

発酵を経過すれば、植物に与える害は少ないことを確認した。

4．乾燥実験 [5)6)]

発酵後の有機物の腐敗を防ぎ、保存及び取扱いを容易にする目的で乾燥処理をおこなった。乾燥装置は傾胴型回転乾燥機を用いた。傾胴型回転乾燥機は、一端部に処理物を投入及び排出する開口を有し、この開口側を上方にして傾斜させた傾胴型乾燥装置である。処理槽の回転方向を変えるだけで処理槽内の処理物の攪拌と排出とを容易に行える。ドラムが傾斜しているため、処理槽の容積に対する処理物の投入量を多くできて処理効率が向上するとともに、ドラムに供給された熱風と処理物から発生したガスを排気ダクトなどの排気装置を設けることなく容易に排出できる。実験に用いた傾胴型回転乾燥機の構造を図１に示す。

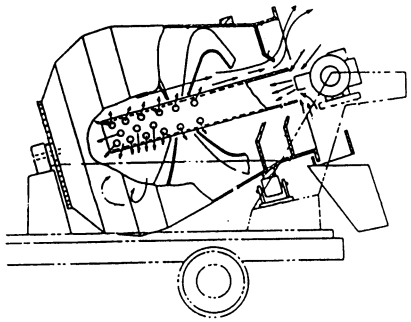


図１　傾胴型回転乾燥機の構造

乾燥実験の結果、運転開始してから約３０分経過後処理物の温度が平衡状態に達した。次に熱風発生装置に使用した灯油バーナーの開度を変化させた時の乾燥時間と処理物の水分変化を測定した。乾燥工程へ移行する時点の水分を３０及び５０％について測定した。乾燥運転を、乾燥前の含水率とバーナー開度のそれぞれについて二種類、従ってそれらの組み合わせとして計４通りの条件についておこなった。

$$\text{運転条件} = \begin{vmatrix} \text{乾燥前の含水率} \\ u \fallingdotseq 50\% \\ \text{乾燥前の含水率} \\ u \fallingdotseq 30\% \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \text{バーナー開度} \\ \text{最大開度} v_{max} \\ \text{バーナー開度} \\ \text{最小開度} v_{min} \end{vmatrix}$$

各条件下での運転時間ｔと含水率ｘとの関係ｘ（ｔ；ｕ、ｖ）、（ただしｕは初期含水率、ｖはバーナー開度）は線形性が高く、最小自乗法により次の関係が得られた。

運転条件１

$x(t;50, v_{min}) = -0.08t + 45$

運転条件２

$x(t;50, v_{max}) = -0.12t + 46$

運転条件３

$x(t;30, v_{min}) = -0.08X + 39$

運転条件４

$x(t;30, v_{max}) = -0.12X + 36$

図２、図３は運転条件１から運転条件４のそれぞれの条件におけるグラフである。上記の結果を利用して、他の運転条件下（$30\% \leqq u \leqq 50\%$、$v_{min} \leqq v \leqq v_{max}$）におけるｘ（ｔ；ｕ，ｖ）の推定法について検討した。まず、上記の結果から直接的に得られることとして次の仮定が成り立つ。①最小及び最大開度での水分変化は、ほぼ比例的に変化する。同時に、②最小と最大開度の間で次の仮定、ｘ（ｔ；ｕ、ｖ）の傾きの差はそれほど大きくない。

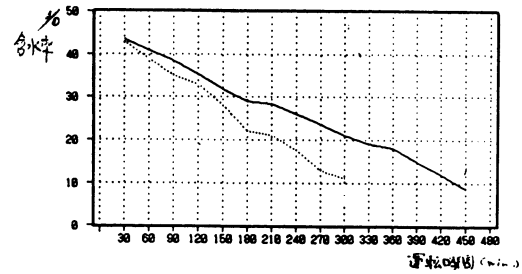


図２　運転条件１、２の含水率変化

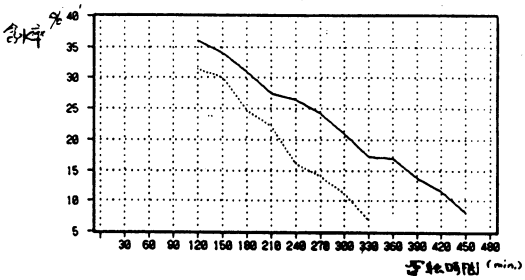


図３　運転条件３、４の含水率変化

仮定②は、処理物に実質的に供給される熱量がバーナー開度に比例するという条件の下に成り立つ。①と②から、最小と最大開度の間の中間的な任意開度における傾きは比例的に求めることができる。

いま、ａ（ｕ，ｖ）＝初期含水率ｕの時、バーナー開度ｖで乾燥を開始した場合の含水率変化の傾きの絶対値とすると、含水率変化の一般式は、

$x(t;u, v) = -a(u, v)\,t + u$　— (A)

となる。実験の結果から、バーナーの開度が最大と最小の場合について、初期含水率に関わらず水分変化の傾きは同じであるから式(1)が成り立つ。任意の初期含水率ｕ、ｕ'について

$a(u, v_{max}) = a(u', v_{max})$

$a(u, v_{min}) = a(u', v_{min})$　— (1)

式(1)及び性質②の最小と最大開度の間で、傾きの差がそれほど大きくないことから　$v_{min} \leqq v \leqq v_{max}$　を満たす任意のｖについて

$a(u, v) = a(u', v)$　— (2)

ｕ＝ｕ'を仮定できる。したがってａはパラメータｕをはずして単に　ａ（ｖ）　— (2)'

と書くことができる。これは初期含水率が異なってもバーナー開度が同じなら傾きも同じことによる。

いま、同一のｖの下に

$x(t;u_0, v) = -a(v)\,t + u_0$　— (3)

$x(t;u_1, v) = -a(v)\,t + u_1$

の二つの変化を想定するとき（ただし$u_0 >= u_1$）、図４に示すｔ*は

$$t^* = \frac{u_0 - u_1}{a(v)} \quad \text{— (4)}$$

として得られる。図４は任意の含水率とその乾燥時間の関係を表す。

以上の乾燥実験から、乾燥開始時の初期含水率を初期データとすると、バーナー開度を制御することによって乾燥時間を推定できる。言いかえれば、乾燥運転開始時の含水率から、目標含水率に達する所要運転時間を推定できる。

以下にその推定方法を示す。バーナーの開度を中間的バ

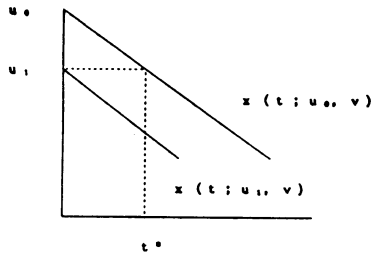


図４　任意含水率とその乾燥時間

ーナー開度v_{mid}とする。乾燥固体（１０－２０%の間を目標とする含水率を持つ固体）の重量w_d、初期重量$w(_0)$とするとき初期含水率uは

$$\text{初期含水率} = \frac{w(_0) - w_d}{w_d} = u \quad \text{—— (7)}$$

と表せる。時刻tにおける重量w（t）とするとき時刻tにおける含水率はuと同様に

$$x(t ; u, v_{mid}) = \frac{w(t) - w_d}{w_d} \quad \text{—— (8)}$$

と表せる。時刻tにおける含水率　x（t；u、v_{mid}）は式(A)、式(2)'　により

$$x(t ; u, v_{mid}) = -a(v_{mid})\, t + u$$

式(7)、(8)をこれに代入して

$$\frac{w(t) - w_d}{w_d} = -a(v_{mid})\, t + \frac{w(_0) - w_d}{w_d} \quad \text{— (9)}$$

を得る。(9)式の両辺にw_dを乗じて

$$w(t) = -w_d a(v_{mid})\, t + w(_0) \quad \text{—— (10)}$$

ゆえに

$$w_d = \frac{w(_0) - w(t)}{a(v_{mid})\, t} \quad \text{—— (11)}$$

を得る。

実際には$w(_0)$、w（t）の値には雑音が混入するためw_dは時刻t_1、t_2、---、t_nにおけるw_dの計算値。w_{d1}、w_{d2}、---、w_{dn}の平均値$w_{dav.}$は

$$w_{dav.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} w_{di} \quad \text{—— (12)}$$

となる。これを乾燥固体の重量w_dとする。図５は運転開始後の時刻tにおける含水率の変化を表した図である。この関係から次のような制御ができる。目標運転時間に乾燥を終了させるための自動運転を行う。初期重量w（$_0$）、時刻tにおける重量がw（t）であるとき、初期含水率を４０%と仮定すると、w（$_0$）とw（t）から時刻tでの含水率を推定する。つぎに目標とする水分変化直線からのズレを求める。このズレを少なくするように燃焼バーナーの開度を調整する。こうして目標の運転時間内に乾燥を終了できる。また目標とする最終乾燥含水率によって運転時間が変化する。乾燥中の水分変化は、傾胴の支持部にロードセルを取付、重量を計測する。

５．有機物処理システムの検討

先に述べたように、処理装置に求められる要件は、短時間に大量の廃棄物を処理でき、かつ処理物の悪臭や汚物感を減少し扱いやすくすることである。

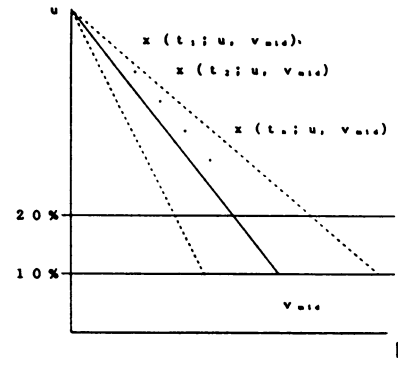


図５　運転時間に対する目標水分の変化

本研究は前記の堆肥化の問題点を解決し、工業的に堆肥化することをめざす。有機廃棄物を単に乾燥するだけでなく、土壌微生物による堆肥化と汚物感の減少を目的とした乾燥を連続して行う高速処理機の開発を目指す。有機物処理システムの制御構成を図６に示す。

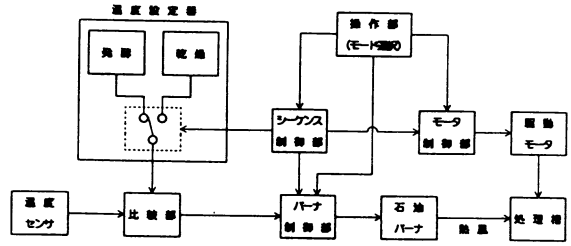


図６　有機物処理システムの制御構成

傾胴型回転乾燥機を発酵槽として使用し、一次発酵が終わった時点でそのまま連続して乾燥工程に切り換える。発酵乾燥処理機はドラム構造であり、ドラムの回転によって内部の有機物の撹拌が行え、さらにドラム後部から与える熱量を操作することによって発酵と乾燥に適した給熱ができるようにした。使用目的によって発酵槽または乾燥機としての単一使用も可能である。発酵または乾燥の運転に応じたバーナーの開度を自動的に調整する。発酵時は処理物の温度を検知し、その温度をほぼ一定に保つようにバーナーの運転と停止を自動的におこなう。

乾燥工程は目標運転時間を設定後、バーナーの開度を自動的に操作し供給熱量を変化させる。処理物の処理過程は水分変化を計測し判断する。ドラムの支持部に荷重計を取付け、発酵乾燥時の水分蒸発量から発酵と乾燥具合を判断する。

乾燥時の自動運転制御方法

乾燥運転開始後、初期水分率を推定し目標運転時間で乾燥を終了させるために、バーナーの自動開度調整をおこなう。このために乾燥運転開始後、運転所要時間を推定する。初期含水率は式(7)および式(8)より推定できる。

$$x(t_n ; u, v_{mid}) = -a(v_{mid})\, t + u \quad \text{— (8)'}$$

t_nは運転開始後の任意の時間である。式(8)'に乾燥終了時における含水率の目標値u_g、目標運転時間t_gを代入すると、運転時間と含水率変化の必要な傾きa^*が求まる。

$$a^* = \frac{x(t_n ; u, v_{mid}) - u_g}{t_g - t_n}$$

式(6)に代入すると

$$a^* = a_{v_{min}} + \frac{v^* - v_{min}}{v_{max} - v_{min}} (a_{(v_{max})} - a_{(v_{min})})$$

となる。この関係式から傾きa*になるバーナー開度v*は

$$v^* = v_{min} + \frac{a^* - a_{v_{min}}}{(v_{max} - v_{min})(a_{(v_{max})} - a_{(v_{min})})}$$

で求めることができる。図7に運転時間と含水率の関係図を示す。

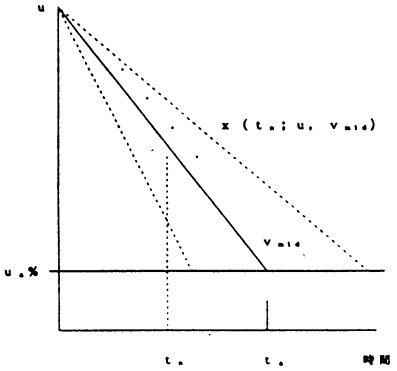


図7　運転時間と含水率の関係

運転時、制御目標の傾きa*と一致するようにバーナー開度を制御する。以上の関係はバーナーの開度変更後に含水率の変化が遅れることなく追随することを前提にしている。実機においては| $v^* - v_{mid}$ | が 大なら遅れが大、中なら遅れは中、小なら遅れも小であるのでこれらの制御遅れを考慮し、バーナーの開度を少し大きめまたは少し小さめに操作する。なお乾燥運転開始後の運転所要時間を推定する場合は、$u_s = -a\ (v_{mid})\ t_s + u$ の関係から目標時間t_sが求まる。

$$t_s = \frac{u - u_s}{a\ (v_{mid})}$$

しかし、実際の運転においては投入物のサイズや投入量の違いによって乾燥時間の特性が異なってくる。マニュアル運転時、運転者は経験的に次のような判断及びバーナー調整を行う。投入物の塊の大きさが大きい場合は乾燥時間が長くなり、逆に粉体の場合短くなる。加えて投入量が多い場合は乾燥所要時間が長くなり、少ない場合短くなる。処理物と処理量から次の関係が得られる。

IF塊サイズ＝大 THENバーナ開度＝少し大きめ（1）
IF塊サイズ＝中 THENバーナ開度＝標準　　（0）
IF塊サイズ＝小 THENバーナ開度＝少し小さめ（－1）
IF投入量　＝大 THENバーナ開度＝少し大きめ（1）
IF投入量　＝中 THENバーナ開度＝標準　　（0）
IF投入量　＝小 THENバーナ開度＝少し小さめ（－1）

これらの関係から、乾燥開始時のバーナー開度設定値は塊のサイズと投入量から得られたバーナー開度の加算によって求められる。 また乾燥運転過程における開度変更量は次式でバーナー開度を変更する。

$$\text{開度変更量} = (|\Delta V^*| + \left\{\begin{matrix}\Delta V_b \\ \Delta V_m \\ \Delta V_s\end{matrix}\right\}) \cdot \mathrm{Sign}\ (\Delta V^*)$$

表1　ファジィルール

		投入物サイズ		
		S	M	B
投入量	S	PB	PS	Z
	M	PS	Z	NS
	B	Z	NS	NB

S:Small
M:Middle
B:Big
NB:Negative Big
NS:Negative Small
Z:Zero
PS:Positive Small
PB:Positive Big

6．まとめ

有機物を堆肥化する場合には単に乾燥したものに比べ発酵処理したものが有効である。処理物の品温を計測することによって発酵の進行具合を推定できる。初回の温度上昇後、数日で温度が下降し始めるが、これが1次発酵であり植物に大きな害を与えない堆肥となる。以降は腐敗しないよう乾燥すれば扱いやすい肥料ができる。本研究で、発酵と乾燥を一連の処理システムに構成した結果、動物性や植物性食品廃棄物を短期間に堆肥化する処理システムを構成できた。工業的に廃棄物を処理する場合コスト低減が必要条件であり、省力化をめざした自動運転の機能が有効である。今回、乾燥時の温度管理や目標運転時間の設定等、自動運転のシステムを構築した。

7．今後の課題

食品廃棄物は種類によって形状や含水率が異なり、その発酵及び乾燥の適正温度も異なる。今回の研究は魚、醤油糟の処理を主におこなった。制御としては基礎的な範疇である。今後、様々な処理物で評価実験を重ねてルール、メンバーシップ関数を改良し、入力である処理物の物性をファジィ評価後、発酵・乾燥処理する実務レベルのシステムを構築したい。

謝辞

発酵・栽培実験においてご協力頂いた宇部サイコン（株）新事業開発室藤岡健二氏、乾燥実験にご協力頂きました環境グループ横田信次郎氏に深く感謝致します。

参考文献

1)松崎敏英：「土と堆肥と有機物」、社団法人　家の光協会（１９９２年）
2)山口辰良：「一般微生物学」、技報堂出版株式会社（１９８７年）
3)渡辺　巌：「田畑の微生物たち」、社団法人農山漁村文化協会（１９８６年）
4)小林達治ほか農山漁村文化協会編集部：「有機物を使いこなす」、社団法人農山漁村文化協会（１９９３年）
5)社団法人　化学工学協会編集：「化学工学便覧」、丸善株式会社（１９８８年）
6)木村　進：「乾燥食品事典」、朝倉書店（１９８４年）

連絡先
〒755 山口県宇部市小串沖の山１９８０番地
宇部テクノエンジ（株）開発グループ
松永　隆昌　　TEL 0836-34-5080

TD4-4

FPGAを用いたリコンフィギャブル・ファジィコントローラの設計

A Reconfigurable Fuzzy Logic Controller Used FPGA

神酒　勤　　渡部 英生　　山川　烈
Tsutomu MIKI　　Hideo WATANABE　　Takeshi YAMAKAWA

九州工業大学情報工学部

Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract- The construction of fuzzy system is strongly dependent on its applications, so that a flexible hardware system is desirable to realize an effective one. This paper describs a reconfigurable fuzzy logic controller using FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) . The system has the following advantages: 1) the appropriate system can be programmed for each application, 2) a hardware debugging is available, 3) the system is dynamically reconfigurable, 4) high-speed operation equal to a custom LSI is realized.

1 はじめに

近年ファジィ制御は広く産業界へ普及し一般的な技術として応用されている. その応用の多くはノイマン型プロセッサを用いたソフトウェアによる処理である. ソフトウェアによるファジィシステムの構築は可能であるが必ずしも最適とは言えない. それはファジィ処理が並列アーキテクチャで連続値を扱うことに起因する. そこで, 効率的なファジィシステムを構築するために専用のファジィハードウェア, いわゆるファジィ推論チップが開発された [1][2]. しかし, これらの多くはハードウェアであるがため, 仕様が固定されるという欠点を持つ. 一方, 実際のファジィシステムはアプリケーション毎に入出力数, 推論法等の仕様が多種多様であるため, これらのハードウェアで対応することは難しい.

そこで本研究では, 最近話題となっている, ユーザがプログラム可能なデバイスである,FPGA(Field Programmable Gate Array) を利用し, ファジィコントローラの ASIC 化を試みる. FPGA を利用することで, ハードウェアの高速性を維持したまま, ソフトウェアの柔軟性を持たせることができ, 制御対象に応じた最適システムを作ることができる.

2 FPGA

本研究では XILINX 社製の FPGA を使用する [3]. FPGA は組み合わせ論理回路とフリップフロップで構成された CLB, I/O ブロック, 配線領域からなる (図 1). これらの接続をプログラム (コンフィギュレーション) することにより希望する回路が実現できる.

また, 必要に応じて何度でも回路を書き換えられるように, 接続情報を格納するメモリに SRAM を使用した FPGA を使用する.

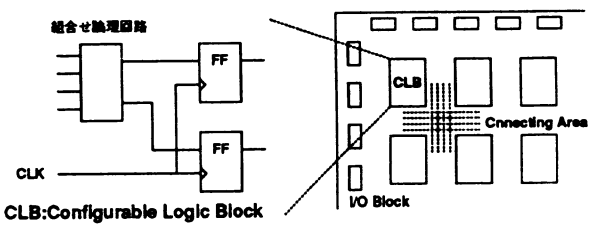
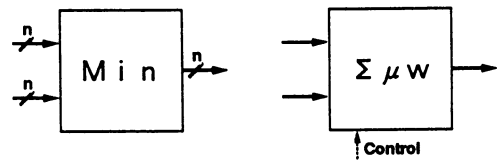


図 1 FPGA の内部構造

3 ファジィ・マクロセル・ライブラリ

設計性をよくするために, ファジィ演算に必要な回路を各機能毎に分け, それらを図 2 のようなファジィ・マクロセルとしてライブラリ化した. これらを組み合わせることにより全体の回路が記述できる. 各セルをデータドリブン型で設計することによりセル間の結線のみでシステムの構築を可能にした.

本ファジィ・マクロセル・ライブラリの各セルとその機能を表 1 に示す.



(a)Min 演算ユニット　(b)WeightedSum ユニット

図 2 ファジィ・マクロセルの例

表 1 ファジィ・マクロセル・ライブラリ

セル名	機能
入力セル	入力値に対する発火ラベルとグレードを RAM から読み出す
RAM I/F セル	RAM とのインターフェイス
組み合わせ発生セル (ルール読みだしセル)	発火ラベルより必要なルールを RAM から読み出す
Min セル	各グレードの Minimum 演算を行なう
Product セル	各グレードの乗算演算を行う
WeightedSUM セル	グレードの重みつき加算を行う
SUM セル	グレードの単純加算を行う
Divider セル	除算を行う

本マクロセルを使用した 2 入力 1 出力のファジィコントローラの構成例を図 3 に示す. 推論法として Product-Sum- 重心法 [4] を用いている. 図 3 に示すように, アーキテクチャどおりにセルを配置し結線することで, グラフィカルに設計することが可能である. また, セルの組合せにより推論法の変更, 入出力数の変更, 入出力解像度の変更等が可能である. 入出力解像度の変更はバスの本数を設定するだけで行なうことが可能である.

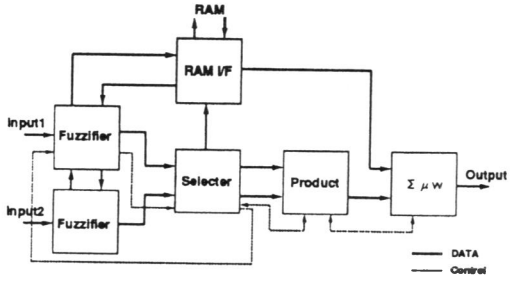


図3 ファジィロジックコントローラ構成例

4 *FPGA* を使ったファジィコントローラの試作

XILINX 社 XC3090A-7 PC84 を用いてファジィコントローラを試作した. そのコントローラの仕様を表 2 に示す.

表 2 コントローラの仕様

入出力数	2 入力 1 出力
入出力解像度	8bit
推論法	Min-Sum- 重心法 Product-Sum- 重心法 Min-Max- 重心法
前件部ラベル数	最大 7 ラベル (但し, 相補型)
ルール数	最大 49 ルール [5]
クロック周波数	5MHz

また, 試作したコントローラの性能を表 3 に, 他のチップとの比較を表 4 に示す. カスタム LSI と同等の能力を実現しているのがわかる.

図 4 はダイナミックに FPGA を書きかえた場合の応答波形である. FPGA のコンフィギュレーションには約 100msec を要する. リコンフィギュレーション性能によってアダプティブシステムへの応用が期待できる.

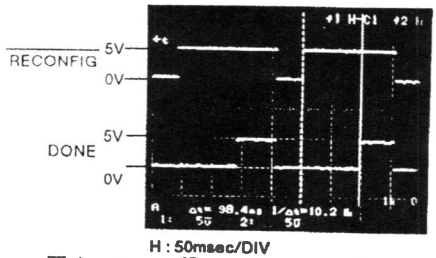
表 3 コントローラの性能

推論法	Clock 数	FLIPS	CLB 数 /320CLB
Min-Sum- 重心法	46	109k	141
Product-Sum- 重心法	50	100k	169
Min-Max- 重心法	64	78k	155

(FLIPS=Fuzzy Logic Inference Per Second)

表 4 他のチップとの比較

チップ名	Clock 数	FLIPS
本ファジィコントローラ	46	109k
AT&T	256	80k
ノースカロライナ大学	64	580k
オムロン FP-3000 [6]	1316	18k
オリンパス LDM2136 [7]	10	400k



H : 50msec/DIV

図 4 コンフィギュレーションの様子

図 5 に試作したファジィロジックコントローラを示す.

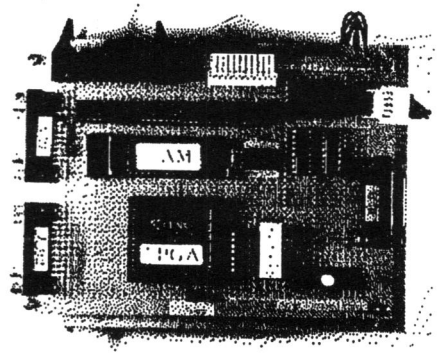


図5 ファジィロジックコントローラ

5 おわりに

本稿では FPGA を用いて, 制御対象に柔軟に対応するファジィコントローラを試作し, その有効性を示した. 本システムは次の特長をもつ: 1) ハードウェアの高速性とソフトウェアの柔軟性を合わせ持つ, 2) ファジィ・マクロセルによりグラフィカルにシステムが設計できる, 3) ダイナミックにシステムの書き換えができる.

本システムは, まだ FPGA のアーキテクチャに依存する部分が多い. 今後は, よりフレキシブルなハードウェアの構造を検討していく.

参考文献

[1] H.Watanabe, Wayne Dettloff, Kathy E.Yount: A VLSI Fuzzy Controller with Reconfigurable, Caxcadable Architecture, IEEE Jounal of Solid-State Circuits, Vol.25, No.2, April 1990, pp.376-382(1990)

[2] T.Miki, H.Matsumoto, K.Ohto, and T.Yamakawa: Silicon Implementation For A Nobel High-Speed Fuzzy Inference Engine:Mega-FLIPS Analog Fuzzy Processor, Jounal of Intelegent & Fuzzy Systems, Vol.1, No.1(1993)

[3] The Programmable Logic Data Book, XILINX 社 (1994)

[4] 水本雅晴: ファジィ制御の改善法 (VII), 9th Fuzzy System Symposium, pp.313-316(1993)

[5] 池田博, 平本行雄, 金須則之, 中村真次: ファジィ推論プロセッサのアーキテクチャ研究, 日産技法論文集, pp.67-74(1992)

[6] 木下郁朗, 喜多総一郎, 江島秀二: デジタルファジィプロセッサ FP-3000, 7th Fuzzy Sustem Symposium, pp.149-152(1991)

[7] 宮沢東, 清渕孝二, 鈴木隆: オリンパスデジタルファジィ IC, 7th Fuzzy Sustem Symposium, pp.141-144(1991)

[問い合わせ先]

〒 820 福岡県飯塚市川津 680-4

九州工業大学情報工学部制御システム工学科

神酒 勤

Phone: 0948-29-7732

Fax: 0948-29-7709

E-mail: miki@ces.kyutech.ac.jp

TE1-1

ファジィ理論を応用した教育評価法

An Educational Evaluation System Applying Fuzzy Theory

清水誠一
Seiichi SHIMIZU
川面小学校
Kawamo Pr. Sch.

山下　元
Hajime YAMASHITA
早稲田大学
Waseda University

Abstract —— Recently the CAI system and other educational technologies have been developed, but many parts of educational activeness is based on subjective decision of teachers. In educational evaluation, it becomes more important for teachers to evaluate by using sensitive decision.On the other hand, fuzzy theory is useful to analyze the inexact phenomena such as the metal process and cognition. So it is applied to the field of soft-science, phycology, education and so on. We propose to analyze such a problem by applying fuzzy reasoning. In this paper, we would not only discuss the analysis method, but also illustrate its practical effectiveness with the case study in elementary education.

1　はじめに

人間の認識や判断などに関わるあいまいな情報は，ファジィ理論を応用してその情報を分析する事により，特徴をかなり明確に表すことができる。

学校教育では近年，CAIシステム等が導入されているが，教育評価などは主に人間の判断に基づいて行われるため，そこには少なからずあいまいさが存在する。

新指導要領では，児童一人一人のよさを伸ばしその個性を生かすという新しい学力観に基づいて，評価の中心が相対評価から，個人のよさを認めることのできる絶対評価へと移行している。絶対評価は，外界からの感性情報と評価者の判断との相互作用の結果であるととらえられる。したがってその評価結果は，評価者の判断によりおおきく左右されることになる。

本研究では，感性情報処理の過程として絶対評価をとらえている。感性に基づく教育評価にファジィ推論を応用することにより，かなり客観的な評価を行うことのできる感性評価モデルを提案する。また，初等教育における評価に適用した事例を通してその効用を述べる。

2　ファジィ推論による評価

ファジィ推論を絶対評価に応用したモデルを感性評価モデルと呼ぶ。本モデルでは，学習状態の評価Eは，Eの下位要素A_i（$1 \leq i \leq n$）とその評価関数$E=\delta(A_1, A_2, \cdots, A_n)$により決定される。Eを構成するこれらの評価要素としての感性情報は，階層構造を構成する（図1）。

この感性評価モデルを実行するためには，まず感性情報におけるそれぞれの評価要素および各要素についての推論規則を決める。次に各規則の要素についてのメンバーシップ関数を定義する。

さらに、推論に用いる規則L（$1 \leq L \leq n$）について，評価の事実（入力値）に対するそれぞれの規則から作成される推論結果を求める。それぞれの推論結果の集合をR_Lとすると，最終的に求める推論結果Rは，

$$R = \bigvee_{L=1}^{n} R_L$$

により求められる。

これより，ファジィ推論を応用した感性に基づく評価$E=\delta(A_1, A_2, \cdots, A_n)$を行う問題は，複数の規則に基づいて，評価の事実を推論することに集約される。一般に評価要素A_i（$1 \leq i \leq n$）の評価値（$y_1, y_2, \cdots y_m$）および評価Eの評価値（$x_1, x_2, \cdots x_t$）のメンバーシップ関数をそれぞれ，$\mu_{yj}(z)$（$1 \leq j \leq m$），$\mu_{xk}(z)$（$1 \leq k \leq t$）と定義すると，ここで規則：1～mについてこれらのメンバーシップ関数を用いて，規則の各要素についての評価値である事実：$z_1, z_2, \cdots z_s$を推論すれば，評価が決定される。

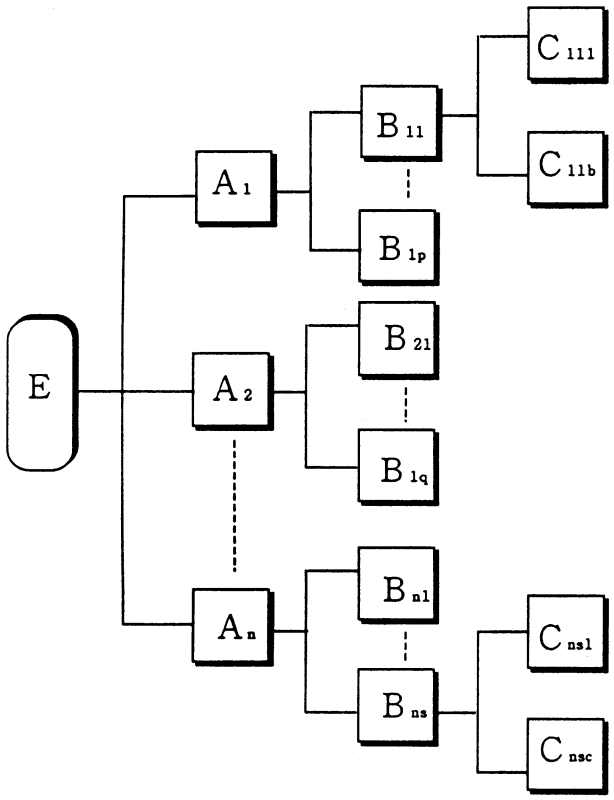


図１　評価要素の系列

	A1	A2		
rule 1：	X,	X	→	A
2：	X,	Y	→	B
3：	X,	Z	→	C
4：	Y,	X	→	B
5：	Y,	Y	→	C
6：	Y,	Z	→	D
7：	Z,	X	→	D
8：	Z,	Y	→	D
9：	Z,	Z	→	E

図３　推論規則

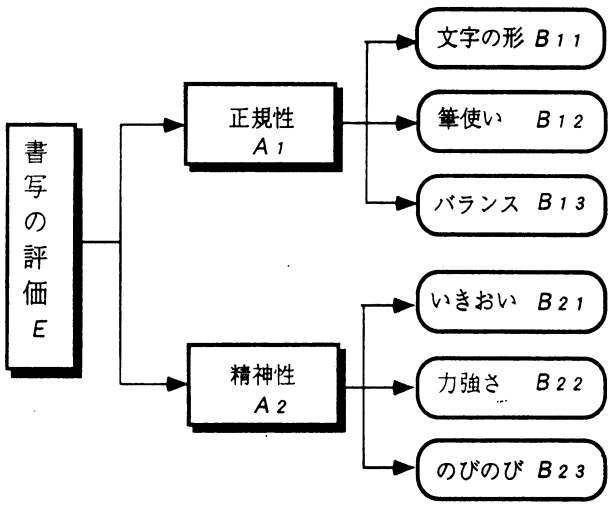


図２　評価観点の構造図



図４　作品例

3　感性評価への適用例

3.1　評価基準および規則

一般に書写や美術などの技能教科の評価は，数学や英語などの教科と比較して，教師の感性が評価の中心となる。そこで小学校の書写の評価にファジィ推論を応用した適用例について述べる。

ファジィ推論を応用した書写の評価モデルでは，初めに評価要素および評価基準を同定し，この評価基準に基づき推論規則（IF-THEN 規則）を作成する。

本評価モデルの評価要素の構造図を図2に示す。これらの要素は階層構造を形成し，全体の総合的な評価Eは，「A_1：正規性」と「A_2：精神性」の評価関数で決定される。したがって，これらのファジィ集合のラベルごとの評価基準を決める必要がある。

そこで，A_1の具体的な評価基準として，

X：良い
Y：普通
Z：悪い

を設定する。またA_2の具体的な評価基準として，

X：ある
Y：普通
Z：ない

を設定する。

また，これらの評価要素に関わるEについての評価基準は，

A：たいへん良く書けている
B：かなり良く書けている
C：普通に書けている
D：少し努力を要する
E：もっと努力を要する

を設定する。これらの評価要素から図3に示す推論規則が生成される。

3.2　メンバーシップ関数

次に，A_1の評価値（X）～（Z）に対するメンバーシップ関数を以下に定義する。

$\mu_X(x) = 2x - 1$
$\mu_Y(x) = 1 - |1 - 2x|$
$\mu_Z(x) = 1 - 2x$

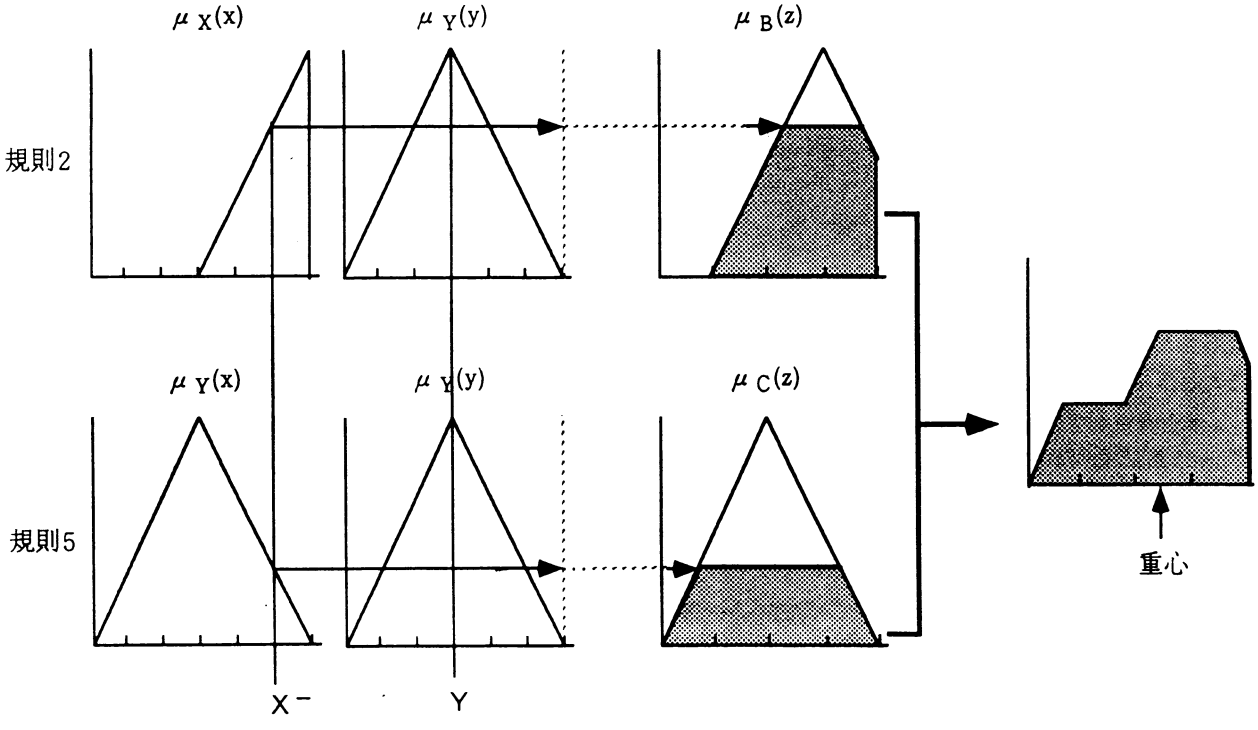


図5　推論プロセス

また，A_2の評価値（X）～（Z）に対するメンバーシップ関数を

$\mu_X(y) = 2y - 1$

$\mu_Y(y) = 1 - |1 - 2y|$

$\mu_Z(y) = 1 - 2y$

と定義する。さらに，評価Eについての，評価値（A）～（E）のメンバーシップ関数を，

$\mu_A(z) = 2z - 1$

$\mu_B(z) = 1 - |1.5 - 2z|$

$\mu_C(z) = 1 - |1 - 2z|$

$\mu_D(z) = 1 - |0.5 - 2z|$

$\mu_E(z) = 1 - 2z$

と定義する。

以上の評価要素に基づいた推論規則およびメンバーシップ関数を用いて，実際の作品の評価値を入力し推論が実行される。その結果を脱ファジィ化することにより最終的な評価値が決定される。

3.3 推論の実行

次に，具体的な作品についての評価の例を示す。

例えば小学4年生の作品（図4）について実際の評価を行ったところ，ある教師は「活字のように字形が整っており，字の勢いもそこそこ感じられる。」と評価した。この評価から各評価項目についての評価値（入力値）は，「A_1：正規性」についてはかなり良い（X^-），「A_2：精神性」については普通（Y）であると判断できる。したがってこの評価は，

$$(A_1, A_2) = (X^-, Y)$$

という評価ベクトルに対して，

$$E = \delta(A_1, A_2)$$

の評価値を決定する問題となる。

この入力値に対して推論を行うには，規則2と5が適用される。具体的には，規則2と5について，2つの入力値に対するそれぞれのメンバーシップ関数を基に，max-min 合成（max-min composition）を行う。まず，min演算を用いて各規則についての推論結果を求め、これらの推論結果に対してmax演算を行い、最終的な推論結果を求める。この推論のプロセスおよび推論結果を図5に示す。この最終的な結果はファジィ集合で得られているので，評価値としての確定値を得るために，脱ファジィ化を行う。具体的には図5の推論結果の重心Gの値を求めることにより，総合的な評価値が得られる。この場合の重心Gは，評価（B）と評価（C）のほぼ中央の値となるので，この作品は「まず良く書けている」と評価することができる。

4 おわりに

評価の主体は人間であり，その人間による感性評価は，本質的にあいまいさを持つ。従来，これらの感性に基づく絶対評価は，評価者の感性に全面的に依存するため，客観的に評価することが困難であった。この感性情報に基づく評価を客観的に行うための一手法として，本稿ではファジィ推論を応用した評価モデルを提案した。なお本事例は教育評価への適用であったが，本モデルは商品開発，アンケート調査等の幅広い分野での利用が可能である。

末筆ながら，本研究に関してお世話になった，早稲田大学の洲之内治男教授，岡山大学の近藤　勲教授，九州工業大学の矢鳴虎夫教授，法政大学の宮武直樹教授およびカリフォルニア大学のL.A.ザデー教授に感謝する。

参考文献

[1] 水本正晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988.

[2] 坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用，森北出版，1989.

[3] 清水誠一，岸　誠一：教師の評価能力向上のための一試行－書写の評価にファジィ理論を応用して－(1) ～ (3)，日本教育工学会研究会，1991～1992.

[4] 清水誠一，宮武直樹，安田隆人：ファジィ理論を応用した授業分析とその評価，ファジィシステムシンポジウム論文集Ⅷ，pp.613～616，1992.

[5] 山下　元，清水誠一：ファジィ推論を応用した思考過程分析，ファジィシステムシンポジウム論文集Ⅷ，pp.125～128，1992.

[6] 山下　元：教育学におけるあいまいさの取扱い，日本ファジィ学会誌4-6，pp.39～47，1992.

[7] 清水誠一，山下　元：ファジィ理論を応用した書写の評価法，日本ファジィ学会ノンエンジニアリング・ワークショップⅢA－12，1993.

[8] 清水誠一，山下　元：ファジィ理論を応用した評価システム－ファジィ推論による書写の評価法－，電子情報通信学会研究報告書ET93-21，1993.

[9] 清水誠一，山下　元：ファジィ推論を応用した教育評価法－書写の技能評価と感性評価－，ファジィシステムシンポジウム第10会大会講演論文集，pp.605-608，1994.

[10] 清水誠一，山下　元：ファジィ推論を用いた感性評価法～書写の評価への適用を通して～，教育工学関連学協会連合第4回全国大会講演論文集，pp.417-418，1994.

TE1-2

情意面に関するあいまい問題について

Inferrence problems in Education based on sensitivity (2)

○宮武　直樹　松田　修三　　三村　紀中　　中島　洋一
法政大学工学部　　松江教育ｾﾝﾀｰ　美唄・東中学校

Naoki Miyatake　Syuzo Mmatsuda　Mimura Norinaka　Yoichi Nakazima
Fuculty of engineering, Hosei univercity　Matsue education center　Bibai higasi elementary school

Abstract: The aim of this study is to find evaluation method of inference ploblems in educatoin are based on sensitivity.
We asked teachers and pupils quationnaires about the evaluation of works of painting. To analyze the educational evaluation, fuzzy integration method is employed.

１．はじめに

技能や作品の評価については、「学んで得た力」のバロメータとして従来も研究されてきており、その評価対象の範囲はかなり明確であると思われる。

評価基準については、「ベテランほど見るべきところを見ている」と言われるように、対象に関する経験の程度に応じて明確さの度合いが異なることが想像できる。

また、判断については、基準がかなり明確なベテランといえども妥当性を欠く恐れがあると思われる。

作品の評価判断については、経験の差によらず、問題自体の性質のために、基準にたいする達成境界を明確にしにくく、予め事例を挙げることも困難であることから、ベテランといえども大まかな判断をせざるを得ない。

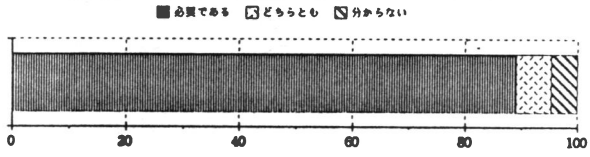
どの程度のベテランのどの基準がどの程度あいまいなのか、あるいは、実際に妥当性を欠く判断がどの程度生じるか等についての実証的研究はあまり例を見ない。

筆者らは、複数のベテランの評価基準や判断例を収集することによって、ある程度数量化することが可能ではないかと考え、この点についてファジィ理論を応用しようと試みている。

２．情意面の評価について

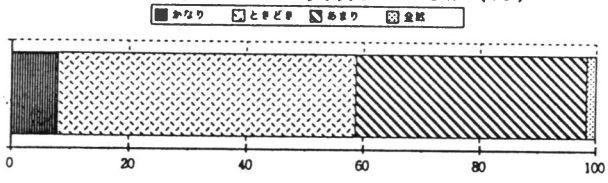
教育現場において、情意面の評価についての研究の必要性は多くの教員は認めている。しかし、必要感の強さに比べて、情意面の評価についての実践的な自信は強くない。

情意面の評価の実践的研究の必要性（％）



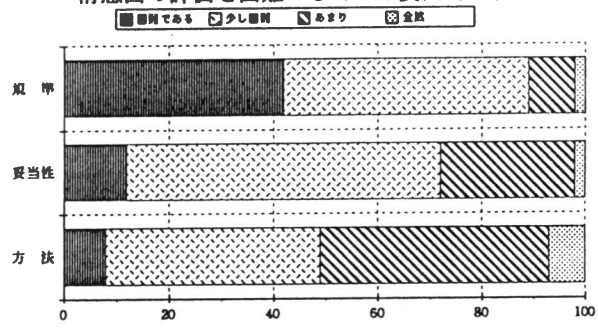
情意面の評価が困難であることについては、基準、妥当性、方法の問題を挙げる教員が多い。

情意面の評価について実践しているか（％）



妥当性については、「定量になじまない」、「評価者の主観に依存しすぎる」、「情意の表出に個人差がある」、「評価内容が複雑、多岐にわたりすぎる」などの意見がある。

情意面の評価を困難にしている要因（％）



３．絵画作品の評価について

図は、1994年度、美唄東中学校３年生が４月から取り組んで仕上げた日本画と本人の自画像である。また、右上の評価は一学期毎に行われ



ている学期末試験の素点と学期における10段階評定、また日本画の自己評定を10段階でさせてこれをつけてある。

自画像は30分間の期末試験のものを直後に全てデータ化し、あとで授業を使ってさらに描き進めさせたものである。こうすることで子供の評定されることへの不安感を少しでも軽くできればということに配慮した。

ファジィ理論の適応を考えたとき、子供に感想なり、自己評価なりを作文させたものから、キーワードを抽出し、ＫＪ法を用いて分類し、階層化構造を構築し、それぞれの項目内容に自然言語を用いて評価を与える方法がある。

また、本研究では２５項目に亘る意識調査を同時に行っているので、このことから項目間の因数を分析し評点を与える方法なども考えられる。

この手法には、生徒の評価と教師の評価の曖昧なゆらぎを計算するという発想の転換があるが、教師の日常の授業観察の主眼は自分の指導内容を最もよく反映している生徒を基準としているものである。したがって、生徒の様々な行動パターンについて、指導観と基準行動を持つ生徒のフイルタを通して見ているということになる。結果としての作品の見方は、子供の場合と教師の場合とでは大変違った見方をしていると言える。子供は自分行為の結果というよりも絵の完成されたイメージや自分の持つ上手な絵の概念との比較で自己評定を下す傾向がある。そのため途中の「努力」や「思い」を評価に大きく取り入れるということは年上になるほどしなくなる。この点の教師の押さえが甘いと評定が信頼を失うことになる。

結果が良く見える作品を作れる子にとって途中の努力は技術の巧出ということであるが、結果に現れないコンプレックスを持つ子は、途中に色や形の決定のための心理的な葛藤があることをわすれてはいけない。この辺が教師の観察と自己評価の両方で浮き彫りにされて、最終的に総合評価（自然言語又は数値）が求められることを期待しているところである。

４．おわりに

学習意欲の評価については、評価の範囲すら明確ではない。概念規定に関する提案はあるが、実証事例が過少であることから、あまり理解が得られていない。また、数量化に馴染まないという感覚が根強くこの種の研究を遅らせている。

筆者らは、構成主義的に学習意欲について、次の観点を提案したい。

・自分の課題として取り組んだか
・学習集団において役割があったか
・教材の構成や糸口を把握したか
・主観的価値を認識したか
・客観的価値を認識したか
・達成可能感を持ったか
・解決の見通し、達成度を持ったか

評価の手がかりは、主として被評価者自身のメタ認知報告で、判断の方法は論理的洞察ということになる。この種の問題解決の糸口として、ファジィ理論の効用を考えて、現在、教育評価システムの構築中である。

〈参考文献〉
三村、宮武：第５回ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ ﾌｧｼﾞｨ ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ 講演論文集、pp78-79(1995年)

＜連絡先＞〒184 小金井市梶野町３－７－２
法政大学工学部システム制御工学科
電(0423)87-6113(代)、6252(直)

TE1-3

学校教育における主観的評価
Subjective evaluation in school education

佐藤　博
Hiroshi Sato

矢鳴　虎夫
Torao Yanaru

福岡県立戸畑工業高等学校
Fukuoka prefectural
Tobata Technical High School

九州工業大学工学部
Kyushu Institute of Technology

Abstract—Until now,the Japanese school education program the knowledge and understanding of subjects by pupils have received more attention than their willingness to learn and their attitude towards learning ,which is more important educational evaluation factors.This paper shows how to measure the concern ,willingness and attitude of subjects by using a subjective observation model(1). And it is showed that we use an artificial neural network to obtain image codes in the subjective evaluation.

1　はじめに

新しい高等学校指導要領によって教育評価について，従来の「知識・理解」を重視した学力観から「関心・意欲・態度」と「思考・判断」を重視する新しい学力観へ転換されることになった．ここでは，生徒の「関心・意欲・態度」という質的で目に見えにくい学力の評価を主観観測モデル(1)を用いて測定することを試みた．

2　アフィン写像の一般的定義

「関心・意欲・態度」の主観的な評価をする際の理論的基礎として，アフィン写像の一般的な定義から紹介する．

二つのアフィン空間(X_1,V_1^n)と(X_2,V_2^m)において(X_1,V_1^n)から(X_2,V_2^m)へのアフィン写像とは，

(i)基礎集合の間の写像　　$f: X_1 \to X_2$

(ii)ベクトル空間の間の線形写像　$\varphi: V_1^n \to V_2^m$

の組(f,φ)でfとφとの間に等式

$$f(P_1+\bar{a}_1)=f(P_1)+\varphi(\bar{a}_1)$$

が，任意の$P_1 \in X_1, \bar{a}_1 \in V_1^n$に対して成り立つものをいう．ここに，$V_1^n$はn次元ベクトル空間，$V_2^m$はm次元ベクトル空間を表す．

3　主観観測ベクトル

アフィン写像の定義により空間(X_1,V_1^n)の中の任意の2つのベクトルを

$$\bar{\varsigma}=\varsigma_1\bar{e}_1+\varsigma_2\bar{e}_2+\cdots+\varsigma_n\bar{e}_n$$

$$\bar{\eta}=\eta_1\bar{e}_1+\eta_2\bar{e}_2+\cdots+\eta_n\bar{e}_n$$

とする．ただし，$P_1 \in X_1, \bar{\varsigma},\bar{\eta} \in V_1^n$で，$P_1+\bar{\varsigma}, P_1+\bar{\eta}$の$P_1$を省略している．このとき，同じ空間$(X_1,V_1^n)$の中の任意のベクトル

$$\bar{a}=a_1\bar{e}_1+a_2\bar{e}_2+\cdots+a_n\bar{e}_n$$

は，線形写像φを次のように定義することにより2次元平面(X_0,V_0^2)に写像される．ここで，V_1^n, V_0^2は内積ベクトル空間を表す．いま，

$$\varphi(\bar{e}_i)=(\bar{\varsigma}\cdot\bar{e}_i)\bar{O}_1+(\bar{\eta}\cdot\bar{e}_i)\bar{O}_2 \quad (i=1,2,\cdots,n)$$

のように定義すると$(\bar{e}_1,\bar{e}_2,\cdots,\bar{e}_n)$が正規直交基底であることから$R(\bar{\varsigma},\bar{e}_i)=\bar{\varsigma}\cdot\bar{e}_i=\varsigma_i$　，$R(\bar{\eta},\bar{e}_i)=\bar{\eta}\cdot\bar{e}_i=\eta_i$となる．ここに，$R(\cdot,\cdot)$は二つのベクトルの関係(Relation)を表す．従って，$\varphi(\bar{e}_i)=\varsigma_i\bar{O}_1+\eta_i\bar{O}_2$と書き直せる．このことから任意のベクトル$\bar{a}$に対し

$$\begin{aligned}\varphi(\bar{a}) &= \varphi(a_1\bar{e}_1+a_2\bar{e}_2+\cdots+a_n\bar{e}_n)\\ &=\sum_{i=1}^{n}a_i\varphi(\bar{e}_i)\\ &=\sum_{i=1}^{n}a_i(\varsigma_i\bar{O}_1+\eta_i\bar{O}_2)\\ &=\left(\sum_{i=1}^{n}a_i\varsigma_i\right)\bar{O}_1+\left(\sum_{i=1}^{n}a_i\eta_i\right)\bar{O}_2\\ &=(\bar{\varsigma}\cdot\bar{a})\bar{O}_1+(\bar{\eta}\cdot\bar{a})\bar{O}_2\end{aligned}$$

と表せる．以上のことから空間(X_1,V_1^n)から任意に取り出される2つのベクトル$(\bar{\varsigma},\bar{\eta})$をもって，空間上のすべてのベクトルを2次元の観測平面(X_0,V_0^2)に写像することができる．これらの$\bar{\varsigma},\bar{\eta}$を各々主観観測ベクトルと呼び，$(\bar{\varsigma},\bar{\eta})$の組を主観観測ベクトル対と呼ぶ．

4　学校教育における主観的評価の例

生徒$\vec{s}_i(i=1\sim n)$の態度を$\vec{\varsigma}$，意欲を$\vec{\eta}$，関心を$\vec{\theta}$とし，これらのうちの任意の２つを選ぶ．いま，１０人の生徒$\vec{s}_i(i=1\sim 10)$の態度と意欲$(\vec{\varsigma},\vec{\eta})$の主観観測ベクトル対をもって評価することを考える．

ここでは，工業科の態度と意欲の評価のために互いに独立な評価基準項目として以下の１４項目を考える．これらの１４項目に対する態度，意欲の主観的評価値を0.00～1.00でコード化し，これをイメージコードと呼ぶ．以下の表１にそれを示す．

評価基準項目	態度$\vec{\varsigma}$	意欲$\vec{\eta}$
C1(服装)	0.90	0.50
C2(頭髪)	0.90	0.50
C3(基本的生活態度)	1.00	0.90
C4(授業態度・工業科)	1.00	0.60
C5(遅刻・早退)	0.90	0.50
C6(出席日数)	0.80	0.50
C7(発表)	0.50	0.90
C8(提出物)	0.50	0.60
C9(実習)	0.70	0.80
C10(製図)	0.70	0.80
C11(課題研究)	0.70	0.80
C12(電子回路)	0.70	0.80
C13(ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾐﾝｸﾞ技術)	0.70	0.80
C14(ﾊｰﾄﾞｳｪｱ技術)	0.70	0.80

表１

C1～C4は主観的に数量化を要する項目で，図１に示すニューラルネットワークにより求める．C5～C8は平常点として指導簿から，C9～C14は教科点として成績から求める．

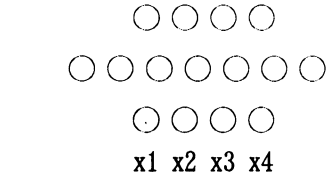


図１

例えば，C3の基本的生活態度を４項目X1,X2,X3,X4で表す．X1:節度ある生活ができる．X2:自他の生命を尊重し，進んで健康安全につとめる．X3:礼儀を重んじ言動などを適切にする．X4:誠実な態度で人に接する．　X1～X4の視点に当てはまるときは「１」，当てはまらないときは「０」とし，出力は４ﾋﾞｯﾄのＢＣＤ符号で表し，それを0.00～1.00に変換する．各ﾆｭｰﾛﾝはｼｸﾞﾓｲﾄﾞ関数で，学習法は誤差逆伝播法を用いる．

次に，１０人の生徒$\vec{s}_i(i=1\sim 10)$の評価基準項目$c_j(j=1\sim 14)$に対するｺｰﾄﾞ表を作成し，これを行列として取り扱う．(s_{ij})　$(i=10,j=14)$．各s_{ij}の値も0.00～1.00の範囲でコード化する．

いま，主観ベクトル対$(\vec{\varsigma},\vec{\eta})$をもって，各生徒の観測（評価）をすると，次式で表される．

$$\varphi(\vec{s}_i)=(\vec{s}_i\cdot\vec{\varsigma})\vec{O}_1+(\vec{s}_i\cdot\vec{\eta})\vec{O}_2$$
$$=\left(\sum_{k=1}^{14}s_{ik}\varsigma_k\right)\vec{O}_1+\left(\sum_{k=1}^{14}s_{ik}\eta_k\right)\vec{O}_2$$

右辺第１項の係数は態度を，第２項の係数は意欲の評価を意味する．ただし，$(\vec{O}_1,\vec{O}_2)$は直交基底を表す．

以上から時刻ｔにおける$\vec{s}_i\cdot\vec{\varsigma}$と$\vec{s}_i\cdot\vec{\eta}$のｸﾞﾗﾌを示すと図２のようになる．

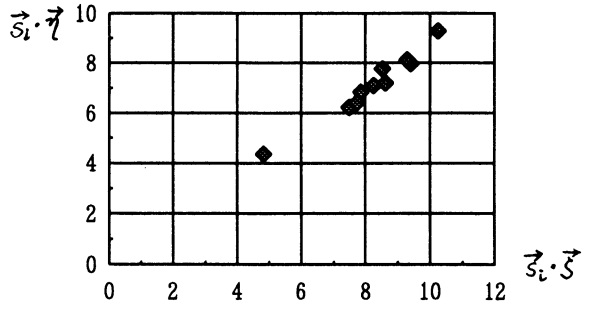


図２

上の図３は表１のイメージコードと行列(s_{ij})の各要素から求められたものである．

5　おわりに

図２から生徒の「見えない学力」といわれる態度と意欲が視覚的にわかる．これをもとに教師の主観に沿った生徒指導に役立てることが期待できる．また，時間の経過により個々の生徒の関心・意欲・態度がどのように変化しているか視覚的にとらえることが可能になり個人内評価ができる．今後，各教科の関心・意欲・態度に応用できるようにｺｰﾄﾞ化について，さらに検討し情意的領域を含んだ教育評価支援システムを構築していければと考えている．

参考文献

（１）T.Yanaru:"BASIC CONCEPT AND THEORY FOR SUBJECTIVE OBSERVATION MODEL,AND THE APPLICABILITY TO CREATE A NEW MACHINE EQUIPPED WITH EMOTIONAL FUNCTIONS",Fifth IFSA World Congress(1993),50-53

連絡先

〒804　北九州市戸畑区仙水町１－１
九州工業大学工学部電気工学科情報コース
矢鳴 虎夫
TEL　093-871-1931(代表)

TE2-1

可変型メンバーシップ関数を用いたファジィ推論によるアンケート処理技法

A Data Processing Technique of Questionnaire Items Using Fuzzy Inference

北垣 郁雄

Ikuo KITAGAKI

群馬職業能力開発短期大学校 情報技術科

Dept. of Information Engineering, Gunma Poly-tech College

Abstract − For the fuzzy evaluation process of answer data of questionnaires with an ordinal scale, we often use fuzzy integral. This material proposes a fuzzy evaluation method using fuzzy inference, where, for example, an inference rule of ' IF the number of highly scored items is big, THEN the total score is high ' is prepared. As usual, fuzzy sets which correspond to 'high','big' and so on are determined as membership function. On the other hand, we determine, so to speak, importance for each item and the weight for each rule. The membership functions vary according to those variables.

１．はじめに

イメージ調査では、ある一つの評価概念を設定し、それに寄与するような項目を用意する。そして、ファジィ積分による総合評価値の算出を意図する場合には、各項目には主観的重要度を付与することがある。また、アンケートは序列尺度で構成する。

本研究でのファジィ推論による処理技法は、これと同じ枠組で採取された回答データに対するものである。推論ルールでは、「項目の評価値が高い」、「項目数が多い」などのファジィ事象を設定しているが、本研究では主に次の点に着眼している。

項目の主観的重要度を評価モデルに加味したことである。各項目が所定の評価概念に対してどの程度寄与するかは一定とはいえない。そこで、各項目に主観的重要度を外的基準として与え、その値によって後件部のメンバーシップ関数を形状変化させることにより、ルールの影響力を加減している。

２．評価問題におけるファジィ推論について

イメージ調査では、個々の項目の評価値よりも、全体的な傾向を見ることが多く、「多くの項目で評価が高ければ、総合評価値も高い」といった見方をする[1],[2]。本研究のファジィ推論は、‘評価値が｛高い，中ぐらい，低い｝’という３段階を基調としており[3]、表１に示す３通りの推論ルールを用いる。たとえば、ルール１は、次のような意味を持っている。

> ルール１：評価値の高い項目数が多いならば、総合評価値は高い

回答データの処理手順は、以下の手順を踏む[4]。

(i)前件部の適合度を計算する

(ii)その適合度にもとづいてそのルールの推論結果を得る

(iii)各推論結果の論理和により、全体の推論結果を求める

(iv)推論結果の一次モーメント（重心、または平均値）と二次モーメント（分散）を求める

このうち、(i)に関し、上記のルールの前件部は２つのファジィ集合で表現されているが、‘Ａであるような要素ｘの数がＢであるならば、推論結果はＣである’という表現形式であり、よく用いられる‘ｘがＡであり、かつ、ｙがＢであるならば、…’という形式に簡単には変換できない。このような表現は、アンケートの評価問題で発生する事柄であり、この形式のルールに対処できる数理モデルの開発が必要である。

次に(ii)では、各ルールの適合度にもとづいて後件部を処理し、推論結果を得る。その際、前件部の一部である‘Ａであるような項目’の主観的重要度が全般に小さいならば、推論結果の信頼性をそれに応じて低くしなければならない。その一手法として、Ｃを特徴づけるメンバーシップ関数の値が台集合の要素に‘鈍感’になるようにすればよい。例えば、メンバーシップ関数が三角形状に設定されて

表1　推論ルール

H：「高い」または「多い」
M：「中ぐらい」
L：「低い」　　(括弧内はルール番号)

		項目数 H
評価値	H	(1) H
	M	(2) M
	L	(3) L

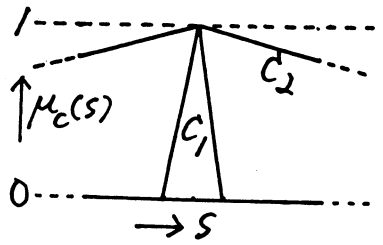


図1　メンバーシップ関数の形状

いたとすると、その両斜辺の傾きを水平に近づければ、より鈍感'になる。図1の例では、sの値に関して、「C_1～中ぐらい」よりも「C_2～中ぐらい」のほうが、台集合の要素に関して帰属度の差が少なく、「中ぐらい」と表現することの意味が薄れることになる。

また、評価値が〈高い，中ぐらい，低い〉のいずれの場合も、対象とする項目の主観的重要度が低ければ、それに応じて、推論結果の信頼性を低く設定することが望まれる。

そこで、項目の主観的重要度を、後件部のメンバーシップ関数の形状に反映させた数理モデルの開発が望まれるわけである。

主に上記の点を考慮して、以下にファジィ推論のモデル化を図る。

3．ファジィ推論による総合評価値の算出

3．1前件部の適合度　本ファジィ推論法では、前件部が、

> 評価値がAであるような項目の数がBであるならば、・・・　(1)

の形式を採っている。この前件部の適合度を、より一般化した形で以下に定義する。

項目x_iに対する評価値e_i($0 \leqq e_i \leqq 1$)に対して，ファジィ事象Aを、「e_iが$\hat{e}$ ($0 \leqq \hat{e} \leqq 1$)に近い」とする。すると、前節でのべた評価値に対するH，MおよびLは、以下のメンバーシップ関数で特徴づけることができる。

$$
\begin{aligned}
\text{H}:\quad & \mu_H(x_i) = 0, && 0.0 \leqq e_i \leqq 0.5 \\
& \mu_H(x_i) = (e_i - 0.5)/0.5, && 0.5 \leqq e_i \leqq 1.0 \\
\text{M}:\quad & \mu_M(x_i) = 1 - |e_i - 0.5|/0.5 \\
\text{L}:\quad & \mu_L(x_i) = 1 - e_i/0.5, && 0.0 \leqq e_i \leqq 0.5 \\
& \mu_L(x_i) = 0, && 0.5 \leqq e_i \leqq 1.0
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

これら3つの式をまとめて、$\mu_A(x_i)$で表す。項目数をmとする。$\mu_A(x_i)$を、

$$\mu_A(x_1) \geqq \mu_A(x_2) \geqq \cdots \geqq \mu_A(x_m) \qquad (3)$$

となるように並べ直す。すると、$\mu_A(x_i)$は図2のように右下りのグラフとなる。一方、

$$X_i = \{x_1, \cdots, x_i\} \qquad (4)$$

として、X_iに対する集合関数$g(X_i)$を考える。そして、ファジィ事象Bの'多さ'を$g(X_i)$に割り当てる。$g(X_i)$は、集合X_iに対して単調減少であり、

$$g(\phi) = 0,\ g(X_m) = 1 \qquad (5)$$

であるから、ファジィ測度である。とりあえず、図2に示す直線状の$g(X_i)$を用いる。すると、

$$\mu_A(x_i) \geqq g(X_i)$$
$$\mu_A(x_{i+1}) \leqq g(X_{i+1}) \qquad (6)$$

となるようなiが存在する。そのiに対して、図3に示す交点の高さを適合度δとする。この適合度δを用いて、後件部のファジィ集合Cの'頭切り'を行う。

3．2後件部の可変型メンバーシップ関数　外的基準として与えた項目x_iの主観的重要度をg_iと表記する。項目x_iは(3)式を満たすものとし、ルールjにおける平均主観的重要度は、項目の主観的重要度g_iを$\mu_A(x_i)$で重みづけして、その値w_j ($0 < w_j \leqq 1$)をルールjによる推論結果の信頼性を表す指標（信頼性指標）とみなす。

$$w_j = \sum_i \mu_A(x_i)\, g_i / \sum_i \mu_A(x_i) \qquad (7)$$

ここでいう信頼性とは、次のように解釈する。ファジィ推論では、各ルールの推論結果の論理和をとったのちに脱ファジィ化を図る。すなわち、その論理和から図形的な重心を求めてノンファジィな総合評価値とする。もし、一つのルールの推論結果に着目すると、やはりその図形的重心を求めることができる。いま、その推論結果が、図4のようであったとしよう。図(a)、(b)はいずれも三角形のメンバーシップ関数であり、図(b)の方が図(a)よりその底辺が長い。これらを比較すると、一次モーメント（図形的重心）が同じであるが、二次モーメント（分散）は図(b)の方が

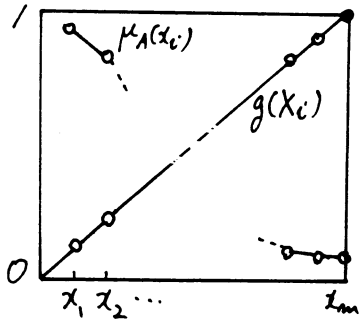


図2　評価値と項目数の特徴づけ

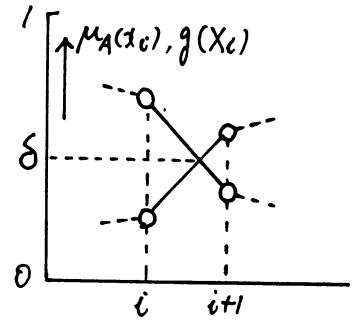


図3　適合度の求め方

大きい。そして、分散が大きいほど、図形的重心を特定することの意味が少なくなる。言い方を替えれば、図(a)では推論結果が図形的にみてs。近辺のみに存在するから、'このルールによる推論結果がほぼsoである' という主張がの意義が、図(b)より大きい。

以上にのべた推論結果に関する言明の意義の大きさを、推論結果の信頼性ととらえる。そして、w_j の大きさをメンバーシップ関数の形状に反映させる。ここで、後件部のファジィ集合H，MおよびLを特徴づけるメンバーシップ関数をまとめて$\mu_C(s)$ で表す。$\mu_C(s)$ の満たすべき条件を以下に示す。

i)パラメータw_j　$\mu_C(s)$ は、w_j をパラメータとする。したがって、ここでは$\mu_C(s, w_j)$ とも表記できる。

ii)境界条件　三角形のメンバーシップ関数が1となるsの値をs_o、0.5となる2つのsの値を小さい方からs_{h-}、s_{h+}とする。

- $\mu_C(s_o, 1) = 1$
- $\lim_{w_j \to 0} \mu_C(s, w_j) = 0.5$
- s_{h-}とs_{h+}は、w_j の値にかかわらず一定とする　(8)

上記を満たす単純なモデルを図5に示す。

ルールjの推論結果の求め方を以下に示す。項目の主観的重要度g（i＝1，…，m）は所与とする。

ステップ1：ルールjの前件部で、3.1の方法で前件部の適合度δを求める。

ステップ2：ルールjの信頼性指標w_j を求める。

ステップ3：後件部でw　が1と仮定したときのファジィ集合Cのメンバーシップ関数において、それを適合度δで'頭切り'して、下部の台形の面積S（w_j）（＝S（1））を求める（図6）。

ステップ4：ステップ3でのw_j の値にもとづいて、図6の要領でメンバーシップ関数を変形する。

ステップ5：ステップ4で求めたメンバーシップ関数において、面積がS（1）となるような台形S'を求める。その台形の高さをδ'とする。

ステップ6：その台形をルールjの推論結果とみなす。

以上のステップ1～6をすべてのルールに適用し、それらの論理和をとったものを全体の推論結果とする。そして、一次モーメント等を求めて、総合評価値の平均値と分散を得る。

4．適用例

本ファジィ評価の基本的特性を調べる。5項目x_1 ～x_5 に対する評価値が表2に示すケースを想定した。また項目の主観的重要度がすべて同じで、その値が1，0.8および0.6の3種類に対して計算した。前件部や後件部の評価値に関するメンバーシップ関数は、図7を用いた。また、項目数に関するファジィ事象は、先の図2のg（X_i）で特徴づけた。平均値はすべて0.5であるので、標準偏差のみ計算結果を示す。これより、ケース1の標準偏差をs_1 などと表記することにして、

1)ケース1で、5項目とも同じ評価値であっても、$s_1 \neq 0$であること、すなわち評価値のバラツキが零と見なされないこと

2)$s_1 \leqq s_2 \leqq s_3 \leqq s_4$であり、通常の標準偏差と大小関係が同じであること

3)項目の主観的重要度の減少に伴って、s_i(i=1,…,4) が増加すること

などがわかる。

すなわち、回答値が同じであっても、信頼性指標の値が小さくなると、総合評価値のバラツキが大きくなる。本ファジィ評価法では、推論結果の信頼性が、総合評価値の特性に反映されており、一つの有効なデータ解析法であることがわかる。

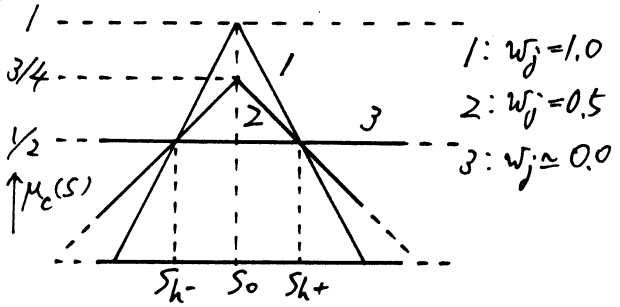


図5　後件部の可変型メンバーシップ関数

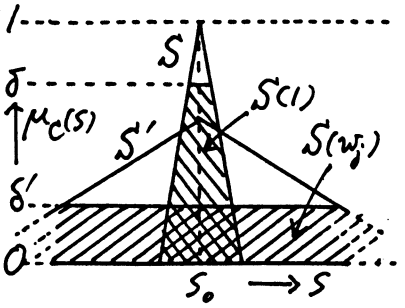


図6　メンバーシップ関数の‘頭切り’

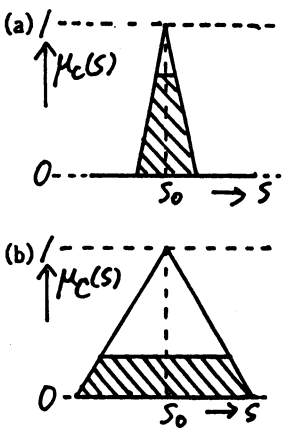


図4　推論結果

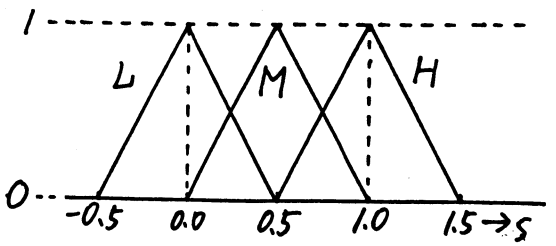


図7　後件部のメンバーシップ関数

表2　推論結果

	項目 x_i と規格化回答値					主観的重要度 g_i と標準偏差		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$g_1 \sim g_5$ が1.0	$g_1 \sim g_5$ が0.8	$g_1 \sim g_5$ が0.6
ケース1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.18	0.23	0.28
ケース2	0.00	0.50	0.50	0.50	1.00	0.46	0.50	0.55
ケース3	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	0.49	0.53	0.56
ケース4	0.00	0.00	0.50	1.00	1.00	0.51	0.55	0.59

文献

(1)中島、般若：ファジィ推論による総合評価法とその応用、日本ファジィ学会誌、5,4,pp.761-771,1993
(2)KITAGAKI.I： A New Logic of Linear Discriminant Analysis Applicable to Education, IECE,E64,11,pp.693-699,1981
(3)吉川、西村：ファジィ範疇法による心理尺度構成とその実験的検証、日本ファジィ学会誌、5, 4,pp,719-731, 1993
(4)本田、大里：ファジィ工学入門、海文堂, 1991

連絡先

〒370-12　高崎市山名９１８
群馬職業能力開発短期大学校
北垣郁雄
tel.0273-47-3333

TE2-2

美術教材のための画像データベースにおけるファジィ情報検索のキーワード・メニュー画面構成

Design of Keyword Menu Display in Fuzzy Information Retrieval for Teaching Materials of Fine Arts

吉根 勝美
Katsumi Yoshine
南山大学 経済学部
Faculty of Economics, Nanzan University

磯本 征雄
Yukuo Isomoto
名古屋市立大学 計算センター
Computation Center, Nagoya City University

Abstract — In this paper, the authors discuss design of keyword menu in a image information database, which has three kinds of data; composition, documents and atmosphere. Owing to their numerical or linguistic fuzzy values, it needs to improve the data model and the information retrieval method from the viewpoint of the fuzzy set theory. The stored data and a retrieval condition are expressed by the fuzzy sets with the membership functions. For the information retrieval, the satisfaction grades of the stored data are estimated by both degree of inclusion in retrieval condition and degree of inclusion in the complement of retrieval condition. Then we mention design of keyword menu for the convenience of information retrieval.

1 はじめに

美術教材である絵画には、原画とこれに付随する作家，制作年，所蔵場所などの書誌データや、絵画の構成を示す場景データ、印象を示す叙情データなどがある。しかも、これらには多くのファジィ・データが含まれ、情報検索時の検索条件も複雑・多様・曖昧になりやすい。こうした曖昧で複雑なデータによる情報検索を効率よく処理するために設計したデータ構造とメニュー画面の構成について議論する。

2 本データベースの設計思想

2.1 データ構造

絵画には、設計図や指紋とは異なり、画像の醸し出す雰囲気や被描写体の配置など、あいまい性の高いデータが多い。本データベースでは、あいまいさのあるデータを、メンバーシップ関数で特性づけられるファジィ集合で統一的に表す。3.2節で述べるように、メンバーシップ関数を4個のパラメータで記述し、関係データモデルを用いて表1のように取り扱う[1][2]。

2.2 検索技法

表1 画像情報の表形式による記述

画像コード番号	被描写体番号	項目名	ラベル	U_1	U_2	U_3	U_4
0001	0	表題	○○○				
0001	0	作者	△△△				
0001	0	年代		55	60	70	75
0001	0	叙情	楽しい	.5	.6	.8	.9
0001	0	叙情	暖かい	.4	.5	.7	.8
0001	1	名称	山				
0001	1	X座標		0	10	50	60
0001	1	Y座標		30	35	65	70
0001	1	標高	高い	.8	.9	1.	1.
0001	2	名称	川				
0001	2	X座標		45	50	90	95
0001	2	Y座標		5	10	60	65
0001	2	全長		40	50	50	60
0001	3	名称	家				
0001	3	X座標		10	20	40	50
0001	3	Y座標		10	15	35	40

本画像データベースの情報検索は、項目名とファジィ集合のラベルによるクリスプ検索と、ファジィ集合を特性づけるメンバーシップ関数によるファジィ検索の2段階に分ける。クリスプ検索では、検索条件から項目名とファジィ集合のラベルを抜き出し、従来のデータベースと同様のキーワード検索によりデータを絞り込む。続いて、ファジィ検索では、絞り込まれた画像データについて、3.3節で定義する満足度を求め、その高い順に画像を提示する。最終的には、提示された画像データから、検索者が自分で求めている画像を選ぶ。

3 画像情報データベースの構成

3.1 蓄積データ

本画像データベースでは、キーとなる画像コード番号が付けられた原画データを説明するため、被描写体毎の場景データとして、その名称と画像中の位置、さらに必要に応じて標高，全長等の付加的な情報を与える(表1，図1参照)。

また、表題や作者等を項目名とする書誌データや、画像から醸し出される暖かさや柔らかさ等の感覚的事項や、楽しさや恐怖感など喜怒哀楽等の生理的、心理的事項のデータを扱う叙情データを追加する。

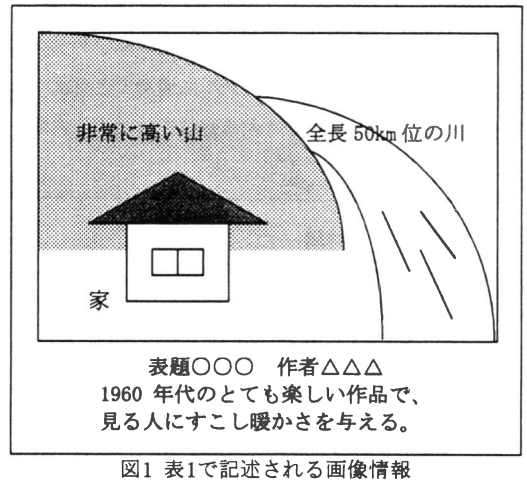


図1 表1で記述される画像情報

3.2 メンバーシップ関数

本データベースでは、ファジィ集合を特性づけるメンバーシップ関数は、図2に示すような台形型を基本とし、4個のパラメータU_1,U_2,U_3,U_4で表す。ここでuの定義域は、座標や年代のような数値のあいまいさが対象の場合は、適当な実数区間をとる。「非常に～」のように言葉のあいまいさが対象の場合、真理値集合[0,1]をuの定義域とする。

また、$U_2=U_3$で「およそ～」、$U_1\rightarrow-\infty$で「～以下，以前」、$U_4\rightarrow+\infty$で「～以上，以降」という状況をそれぞれ表す。

3.3 満足度の計算

絵画の様に複雑さやあいまいさの大きいデータでは、検索条件に対する蓄積データの一致度ではなく、包含関係に基づく評価の方が適している。また、矛盾律や排中律が成立しないファジィ集合による条件検索では、検索条件の否定に相当するファジィ集合に対する包含関係も考慮すべきである。

以上の観点から、データを表すファジィ集合Dが検索条件を表すファジィ集合Cに包含される度合を$\pi(C,D)$、Cの補集合C^Cに包含される度合を$\pi(C^C,D)$とするとき、データDの検索条件Cに対する満足度$\Pi(C,D)$を次式で定義する。

$$\Pi(C,D)=\pi(C,D)/\{\pi(C,D)+\pi(C^C,D)\} \qquad (1)$$

なお$\pi(C,D)$は、CとDの積集合から評価される。具体的には、データの種類に応じて、積集合の高さや面積を$\pi(C,D)$とする。

4 キーワード・メニューの構成

実際の情報検索の場面では、キーワードの決定と入力が困難である。そこで、キーワード集を用意して検索者に便宜を計ることにする。図3には、被描写体の名称を与えるキーワード・メニュー構成例を示す。検索システム内では、類似したキーワード間には関連性を設定しておくことで、柔軟な情報検索が可能となる。

5 まとめ

本論文では、絵画のようにあいまい性の高いデータにファジィ集合を適用し、関係データモデルに帰着できるようにデータ構造を設計し、検索条件に対する蓄積データの包含関係に基づく検索手法を定式化した。

パソコンのソフトウェアでファジィ集合を取り扱う方策[3][4]も見られることから、現場への普及を考慮して、本データベースは、パソコン上のデータベース管理システムを利用した実現を目指す。

なお本研究は、文部省科学研究費補助金（試験研究(B)06558021）によるものである。

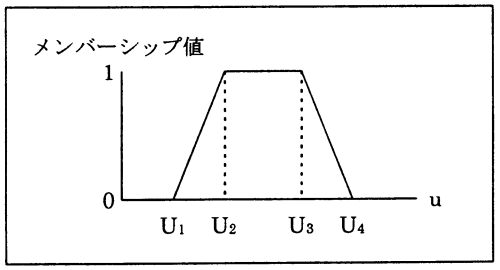


図2 メンバーシップ関数の形状

参考文献

[1] 磯本 征雄, 吉根 勝美: 画像データベースのためのデータ構造と情報検索技法,日本ファジィ学会第 10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.627-630 (1994)

[2] 吉根 勝美, 磯本 征雄: 画像情報データベースのデータ構造と情報検索技法のファジィ論的定式化, 情報処理学会第49回全国大会講演論文集(分冊 4), pp.125-126 (1994)

[3] H. Nakajima and Y. Senoh: Development of Fuzzy Add-in Macros with Spread Sheet, Proceedings of the FUZZ-IEEE/IFES'95 Workshop on Fuzzy Database Systems and Information Retrieval, pp.55-60 (1995)

[4] J. Kacprzyk and S. Zadrozny: Fuzzy Queries in Microsoft ACCESS™ V.2, Proceedings of the FUZZ-IEEE/IFES'95 Workshop on Fuzzy Database Systems and Information Retrieval, pp.61-66 (1995)

連絡先

〒466 名古屋市昭和区山里町 18
南山大学 経済学部
吉根 勝美
TEL 052-832-3111 (内) 277
FAX 052-835-1444

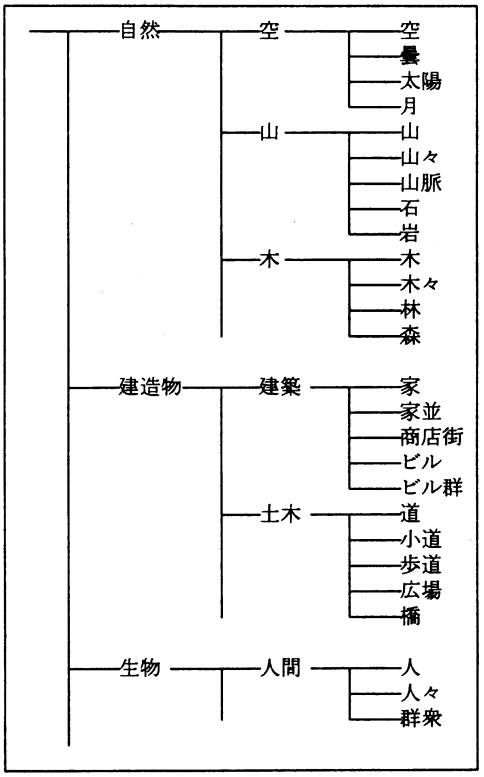


図3 被描写体の名称を与えるキーワード・メニュー

TE2-3

ファジィ数学の大学(文系)基礎教育への導入［Ⅱ］

The Introduction of Fuzzy Mathematics to the Basic Education of University (Non-engineering Course) [Ⅱ]

須田　宏
Hiroshi Suda

慶応義塾大学
Keio University

Abstract——The introduction of fuzzy mathematics to the basic education of university (non-engineering course) is necessary because of the following reasons : (1) The day that fuzzy theory often appears in special studies of university (non-engineering course) will come one of these years. (2) Freshmen will have various knowledge of mathematics when they entered university. Fuzzy theory gives them the ability in logical thinking without preliminary knowledge.

From April, I'm trying this lecture "Introduction to Fuzzy Theory" as one of 'synthetic education seminar'. Now, I have arrived in the midst of my lecture. I'll report about the correspondence of students and trouble points.

1．はじめに

昨年１０月教育工学関連学協会連合第４回全国大会(岐阜大学)において「ファジィ数学の大学(文系)基礎教育への導入」と題して教科内容の試案を提示し，教育関係の専門家にご助言を頂いた．一部修正し本年３月ノンエンジニアリング･ファジィ研究会第５回ワークショップ(法政大学)において「大学(文系)における『ファジィ理論入門』講義試案」と題して再提示し，ファジィ関係の専門家にご批判をお願いした．

本年４月より，１，２年次学生を対象とする「総合教育セミナー」の中で試行し，ファジィ理論に対する学生の反応や教育上の問題点等資料を収集中である．７月第１週段階での中間報告をしたい．

2．「ファジィ理論入門」の教育的意義

近年，ファジィ理論を利用してソフトサイエンスの問題解決をはかる研究が増加してきた．今後広く深くますます活発になっていくものと思われる．一方，大学(文系)の研究領域は人文科学，人間科学，社会科学等と呼ばれる分野で概ねソフトサイエンスの領域に含まれる．

人間の言語，思考，行動や，人間を要素とする組織，組織を部分集合とする社会など人間の関与するところには，1 or 0の２値論理で処理できない現象がしばしばみられる．このような人間特有の「あいまいさ」が含まれる現象の表現，分析にはファジィ理論が有効である．

人文科学の分野では哲学，語学，デザインなど，人間科学の分野では言語学，文化人類学，心理学，教育学など，社会科学の分野では社会学，ビジネスなどへの応用が活発で，経済学，経営学，会計学，マーケッティング，法学，政治学への応用も盛んになりつつある．これらの様相は日本ファジィ学会誌総目次(同誌Vol.6,No.2)，ファジィシステムシンポジウム講演論文集(1994)等を一覧したり，日本ファジィ学会編「講座ファジィ⑭ ファジィ理論と人文・社会科学」(日刊工業新聞社,1994)に記載された具体例や各章末の参考文献を読むと垣間見ることができる．

このような情況から察して，文系の専門科目の中にファジィ理論が顔をのぞかせる日はそう遠くないように思われる．そこで，これら方面を専攻する学生諸君にとって，数学による基礎づけに問題が残るものの，ファジィ理論は研究遂行上の重要な道具となることであろう．

一方，昨年４月より高等学校の新学習指導要領が施行され，選択の幅が広くなったのにともない，１９９７年以降，大学新入生の数学の知識はいま以上に不揃いとなる．高等学校で数学に馴染んでいなかった学生にとっても１つの学問を専攻する上で，論理的思考は不可欠である．

あいまいさの存在を認め，あいまいさを数量的に表すことによって厳密に数式化したならば，あとは明確に，客観的に理論を数学的に展開していくファジィ理論は，その基礎を学習するための予備知識として数学Ⅰ程度で十分と思われるので，論理的思考力を身に付けさせる教材としても適しているといえよう．身近な具体例で説明し，面倒な計算を避けることにより，数学嫌いの学生にも興味を持たせることができるのではなかろうか．

3．「ファジィ理論入門」講義内容案

９０分授業×１３回：２単位相当

Ⅰ 「あいまいさ」

「あいまいさ」について考察し「ファジィネス」という概念を紹介する．さらに，従来の科学的理論と異なる「ファジィ理論」の本質について説明する．

・ファジィネス；ファジィ理論 ——[1]

Ⅱ ファジィ集合

まず，ファジィ理論の基本であるファジィ集合について，その定義と意味，そしてその表現方法について考える．ついで，ファジィ集合に関する基本的な演算とその性質について詳述する．

・ファジィ集合；メンバーシップ関数 ——[2]
・ファジィ集合の演算
　(相等,包含,和集合,共通集合,補集合)
・空集合，全体集合
・演算の基本的な性質 ——[3]
・代数積，代数和とその基本性質
・排他的和，差集合，絶対差，凸結合 ——[4]
・α-レベル集合；分解定理 ——[5]

Ⅲ ファジィ関係

ファジィ理論を応用するとき重要な働きをするファジィ

関係について考察し，その合成，演算，基本的性質等を説明する．さらに，ファジィグラフによる分析法を紹介する．

・ファジィ行列；ファジィグラフ
・ファジィ関係のレベル関係
・ファジィ関係の合成
・ファジィ関係の演算
（包含，和，交わり，補ファジィ関係）
―[6]

・逆ファジィ関係
・ファジィ関係の基本的性質
・反射的，対称的，推移的，反対称的
・推移的閉包
―[7]

・類似関係
・分割木；類似クラス
・ファジィ順序関係
・ファジィ半順序関係
―[8]

Ⅳ ファジィ数

「だいたい３」などというファジィ数についての四則演算を紹介する．

・ファジィ数の四則演算
・クリスプ関数によるファジィ集合の像
―[9]

Ⅴ 拡張原理

拡張原理は，従来の考え方で展開されていた理論をファジィ集合に対しても適用できるように拡張するときに必要で，ファジィ理論の中で欠くことのできない重要なものである．これについて解説する．

・拡張原理
・ファジィ写像によるファジィ集合の像
―[10]

Ⅵ ファジィ推論

ファジィ推論は，あいまいな知識から人間が通常行うのと同じような推論を行って妥当な結論を得るための１つの推論方法である．この方法をコンピュータや機械に実行させファジィ理論の応用範囲が飛躍的に拡大した．この推論方法を紹介する．

・ファジィ命題
・ファジィ推論
（一般化modus ponens，一般化三段論法）
―[11]

・一般のファジィ推論
（多重ファジィ推論形式）
―[12]

・ファジィ推論による制御
（ファジィ制御，Min-Max重心法）
―[13]

４．教案作成のための試行(教育実験)

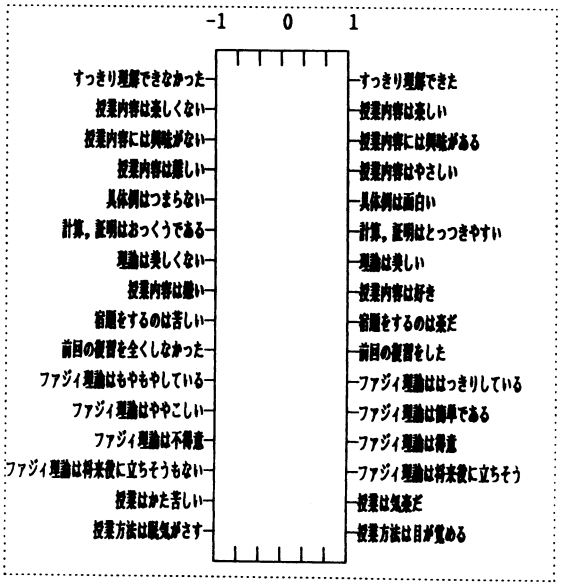
当学部には１，２年次学生を対象に，教員が自主的に内容を選定できる「総合教育セミナー」(通年４単位)が設定されている．本年４月より，この科目の中で上記３の１回分を原則として２回に分け「ファジィ理論入門」を試行している．‘セミナー’の趣旨を活かすため，９０分授業の半分程度を講義にあて，残りの半分を学生との討議にあてている．秋学期には参考文献[５]を用いて学生に発表させることも試みたい．

履修している学生諸君は基礎解析，代数幾何世代である．この授業は予備知識をさほど必要としないので，毎回の討議やアンケートを通しての彼らの率直な意見，反応は‘本格的な講義’の資料として役立つことであろう．

５．中間報告(結果の検討)

予稿集の原稿締切り段階ではまだ検討できないので報告が当日になることをお許し頂きたい．

とくに，情意面調査用ＭＳＤ(滋 三郎「算数・数学に対する態度を測定するために開発されたＳＤについて」数学教育学論究 Vol.39・40,1983)を参考に，下掲のような調査用紙を作成し，毎時限の授業に対して抱いている感じを回答させている．



６．おわりに

前回‘ファジィ理論に興味をもち，勉強を始めてまだ日が浅いにもかかわらず，このような試みを企てるのは無鉄砲のそしりを免れないであろう’と申し上げて試案を提示した．発表後，誤りのご指摘やご助言を頂いた．未熟な筆者に対するこれらの暖かいアドバイスに心から謝意を申し上げたい．十分活かして試行を開始しているが，この講義試案を少しでもより良いものとするため今後も諸先生のご叱正，ご教示を賜りたい．

［参考文献］

［１］ 水本雅晴「ファジィ理論とその応用」サイエンス社 (1988)

［２］ 坂和正敏「ファジィ理論の基礎と応用」森北出版 (1989)

［３］ 向殿政男「ファジィのはなし」日刊工業新聞社 (1989)

［４］ 日本ファジィ学会(編)「講座ファジィ② ファジィ集合」日刊工業新聞社(1992)

［５］ 中島信之，竹田英二，石井博昭「社会科学の数理 ファジィ理論入門」裳華房 (1994)

［連絡先］

〒223 横浜市港北区日吉 4-1-1
慶応義塾大学 商学部
須田 宏
Tel 045-563-1111(内3703)
Fax 045-563-9821(自然科学)

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

TE3-1

ファジィシステムシンポジウム'95

ファジィグラフの特性解析システム

Computer aided Analysis system of Fuzzy Graph

黒柳幸男[1)]，駒形真樹[1)]，土田賢省[1)]，佐藤　章[1)]，山下　元[2)]
1)東洋大学　2)早稲田大学

Yukio KUROYANAGI[1)]，Masaki KOMAGATA[1)]，Kensei TSUCHIDA[1)]，
Akira SATOH[1)]，Hajime YAMASHITA[2)]
1)TOYO UNIVERSITY　2)WASEDA UNIVERSITY

Abstruct. It should be important to represent a fuzzy graph as an approximate graph and clarify its relational structure. In this paper, we propose a methodology to solve this problem through a computer aided analysis system, which we have developed. The system analyzes the problem easily, speedly and exactly .

1　はじめに

人間の認識や行動などに関する情報のように，現実の世界には曖昧さを含むものが数多く存在する。心のはたらきや感性についての情報などはその典型と考えられる。このような情報は主観によるために客観的な基準の確立や法則性を見つけることは難しく，また計測したり，解析したりすることが困難とされている。そこで，人間の判断，評価，心情，感性などに関する情報を定量的に取り扱えるファジィ理論を用いた分析方法が考えられている。

ファジィグラフは関連性や類似性などの観点から分析すると，かなり明確にその本質の抽出が可能になる。そのような解析の過程では，必要とするパラメータを決めたり，その結果を迅速にかつ効率的に判断したりするための図式化が必要になり，コンピュータ支援によるシステムが有効と考えられる。

本研究では，分割樹形図とファジィグラフの近似表現に関するシステムを試作し，実験を行った。近似グラフの表示は円周上にノードを配置する表現形式をベースとするマンマシン処理方法によるものである。

2　コンピュータ支援による特性解析システム

ファジィグラフを用いた類似構造分析や関連構造分析などを手計算で行う場合，分析対象となる要素数が多いときには多大な時間を必要とし，手間のかかる作業となる。このような問題を解決するためには，コンピュータ支援によるシステムが有効である。

本研究では，ファジィグラフを用いた関連構造分析と類似構造分析を対象としてマンマシン処理を実現するシステムを構築した。

2.1　システムの概要

A. システムの機能

本システムは解析目的によって，以下の機能をもつ。すべての処理を自動化することも考えられるが，誰にでも手軽に使用できる，分析者にとって見易く，かつ解析し易い表示を行う，という観点からマンマシン処理とした。

（a）ファジィ行列の入力
（b）入力誤り修正
（c）類似講造分析，分割樹形図の作成と表示
（d）関連構造分析，近似グラフの作成と表示
（e）マンマシンによるグラフ表現の修正

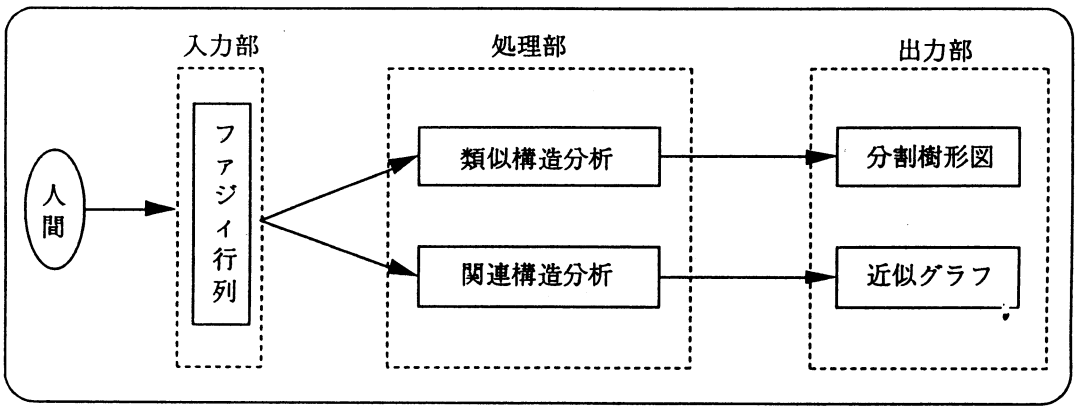


図１　ファジィグラフ特性分析システムの構成

B.システム構成

システムの構成を図１に示す。解析者がファジィ行列を入力する入力部，処理部，出力部の３つの部分から構成されている。

（a）入力部：画面の指定にしたがって，ファジィ行列をキーボードから入力した後に，類似構造 分析と関連構造分析のいずれの処理を行うかを選択する(図２)。入力間違いがあれば修正する。

（b）処理部：後述するアルゴリズムにしたがって，類似構造分析，関連構造分析に必要とする計算，および再計算をそれぞれ行う。

（c）出力部：類似構造分析では，分割樹形図(図３)を作成する。関連構造分析では，一通りの計算をおこなった後に基本となるファジィグラフを表示する。その図形が解析しにくい形(図５(a))である場合には，マンマシン処理によって変形(図５(b))する。これら変更は円周上に配置された２対のノード番号を入れ換えることによって行われる。

２．２　類似構造分析

ファジィ行列Ｆから，各々の係数の類似性を表現するために，分割樹形図を表示する。分割樹形図を作成するときのアルゴリズムは以下のようになる。

分割樹形図を求めるアルゴリズム

（１）ファジィ行列Ｆから，推移包（可達行列）$\hat{F}$を求める。

（２）クラスター分析のＲz，階層の段数を求める。

（３）最初の段のノードの順番を決める。

（４）（２）で求めたＲzに従って，ノードをつなげる。

（５）Ｒzを構造化し，分割樹形図を出力する。

1	0.68	0.68	0.62	0.87	0.92
0.68	1	0.37	0.90	0.55	0.63
0.68	0.37	1	0.30	0.82	0.73
0.62	0.90	0.30	1	0.48	0.57
0.87	0.55	0.82	0.48	1	0.88
0.92	0.63	0.73	0.57	0.88	1

図２　ファジィ行列Ｆ

入力されたファジィ行列の表示内容を図2に，また結果としての分割樹形図を図3に示す。図3の形は人間の描くものより多少ぎこちなく見えるが，これは要素をできるだけ多くすることを考え，詰めた結果によるものである。

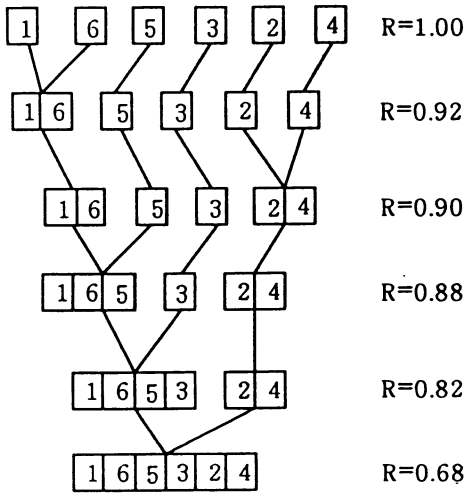


図3　分割樹形図

2．3　関連構造分析

ファジィグラフの近似計算を行うアルゴリズムは，結局のところファジィグラフの近似N値グラフ（N≧3）を求めることになる。類似構造分析と同様に計算の詳細は省略するが，そのアルゴリズムを示すと以下のようになる。この処理は，近似3値グラフを求めるか，近似4値グラフを求めるか，などのように，N（N≧3）の指定，および作成されたグラフの図形表現を必要に応じて修正できるように，マンマシン処理を採用している。

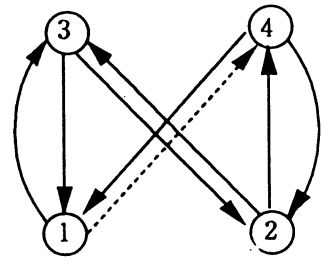
近似N値グラフを求めるアルゴリズム

（1）FのpグラフFpを求める。
（2）FとFpの距離関数d(p)を求める。
（3）Fの表現関数e(p)を求める。
（4）d(p)とe(p)から最適なp*を求める。
（5）Fの近似N値グラフを作成し，基本となる形で図形を表示する。
（6）表示されたファジィグラフを必要に応じて変形する。

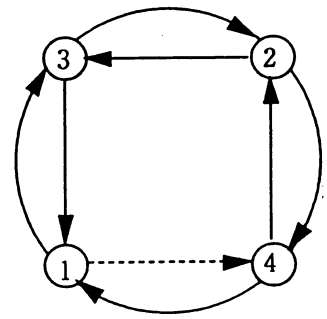
1	0.21	0.79	0.53
0.22	1	0.85	0.20
0.92	0.88	1	0.25
0.90	0.24	0.20	1

図4　関連構造行列（ファジィグラフF）

ファジィグラフの近似N値グラフの図形表示において，解析に適した任意の形を自動的に作図するアルゴリズムは完成していない。したがって，円周上に配置されたノードをベースとした，基本となる図形(図5(a))をもとにして図を変形(図5(b))することになる。マンマシンによる任意の形の図形表示も考えられるが時間的な制約のために，現在は、今回作成した形のようなシステムに止まっている。



（a）基本となる図形



（b）変形した図形

図5　近似グラフF_3の例

3　おわりに

本研究では，ファジィグラフを用いた類似構造分析と関連構造分析のためのコンピュータ支援によるシステムをパソコン（ＰＣ－９８）上に構築し，その概要について報告した。手軽に使えるという観点からパソコンを使用し，しかも解析し易いマンマシン処理方式を提案した。

類似構造分析や関連構造分析の一連の分析過程をシステム化し，マンマシン処理にすることによって、時間の浪費や手間のかかる作業を減らすことができ、また分析も効率的にできることが可能と考えられる。

今後は解析し易いグラフの描画を柔軟に対応できるようにすることなど，システムの改良，さらには類似構造分析，関連構造分析だけでなく，連結度分析，その他の分析機能を付加することによって充実したシステムにしたいと考えている。

4　参考文献

1．山下元，佐藤章：ファジィグラフの近似表現と応用，ファジィシステムシンポジウム，1995

2．清水誠一，他：ファジィグラフを応用した教材構造分析Ⅰ～Ⅲ，ファジィシステムシンポジウム，1990～1995

3．山下元：ファジイグラフの近似構造分析と応用Ⅰ～Ⅱ，電子情報通信学会技術研究報告 ET91-46，ET93-59，1991～1993.

4．西田俊夫，竹田英二：ファジイ集合とその応用，森北出版

5．水本雅晴：ファジイ理論とその応用，サイエンス社

6．山下，勝又，津田：ファジィグラフの解析と応用，日本数学会大会応用数学分科会F89-13,1989

7．山下元：Approximation Algorithm of a Fuzzy Graph and its Application,Int'l Congress of Fuzzy System Association Ⅲ p.492-295，1989

8．山下，滝沢：ファジィグラフの近似分析と応用Ⅰ～Ⅳ，日本数学会大会応用数学分科会S90-01,S92-22,F93-24,S94-34,1990～1994.

9．山下，滝沢，他：Approximate Analysis of Fuzzy Graph and its Application,Int'l Congress of Mathematicians XXII PS18-102;1994.

連絡先
〒350
埼玉県川越市鯨井2100
東洋大学工学部情報工学科
黒柳 幸男
TEL　0492-31-1135
FAX　0492-33-9788

TE3-2

ファジィグラフを応用した教材構造分析 III

--- Instruction and Cognition Structure Analysis Applying Fuzzy Graph ---

清水誠一	勝又保雄	津田 栄
Seiichi Shimizu	Yasuo Katsumata	Ei Tsuda
川面小学校	目黒高校	国学院高校
Kawamo P_R.School	Meguro S_R.H.S.	Kokugakuin S_R.H.S.
簗内顕彦	佐藤 章	山下 元
Akihiko Yanai	Akira Satoh	Hajime Yamashita
早稲田実業	東洋大学	早稲田大学
Waseda-Jitugyo H.S.	Toyo University	Waseda University

ABSTRACT : The uncertain information concerning human behavior, mental process and cognition could be represented by a fuzzy graph and analysed its global feature. In this paper, we would discuss the approximate expression method of a fuzzy graph and present its application to the instruction and cognition analysis.

1．はじめに

人間の認識や行動などに関するあいまいな情報は，ファジィグラフで表して解析するとその特徴を明確にしやすい．本稿では，ファジィグラフの近似法を論ずると共に，それを応用した教材構造分析への応用法を述べる．

2．ファジィグラフの近似法

ファジィグラフG＝(V,F)は，頂点の有限集合V＝{v_i}と，頂点v_iからv_jへのファジィ関連構造行列F＝(f_{ij})，$0 \leqq f_{ij} \leqq 1$，$f_{ii}=1$，により定義される．

ファジィグラフGは，その関連構造行列Fにより定まるので，ここではFをファジィグラフとみなす．

ファジィグラフFの近似N値グラフは，Fのp－グラフF^p，FとF^pの相違度を表す距離関数d(p)，Fの複雑度を表す表現関数e(p)などにより分析される．

定義２．１：Fのp－グラフF^p，$p \in [0, 1/(N-2))$

$$F^p=(f^p_{ij}),\ f^p_{ij}=r/(N-1),\ f_{ij} \in X_r$$

ただし，$0 \leqq r<N$，$r>[N/2]$のとき$X_r=(x_r, x_{r+1}]$，$r=[N/2]$のとき$X_r=[x_r, x_{r+1}]$，$r<[N/2]$のとき$X_r=[x_r, x_{r+1})$，また，$x_r=0.5+(r-N/2)p$，$x_0=0$，$x_N=1$である．

定義２．２：距離関数d(p)，表現関数e(p)

$$d(p)=\alpha_N \Sigma |f_{ij}-f^p_{ij}|/(n^2-n)$$

$$e(p)=\gamma(p)/(n^2-n)$$

だだし，$\gamma(p)=|\Gamma|$，$\Gamma=\{f^p_{ij} \in F^p ; f^p_{ij} \neq 0, 1\}$である．

定理２．１：d(p)の最小値d_m，e(p)の単調性

$$d_m=d(1/(N-1)) \leqq d(p)$$

$$p_i<p_j \Rightarrow e(p_i) \leqq e(p_j)$$

次に，FとF^pの一致度を評価するファジィ集合Dのメンバーシップ関数を$f_D(p)$，F^pの簡潔度を評価するファジィ集合Eのメンバーシップ関数を$f_E(p)$とする．

定義２．３：関数$f_D(p), f_E(p) \in [0, 1]$

$$f_D(p)=\{d_M-d(p)\}/\{d_M-d_m\}$$

$$f_E(p)=\{e_M-e(p)\}/\{e_M-e_m\}$$

ただし，$d_M=\mathrm{Max}\{d(0), d((N-2)^-)\}$，$e_m=e(0)$，$e_M=e((N-2)^-)$である．

ここで，メンバーシップ関数$f_D(p)$と$f_E(p)$のファジィ決定を

$$f_G(p)=f_D(p) \wedge f_E(p)$$

とする．また，$f_G(p)$の最大化決定をp*とすると，その値はFを近似するpの最適値と考えることができる．

したがって，$p=p^*$ としたFのp－グラフを，Fの最適な近似N値グラフとみなす．

定理２．２：Fの近似N値グラフ F^*_N

$$F^*_N=(f^*_{ij}),\ f^*_{ij}=r/(N-1),\ f^*_{ij}\in X_r$$

ただし，$0\leqq r<N$，$r>[N/2]$のとき $X^*_r=(x^*_r,\ x^*_{r+1}]$，$r=[N/2]$のとき $X^*_r=[x^*_r,\ x^*_{r+1}]$，$r<[N/2]$ のとき $X^*_r=[x^*_r,\ x^*_{r+1})$，また，$x^*_r=0.5+(r-N/2)p^*$，$x^*_0=0$，$x^*_N=1$ である．

一般に，定理２．２より，あたえられたファジィグラフFの近似N値グラフ F^*_N，$N\geqq 3$，ができる．

３．ファジィグラフの応用例

ファジィグラフの近似N値グラフの応用として，教材構造分析について述べる．

一般に，教授者の教材構造は，学習者の認知構造をフィードバックすることにより，検証，または，改善されるとする．

n人の学習者 $\{S_k;\ 1\leqq k\leqq n\}$ に，m項目のテスト $\{P_i;\ 1\leqq i\leqq m\}$ を行なうと，テストの得点行列 $X=(x_{ki})$ が得られる．ただし，学習者 S_k が項目 P_i を正答した場合は $x_{ki}=1$，誤答した場合は $x_{ki}=0$ とする．

得点行列Xから，テスト項目 P_i と P_j の同時正答者数a，同時誤答者数dなどを集計すると，図３．１のクロス集計表 C_{ij} ができる．

$P_i\backslash P_j$	1	0	合　計
1	a	b	a＋b
0	c	d	c＋d
合　計	a＋c	b＋d	n

図３．１　クロス集計表 C_{ij}

クロス集計表 C_{ij} から，項目 P_i と P_j のファジィ類似係数 s_{ij}，項目 P_i から P_j へのファジィ関連係数 f_{ij} などが求まる．

定義３．１：類似係数 s_{ij}，関連係数 f_{ij}

$$s_{ij}=s_{ji}=(a+d)/n\in[0,1]$$

$$f_{ij}=(a+d)/[(a+c)+(c+d)]\in[0,1]$$

ファジィ類似係数 s_{ij}，ファジィ関連係数 f_{ij} に関して，つぎの性質が成りたつ．ただし，ϕ_{ij} は，項目 P_i と P_j の相関係数を表す．

補題３．１：$s_{ij}\sim 2\phi_{ij}-1$

$$2/s_{ij}=1/f_{ij}+1/f_{ji}$$

$$\overline{x}_i<\overline{x}_j\Rightarrow f_{ij}<f_{ji}$$

$$s_{ij}=1-\Sigma|x_{ki}-x_{kj}|/n$$

$$f_{ij}=s_{ij}/(1-\overline{x}_i-\overline{x}_j)$$

だだし，$\overline{x}_i=\Sigma x_{ki}/n$，$\overline{x}_j=\Sigma x_{kj}/n$ である．

ファジィ関連係数 f_{ij} から，ファジィ関連構造グラフ $F=(f_{ij})$ ができ，教材の関連構造が分る．

ここで，ファジィグラフFを近似し，近似N値グラフ F^*_N をつくると，学習者の大域的な認知構造が分る．

本分析法には，多量のファジィデータの計算が必要とされる．これを正確，かつ，迅速に処理するため，マイクロコンピュータによる支援システムが開発され，筆者等のあいだで利用されている．

ファジィグラフを応用した教材構造分析の適用例として，初等教育における「九九」について述べる．

３０人の学習者に，図３．２のテストを実施し，図３．３の得点行列Xがえられた．

次に，得点行列Xを分析すると，「六の段」に関しては，図３．４のファジィグラフFができる．

8×1＝	9×1＝
8×5＝	6×7＝
6×6＝	9×8＝
7×9＝	7×6＝
9×4＝	6×5＝
9×6＝	6×8＝
7×2＝	6×1＝
7×7＝	7×1＝
8×4＝	9×5＝
8×7＝	7×4＝
6×9＝	6×4＝
8×3＝	9×2＝
8×8＝	7×8＝
8×2＝	8×6＝
6×2＝	8×9＝
6×3＝	9×3＝
7×3＝	7×5＝
9×9＝	9×7＝

図３．２　テスト問題

	6	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	9	9	9	9
	6	7	8	9	6	7	8	9	6	7	8	9	6	7	8	9
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
5	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
18	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
19	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
20	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
29	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
30	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

図３．３　得点行列X

ファジィグラフFのu－カットグラフF$_u$は図３．５となる．ただし，uは片連結度で，u＝0.86である．

ここで，ファジィグラフFの近似構造グラフを求めると，F^*_2，F^*_3，F^*_4，F^*_5は，それぞれ，図３．６，図３．７，図３．８，図３．９となる．

また，N＝３，４の場合のファジィ決定をグラフに示すと，それぞれ，図３．１０，図３．１１となる．

これら事例から，近似N値グラフが，もとのファジィグラフの特徴を簡潔に表していることが分る．

また，Nが大きくなるにつれて，近似N値グラフがもとのファジィグラフの状態を，順次に，正確に示すことも分かる．

これらの近似構造グラフから，「六の段」の認知系列として，(6x6)→(6x7)→(6x9)→(6x8) が判断される．

「六～九の段」のファジィグラフとその近似５値グラフは，それぞれ，図３.12，図３.13のようになる．

これから，初等教育における「九九」計算の認知構造が考察される．

一般に，ファジィグラフの近似N値グラフは，本稿に適用例として述べた教材構造分析の他にも，ソシオメトリー分析，意識調査などのあいまいな情報の構造解析に応用される．

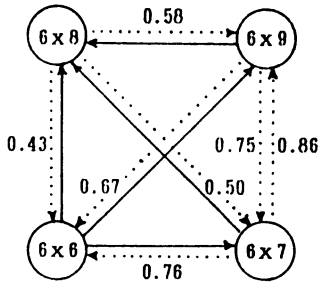


図３．４　ファジィグラフF

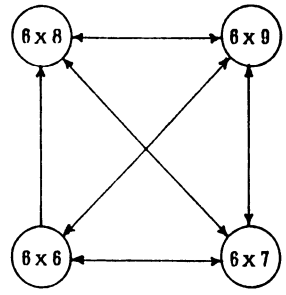


図３．６　近似２値グラフF^*_2

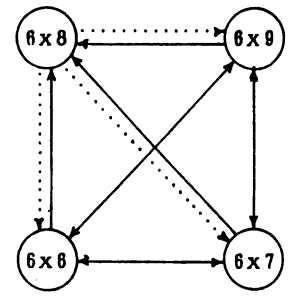


図３．８　近似３値グラフF^*_3

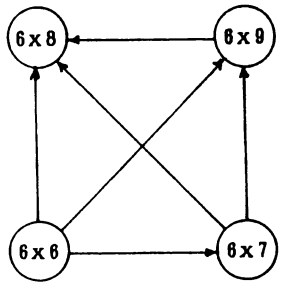


図３．５　u-カットグラフF$_u$

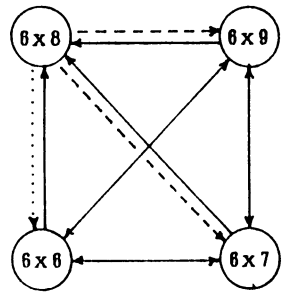


図３．７　近似４値グラフF^*_4

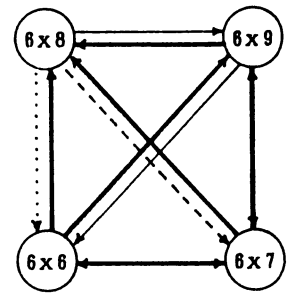


図３．９　近似５値グラフF^*_5

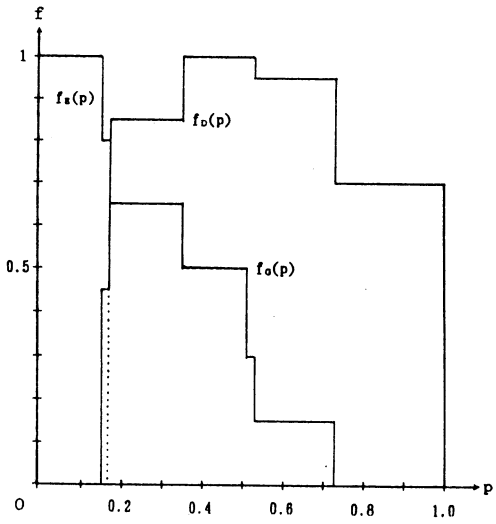


図３．１０　ファジィ決定（Ｎ＝３）

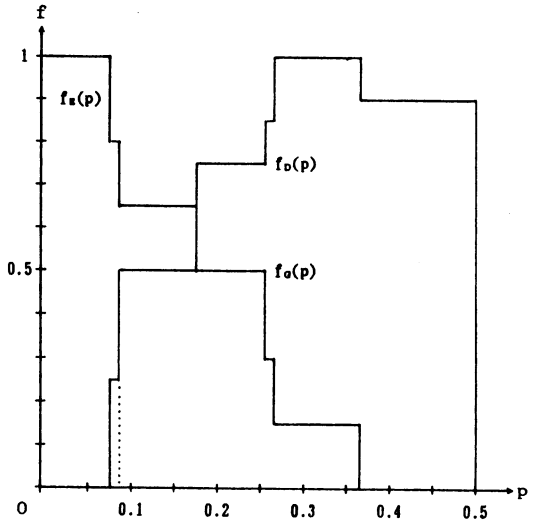


図３．１１　ファジィ決定（Ｎ＝４）

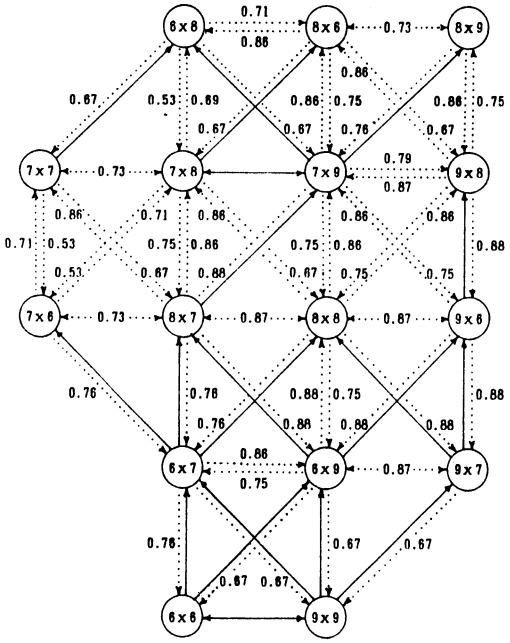


図３．１２　ファジィグラフ

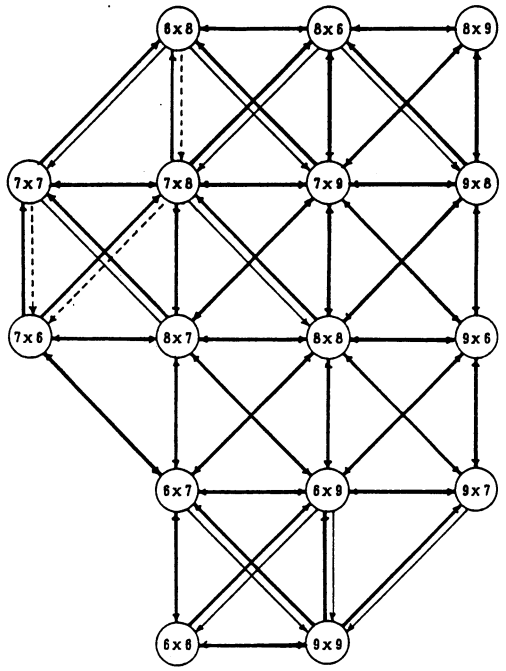


図３．１３　近似５値グラフ

［参考文献］

１．西田，竹田：ファジイ集合とその応用，森北出版，1978.

２．山下，森岡：Global Structure of a Fuzzy Graph, Analysis of Fuzzy Information, CRC Press, 1987.

３．山下，勝又，津田：ファジィグラフの解析と応用，日本数学会大会応用数学分科会 F89-13, 1989.

４．山下：Approximation Algorithm of a Fuzzy Graph and its Application, Int'l Congress of Fuzzy System Association III, 1989.

５．山下，他：Approximate Analysis of Fuzzy Graph, Int'l Congress of Mathematicians XXI, 1990.

６．山下，滝沢：ファジィグラフの近似分析と応用 Ⅰ～Ⅳ，日本数学会大会応用数学分科会 S90-01, S92-22, F93-24, S94-34, 1990～1994.

７．山下：ファジィグラフの近似構造分析と応用Ⅰ～Ⅱ，電子情報通信学会 ET91-46, ET93-59, 1991～1993.

８．山下，滝沢，他：Approximate Analysis of Fuzzy Graph and its Application, Int'l Congress of Mathematicians XXII, 1994.

TE3-3

ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析VI

Sociometry Analysis Applying Fuzzy Theory

清水誠一	山下　元	勝又保雄	津田　栄
Seiichi SHIMIZU	Hajime YAMASHITA	Yasuo KATSUMATA	Ei TSUDA
川面小学校	早稲田大学	目黒高校	国学院高校
Kawamo Pr. Sch.	Waseda University	Meguro Sr.H.S.	Kokugakuin Sr.H.S.

Abstract —Fuzzy Theory is a theory which is fit to analyze fuzzy information about human behavior or recognition and we can make reasonably our decision by the theory. Recently it is applied in many disciplines of soft-science. The sociometry is one of the popular method to represent human relationship by using crisp graph. But it is difficult to have a clear grasp of the particular human class. To solve this problem, we developed a new analysis method to represent an approximate structure of human class applying fuzzy graph. In this paper, we would not only discuss the analysis method, but also illustrate its practical effectiveness with the case study in elementary school.

1　はじめに

ソシオメトリー (Moreno [1]) とは，社会集団内の個々の成員間の牽引と反発の関係を調査する代表的な社会的測定法である。従来，集団の成員間の構造を知る手法として，ソシオメトリックテストが利用されている。ソシオメトリックテストの結果から，ある集団の成員どうしの選択・排斥関係等の関係を把握することができる。しかし実際には，その分析結果から集団構造の特徴を明確に，直接的に理解するにはかなりの困難を伴う。

ファジィ理論は，人間の行動，認識などのあいまいな情報を分析し，意志決定を行う理論で，近年ではソフトサイエンスの分野で広く応用されている（山下 [7])。集団における人間関係は，本来的にあいまいさ (fuzziness) を伴うものである。筆者等はファジィ理論を応用し，人間の選択の感情についてのファジネスを測定することにより，従来のソシオメトリックテストでは十分に表すことのできなかった集団内の人間関係や，集団構造の特性を明確に抽出する方法を開発 (山下 [4]) した。本稿ではファジィグラフを応用した近似ソシオグラムの分析法を示すと共に，学校教育での具体的な適用事例を通して，その効用について述べる。

2　ソシオグラムの分析法

M人の集団 $\{S_i ; 1 \leqq i \leqq M\}$ に，選好順位をつけたアンケート（図1）を行い，成員間の関連状態を近似的に測定する。この結果から，成員S_iがS_jを選択した順位k_{ij}を要素とする応答行列$K=(k_{ij})$，$0 \leqq k_{ij} \leqq N$，が得られる。応答行列から，評定得点を表す係数$r_{ij} \geqq 0$を要素とする評定行列$R=(r_{ij})$，$0 \leqq r_{ij} \leqq N$，を作成する。

定義2.1　$N=[\Sigma n_p / MN + 0.5]$

$n_p = \Sigma \mathrm{Max}\{k_{ij}\}$

$r_{ij} = N - k_{ij} + 1$

評定行列Rから，成員S_iとS_jに関する友好のファジネス$s_{ij} \in [0, 1]$と，成員S_iからS_jへの選好のファジネス$t_{ij} \in [0, 1]$を求める。

定義2.2　$2/s_{ij} = N / r_{ij} + N / r_{ji}$，$s_{ii}=1$

［問い］グループで活動するとき、同じグループになりたい人がいれば、順に書きなさい。

順位	相　手	順位	相　手
1		7	
2		8	
3		9	
⋮		⋮	
6		12	

図1　アンケート用紙

ただし，$r_{ij}r_{ji}=0$ の時は，$s_{ij}=0$ とする。

定義2.3　$t_{ij}=r_{ij}/N$，$t_{ii}=1$

この友好係数s_{ij}は，選好係数t_{ij}とt_{ji}の調和平均で求められる。

友好係数s_{ij}から，ファジィ友好行列（グラフ）$S=(s_{ij})$，$s_{ij}=s_{ji}$，が構成される。このSのクラスター分析による分割樹形図Pから，集団の分岐状態がわかる。選好係数t_{ij}からファジィ選好行列（グラフ）$T=(t_{ij})$，$t_{ij}\neq t_{ji}$，が構成される。

このTを近似すると近似N値グラフT_n^*ができ，成員間の関連状態が把握できる。友好状態を表す分割樹形図Pと，近似N値グラフT_n^*を総合し，集団成員に関する近似ソシオグラムF_n^z（友好度$z=z_0$）が構成される。

3　ソシオグラムの分析例

ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析の適用例として，初等教育における人間関係の分析例を述べる。本稿では，特に集団の人間関係の変容を調べる目的で，小学生のクラスの人間関係について時系列的な分析を行い，その結果を比較することにより，児童の

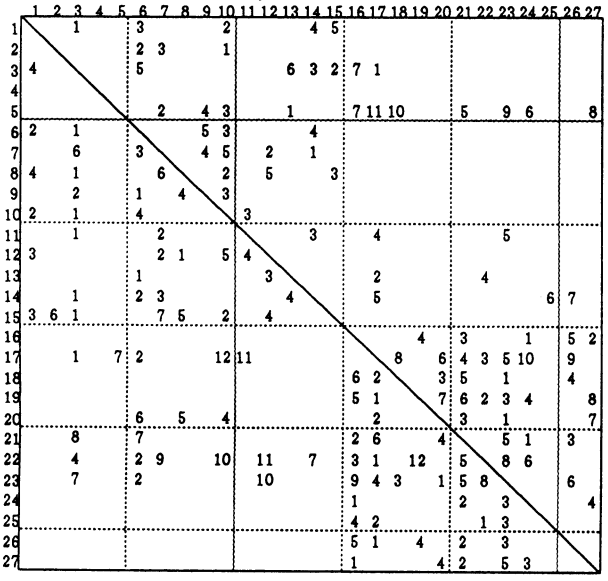


図2　応答行列K_1

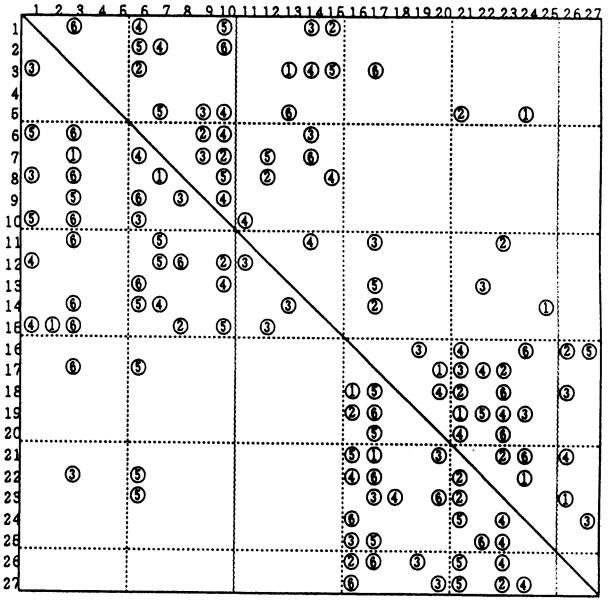


図3　評定行列R_1

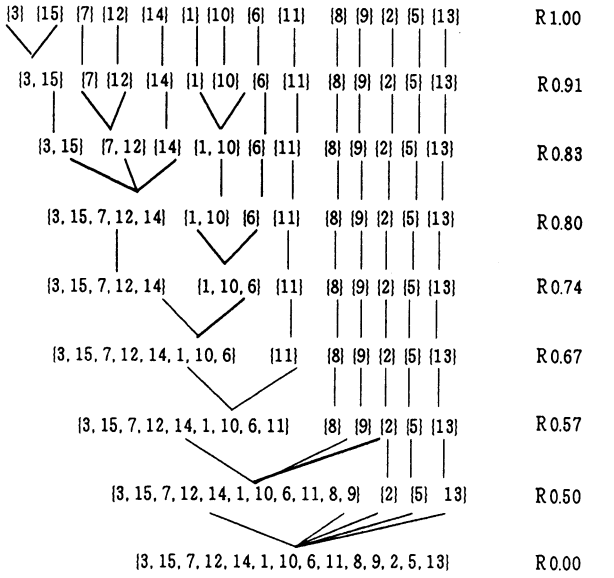


図4　分割樹形図P_1

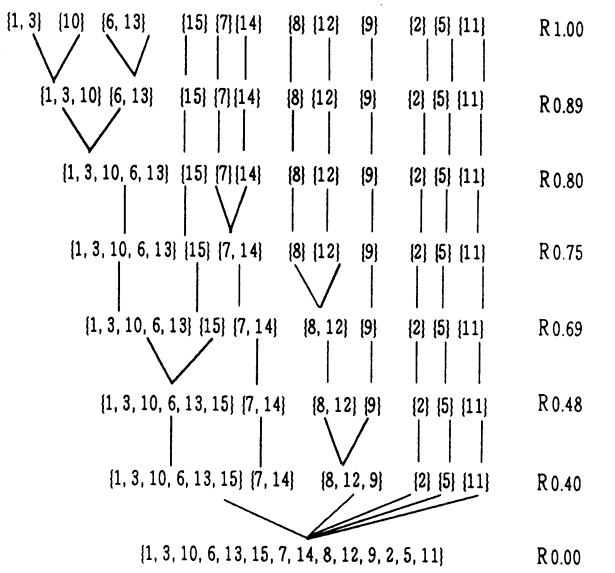


図5　分割樹形図P_2

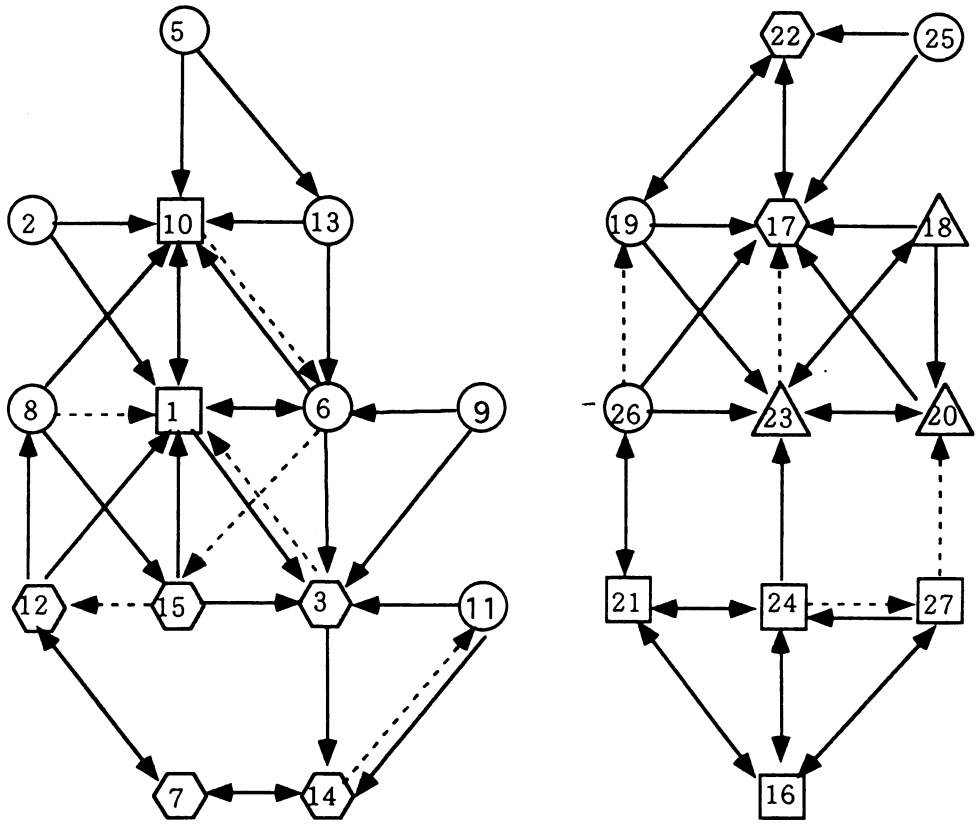


図6　近似ソシオグラム F_1^z

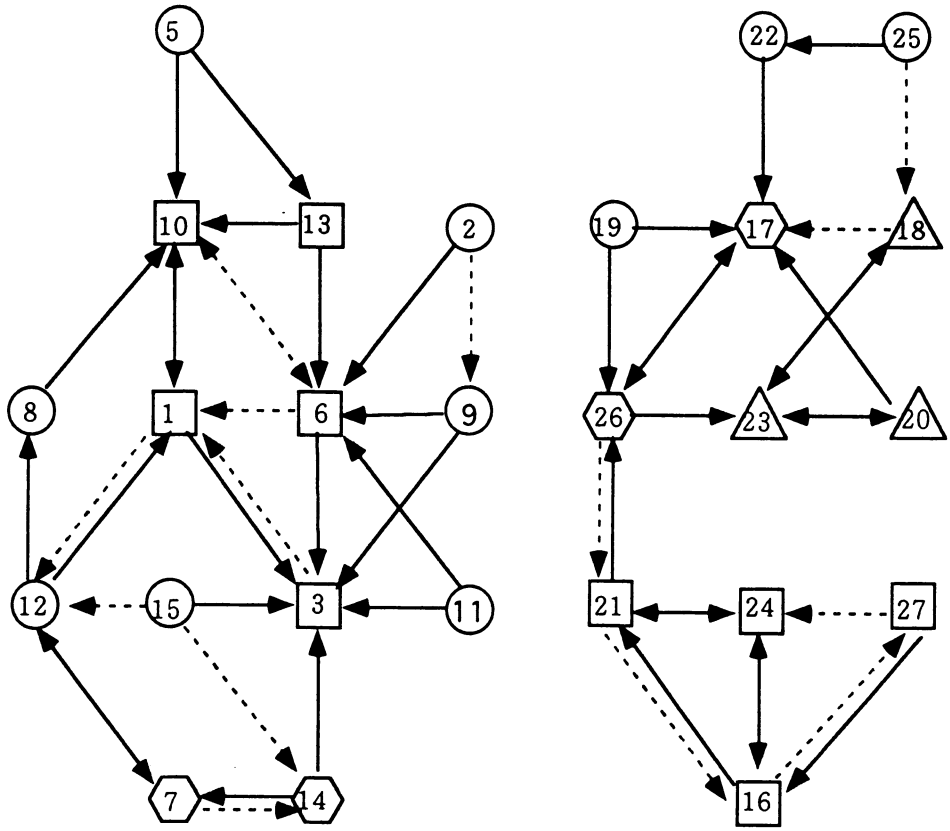


図7　近似ソシオグラム F_2^z

人間関係の具体的な変容を客観的に把握することを目的とする。

岡山県K小学校４年生27名のクラスを対象に，第１回目の調査として図１の友達調べのアンケート(丸川［３］)を実施した（1994年６月)。このアンケートの結果から以下の手順に従い，最終的に近似ソシオグラムF_1^zを求める。

図１のアンケートの結果より得られたクラスの成員に関する応答行列$K_1=(k_{ij})$（図２）から，評定行列$R_1=(r_{ij})$（図３）を作成する。この評定行列R_1の要素を基に，ファジィ友好行列（グラフ）S_1，S_1から集団全体をクラスターに分類した分割樹形図P_1を作成する。P_1の男子のクラスターを図４に示す。

選好係数からファジィ選好行列(グラフ)Tが求められ，このTを近似した近似N値グラフに基づき近似三値行列（グラフ）T_3^*を作成する（N＝３)。

次に分割樹形図P_1を男女のそれぞれのクラスターXとYに分類し，XおよびYについてのファジィ関連行列（グラフ)，近似三値行列（グラフ）を作成する($z=0.83$)。近似三値グラフT_3^*から男女の近似ソシオグラムF_m^zとF_w^zを作成した後，集団全体の近似ソシオグラムF_1^z（$z=0.83$）（図６）を作成する。

時系列分析の第２回目の調査として，同一クラスを対象に同一のアンケート（図１）を実施し（1994年10月)，その結果を基に，第１回目と同様の手順により分析を行った。この第２回目のアンケート結果から分割樹形図P_2が得られる。P_2の男子のクラスターを図５に示す。これより最終的な近似ソシオグラムF_2^z（$z=0.80$）が得られる。

それぞれの近似ソシオグラムF_1^z（図６）とF_2^z（図７）から，集団の成員間の大域的な人間関係，クラス内のオピニオンリーダー，孤立的児童，友好関係等が，かなり明確にわかる。また，２つの集団の関連状態の定量的な比較をするために，これらのファジィグラフについて類似評定を行った。

定義3.1

$d(F_1^z, F_2^z)=\Sigma|f_{ij}^1-f_{ij}^2|/\Sigma N_j$,

$N_j=|\psi|$, $\psi=\{f_{ij}^1; f_{ij}^1+f_{ij}^2\neq 0, i\neq j\}$

ただし，$d(F_1^z, F_2^z)$はF_1^z，F_2^zの類似評定値を表す。男子，女子の類似評定値$d_x(F_1^z, F_2^z)$，$d_y(F_1^z, F_2^z)$はそれぞれ0.44，0.39となる。ファジィ決定に基づく類似の程度(山下［8])から，男女ともに非類似であるため変容があったことがわかる。実際，F_1^z，F_2^zのソシオグラムから，小グループの構成メンバーの変化やリーダーに対する他の児童の関わり方の変化などの具体的な変化が直接的に読み取れる。

このような時系列的な近似ソシオグラムの比較分析から，成員の人間関係の変容がかなり明確になり，集団構造に関する有益な情報，班活動，席変え等のクラス運営に必要な情報，を得ることができる。

４　おわりに

本稿ではファジィ理論を用いたソシオグラムの分析法を示すと共に，適用事例を通じて，その効用を述べた。なお，本稿で述べた事例は集団構造の分析についてであるが，ファジィグラフの近似N値グラフは，教材構造の分析や意識調査などのあいまいな情報の構造解析にも応用される。

なお末筆ながら，本研究でお世話になった早稲田大学の洲之内治男名誉教授，滝沢武信教授，川村女子大学の西村和子教授，および，カリフォルニア大学のＬ．Ａ．ザデー名誉教授に感謝する。

参考文献

［１］J. Moreno : The Sociometry Reader, The Free Press, 1960.

［２］西田，竹田：ファジィ集合とその応用，森北出版，1978.

［３］丸川：ソシオマトリックス利用の手引き，岡山県教育センター，1985.

［４］山下，西村，勝又，津田：ファジィ理論を応用したソシオグラム分析，電子情報通信学会研究報告書ET89-109，1989.

［５］山下：Approximation Algorithm of a Fuzzy Graph and its Application, Int' l Fuzzy System Association Ⅲ TH-5，1989.

［６］津田，勝又，山下，西村，清水：ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析Ⅰ～Ⅴ，ファジィ学会，1989～1994

［７］山下：ファジィグラフの近似構造分析と応用Ⅰ，Ⅱ，電子情報通信学会研究報告書ET91-46，93-60，1991～1993

［８］山下：教育学におけるあいまいさの取扱い，日本ファジィ学会誌4-6，pp.39-47，1992

［９］清水，山下：ファジィソシオグラムの分析法Ⅱ～Ⅲ，電子情報通信学会研究報告書ET，1993

［10］津田，勝又，山下，清水：ファジィグラフを応用したソシオメトリー分析，日本ファジィ学会誌6-3，pp.570-584，1994

［11］清水，山下，勝又，津田：近似グラフを応用したソシオグラムの分析法Ⅰ，教育工学関連学協会連合第４回全国大会，pp.63-64，1994

TE3-4

間隔尺度友達調べによる友達関係伝播図と学級のまとまり度

Application of the Propagation Diagram for Friendship and the Grade of Unity in the Class
Using the Sociometric Test Based on Interval Scale Measurement

宮 地 功
MIYAJI, Isao
岡山理科大学情報処理センター
Information Processing Center, Okayama University of Science

The grades of membership of five characteristic values of the propagation diagram for friendship are defined in the fuzzy set "small numbers". It is defined that the grade of unity of a class is equal to the minimum value in their grades of membership. The classes are classified into the two sets, one of which is well united classes and the other lacks unity, by the grade of unity. It is shown that the characteristic values can clearly discriminate between the two sets. A teacher can grasp the changing of friendship by comparing the diagrams and the grades of unity at two points of time.

1. は じ め に

いじめや不登校の問題が小中学校において深刻になっている．これを解決するために，学級内の児童の仲間作りやまとまりのある学級作りを進めることが今まで以上に大切になってきている．そのために，児童全員の相互の友達関係をできるだけ正確に把握する必要性が高まっている．

学級の友達関係を測定し分析するために，ソシオメトリックテスト[(1)]がある．グラフ理論のグラフは有限個の点(頂点と呼ぶ)とそれらの間を結ぶ有向線を合わせたものである．ソシオメトリックテストの結果を用いて，頂点を学級の一人一人の児童に対応させ，有向線で連結されている2人の間に友達関係があることを示す．その図をソシオグラムと呼び，集団の構造が表現できる[(4)]．

ソシオメトリックテストの1つとして，構成員全員の名前を書いておき，間隔尺度で一人一人について選択の度合を問う質問紙(間隔尺度法)が提案されている[(3)]．選択強さを含めて，構成員全員による全員に対する相互の友達関係の情報が得られる．間隔尺度法ではそのような弱い友達関係も含めて正確なデータが得られる．間隔尺度法から得られた選択する強さの度合をあいまいな選択関係と考え，この関係をファジィグラフと捕らえ，FSM手法によって友達関係伝播図(図2参照)を作成する方法を提案した[(2)]．この図は，左に布置された児童が選択した右に布置された児童に対して矢線を引いて，友達関係がどのようになっているか，それがどのように伝播するか，グループがどのように形成されるかという様子を容易に知ることができる．仲良しグループ間の関係，周辺児，孤立児が容易に分かり，学級の友達関係が明瞭に把握できる．学級のまとまりの程度を視覚的に知ることができる．

友達関係伝播図を特徴づける，頂点数，階層数，グループ数，孤立児数，周辺児数のことを特性値と呼ぶ．この特性値に基づいたメンバーシップ関数から学級のまとまり度を定義する．まとまり度を用いてまとまりのある学級とそうでない学級の集合に分け，特性値によって２つの集合を判別することが可能であることを明らかにする．

以下では，友達関係を表した行列について説明し，友達関係伝播図の特性値から学級のまとまり度を求める方法を説明し，考察する．

2. 間隔尺度法による友達調べ

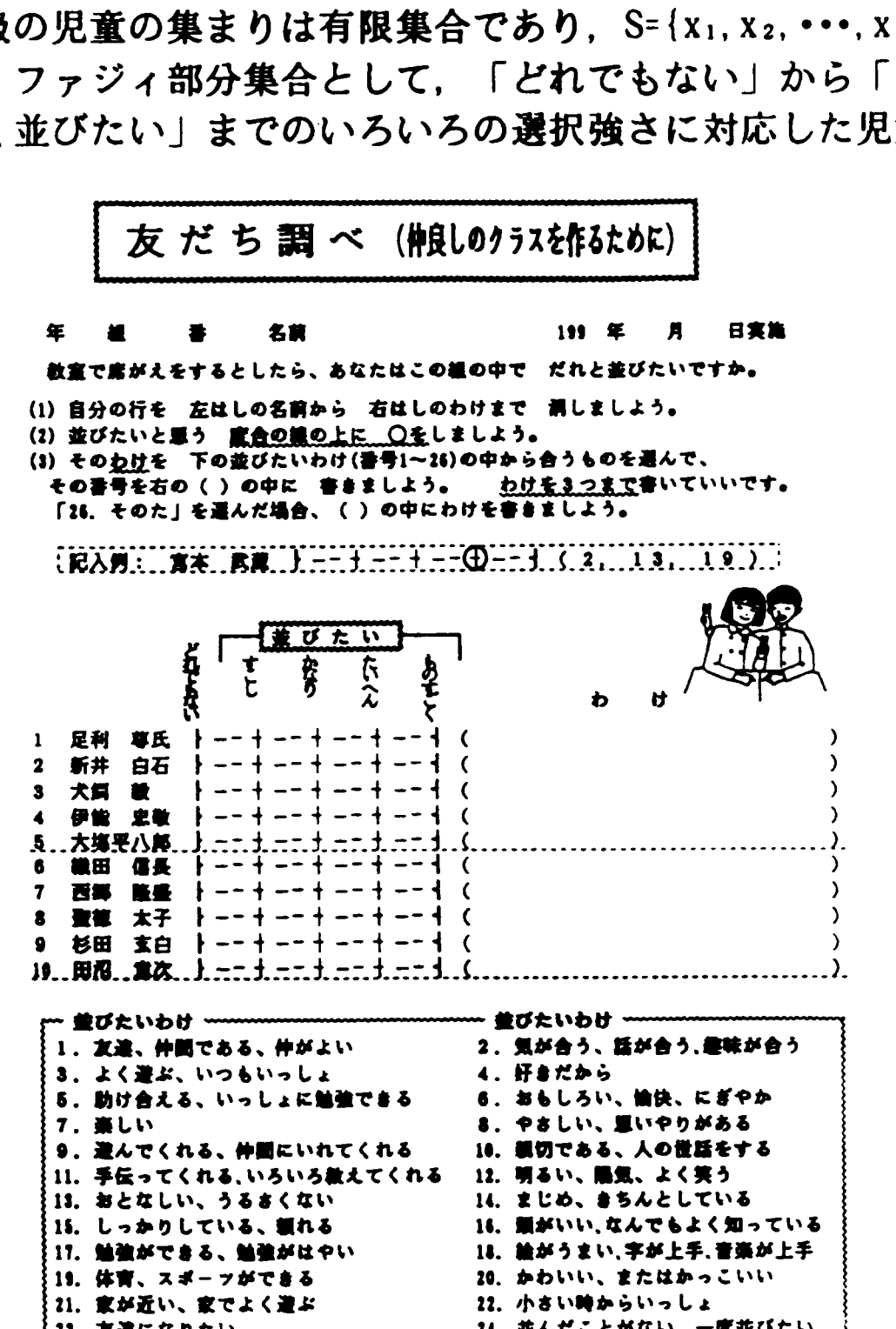
図1のような用紙に学級の児童全員の名前が記入されている5段階の間隔尺度で席替えの際の並びたい程度を測定する[(3)]．各児童に対して並びたい度合として「どれでもない」から「ものすごく並びたい」の5段階がある．それらの選択強さに対して値0, 0.25, 0.5, 0.75, 1を割り当てる．「どれでもない」は並びたくないやどちらでもよいなど積極的に並びたいと思わない気持を含んでいる．度合の右に並びたい理由の番号を記入する欄を設けている．用紙の下に文献(1)を参考にして主要な選択の理由を25項目書いている．

間隔尺度データとして測定して、(0,1)の値f_{ij}をとるように正規化した次の友達関係行列$F=[f_{ij}]$を考える．

$$F=[f_{ij}],\quad 0\leq f_{ij}\leq 1,\quad i,j=1,2,\cdots,n \qquad (1)$$

ここで，nは学級の児童数である．行iは児童x_iが他の児童x_j ($j=1,2,\cdots,n$)について並びたいと思っている程度（選択強さ）を，その列jは児童x_jが他の児童x_i ($i=1,2,\cdots,n$)から並びたいと思われている程度を表している．

ファジィ全体集合の要素は学級の児童x_iそのものであるので，学級の児童の集まりは有限集合であり，$S=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$とする．ファジィ部分集合として，「どれでもない」から「ものすごく並びたい」までのいろいろの選択強さに対応した児童の集


友だち調べ (仲良しのクラスを作るために)

年 組 番 名前 199 年 月 日実施

教室で席がえをするとしたら、あなたはこの組の中で だれと並びたいですか。

(1) 自分の行を 左はしの名前から 右はしのわけまで 調しましょう。
(2) 並びたいと思う 度合の線の上に ○をしましょう。
(3) そのわけを 下の並びたいわけ(番号1〜26)の中から合うものを選んで、その番号を右の ( ) の中に 書きましょう。 わけを３つまで書いていいです。「26. そのた」を選んだ場合、( ) の中にわけを書きましょう。

記入例： 宮本 武蔵 ├──┼──┼──⊕──┤ (2, 13, 19)

	どれでもない	すこし	かなり	たいへん	ものすごく	わけ
1 足利 尊氏						( )
2 新井 白石						( )
3 犬飼 毅						( )
4 伊能 忠敬						( )
5 大塩平八郎						( )
6 織田 信長						( )
7 西郷 隆盛						( )
8 聖徳 太子						( )
9 杉田 玄白						( )
10 田沼 意次						( )

並びたいわけ
1. 友達、仲間である、仲がよい
2. 気が合う、話が合う、趣味が合う
3. よく遊ぶ、いつもいっしょ
4. 好きだから
5. 助け合える、いっしょに勉強できる
6. おもしろい、愉快、にぎやか
7. 楽しい
8. やさしい、思いやりがある
9. 遊んでくれる、仲間にいれてくれる
10. 親切である、人の世話をする
11. 手伝ってくれる、いろいろ教えてくれる
12. 明るい、陽気、よく笑う
13. おとなしい、うるさくない
14. まじめ、きちんとしている
15. しっかりしている、頼れる
16. 頭がいい、なんでもよく知っている
17. 勉強ができる、勉強がはやい
18. 絵がうまい、字が上手、音楽が上手
19. 体育、スポーツができる
20. かわいい、またはかっこいい
21. 家が近い、家でよく遊ぶ
22. 小さい時からいっしょ
23. 友達になりたい
24. 並んだことがない、一度並びたい
25. なんとなく
26. そのた(わけをかっこの中に書く)

図1 間隔尺度法による友達調べ用紙（一部）

合を考える．

3．友達関係伝播図と学級のまとまり度

図2のような友達関係伝播図によって，行動観察や問答では把握できない学級内の児童の内面の心理状態の全体像を見える形に表現できる．まとまった学級は1つの大きなグループがあり，それを何人かの児童が取り囲むような図になる．学級に何となくまとまりがなく，その友達関係がよく把握できない学級については，頂点の数が多い，階層数が多い，大きなまとまりがなく数人のグループがいくつかあり，周辺児や孤立児が多い図が得られる．このように友達関係伝播図を見ると学級のまとまり具合になるほどと納得できる．

48学級について，$\lambda=1$における特性値を表1に示す．頂点数は児童を1つの頂点とした数であり，数人の児童からなるグループも1つの頂点である．グループ数は2人以上の児童の間で強連結の関係になっている数である．

特性値はいずれも小さい方がまとまりのある学級に属する度合が高いと考えられる．学級iの頂点数，階層数，グループ数，孤立児数，周辺児数をc_{ij}(j=1,2,•••,5)で表す．これらの特性値がそれぞれ正規分布するとして，c_{ij}が小さい数の集合に属する度合を次のメンバーシップ関数$\mu(c_{ij})$で表し，その関数を図3に示す．

$$\mu(c_{ij})=0.5-\frac{c_{ij}-m_j}{4\sigma_j},\quad j=1,2,\cdots,5 \qquad (2)$$

ただし，$0\leqq\mu(c_{ij})\leqq1$である．ここで，m_jとσ_jは特性値$c_{\cdot j}$のi=1,2,•••,48についての平均とその標準偏差である．c_{ij}(j=1,•••,5)の中で1つでもかなり大きい値があれば，学級iはまとまりのある学級に属しているとはあまり言えない．このことから，特性値のメンバーシップ関数の最小値を用いて学級iのまとまり度u_iを次のように定義する．

$$u_i=\bigwedge_{j=1}^{5}\mu(c_{ij}) \qquad (3)$$

表1の右端に各学級のまとまり度を示す．m_j以上の$c_{\cdot j}$はかなり大きい値であると考える．図3に示すように学級iのc_{ij}(j=1,2,•••,5)の最大値がm_jのとき，メンバーシップ関数の最小値が0.5になり，$u_i=0.5$である．そこで，0.5を下限値として，次のようにまとまりのある学級の集合C_uを定義する．

$$C_u=\{i\mid u_i\geqq0.5,\ i=1,2,\cdots,48\} \qquad (4)$$

C_u以外のまとまりのない学級の集合をC_lとする．

いま，しきい値$\lambda=1$におけるc_{ij}(j=1,•••,5)を用いて，48学級を2つの学級集合C_uとC_lに分ける．集合C_uとC_lに属する学級数はそれぞれ13と35である．表1の右端に*印を付けた学級がC_uに属する学級である．これらの友達関係伝播図はC_lに属している学級のものよりかなりまとまりがあると視覚的にも確かめた．

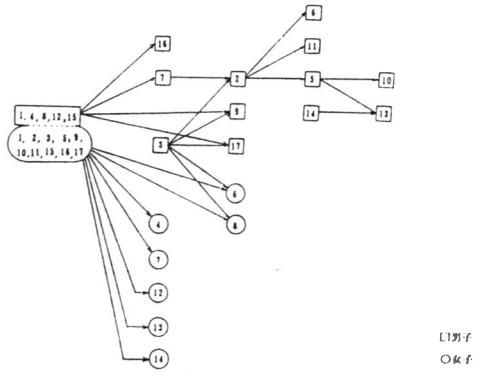


図2　友達関係伝播図の例

線形判別関数を用いて集合C_uとC_lがc_{ij}(j=1,•••,5)で判別できるかどうかについて分析した．表1の各特性値について，判別関数の値（判別得点）を求めてヒストグラムを図4に示す．ここで，×と○はそれぞれ学級集合C_uとC_lを示す．誤判別はC_uについてはなく，C_lについて2学級(学級番号22,41)であり，2つの集合がよく判別されている．誤判別率は4.2%であった．この結果から友達関係伝播図を視覚的に見るだけでなく，その特性値のメンバーシップ関数から求められたまとまり度によって学級のまとまりの程度をほぼ判定できることが明らかになった．

4．ま と め

本論文では，友達関係行列を用いて作成した友達関係伝播図から学級のまとまり度を定義し，そのまとまり度を用いてまとまりのある学級とそうでない学級の集合に分けて，その2集合が特性値によってほぼ判別できることを示した．

友達関係伝播図から学級全体の友達関係を捕らえた後，他の児童からどのように思われているかが分かる理由の度数表[3]を併用して見たり，個人の友達関係図などの図表を参考にして，児童の理解を進め，個別指導をする際の適切な指針を得て、実際に指導し、その効果を再度調べることが重要である．

友達調べを実施して，アンケートにご協力頂きました岡山市内の小学校の先生方に深く感謝致します．

参 考 文 献

(1) 河井芳文:ソシオメトリー入門，みずうみ書房，(1985).
(2) 宮地功:FSM手法によるソシオグラムの提案，電子情報通信学会技術研究報告，ET93-70，pp.29-36 (1993).
(3) 宮地功，岸誠一，小孫康平:間隔尺度測定に基づくソシオメトリックテストの提案と分析システムの開発，教育情報研究，Vol.9，No.2，pp.33-44 (1993).
(4) 田中熊次郎:ソシオメトリーの理論と方法，明治図書 (1972).

表1　友達関係伝播図の特性値とまとまり度

学級	児童数	頂点数	階層数	グループ数	孤立児数	周辺児数	まとまり度
1	36	26	4	5	13	8	0.00
2	34	14	4	3	3	9	0.56*
3	41	10	4	2	1	8	0.56*
4	40	23	7	1	1	21	0.00
5	34	27	6	4	7	17	0.14
6	35	29	4	4	8	17	0.16
7	37	31	5	3	12	16	0.01
8	37	23	5	2	11	10	0.08
9	38	26	4	4	5	17	0.19
10	37	21	4	5	7	8	0.19
11	35	25	6	4	5	17	0.14
12	37	18	4	3	5	8	0.19
13	35	11	4	2	2	7	0.56*
14	42	8	3	1	1	6	0.71*
15	34	20	5	1	2	17	0.19
16	36	23	4	4	6	13	0.35
17	38	34	5	3	11	20	0.00
18	37	21	4	6	6	8	0.02
19	38	24	7	4	4	17	0.00
20	34	27	5	4	8	15	0.23
21	35	6	3	2	1	3	0.68*
22	42	11	3	1	1	5	0.48
23	41	12	3	3	4	7	0.55*
24	36	20	4	3	7	10	0.35
25	38	30	5	2	14	12	0.00
26	37	23	6	4	9	17	0.14
27	35	18	5	6	3	9	0.02
28	35	17	4	5	5	6	0.02
29	35	20	4	5	6	9	0.19
30	35	24	4	3	1	20	0.05
31	36	25	6	4	10	11	0.14
32	37	22	6	4	5	16	0.14
33	37	24	5	5	5	13	0.19
34	36	17	4	4	7	6	0.35
35	35	10	3	2	3	5	0.62*
36	35	24	4	4	7	13	0.32
37	35	21	4	4	9	6	0.21
38	35	23	3	3	8	12	0.28
39	36	2	2	1	0	1	0.83*
40	35	16	4	2	0	14	0.33
41	37	11	5	1	2	8	0.35
42	33	8	3	2	3	3	0.62*
43	33	8	3	2	1	5	0.68*
44	30	16	4	5	4	8	0.19
45	36	4	2	2	0	2	0.68*
46	36	19	6	3	3	13	0.14
47	36	6	4	1	1	4	0.56*
48	36	7	4	2	1	4	0.56*
m	36.2	18.4	4.3	3.1	4.8	10.5	0.29
σ	2.3	7.8	1.2	1.5	3.7	5.2	0.24

[問い合わせ先]
〒700 岡山市理大町1-1
岡山理科大学
情報処理センター
宮 地 功
TEL(086)252-3161 内線4339
FAX(086)252-3012

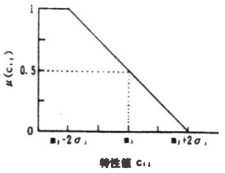


図3　特性値のメンバーシップ関数

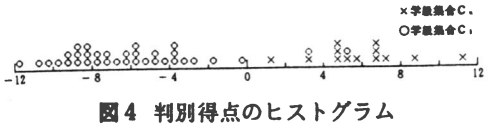


図4　判別得点のヒストグラム

TE4-1

折れ線型メンバーシップ関数を用いたファジィルールの自動チューニング

Self-Tuning of Fuzzy Rules by Piecewise Linear Membership Functions

宮田仁志，大木　誠，柴田修吾+，田中幹浩，藤田裕輝++，大北正昭
Hitoshi Miyata, Makoto Ohki, Syuugo Shibata, Mikihiro Tanaka, Yuuki Fujita, Masaaki Ohkita

鳥取大学工学部電気電子工学科，+関西日本電気株式会社，++NTT Do Co Mo
Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering,Tottori University
+NEC Corporation Kansai,Ltd.,++NTT Do Co Mo

Abstract

In the fuzzy control by the steepest descent method, we propose a use of piecewise linear membership functions(MSFs). In this algorithm, comparing with the conventional triangular form of MSFs, the expressiveness is expanded. As a result, for constructing the inference rules, the iterative learning can be reduced in number. An effectiveness of this algorithm is illustrated with an example of a parallel parking of an autonomous mobile robot.

1．はじめに

ファジィ理論は，制御への応用に適した理論として最近特に注目されている．その応用分野は広範囲にわたっているが，列車の制御，浄水場の制御，家庭用電気製品などで既に実用化されている[1]-[3]．我々は，このようなファジィ理論の特徴に注目し，その手法を取り入れた自律移動ロボットの開発に取り組んでいる[4]-[6]．

しかし，ファジィ理論には，実際に制御対象の入出力関係を表現しようとした場合，ファジィ推論ルールの調整を行わなければならないという問題がある．そこで，このファジィ理論の欠点を補うために，ニューラルネットワークとファジィを融合する手法などが提案されている[7]-[9]．

我々は，文献８，９のデルタルールによるファジィ推論の自動チューニングにおける二等辺三角形型メンバーシップ関数を折れ線型メンバーシップ関数に変更することによって，メンバーシップ関数の表現能力を高めることが出来るのではないかと考えた．

そして，この手法を我々の移動ロボットの縦列駐車制御に適用しファジィルールのチューニングを行った．その結果，学習の収束が早くなったことを示す．

2．折れ線型メンバーシップ関数を用いたファジィ推論

2．1　ファジィ推論

本手法では，文献８，９の手法と同様に後件部が実数値である簡略化ファジィ推論を用いる．

$$\text{Rule } i : \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \cdots x_m \text{ is } A_{im} \text{ then } y \text{ is } w_i \quad (i=1,\cdots,n) \tag{1}$$

（１）式で，$x_1,\cdots,x_m$は入力変数，yは出力変数，A_{i1}，$\cdots,A_{im}$は推論ルールごとに独立に設定された折れ線型メンバーシップ関数を表す．

また，ファジィ推論の演算であるが，前件部適合度演算は，（２）式のような代数積で，推論結果yは（３）式のような重心演算で表される．

$$\mu_i = A_{i1} A_{i2} \cdots A_{im} \tag{2}$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_i} \tag{3}$$

本手法では，このようなファジィ推論の過程を単一のニューラルネットワークで表現し，その学習機能を利用しファジィルールのチューニングを行う．

2．2　メンバーシップ関数

デルタルールによる自動チューニングにおいて，二等辺三角形型のメンバーシップ関数を用いた場合，我々の用いているある入力値周辺で出力値の変化が急激なモデルでは，学習回数が多いという問題点があった．

そこで，メンバーシップ関数の形状に柔軟性を持たせることにより，表現能力が向上すると考え，図１に示すような折れ線型メンバーシップ関数を用いる．図１の折れ線型メンバーシップ関数では，まず二等辺三角形型メンバーシップ関数において，メンバーシップ関数の中心値で左右２つの領域に分割する．そして，さらに左右それぞれの領域において幅

の中点に節点を設ける．これによって，中心値と節点によってメンバーシップ関数は４つの領域に分割されることになり，それぞれの領域を定義域の小さい方から領域１，領域２，領域３，領域４とする．

従って，メンバーシップ関数の学習のパラメータは，中心値a_{ij}，左右２つの幅b_{ij1},b_{ij2}，左右２つの節点の高さc_{ij1},c_{ij2}となる．本手法では，最急降下法によって中心値a_{ij}，左右２つの幅b_{ij1},b_{ij2}については横軸の方向に，左右２つの節点の高さc_{ij1},c_{ij2}については縦軸方向にチューニングを行う．

それぞれの領域でのメンバーシップ関数を次式のように表現する．

［領域１］ $a_{ij}-b_{ij1}<x_j<a_{ij}-b_{ij1}/2$ のとき

$$A_{ij}(x_j)=c_{ij1}-\frac{2c_{ij1}(a_{ij}-b_{ij1}/2-x_j)}{b_{ij1}}$$

［領域２］ $a_{ij}-b_{ij1}/2 \leqq x_j<\leqq a_{ij}$ のとき

$$A_{ij}(x_j)=1-\frac{2(1-c_{ij1})(a_{ij}-x_j)}{b_{ij1}}$$

［領域３］ $a_{ij}<x_j \leqq a_{ij}+b_{ij2}/2$ のとき

$$A_{ij}(x_j)=1-\frac{2(1-c_{ij2})(x_j-a_{ij})}{b_{ij2}}$$

［領域４］ $x_j \leqq a_{ij}-b_{ij1}$, $x_j \geqq a_{ij}+b_{ij2}$ のとき

$$A_{ij}(x_j)=c_{ij2}-\frac{2c_{ij2}(x_j-a_{ij}-b_{ij2}/2)}{b_{ij2}}$$

［上記以外の領域］ $x_j \leqq a_{ij}-b_{ij1}$, $x_j \geqq a_{ij}+b_{ij2}$ のとき

$$A_{ij}(x_j)=0 \qquad (4)$$

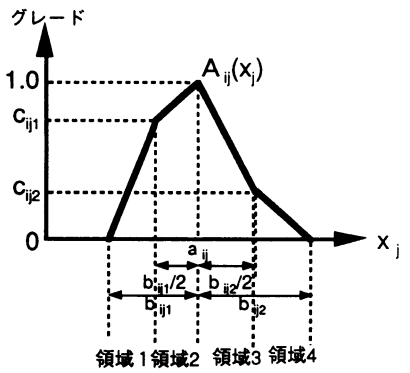


図１　折れ線型メンバーシップ関数

２．３　学習式

本手法では，最急降下法を用いて折れ線型メンバーシップ関数のパラメータa_{ij},b_{ij1},b_{ij2},c_{ij1},c_{ij2}と後件部実数値w_iのチューニングを行う．本手法で用いる評価関数を次式で定義する．

$$E=\frac{1}{2}(y-y^*)^2 \qquad (5)$$

ここで，yはファジィ推論の出力値，y*は学習データの出力値を表している．

本手法で用いる学習式について，後件部実数値w_iと領域１における前件部メンバーシップ関数のパラメータa_{ij},b_{ij1},b_{ij2},c_{ij1},c_{ij2}の更新量を次に示す．

$$\frac{\partial E}{\partial w_i}=\frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^{n}\mu_i}\cdot(y-y^*) \qquad (6)$$

［領域１］ $a_{ij}-b_{ij1}<x_j<a_{ij}-b_{ij1}/2$ のとき

$$\frac{\partial E}{\partial a_{ij}}=\frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^{n}\mu_i}\cdot(y-y^*)\cdot(w_i-y)\cdot\frac{-2(1-c_{ij1})}{b_{ij1}\cdot A_{ij}(x_j)} \qquad (7)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_{ij1}}=\frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^{n}\mu_i}\cdot(y-y^*)\cdot(w_i-y)\cdot\frac{2(1-c_{ij1})(a_{ij}-x_j)}{(b_{ij1})^2\cdot A_{ij}(x_j)} \qquad (8)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_{ij2}}=0 \qquad (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_{ij1}}=\frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^{n}\mu_i}\cdot(y-y^*)\cdot(w_i-y)\cdot\frac{2(a_{ij}-x_j)}{b_{ij1}\cdot A_{ij}(x_j)} \qquad (10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_{ij2}}=0 \qquad (11)$$

領域２，３及び４についても同様の手順により更新量を決める．

３．シミュレーション

３．１　シミュレーション方法

本手法を我々の移動ロボットの縦列駐車制御に適用し，学習の収束が早くなることを示す．

図２に今回適用した移動ロボットの縦列駐車制御の入力変数を示す．

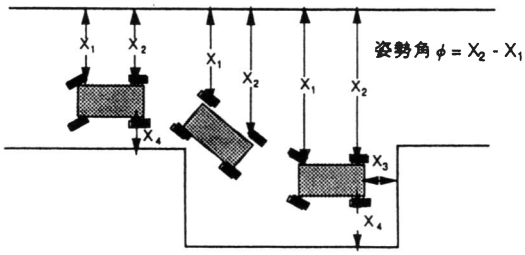


図2　入力変数の定義

入力変数と出力変数は次のように設定した．

入力変数：移動ロボットと後ろ側の壁の距離X_3
　　移動ロボットと左側の壁の距離X_4
　　移動ロボットの姿勢角ϕ
出力変数：移動ロボットの前輪のステアリング角θ

移動ロボットは，バック走行で駐車場に進入し，前輪のステアリング角の操作により１回で駐車場に納まるようにする．また，走行終了条件としては移動ロボットは完全に駐車場に納まり，駐車場の左側面の壁に対してほぼ平行になることとした．

次に，学習に用いる入出力データについて説明する．今まで，我々の研究室で試行錯誤によりチューニングした軌跡[5,6]の中から教示させる軌跡を選び，学習用入出力データを作成した．得られた入出力データは２５個だった．図３に教示させた移動ロボットの軌跡を示す．

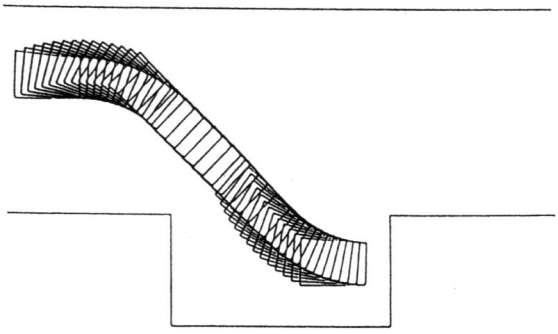


図３　教示させた移動ロボットの軌跡

ファジィ推論ルールの初期設定については，メンバーシップ関数の中心値a_{ij}については定義域を等分割するようにし，２つの幅b_{ij1},b_{ij2}は定義域を十分カバーするように設定し，２つの節点の高さc_{ij1},c_{ij2}は0.5に設定した．メンバーシップ関数は３つの入力変数それぞれに対して３個設定し，ファジィ推論ルールの数は全てのメンバーシップ関数の組み合わせの数である27(=3^3)個とした．また，後件部実数値w_iは全て0に設定した．

以上の条件でシミュレーションを行った．図４に，シミュレーションの手順を示す．

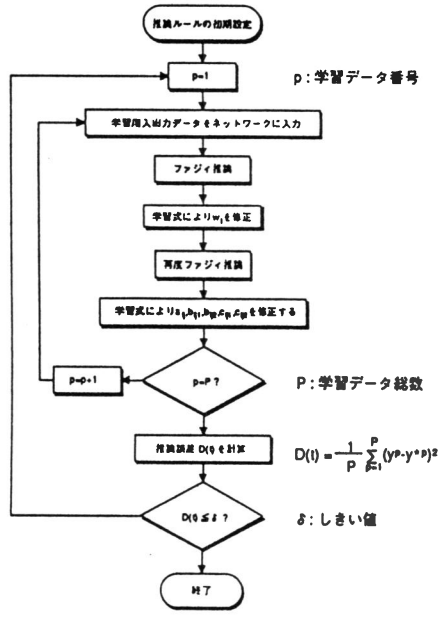


図４　シミュレーションの手順

３．２　シミュレーション結果

シミュレーション結果について述べる．図５にチューニングによって得られたファジィ推論ルールの一例を示す．

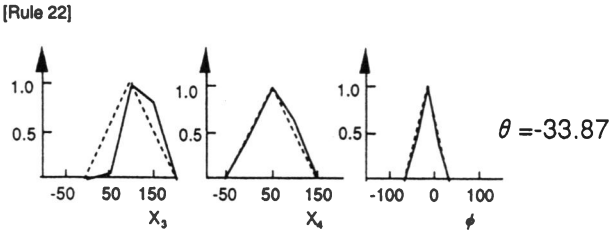


図５　ファジィ推論ルールの一例

図６に折れ線型メンバーシップ関数を用いた場合と，従来の二等辺三角形型メンバーシップ関数を用いた場合の学習の様子を表したグラフを示す．

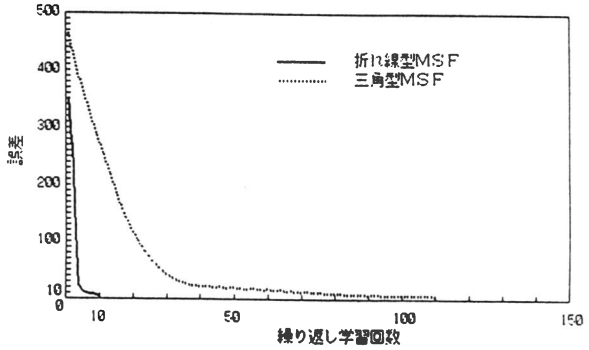
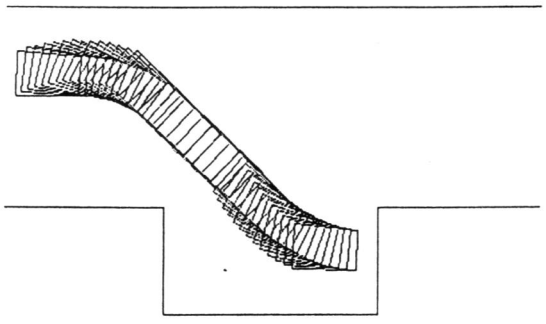


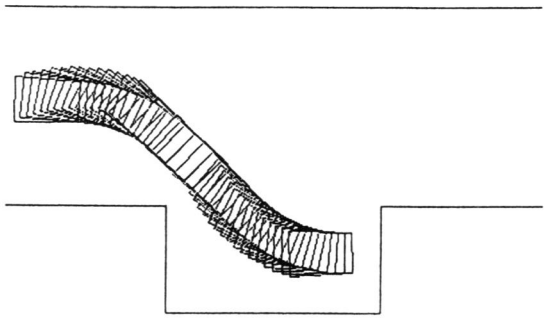
図６　学習回数と誤差

これは，同じシミュレーション条件での学習である．図６からわかるように，折れ線型メンバーシップ関数を用いた場合，従来の二等辺三角形型メンバーシップ関数を用いる場合に比べて繰り返し学習回数が約１０分の１になっているのがわかる．これは，メンバーシップ関数の形状を折れ線型とすることによりメンバーシップ関数の表現能力が向上し，より柔軟な学習が可能になったためと思われる．

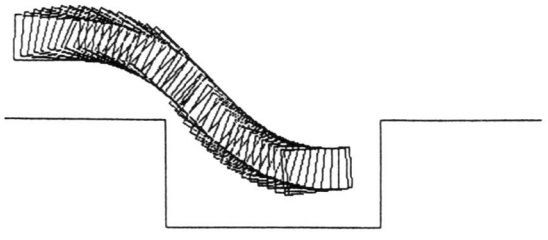
また，チューニングによって得られたファジィ推論ルールによって実際に走行させ，良好な結果が得られ，ファジィ推論ルールの妥当性が確かめられた．図７に色々なスタート位置からの移動ロボットの走行結果を示す．



(a)　道路の右寄りからスタートした場合



(b)　道路の中央付近からスタートした場合



(c)　道路の左寄りからスタートした場合

図７　チューニング後の推論ルールによる走行結果

４．まとめ

ファジィ推論ルールのメンバーシップ関数を二等辺三角形型からより柔軟な形状の折れ線型に変更する手法を提案した．本手法の有効性を検討するために，移動ロボットの縦列駐車制御に適用した．その結果，学習の収束が早くなることが示された．

参考文献

[1] 安信，宮本，井原，”Fuzzy 制御による列車定位置停止制御”，計測自動制御学会論文集，19巻，11号，873-880頁，(1983).

[2] 柳下，伊藤，管野，”ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用”，システムと制御，28巻，10号，597-604頁，(1984).

[3] 日本ファジィ学会，特集　ファジィ応用製品・技術，日本ファジィ学会誌，3巻，2号，2-59頁，(1991).

[4] 大北，宮田，前田，神井，小林，”ファジィ理論を用いた走行ロボットの試作”，鳥取大学工学部研究報告，Vol.21,No.1,pp.75-90，(1990).

[5] M.Ohkita,H.Miyata,M.Miura and H.Kouno, "Travelling experiment of an autonomous mobile robot for a flush parking",Proc. IEEE Internat. Conf. on Fuzzy Systems,(March 28-April 1,San Francisco,CA, USA),Vol.1,pp.327-332,(1993).

[6] M.Ohkita,H.Miyata,M.Miura,H.Kouno,Y.Yokouchi and S.Shibata,"Fuzzy control of an autonomous mobile robot for a parallel parking",Proc. the 14th IMACS World Congress,(July 11 - 15,Georgia Inst. of Tech. Atlanta,GA,USA),Vol.1,pp.404-406,(1994).

[7] 林，野村，若見，”ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルールの獲得”，日本ファジィ学会誌，Vol.2,No.4,pp.585-597，(1990).

[8] 野村，林，若見，”最急降下法によるファジィ推論の自動チューニングと障害物回避への応用”，第６回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.423-426，(1990).

[9] 野村，林，若見，”デルタルールによるファジィ推論の自動チューニング手法と障害物回避への応用”，日本ファジィ学会誌，Vol.4,No.2, pp.379-388，(1992).

連絡先

〒６８０　鳥取市湖山町南４丁目１０１番地
鳥取大学工学部電気電子工学科
大北正昭
TEL　0857-28-0321　（内）4192,4190
FAX　0857-31-0880

TE4-2

山登り法によるファジィルールの自動生成

Automatic generation of Fuzzy Rules by Downhill Method

泉本 和俊, 水本 雅晴
Kazutoshi IZUMOTO Masaharu MIZUMOTO

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

Abstract

In this paper, we show an automatic generation method of fuzzy rules using downhill method. A fuzzy rule is generated in such a way that the center of the fuzzy rule is located at the point where maximal inference error takes place in the input space, and then the parameters of the fuzzy rule are tuned by using downhill method. The process is repeated until the model error becomes small. From the numerical examples, we show that this generation method requires the smaller number of fuzzy rules to achieve the specified model error.

1 はじめに

ファジィ制御などの分野において、ファジィルールを自動的に生成する手法が数多く提案されている。これはルールを生成するシステムが複雑化し、多大な時間と労力が必要になってきたことによる。そこで、熟練者が行う操作をサンプリングして理想入出力とし、同様の出力を得るファジィルールを自動的に生成する手法が考え出されてきた。[1,3,4] 後件部実数値のみをチューニングするものから、重み、前件部メンバーシップ関数の頂点座標を含めてチューニングするものへと発展してきた。現在は、ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムなど多種多様な手法により、それぞれの特徴を持ったチューニング手法が提案されている。

一般的にファジィルールは、格子状に配置する場合が多い。この方法は簡単で効率的であるので、多くの場合に適用できる。しかしながら、この方法では、入力数が増加した場合に、多くのルールを生成しなければならないという欠点がある。

本論文では、適当にメンバーシップ関数を生成・配置し、山登り法によりチューニングを行うファジィルール自動生成手法について述べる。本手法により、入力数が増えても、ルール生成時に多数のルールを作る必要がなくなる。

2 ファジィルールの定義

まず、本論文で使用する円錐型メンバーシップ関数と、簡略化推論法について述べる。この場合、簡単のため、2 入力 1 出力の場合について述べていく。

ファジィルールは次のように表される。

$$\begin{aligned}
&\text{ルール } 0\text{: If } (x,y) \text{ is } A_0 \text{ then } z = z_0\\
&\text{ルール } 1\text{: If } (x,y) \text{ is } A_1 \text{ then } z = z_1\\
&\quad\vdots \qquad\qquad\qquad \vdots\\
&\text{ルール } i\text{: If } (x,y) \text{ is } A_i \text{ then } z = z_i\\
&\quad\vdots \qquad\qquad\qquad \vdots\\
&\text{ルール } m\text{: If } (x,y) \text{ is } A_m \text{then } z = z_m
\end{aligned} \tag{1}$$

ここで、i はルール番号、m はルール数を示す。

ファジィルールの前件部 A_i は 2 次元のファジィ集合であるが、"ファジィポイント" の考えに基づいて、円錐型メンバーシップ関数 (以下、円錐型 MF) を使用する。

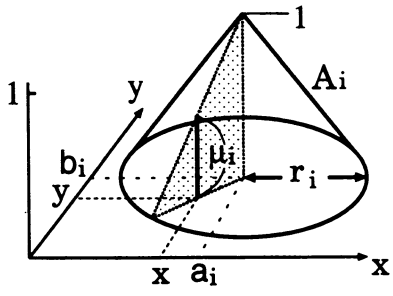


図 1 円錐型 MF のグレード μ_i

円錐型 MF A_i は、頂点座標 (a_i, b_i) と半径 r_i で表現される (図 1 参照)。入力 (x,y) に対するルール i のグレード μ_i は、次式から求められる。

$$\mu_i = \max\left\{0,\ 1 - \frac{\sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}}{r_i}\right\} \tag{2}$$

図 1 で求めた各グレード $\mu_1, \ldots, \mu_m$ と、式 (1) の後件部 $z_1, \ldots, z_m$ の荷重平均を取ることにより、推論出力 z^* が次のように求められる (図 2 参照)。

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^{m} \mu_i z_i}{\sum_{i=1}^{m} \mu_i} \tag{3}$$

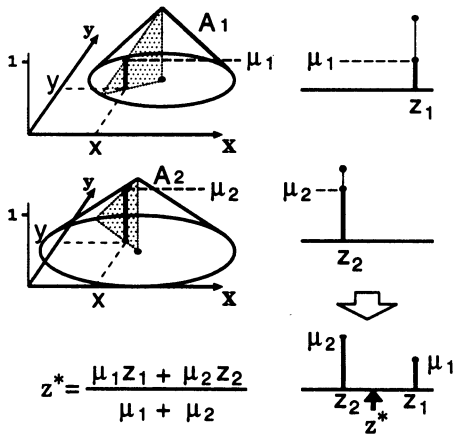


図2　2入力1出力の簡略化推論法

3　山登り法によるファジィルールのチューニング

前件部が円錐型MFからなるファジィルールに対して、理想入出力が与えられたときの、ルール生成手順と、山登り法によるチューニングの方法を以下で説明しよう。

入力を (x, y)、出力を z^r とする入出力データの組を理想入出力として与える。初期ルールの設定後、まずファジィ推論を行い、理想値と推論値との誤差を求め、誤差が最大である点の座標に新たなファジィルールを生成する。次に、誤差の総和をとった推論誤差が小さくなるように、山登り法を用いてチューニングを行う。山登り法を用いてファジィルールのチューニングを繰り返し行い、既存のルールで、これ以上チューニングができないところまできたら、新たなファジィルールを追加生成し、チューニングを再び繰り返していく。

以下に、2入力1出力の場合を例にとって説明を行う。

ステップ 1: 2入力1出力の理想入出力データ $(x, y, z^r)_j$ をすべて読み込む。jはデータ番号を示す。但し入力データ (x, y) は、簡単のため$-1 \leqq x, y \leqq 1$ のように正規化されているものとする。

初期ルール0を、入力空間全体を覆うように設定する。通常、前件部頂点座標 $a_0 = b_0 = 0$, 半径 $r_0 =$ 大きい値, 後件部実数値 $z_0 = 0$ に設定する。

ルール数 $m = 0$ とする。

ステップ 2: 新たなルールの生成を行う。すなわち、ルール m+1 を、ステップ 2-1 からステップ 2-4 で生成する。

ステップ 2-1: ルール生成前の状態でファジィ推論を行い、理想入出力との誤差が最大である点の座標を、新たなルールの頂点座標 (a_{m+1}, b_{m+1}) とする。

ステップ 2-2: 新たなルールの前件部メンバーシップ関数の半径の候補を求める。半径の最大値 r-max を、入力空間 $[-1, 1]$ の半分にあたる1とする。半径の最小値 r-min は、頂点座標から最も近い入力データ点までの距離とする。半径の最小値と最大値を一定数で等分割 (例えば10等分) した値を、半径の候補とする (図3参照)。

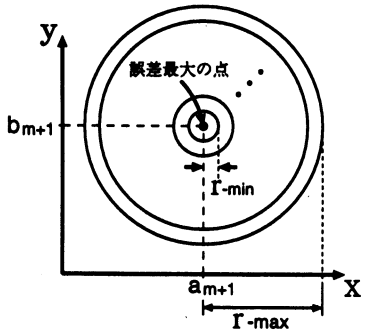


図3　新たな規則の生成過程

ステップ 2-3: それぞれの半径の候補毎に、次式で後件部実数値 z'_{m+1} を求める。

$$z'_{m+1} = \frac{\sum_k \mu^k_{m+1} z^r_k}{\sum_k \mu^k_{m+1}} \tag{4}$$

k は、半径に含まれる入力データ $(x, y)_k$ の番号。

μ^k_{m+1} は、半径に含まれる入力データ $(x, y)_k$ に対するグレード値。

z^r_k は、半径に含まれる入力データの理想出力値。

ステップ 2-4: 各々の半径候補において、式(4)による後件部 z'_{m+1} に対して、全入力データ $(x, y, z^r)_j$ の下でのファジィ推論を行い、次式により推論誤差 E を求める。

$$E = \sum_j |z^*_j - z^r_j| \tag{5}$$

最も推論誤差の小さかった半径候補に対するルールを、新たなファジィルール $m+1$ として採用する。

ルール数 m に1足して、ステップ3へ進む。

ステップ 3: 山登り法によりチューニングを行う。詳しくは、ステップ 3-1 から ステップ 3-5 で述べる。

ステップ 3-1: ルール1から順番にチューニングを行う。$i = 1$ とする。

ステップ 3-2: ルール i の前件部頂点座標及び半径、後件部の値のチューニング候補を、次のように求める。ルール i の頂点座標 (a_i, b_i) を中心として刻み幅 h で、$a_i = a_i, a_i \pm h$; $b_i = b_i, b_i \pm h$ を組み合わせた 3^2個の点を求める。同様に、半径、後件部の値についても同様に、$r_i = r_i, r_i \pm h$, $z_i = z_i, z_i \pm h$ と、それぞれ3個の点を求める (図4参照)。但し、

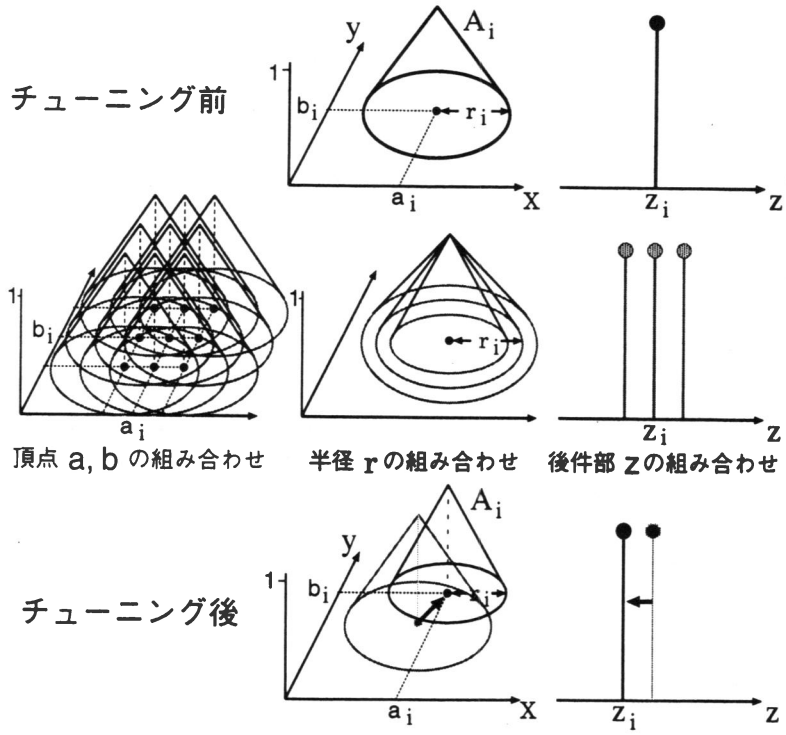


図 4　山登り法によるルールのチューニング法

刻み幅 h は、頂点, 半径, 後件部それぞれに違った値を設定することもできる。

以上の全ての点を組み合わせた 3^4 個のチューニング候補を用いた場合の、推論誤差 E を式 (5) より求める。

ステップ 3-3: 3^4 個の推論誤差のうち、最小値を示した (頂点, 半径, 後件部) の組み合わせをチューニング結果として、ルール i を変更する。

ステップ 3-4: i が、ルール数 m であればステップ 3-5 へ進む。そうでなければ、$i \leftarrow i+1$ として、ステップ 3-2 へ戻る。

ステップ 3-5: 全てのルールのチューニングにおいて、いずれかのルールが変更されていた場合、1 回の学習が終了したとして学習回数に 1 足す。

推論誤差が目標誤差を下回ったら、結果を出力し終了する。そうでなければ、ステップ 3-1 へ戻る。

いずれのルールも変更されていなかった場合、ステップ 3-6 へ進む。

ステップ 3-6: 刻み幅である h の値が、刻み幅の最小値 H-min より大きければ、刻み幅 h を小さくして再びステップ 3-1 へ戻る。H-min を下回った場合、現在のルール数におけるチューニングは終了となり、h を初期値に戻し、ステップ 2 に戻る。但し、ルール数 m が、規定の最大ルール数に達した場合、結果を出力して終了する。

4　シミュレーション結果

文献 [1] で用いられている式 (6) より作成した理想入出力データをもとに、ファジィルールの自動生成を行った。

理想入出力データは、x, y をそれぞれ -1.0〜1.0 の範囲で 20 分割して (x, y) を求め、式 (6) により計算した $f(x, y)$ を z^r とする、20^2 で 400 個の (x, y, z^r) を理想入出力データとした (図 5 参照)。ここで、$a_1 = b_1 = -0.5$, $a_2 = b_2 = 0.0$, $a_3 = b_3 = 0.5$ である。

$$f(x,y) = -0.003 + \sum_{i=1}^{3} \left[i + 400*((x-a_i)^2 + (y-b_i)^2) \right]^{-1} \quad (6)$$

自動生成の過程と結果を、図 6 と図 7 に示し、表 1 で、幾つかの生成例の比較を示す。

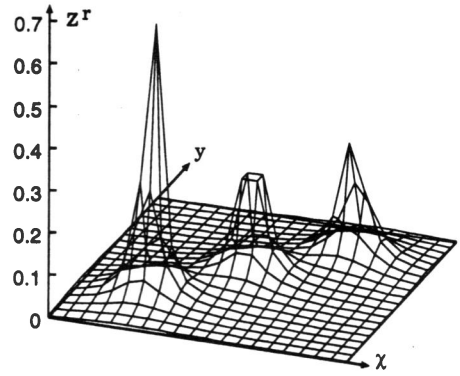
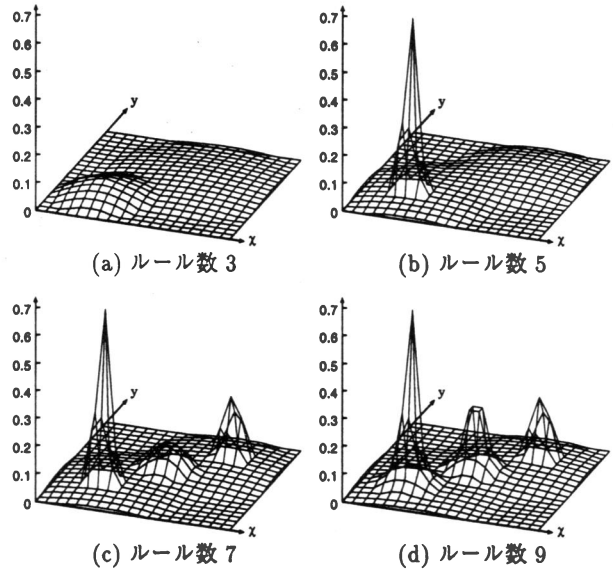


図 5　理想入出力データ (400 個)



(a) ルール数 3　(b) ルール数 5　(c) ルール数 7　(d) ルール数 9

図 6　自動生成過程 (結果 1 の場合)

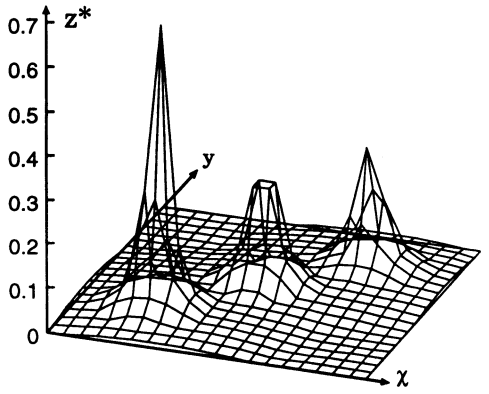


図 7　自動生成例 (結果 1, ルール数 11)

表 1　自動生成結果の比較

	文献 [1]	結果 1	結果 2	結果 3
MF 形状	三角型	円錐型	三角型	三角型
ルール数	17	11	10	12
推論誤差	1.367*	1.147	0.953	1.088
平均誤差	0.00342*	0.00286	0.00238	0.00272
学習回数	145	237	228	165
刻み幅	——	可変	可変	固定

(注) 表 1 において、*マークの所は、文献 [1] には記述されていなかったので、こちらでシミュレーションを行った結果の数値である。

MF 形状が三角型となっている所は、頂点 (a_i, b_i), 半径 r_i より、前件部 A_i は三角型ファジィ集合 A_x(中心 a_i, 片幅 r_i)、A_y(中心 b_i, 片幅 r_i) から以下のようにして求められることを表している。

$$\mu_{A_i}(x,y) = \mu_{A_x}(x)\,\mu_{A_y}(y) \qquad (7)$$

結果 1 では、文献 [1] の 17 ルールに対し、11 ルールで同程度の結果が得られた (図 7)。

結果 1〜3 において、円錐型より三角型の方がいい結果を示しているのは、メンバーシップ関数の形状が、式 (6) を表現するのに適しているものと想像される。

結果 1 のファジィルールとその配置を表 2 と図 8 に示す。但し、図 8 のルール 0 の半径は、実際にはもっと大きい。

表 2　生成結果 1 のファジィルール

ルール	頂点 a	頂点 b	半径 r	後件部 z
0	0.00000	0.00000	1000000	0.00000
1	0.36342	0.36303	0.84296	0.05694
2	-0.34360	-0.34321	0.87704	0.05508
3	-0.49438	-0.49438	0.16194	1.07653
4	-0.47993	-0.47993	0.10526	1.92778
5	0.49165	0.49165	0.16589	0.77101
6	-0.00067	-0.00067	0.29753	0.32116
7	0.00049	0.00049	0.15526	0.89912
8	-0.49613	-0.49613	0.33638	0.19515
9	0.49126	0.49126	0.34384	0.15603
10	0.47719	0.47602	0.09549	0.47308

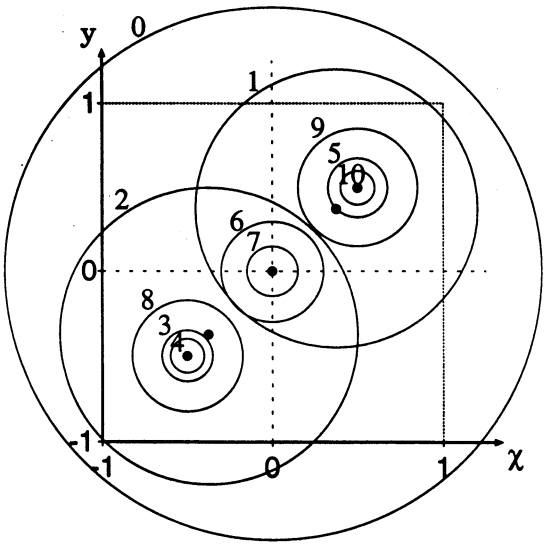


図 8　生成されたルールの配置図 (結果 1)

5　おわりに

本手法により、文献 [1] のファジィルール生成結果と比較して、少ないルール数でシステムの同定ができた。さらに多入力化した場合、ルール数減少の効果はもっとはっきり現れると考えられる。しかしながら、本手法は、パターン探索的にチューニングを行うので学習時間がかかるといった難点を有している。

本手法では、逐次生成型のルール生成を行ったが、チューニングがある程度進むと、小さくなった誤差を少しでも減らそうと、局所的に多数のファジィルールを生成する。これはルール生成の構造上そのようになるのであるが、ルール数が増加してもほとんど効果が現れなくなった場合、逆にその時点で例えば削除型のファジィシステム [5] によってチューニングを行い、精度を極力維持したままルール数を減少させ、最適なルール数を見つけ出す手法も考えられる。

参考文献

[1] K.Mitsubuchi, S.Isaka and Zhen Yu Zhao, A Fuzzy Rule Generation System, **Fifth IFSA World Congress**, pp.11–14, 1993.

[2] L.C.W. ディクソン, **非線形最適化計算法**, 培風館, 1974.

[3] 荒木・野村・林・若見, ルールを逐次的に生成するファジィモデリングの一提案, **日本ファジィ学会誌**, Vol.4 No.4, pp.722–732, 1992.

[4] 片山・鍬田・梶谷・西田, 自己増殖型 C^∞ 級ファジィモデルとカオス時系列同定問題への応用, **第 8 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集**, pp.253–256, 1992.

[5] 宮島・福元・石塚, ルールの削除に基づくファジーモデリング, **電子情報通信学会論文誌**, Vol.J77-A, pp.1555–1562, 1994.

問い合わせ先：〒 572 大阪府寝屋川市初町 18 番 8 号
大阪電気通信大学 大学院工学研究科 情報工学専攻
泉本 和俊
Tel：0720–20–4569　Fax：0720–24–0014
E-mail：izumoto@mzlab.osakac.ac.jp

TE4-3

ファジィエキスパートシステムにおける ルールの自動チューニング手法

The Rule Tuning Method for Fuzzy Expert Systems

加藤　康記　Yasunori KATO
小杉　正貴　Masataka KOSUGI
高木　繁則　Shigenori TAKAGI

（株）インテック・システム研究所
INTEC Systems Laboratory Inc.

Abstract - Using neural network technic, several method to tune the fuzzy rules was proposed. However, nobody discussed about tuning for decision support expert system.

This paper discuss about the method to tune the predicate in the conclusion part of the fuzzy if-then rules, using vague teach data. This method is not depend on the inference method.

１．はじめに

ファジィ理論が提唱されてから３０年あまりが経ち、制御分野を中心に数多くのシステムが実用化されている。また、これまで試行錯誤に頼らざるを得なかったファジィルールのチューニングに関してもニューロ技術を用いることにより自動的に行うことが可能となってきた[1]。しかし、これまで提案されてきたチューニング手法は制御分野、つまり入出力の学習データが実数値である場合に限られ、意思決定問題など、学習データ自体にあいまいさの伴った場合のチューニング手法については何ら論議がされていない。

本論文では、あいまいさを伴った学習データをもとにファジィルールのチューニングを行う手法を提案する。なお、本手法は推論方法、implication関数に依存しない。

２．あいまいデータによるチューニング方式

２．１　共通の性質

今回筆者等が目指しているのは、入出力ともにあいまいさの伴った教師データからのルールのチューニングである。また、推論方式自体もマムダニ推論に留まらず、種々の推論形式を対象にしている。従って従来のチューニング方式は適応できないため、様々な推論方式をシミュレーションにより評価し、共通の性質を洗い出すことから行った。以下に導き出した性質を挙げる。

1)後件部プレディケートが横にずれれば、推論結果も同じ方向にずれる。

2)後件部プレディケートのあいまいさが大きいと推論結果のあいまいさも大きくなる。

２．２　教師データとの誤差

従来の推論方式では実数値同士の比較のみで良かったが、今回対象とするのはどちらも分布を持った値であるため新たな手法が必要となる。２つの分布の誤差は、「左右のずれ」と「あいまいさの違い」の２つに分けて導出した。

１）左右のずれに関して

ともに分布を持った値であるため、この２つを比較するには拡張原理[2]に基づく計算が必要であり計算量が多くなる。また、計算結果も分布となるため、その扱いが困難となる。そのため、２つの分布の最大グレード部分の中心位置のみを比較することとした。出力値、教師データの中心位置をそれぞれa_o、a_tとすると、左右のずれDaは以下の式で表される。

左右のずれ：$Da = a_o - a_t$　(1)

２）あいまいさのずれに関して

ここで言うあいまいさとは分布の横の広がり幅を言う。推論値と教師データとのあいまいさの違いはグレード値が1と0.5以上を持つ区間の幅の差として計算した（図１、式２、３参照）。

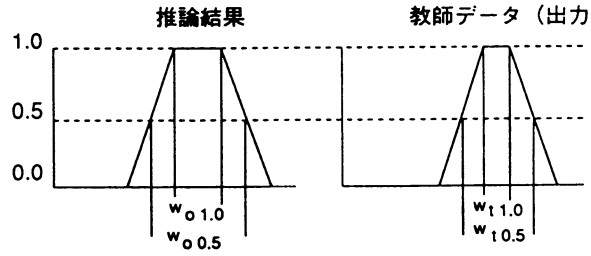


図１．あいまいさのずれの計算方法

あいまいさのずれ：

ｸﾞﾚｰﾄﾞ値1.0：$Dw_{1.0} = w_{o1.0} - w_{t1.0}$　(2)

ｸﾞﾚｰﾄﾞ値0.5：$Dw_{0.5} = w_{o0.5} - w_{t0.5}$　(3)

2．3　プレディケートの修正

以上求めた誤差値をそのまま後件部プレディケートの修正に用いた。しかし、推論結果にあまり影響していないルールの修正を防ぐため、ルールの適合度合（τ）および、学習係数（Ka, Kw）を掛けたものを実際の修正量とした。以下にそれぞれの場合の修正量の計算式を示す。

1) 左右のずれに関して

$$Ma = -Ka \times Da \times \tau \quad (4)$$

2) あいまいさのずれに関して

$$Mw_{1.0} = -Kw \times Dw_{1.0} \times \tau \quad (5)$$

$$Mw_{0.5} = -Kw \times Dw_{0.5} \times \tau \quad (6)$$

3．シミュレーション評価

本手法の有効性を調べるため、シミュレーションによる評価を行った。学習に用いた教師データは入力値xと出力値yが式(7)で示す関係にあり、それぞれにあいまいさを付加した11組のデータである。図2に入力教師データと出力教師データの関係を示す。

$$y = \mathrm{Sin}(x \times (\pi/2)) \qquad x : [0, 1] \quad (7)$$

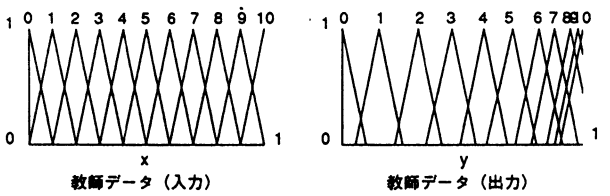


図2．入出力教師データ

上記の入出力の関係を以下のような5つのルールで表現し、このルール後件部のプレディケートを学習対象とした。ここで、paiは前件部プレディケート、ppiは後件部プレディケートを表す。

IF　x is pai　THEN　y is ppi　i : [1, 5]

学習前の前件部／後件部プレディケートの形状を図3、学習後の後件部プレディケートの形状を図4にそれぞれ示す。

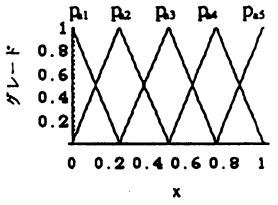


図3．前／後件部プレディケート（学習前）

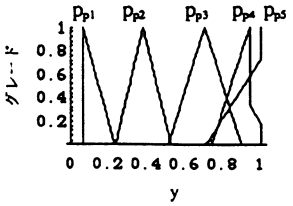


図4．後件部プレディケート（学習後）

表1に学習前の推論結果と学習後の推論結果の比較を示す。なお、紙面の都合、ここでは偶数番号のデータのみを示す。

表1に示すような分布形状に関する定量的な評価方法はまだ確立されていないため一概には評価できないが、学習前の推論結果より学習後の推論結果の方がより教師データに近い値が推論されていると見ることができる。

4．おわりに

これまで論議がされていなかった、あいまい教師データをもとにしたファジィルールで用いる後件部プレディケートのチューニング方式を提案した。また、本手法の有効性を示すため、シミュレーションを用いて評価を行った。今後の課題として前件部プレディケートの学習方法および推論方式自体の学習方法の確立がある。

参考文献

[1] 野村他：最急降下法によるファジィ推論の自動チューニングと障害物回避への応用、第6回ファジィシステムシンポジウム予稿集、pp. 423-426 (1990).

2] 本多他：ファジィ工学入門、海文堂(1989)

連絡先

〒930　富山市下新町3-23
株式会社インテック・システム研究所
加藤　康記
TEL　0764-44-1111 (内) 7655
FAX　0764-44-8126
E-mail：　kato@isl.intec.co.jp

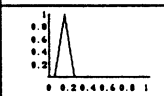
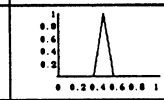
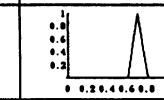
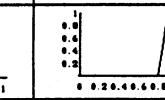
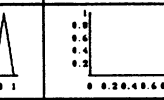
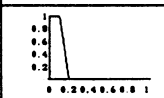
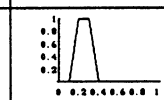
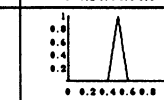
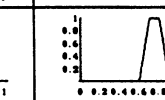
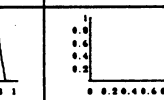
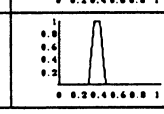
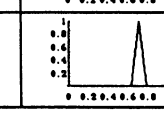
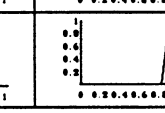
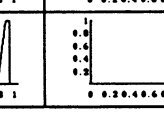
教師データNo (偶数データのみ)	No.2	No.4	No.6	No.8	No.10
教師データ（出力）					
推論結果（初期状態）					
推論結果（チューニング後）					

表1．推論結果

TE4-4

ファジィ積分を用いた制御ルールの自動チューニング
Auto-Tuning of Fuzzy Control Rules Using Fuzzy Integrals

宮田 仁志，大木 誠，大北 正昭
鳥取大学工学部
Tottori University, Department of Engineering

Abstract- We have been studying an autonomous mobile robot controlled by the fuzzy logic. The fuzzy rules, for its control, had been set up with the trial and error method. To improve such inconvenience, we employed the auto-tuning algorithm. Some methods which optimize objective functions to adjust control rules have been proposed. In such a case, the objective functions represent variables which should be minimized or maximized in the control systems.

In this paper, we discuss auto-tuning of fuzzy control rules by the pattern search method whose objective function is defined using fuzzy integrals. For an improvement of the auto-tuning algorithm, we introduce fuzzy integrals into the objective function of the pattern search algorithm. And we illustrate its utility by simulation of a parallel parking of an autonomous mobile robot.

1 はじめに

ここに提案するのは，制御目的の達成度を評価するため，意思決定における評価法として提案されている階層的ファジィ積分(Hierarchical Fuzzy Integral : HFI)[1]を用い，これによる評価値を目的関数の値とみなしてパターン探索法による最適化により，制御ルールの後件部のパラメータを決定する方法である．その事例として移動ロボットの縦列駐車をとりあげ，シミュレーション結果を示した．

我々は，自律移動ロボットの研究に取り組んでおり，これまでに縦列駐車制御のシミュレーションと実験によってファジィ制御の有効性を確認している[2]．

制御ルールの自動チューニング法としては，ある目的関数を定義し，これを最適化する方法がとられることが多く，種々のアルゴリズムが提案されている．この種のチューニング法において，制御目標の達成度を定性的な尺度で直接表現し，これを目的関数とすれば，その意味が直感的に理解しやすくなり取り扱いに便利である．

2 四輪型移動ロボットの縦列駐車

自動チューニングの例題として縦列駐車を考える．「四輪型移動ロボットがバック走行をしながら駐車場に進入し，適正な位置に駐車する」様子を図１に示す．このときの各変数を次のように定義した．

前件部変数

X_1 : 移動ロボットの右側面前方から壁までの距離
X_2 : 移動ロボットの右側面後方から壁までの距離
X_3 : 移動ロボットの後面の中央から壁までの距離
X_4 : 移動ロボットの左側面後方から壁までの距離
ϕ : 移動ロボットの姿勢角

後件部変数

θ : 移動ロボットの前輪の切り角

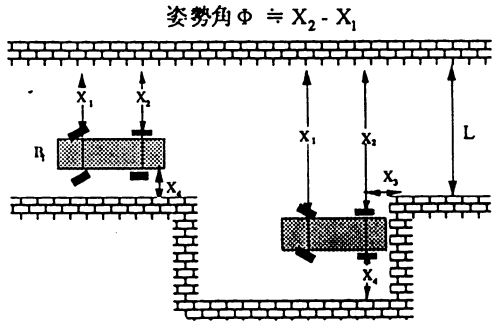


図１　縦列駐車における各変数

2.1 四輪走行モデル

シミュレーションには，図２に示す移動ロボットの四輪走行モデルを使用した．

四輪車が遠心力，車輪の滑り等を無視できる極低速で走行する場合において，その旋回運動時の軌跡は簡単なモデルで説明することができる．いま，ロボットの前輪の内輪，外輪の切り角をそれぞれθ，θ'とすると，前輪の切り角が一定の間，移動ロボットは後輪の中心軸の延長上に中心を持つ同心円状の軌跡を描きながら移動しその方向を変える．このとき同心円の曲率半径はハンドルの切り角θ，θ'と走行ロボットのホイールベース（軸間距離）Lを用いることにより次の式によって求められる[3]．

$$R_1 = L / \sin\theta \quad (1)$$

$$R_2 = L / \sin\theta' \quad (2)$$

$$R_3 = R_1\cos\theta - (B_r - B_f)/2 \quad (3)$$

$$R_4 = R_2\cos\theta' + (B_r - B_f)/2 \quad (4)$$

$$\theta' = \tan^{-1}\{L / (B_f + L\cot\theta)\} \quad (5)$$

ここで，R_1，R_2，R_3，R_4 はそれぞれ，ロボットの前輪，後輪部の内輪，外輪の旋回半径，B_f，B_r はそれぞれ前輪，後輪のトレッド（輪距）を示す．

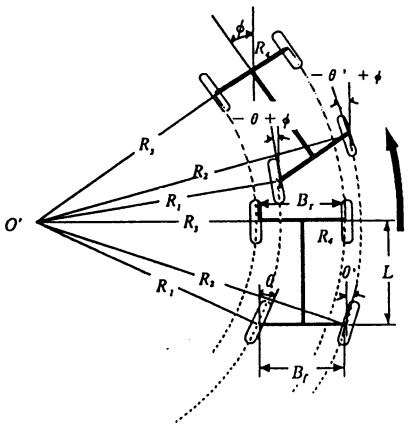


図２　移動ロボットの四輪走行モデル

2. 2　制御ルール

図１に示した各変数を用いて，以下の９つの制御ルールを設定した．

R_1:If X_3 is B　then $\theta = w_{11}+w_{12}X_3+w_{13}X_4+w_{14}\,\phi$

R_2:If X_3 is S　then $\theta = w_{21}+w_{22}X_3+w_{23}X_4+w_{24}\,\phi$

R_3:If X_4 is B　then $\theta = w_{31}+w_{32}X_3+w_{33}X_4+w_{34}\,\phi$

R_4:If X_4 is S　then $\theta = w_{41}+w_{42}X_3+w_{43}X_4+w_{44}\,\phi$

R_5:If ϕ is PB then $\theta = w_{51}+w_{52}X_3+w_{53}X_4+w_{54}\,\phi$

R_6:If ϕ is PS then $\theta = w_{61}+w_{62}X_3+w_{63}X_4+w_{64}\,\phi$

R_7:If ϕ is Z　then $\theta = w_{71}+w_{72}X_3+w_{73}X_4+w_{74}\,\phi$

R_8:If ϕ is NS then $\theta = w_{81}+w_{82}X_3+w_{83}X_4+w_{84}\,\phi$

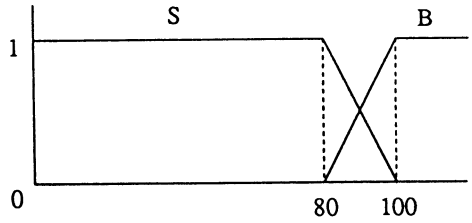
R_9:If ϕ is NB then $\theta = w_{91}+w_{92}X_3+w_{93}X_4+w_{94}\,\phi$

B : Big，PB : Positive Big，NB : Negative Big
Z : Zero
S : Small，PS : Positive Small，NS : Negative Small

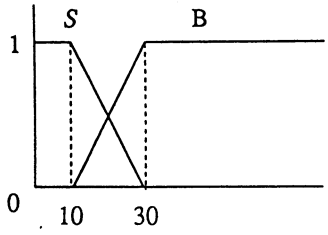
それぞれの前件部のメンバーシップ関数を図３に示す．

3　制御ルールのチューニング

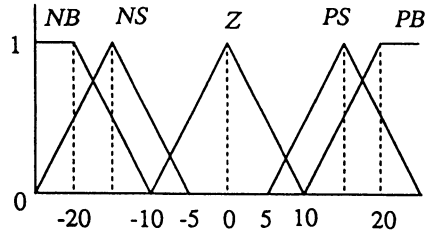
制御ルールのチューニング法としてよく用いられるのは，あらかじめ定義しておいた目的関数の値を最適化する方法である．このような最適化アルゴリズムのひとつに，パターン探索法がある[4]．
ここでは，このパターン探索法の目的関数をファジィ積分を用いて構成し，これを最適化することにより制御ルールの自動チューニングを試みた．



(a)　X_3 のメンバーシップ関数



(b)　X_4 のメンバーシップ関数



(c)　ϕ のメンバーシップ関数

図３　前件部のメンバーシップ関数

3. 1　パターン探索法

パターン探索法は最適化の手法の一つであり，探索移動とパターン移動の２つの手続きからなる．つまり，まず探索移動によって現在の基点の近傍の目的関数の様子を探索し，その結果をもとにパターン移動によって目的関数値が減少する方向に基点の移動をおこなう．そしてこれらの操作をある条件を満たすまで反復する．ここでは Hooke-Jeeves のアルゴリズムを用いた[5],[6].

制御ルールを以下のように仮定する．

R_1 : If x_1 is F_1 then

$$y_1 = w_{11}{}^k+w_{12}{}^k x_1+\cdots+w_{1n}{}^k x_{n-1}$$

:

:

Rr : If x_r is F_r then

$$y_r = w_{r1}{}^k+w_{r2}{}^k x_1+\cdots+w_{rn}{}^k\, x_{n-1}$$

ただし，F_s (s=1, 2, …, r) は前件部のファジィ集合，$w_{s0}{}^k$, $w_{s1}{}^k$, …, $w_{sn}{}^k$ は第 s 番目の制御ルールにおけ

る第 k 回目の探索過程での探索パラメータを表す．制御ルールは r 個あるので，探索パラメータの個数 m は，$m=n\times r$ となる．

いま，探索パラメータの個数を m 個とし，第 k 回目の探索過程において，第 p-1 番目の探索パラメータの最適方向を探る探索移動が終了した時点での探索点を

$$W_p^k = (w_1^k, w_2^k, \cdots w_p^k, \cdots, w_m^k) \quad (7)$$

で表す．また，第 p 番目が 1 である単位ベクトルを d_p (p=1, 2, ⋯, m)で表す．

上述の探索移動とは，p=1 から次の操作を行うことをいう．探索点 W_p^k を $W_p^k+\alpha\ d_p$, $W_p^k-\alpha\ d_p$ としてそれぞれシミュレーションを行い，評価値が最も大きくなる探索点を次の第 (p+1) 番目の探索移動を行うための基点とする．例えば，評価値 f が

$$f\{W_p^k\} < f\{W_p^k+\alpha\ d_p\} \quad (8)$$

$$f\{W_p^k\} < f\{W_p^k-\alpha\ d_p\} \quad (9)$$

のときは $W_{p+1}^k = W_p^k$ とする．

すべてのパラメータの探索移動が失敗した場合，つまり p=1 から m まで探索移動を行った時，評価値が

$$f\{W_1^k\} = f\{W_m^k\} \quad (10)$$

となる場合は α の値を小さくする．ただし，

$$\alpha \leqq \varepsilon \quad (11)$$

の場合はアルゴリズムを終了させる．ε はアルゴリズムを終了させるための閾値である．

第 k 回目の探索過程における第 m 番目の探索移動が終了した時点の探索点は W_m^k である．パターン移動とは，次のように探索点 W_m^k から W_m^k と W_m^{k-1} を結ぶ方向に同じ距離だけ移動することをいう．

$$W^k = W_m^k + (W_m^k - W_m^{k-1}) \quad (12)$$

ただし，W^k はパターン移動後の基点を示す．

3.2 目的関数

縦列駐車を定性的に評価するとき，駐車場への進入角度，最終位置での車体の角度等，評価の基準となる項目を選び出しておき，それぞれを個別に評価した後に，それらを統合して総合評価値とするという手順をふむと考えやすい．このような方法として，意志決定における評価法として提案されている，階層的ファジィ積分(HFI)がある．そこで我々は HFI を縦列駐車の評価に用い，これを目的関数値と考えて，パターン探索法によって最適化することにより，制御ルールの自動チューニングを試みた．縦列駐車の評価基準を階層的に考え，まず一番下の階層について評価値とその一つ上の階層から見た重要度より，ファジィ積分によって評価値を求める．次にこれを一つ上の階層での評価値とみなして重要度とから同様な演算によって評価値を求める．この演算，つまり評価値と重要度とから一つ上の階層の重要度を求めるという操作を一番上の階層まで繰り返しおこない，最後に縦列駐車の評価値を得る．ファジィ積分としては菅野積分を用いた．

3.3 ファジィ積分による縦列駐車の評価

HFI のアルゴリズムに従って階層図を作成し，評価項目の評価値，各ランクから見た主観的重要度を決定した．階層図を図 4 に示す．

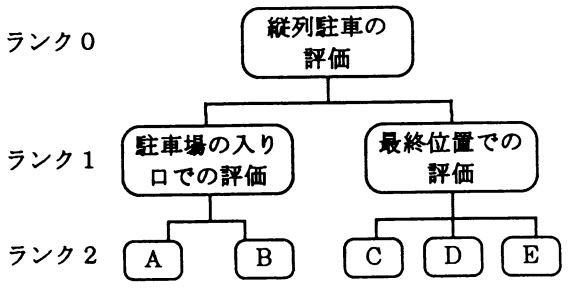
ランク 2 における各評価項目の評価値はメンバーシップ関数のグレード $h: X \to [0,1]$ で与え，主観的重要度は，λ－ファジィ測度 $g_\lambda: 2^X \to [0,1]$ で表した．λ－ファジィ測度は次のような性質をもつ．

$$E \cap F = \varnothing \Rightarrow g_\lambda(E \cup F) = g_\lambda(E) + g_\lambda(F) + \lambda g_\lambda(E) g_\lambda(F) \quad (-1 < \lambda < \infty) \quad (13)$$

これにより，λ を変化させると以下のようにその性質を変える．

$$\begin{aligned} g_\lambda(E \cup F) &< g_\lambda(E) + g_\lambda(F) \quad (-1 \leq \lambda < 0) \\ g_\lambda(E \cup F) &> g_\lambda(E) + g_\lambda(F) \quad (0 < \lambda < \infty) \end{aligned} \quad (14)$$

まず，評価値とランク 1 からみた各項目の重要度からファジィ積分によってランク 2 の評価項目の評価値を求めた．この評価値と，ランク 0 からみたランク 1 の重要度から同様な演算によって総合評価値を求めた．それぞれの主観的重要度は，縦列駐車に要求される，項目の優先順位を相互に比較しながら決定した．表 1，表 2 にこれらを示す．



A: 入り口のコーナーからの距離
B: 入り口を通過する時の姿勢角
C: 横の壁までの距離
D: 後ろの壁までの距離
E: 停止した時の姿勢角

図 4　縦列駐車の評価の階層図

表１　ランク０から見たランク１の重要度

駐車場の入り口での評価	最終位置での評価
4.5	6.5

表２　ランク１から見たランク２の重要度

A	B	C	D	E
0.72	0.60	0.70	0.42	0.60

4　シミュレーション

シミュレーションにおいては以下の条件を仮定した.

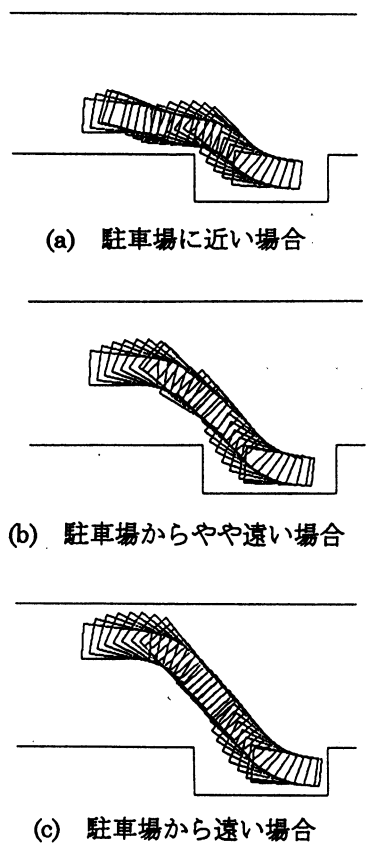
- 移動ロボットの速度は一定とし，遠心力等が無視できる極低速で，加速，減速はしない.
- 駐車場の大きさは未知であるが移動ロボットが入れる状態であるとする.
- 前輪のステアリングは，移動ロボットの動きに合わせて，左右３０度まで動くとし，推論結果がそれ以上の動きを要求しても３０度を保つことにする.
- ロボットの姿勢角が４５度以上となるか，走行路の壁に衝突したときは失敗とみなし，走行を中止する.

図７にλ=0.4 としたときのチューニング後のシミュレーション結果を示す.

5　おわりに

目的関数を HFI を用いて構成し，パターン探索法によって縦列駐車の制御ルールの調整を行った. 得られたルールを用いれば，スタート位置が変わってもロボットはスムーズに駐車場に入ることが確認できた.

今後は，λの値を変化させた場合の比較，他のファジィ積分を用いた場合の検討が必要である. また，パターン探索法においては探索パラメータ，変動係数αの初期値の決定法が重要である. これらの検討とともに，繰り返し計算を軽減する方法についても考察する必要がある.



(a)　駐車場に近い場合

(b)　駐車場からやや遠い場合

(c)　駐車場から遠い場合

図５　調整後のシミュレーション結果

参考文献

[1] 杉山，椎塚：“階層的ファジィ積分による意思決定法”，日本ファジィ学会誌，Vol. 3, No. 4, pp. 772-782, 1993.

[2] M. Ohkita, H.Miyata, M. Miura, and H. Kouno : “Travelling experiment of an autonomous mobile robot by a flush parking”, Proc. of the 2nd IEEE International Conference, Vol.1, pp.327-332,1993.

[3] 下田：自動車工学，共立出版，1975.

[4] 松原：非線形最適化計算法，培風館，1976.

[5] 林：”ファジィ制御とニューラルネットワークとの融合法”，情報処理，Vol.34,No.1,pp.44-51, 1993.

[6] 林：”ニューロ・ファジィ（その３）（コンピューティングの玉手箱），bit,Vol.25,No.6,pp.112-113, 1993.

連絡先

〒６８３　鳥取県米子市彦名町４４４８

米子工業高等専門学校　電気工学科

宮田　仁志

TEL　0859-24-5121（ダイヤルイン）

FAX　0859-24-5049

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

TF3-1

遺伝的アルゴリズムを用いた連続桁ＲＣ床版の打設計画

LAYING SEQUENCE PLAN FOR RC SLAB OF CONTINUOUS GIRDER USING GENETIC ALGOLITHMS

夏秋義広* 向台茂* 保田敬一** 古田均***
Yoshihiro NATSUAKI Sigeru MUKANDAI Keiichi YASUDA Hitoshi FURUTA

* 片山ストラテック 橋梁設計部
Bridge Design Div.,Katayama Stratech Corp.

** ニュージェック 土木第２部
Civil Engineering Dept.2,Newjec Inc.

*** 関西大学 総合情報学部
Dept. of Informatics,Kansai Univ.

Abstract

In recent year, Genetic Algorithms (GA) have attracted attention as a technique for solving combinatorial optimization problem with discrete design variables and a discontinuous objective function. This research is an application of these GA to the problem of determinig the laying sequence for a continuous girder RC floor system. The purpose of this problem is to minimize a function which is a linear combination of the number of working days, number of seams and the deflection error. The design variable is the laying day for each panel. After presenting the problem in the form of GA operation, numerical results are presented to 3-span continuous box girder having 33 slab panels.

１．まえがき

現場打ちコンクリート床版の打設順序決定は、これまで「床版工事設計施工の手引き[1)]」などを参考に、経験者により試行錯誤的に求められていた。これは、最適な打設計画を決定するには多大の構造解析とその評価を要求されるため、実際問題として可能な組合せ全てについてチェックすることが不可能に近いためである。そこで、本研究では、離散変数、非連続関数から成る組合せ最適化問題の一解法として近年脚光を浴びている遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithms, GA）を、連続桁ＲＣ床版の打設順序決定問題に適用することを試みたものである。

２．連続桁ＲＣ床版の打設計画

ＲＣ床版を有する連続桁の床版コンクリート打設計画（打設回数、打設順序および打設間隔決定）では一般に、たわみの大きい径間の中央部より打設し、負の曲げモーメントの生ずる中間支点付近は後で打設する。このとき、各施工段階のコンクリート打設日は、先行打設されたコンクリートに発生する引張応力度が許容値以下となるように設定される。

コンクリートの許容引張応力度は材令が大きいほど高いため、十分に間を置いた打設計画とすれば問題ないが、工期およびたわみに及ぼすコンクリートの合成効果の影響を考慮すると、打設間隔は小さいのが望ましい。従って、実際の打設計画では、床版コンクリートの許容引張応力度を満足できる範囲で最終打設日が最も早くなるように各施工段階のコンクリート打設日が決定される。

打設回数は、１日当りのコンクリート打設量、すなわち一回に打設できるパネル数により制限される。１ケースの打設計画を計算する場合でも各打設段階における構造解析とその評価を要求されるため、広幅員、多径間等の橋梁で打設回数の多い場合には、可能な組合せの全てをチェックすることは実際問題として困難である。従って、ある限られた解析回数で工学的に有意な解が得られれば実用的である。ここに、ＧＡ適用の可能性がある。

３．離散的組合せ最適化問題への定式化

図－１に示すような連続桁ＲＣ床版の打設順序決定問題を考える。評価項目として、本研究では、施工日数、打ち継目数、たわみ誤差の最小化を対象とする。本問題は、従って以下のように定式化される。

目的関数： $OBJ(i)=\alpha_1 f_1+\alpha_2 f_2+\alpha_3 f_3 \rightarrow$ mini (1)

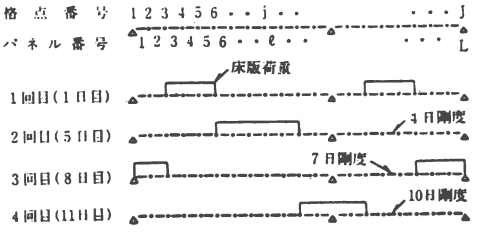
制約条件： $g_1(i)=\sigma_j-\sigma_a \leqq 0$ (j=1～J) (2)

$g_2(i)=\delta_j-\delta_a \leqq 0$ (j=1～J) (3)

$g_3(i)=V_k-V_a \leqq 0$ (k=1～K) (4)

設計変数： $1 \leqq D_\ell \leqq 16$ day (ℓ=1～L) (5)

ここに、i:設計番号、f_1：最終打設日、f_2：打ち継目数、f_3：たわみ誤差、$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$:重み、$\sigma_j$：格点jのコンクリート引張応力度、$\sigma_a$：コンクリート許容引張応力度、$\delta_j$：格点jの最終たわみと計画たわみとの差、$\delta_a$：キャンバーの許容誤差、$V_k$：第k回目のコンクリート打設量、$V_a$：1日当りのコンクリート打設可能量、$D_\ell$：パネルℓの打設日、J：格点数、K：打設回数、L：パネル数。



図－1　打設順序決定問題の例

4．ＧＡによるプログラミング

原問題は制約条件付きの最小値問題であるため、外点ペナルティ法を用いて無制約問題に変換する[2)]。

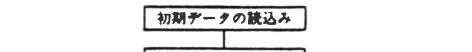
$$\Phi(i)=OBJ(i)+\gamma \sum_{m=1}^{3} \max[g_m,0] \qquad (6)$$

ここに、γ：ペナルティ係数、m：制約条件式数。

適応関数 FIT(i)には、プログラミングが簡単な外点ペナルティ関数の逆数（$=1/\Phi(i)$）を用いる。

設計変数は、図－2に示すように各パネルの打設日を2進数表現したストリングに変換する。

構造解析には平面骨組み問題として変形法のプログラムを用いる。例えば図－1の例では1ストリングに対し4回の構造解析が要求される。ＧＡによる計算フローを図－3に示す。



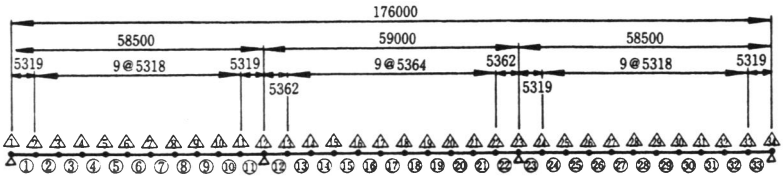
図－2　打設日のストリング表現

図－3　ＧＡの計算フロー

5．数値解析例

数値解析例として、図－4に示す3径間連続箱桁のＲＣ床版打設順序決定問題を取り上げる。打設日に応じた床版コンクリートの鋼への換算ヤング係数比Ｎ値と許容引張応力度を表－1に示す。数値計算に際し、目的関数、制約条件、ＧＡパラメータに用いる諸定数などは表－2のように設定した。

本研究では、まず単純ＧＡによる探索を500世代行った。収束状況を図－5に、500回の探索で最も適応関数値の大きかった打設順序を図－6に示す。図－5より、適応関数値の最大値は440世代付近からほぼ一定値に収束している。また、平均値も次第に収束していくのがわかる。しかし、図－6は最適値とは言い難



注記：△＝格点番号，○＝部材(パネル)番号

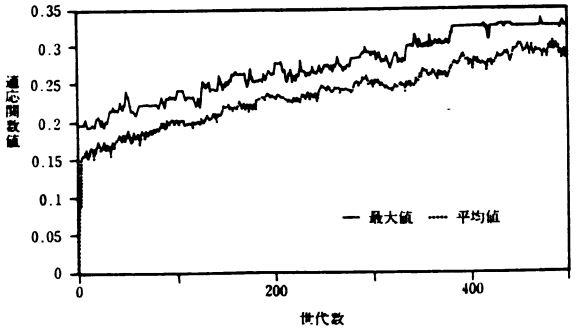
図－4　数値計算の対象構造

表－１　床版コンクリート強度

間隔(日)	N値	許容引張応力度(kgf/cm²)
1	24	2.7
2	18	4.7
3	15	6.6
4	14	7.7
5	13	9.0
6	12	10.0
7	11	11.0
8	11	11.0
9	11	12.4
10	10	13.0
11	10	13.7
12	10	14.5
13	9	15.2
14	9	15.8
15	9	16.5

表－２　数値計算上の諸定数

目的関数	中央値	f_1	10日
		f_2	6ヶ所
		f_3	7■■
	重み係数	α_1	0.1
		α_2	0.8
		α_3	0.1
制約条件		σ_a	表－3
		δ_a	-5~15■■
		V_a	100㎥
ペナルティ係数		γ	10^3
GA パラメータ	人口数(個体数)		100
	ストリング長		132
	交叉確率		0.5
	突然変異確率		0.1



図－５　単純ＧＡによる収束状況

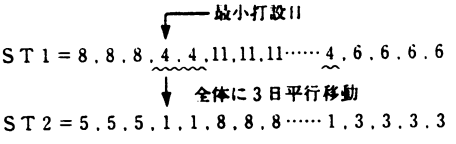
く、局所解に陥ったようである。計算時間に関しても、ACOS 3400/10AVP (2.9Mips) を用いて、100人口x500世代の探索にCPU TIMEで15時間を費やしており、実用的であるとは言い難い。より少ない世代数で実用解が得られるようにＧＡオペレーターの改良を行う。

まず、淘汰をルーレット戦略からエリート戦略に変更する。ルーレット戦略では図－５に示されるように、適用関数値最大の個体が壊され、再び元のレベルまで戻るのに十数世代を経ている場合があり、計算効率が悪い。従って、各世代の適用関数値が最大値を示す個体は淘汰に拘らず無条件に残し、交叉、突然変異に引き継ぐこととした。

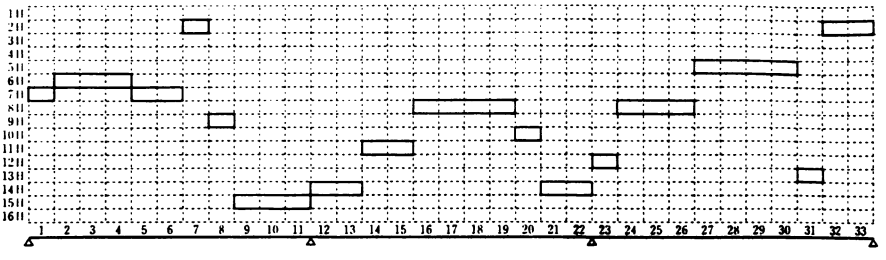
次に、新しい突然変異の概念を導入する。本問題では、パネルの打設日がある程度まとまってきたら、１ビットを変更するだけでは打継目数が増えることになるため適応関数値が増加しない。従って、同一の打設日を一度に変更できるように、以下の手順で示される突然変異を導入する。

①：２進数ストリングを10進数に戻す。
②：変更するパネルナンバーを乱数で決定する。
③：新しい打設日（変更打設日）を乱数で決定する。
④：②と同一打設日の全パネルを変更打設日に変える。

本プログラムでは、初期ストリングの生成や突然変異にランダム関数を用いているため、必ずしも初日から打設をスタートしない場合が生じてくる。例えば図－７に示すST1とST2のように打設間隔が同一であれば、打ち継目数およびたわみ誤差が同じであるため、制約条件を満足しつつST1からST2へと移行することは殆ど不可能である。これを改善するため、打設日全体を平行移動させるオペレータを作成した。



図－７　平行移動パラメータ



図－６　単純ＧＡによる解

表－３　パラメータ解析結果

CASE	α_1	α_2	α_3	γ	FIT	OBJ	世代数
1	0.990	0.005	0.005	10^4	1.645	0.608	340
2	0.005	0.990	0.005	10^3	1.004	0.996	860
3	0.005	0.005	0.990	10^4	3.065	0.326	295
4	0.315	0.516	0.169	10^1	0.700	1.428	469
5	0.315	0.516	0.169	10^2	1.134	0.882	371
6	0.315	0.516	0.169	10^3	0.664	1.507	477

表－４　各ケースの打設順序

CASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
	△	第1桁間									△					第2桁間						△	第3桁間										△
1	4	4	4	4	5	5	3	3	3	5	5	6	6	6	4	3	2	2	5	5	2	6	6	2	2	2	1	4	4	1	1	1	1
2	5	5	5	5	5	5	2	2	8	8	8	8	8	8	2	2	2	7	7	7	7	7	7	7	1	1	1	1	3	3	3	3	3
3	4	6	8	6	7	7	6	5	2	7	16	15	13	6	13	1	14	13	8	8	13	14	14	14	7	14	7	7	8	8	8	8	1
4	8	8	5	5	5	5	2	2	2	8	8	8	7	7	2	2	6	6	7	7	7	7	8	7	1	1	1	6	6	4	6	6	6
5	2	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	3	3	5	5	2	2	2	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	1	1	1	1
6	12	12	12	1	5	5	5	1	1	1	12	12	12	2	2	1	7	9	9	9	9	9	9	9	4	4	4	5	5	5	1	1	2

以上の改良を行い、目的関数の重みおよびペナルティ係数が解に及ぼす影響を調査するためパラメータ解析を行った。解析結果を表－３および表－４に示す。表－３に示すパラメータ以外の諸定数値は、表－２と同一である。表中、CASE-1～CASE-3は単目的とみなせる程度に目的関数の重みを調整したものである。CASE-4～CASE-6はペナルティ係数の大きさを変化させたもので、この時の重みは各目的関数値の影響がほぼ同一となるよう次式で求めた。

$$\alpha_i = OBJ(i)/OBJ(1+2+3) \qquad (7)$$

ここに、OBJ(i)はCASE-iの目的関数の値を示し、OBJ(1+2+3)はOBJ(1)～OBJ(3)の合計である。

本解析モデルは、実際に施工された橋梁を対象にしているが、その際に経験者が解析・決定した打設計画では、最終打設日は８日、打ち継目数は４ケ所である。表－３および表－４より、CASE-1では最終打設日は６日と実際の計画より小さい値が得られているが、打ち継目数が14ケ所と多い。CASE-2では、打ち継目数が６ケ所と改善されており、最終打設日も８日と実際計画に比し遜色ない結果が得られている。

CASE-4～CASE-6の解析結果より、ペナルティ係数の大きさは本問題に関しては$\gamma=10^2$程度が妥当であると思われる。CASE-5では、CASE-1とCASE-2を折衷したような解が得られた。計算時間は約９時間である。CASE-5の解は、同一日に分割して打設するため打ち継目数が実際施工された計画より若干多いが、最終打設日に関しては実際計画より優れている。このように、本手法は連続桁ＲＣ床版の打設順序決定問題に有効であると云える。

６．あとがき

本研究は連続桁ＲＣ床版の打設順序決定問題にＧＡの適用を試みたものである。近年ＧＡは、離散的組合せ最適化問題への有効な手法として脚光を浴びているが、組合せ数が多い場合には単純ＧＡでは必ずしも上手く行かないとも云われている。本問題の場合も、ストリングが長すぎて単純ＧＡでは望むような解が得られず、ＧＡオペレータの改良を必要とした。実際問題へのＧＡの適用に際しては、問題に応じた適切なコーディングおよびＧＡオペレータの開発などが必要であろう。

参考文献

1)日本橋梁建設協会編：床版工事設計施工の手引き，平成２年５月

2)杉本・鹿・山本：離散的構造最適設計のためのＧＡの信頼性向上に関する研究，土木学会論文集，No.471/I-24, pp.67-76, 1993.7

3)Goldberg,D.E.: Genetic Algolithms in Search, Optimization and Machine Learning, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY,INC., 1989.

連絡先

〒551 大阪市大正区南恩加島 6-2-21

片山ストラテック 橋梁設計部

夏秋義広

TEL 06-552-1235

FAX 06-551-5648

TF3-2

ファジィ理論を応用した斜張橋のための温度同定法

Fuzzy System Identification Method for the Construction of Cable-Stayed Bridges Considering Temperature Effect

亀井正博	古田 均	田中 洋	松下泰弘
Masahiro Kamei	Hitoshi Furuta	Hiroshi Tanaka	Yasuhiro Matsushita
大阪長堀開発（株）	関西大学	日立造船（株）	日立造船（株）
Osaka Nagahori development Inc.	Kansai University	Hitachi Zosen Corporation	Hitachi Zosen Corporation

Abstract－Cable tension adjustment is conventionally carried out in the midnight to eliminate the influences of temperature. Therefore, this work becomes very hard for the bridge engineers. For reducing the load of the works, it is necessary to develop the cable tension adjustment system which is enable to perform in the day time by avoiding the influence of remarkable thermal changes in the day time. For this propose, we have developed a practical method of estimating the influence of temperature. Fuzzy System Identification method (FSI) developed by the authors is extended to estimate the influence of temperature. First the extended FSI is formulated. Secondly, a numerical example of the method is shown using assumed data. The results confirm that the cable tension adjustment in the day time is theoretically possible by using this method.

1 はじめに

斜張橋は、最適なケーブル張力を決定することにより、主桁の曲げモーメントを均一化させて、合理的な設計を行うことができる。しかし、製作・架設の段階で種々の誤差が累積し、設計値どおりのキャンバーやケーブル張力を確保することは極めて難しい。そこで、架設時にシム調整を行い、完成時の精度を向上させている。

ところで、シム調整を行うためには、架設途上で主桁や塔の変位、およびケーブル張力の計測が必要である。しかし、昼間は橋体の温度変化が大きく、それが変位やケーブル張力に与える影響も少なくない[1]。そのため、この作業は、温度の影響が入らないように、橋全体の温度が一定となる夜間に実施されている。シム調整を昼間に行うには、温度の計測点をできるだけ多くし、橋体の温度状態を正確に把握して、計測値から温度の影響を精度よく除去する必要がある。しかし、通常、橋体の温度は熱電対で計測されているため、計測点をあまり多くすることはできない。

そこで、筆者らは、限られた計測点での温度の計測値と、その温度状態での変位とケーブル張力の計測値をファジィデータと考え、ファジィ線形回帰分析を用いた構造同定の手法により標準温度（一般には、20℃）でのケーブル張力と変位を推定する方法（以下、温度同定法と呼ぶ）を開発した[2]。また、温度補正後の計測値をファジィデータと考え、構造系に含まれる誤差要因を分析し、その結果をもとに完成系を予測する方法（以下、ファジィＳＩ法と呼ぶ）も開発した[3]。

ここでは、温度同定法の定式化を述べ、斜張橋の架設管理を昼間に実施することを想定して数値解析を行い、構造物内に種々の誤差が内在し、しかも温度変化の影響が含まれている場合でも、温度同定法を適用することによって、温度の影響を除去できることを示し、さらに、ファジィＳＩ法によって、誤差要因分析が行えることを示す。

2 温度同定法の定式化

温度同定法とは、橋全体の温度分布の区間割りを仮定し、ある温度分布における変位とケーブル張力、および一部の区間の温度の計測値をもとに、構造同定法を応用して、全区間の温度、および標準温度における変位とケーブル張力とを推定する方法である。

まず、変位とケーブル張力との計測値をファジィデータと考え、$\tilde{Y}$と定義する。そして、標準温度20℃における変位とケーブル張力との推定値を$\tilde{Y}_0$、温度変化による変位とケーブル張力との影響値をKとする。また、$\tilde{Y}$をモデル式の係数の可能性に依存するとみなし、次式で示すように、ファジィ係数$\tilde{X}$を持つ温度影響値モードの線形的に重ね合わせたもので表す。

$$\tilde{Y} = \tilde{Y}_0 + \sum_{i=1}^{N} \tilde{X}_i K_i \qquad \cdots\cdots(1)$$

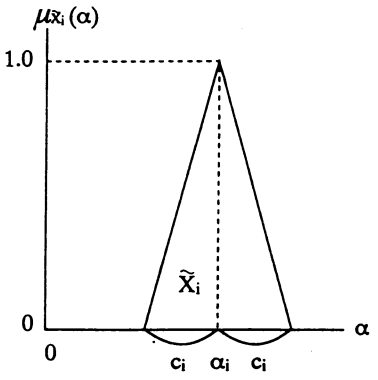


図1 $\tilde{X}_i$のメンバーシップ関数

ここで、$\tilde{X}_i$は図 1に示すc_iとα_iとを代表値とするメンバーシップ関数をもつファジィ量である。いま、与えられた課題は、ファジィ係数$\tilde{X}_i$と標準温度における推定値$\tilde{Y}_0$とを求めることにある。そこで、適合度を計る基準パラメータh（$0 \leqq h < 1$）を導入し、標準温度における推定値$\tilde{Y}_0$も$\tilde{X}_i$（i=N+1, …N+M）で表現すると、ファジィ量$\tilde{X}_i$は、以下の諸式(2)～(5)で表されるファジィ線形回帰分析のMAX問題に帰着される。すなわち、

目的関数：

$$J(c_i) = \sum_{i=1}^{N+M} \sum_{j=1}^{N+M} c_i |K_{ji}| \rightarrow MAX \qquad \cdots\cdots(2)$$

制約条件：

$$T_j + (1-h)e_j \geqq (1-h)\sum_{i=1}^{N} c_i |K_{ji}| + \sum_{i=1}^{N} \alpha_i K_{ji} + (1-h)\sum_{i=N+1}^{N+M} c_i |K_{ji}| + \sum_{i=N+1}^{N+M} \alpha_i K_{ji} \qquad \cdots\cdots(3)$$

$$T_j - (1-h)e_j \leqq -(1-h)\sum_{i=1}^{N} c_i |K_{ji}| + \sum_{i=1}^{N} \alpha_i K_{ji} - (1-h)\sum_{i=N+1}^{N+M} c_i |K_{ji}| + \sum_{i=N+1}^{N+M} \alpha_i K_{ji} \qquad \cdots\cdots(4)$$

$$j=1,2,\cdots N+M \quad c_i \geqq 0 \qquad \cdots\cdots(5)$$

ここに、

M：計測項目（主桁と塔の変位、およびケーブル張力の計測箇所数）

N：温度分布の区間割り箇所数（ただし、主桁のように温度差がある場合、一様な温度変化と温度差の重ね合わせとみなすため、1区間当たり2箇所となる。）

T_j：計測値$\tilde{Y}$のj成分

K_{ji}：区間iの単位温度変化による計測値j成分の影響値（一様な温度変化と温度差の影響に分離する。）

c_i, α_i：$\tilde{X}_i$のメンバーシップ関数の代表値（全区間の温度変化量、および標準温度における変位とケーブル張力）

e_j：計測値（ファジィ出力）の誤差

h：適合度を計る基準パラメータ（$0 \leqq h < 1$）

式(3)、および(4)の右辺の第3項、ならびに第4項は、式(1)における$\tilde{Y}_0$を表している。また影響値K_{ji}については$i=N+j$のときのみ$K_{ji}=1$、そのほかは$K_{ji}=0$である。

本方法により、標準温度における推定値$\tilde{Y}_0$を求めることができれば、夜間計測と同じデータを得たことになる。

3．数値計算例と考察

3．1 解析モデル

斜張橋の架設途上のモデルを用いて、数値計算例を示す。モデルの主要寸法、および格点番号を図2に示し、また部材番号を図3に示す。モデルは、中央径間の主桁の架設途上であり、最上段ケーブルがまだ架設されていない状態にある。また、架設機材重量として、格点15に集中荷重(P=100tf)を載荷する。断面性能、および死荷重は、表1に示すとおりである。

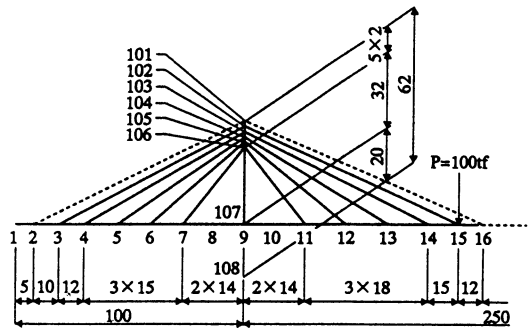


図2 主要寸法、および格点番号（単位：m）

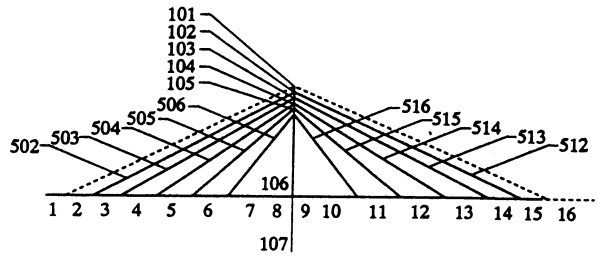


図3 部材番号

表1 断面性能、および死荷重

部材区分	断面積 (m^2)	断面二次モーメント (m^4)	ヤング係数 (tf/m^2)	前死荷重 (tf/m)
主桁	0.3～0.4	0.25～0.35	2.1×10^7	5.0
塔	0.3	0.25	2.1×10^7	5.0
ケーブル	0.0012 ～0.0055	—	2.0×10^7	0.05 ～0.10

3．2 誤差の仮定

表２に示すように、解析モデルの構造系、および架設機材重量など、５種類の要因の誤差寄与率を仮定し、組立計算を行って変位とケーブル張力の誤差量（仮定誤差）を算出する。

さらに、表３に示すように、橋体の温度分布を２ケース仮定し、それぞれケースについて標準温度20℃からの主桁と塔の変位、およびケーブル張力の変化量を算出する。

一方、図４に示す位置で、主桁と塔の変位、ケーブル張力、および橋体温度を計測したと仮定する。変位と張力の計測値は、表４に示すように、設計値に仮定誤差と温度の影響とを組み合わせた値とする。また、橋体温度は表３の※印で示す部材の値を計測値として用いる。

これらの値をもとに、温度同定法を適用することによって、計測値に含まれる温度の影響を除去し、さらに構造同定法によって、誤差要因分析を行う。

表２ 誤差要因の仮定

誤差系	誤差要因の種類	誤差寄与率 (%)
a1	側径間の前死荷重	−8.0
a2	中央径間の前死荷重	+5.0
a3	主桁の剛度	+8.0
a4	全ケーブルのヤング係数	−5.0
a5	架設機材の重量	−3.0

表３ 橋体の温度分布

部材区分	部材番号	対象位置	温度分布(℃)	
			ケース１	ケース２
主桁	※1～4	桁上面	30.0	55.0
		桁下面	28.0	50.0
	5～8	桁上面	34.0	51.0
		桁下面	32.0	46.0
	※9～12	桁上面	38.0	47.0
		桁下面	36.0	42.0
	13～15	桁上面	42.0	43.0
		桁下面	40.0	38.0
塔	100～107	側径間側	20.0	50.0
		中央径間側	25.0	45.0
ケーブル	502, 512		40.0	44.0
	503, 513		40.0	44.0
	504, 514		38.0	44.0
	505, 515		38.0	44.0
	※506, 516		36.0	44.0

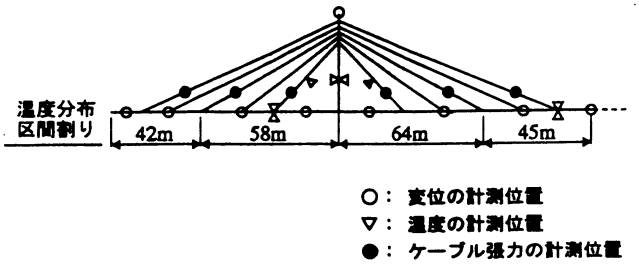


図４ 計測位置

表４ 誤差と温度の影響とを含んだ計測値

計測項目	計測位置	設計値	仮定誤差	温度の影響		計測値	
				ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
主桁の変位 (mm)	2	−42	−13	−2	−0	−57	−56
	4	−194	−59	−5	−18	−258	−270
	6	−238	−67	−4	−19	−309	−324
	8	−100	−28	−0	−6	−128	−133
	10	108	28	−2	2	134	138
	12	329	87	−5	−5	410	410
	14	483	142	9	−9	634	617
	16	565	181	29	3	775	749
塔の変位(mm)	101	59	−42	48	−48	65	−31
ケーブルの張力 (tf)	502	325.4	33.6	3.0	1.5	362.0	360.5
	504	151.1	2.2	0.8	−0.3	154.1	152.9
	506	156.2	−10.6	5.1	10.9	150.8	156.6
	512	348.4	12.2	−0.7	6.0	359.8	366.6
	514	136.9	7.8	0.2	−0.4	144.9	144.4
	516	140.4	2.1	10.3	6.8	152.8	149.3

3．3 温度同定法の適用

前節で示したように、２ケースの温度分布における一部分の橋体温度、および誤差を含んだ変位とケーブル張力の計測値をもとに、温度同定法を適用して標準温度20℃での推定値を算出する。ここで、温度の計測値は、±1℃の計測誤差を含んでいると仮定した。また、温度を計測していない主桁部材は、隣り合う部材の計測値の平均値を用いて、その誤差を±3℃とした。ケーブルは、最下段のみで計測したと仮定しているため、全ケーブルで一定温度とし、その誤差を±3℃と仮定した。結果を表５に示す。ここで、推定値と設計値との差異が推定誤差となり、推定誤差と仮定誤差の相違は、主桁の変位で最大10mm程度で、またケーブルの張力で2tf程度である。このことから、温度同定が、精度よくできていることがわかる。

表５ 標準温度における推定値

計測項目	計測位置	設計値	推定値	推定誤差	仮定誤差
主桁の変位(mm)	2	-42	-52	-10	-13
	4	-194	-251	-58	-59
	6	-238	-304	-67	-67
	8	-100	-125	-25	-28
	10	108	139	31	28
	12	329	417	88	87
	14	483	630	147	142
	16	565	753	188	181
塔の変位(mm)	101	59	31	-29	-42
ケーブルの張力(tf)	502	325.4	359.3	33.8	33.6
	504	151.1	151.5	0.4	2.2
	506	156.2	148.4	-7.9	-10.6
	512	348.4	360.4	12.0	12.2
	514	136.9	143.7	6.7	7.8
	516	140.4	144.7	4.2	2.1

３．４ 構造同定法の適用

温度同定法により得られた推定誤差もとに、ファジィＳＩ法により誤差要因分析を行い、誤差寄与率を求めた。ここで、主桁と塔の変位、およびケーブル張力の計測値にそれぞれ±2tf、および±2cmの計測誤差が含まれていると仮定した。計算結果を、表６に示す。この表より、誤差寄与率の計算値と仮定値を比較すると、ほぼ一致している。しかし、ａ3の場合の精度は、若干、悪くなっている。これは、主桁の剛度の影響値が、他の誤差要因と比較してかなり小さいことに起因していると考えられる。

表６ 誤差寄与率の比較

誤差系	誤差要因の種類	誤差寄与率(%)	
		仮定値	計算値
a1	側径間の前死荷重	−8.0	−8.0
a2	中央径間の前死荷重	+5.0	+5.0
a3	主桁の剛度	+8.0	+1.0
a4	全ケーブルのヤング係数	−5.0	−3.6
a5	架設機材の重量	−3.0	−1.5

４．まとめ

本文では、斜張橋の昼間架設管理を想定して、数値解析を行った。その結果、本研究で明らかにされた諸点をまとめると、以下に示すとおりである。

（１）温度同定法を適用すれば、限られた計測値をもとに、橋全体の温度分布を推定し、温度の影響を除去することができる。しかし、この方法を適用する場合でも、基準となる部材の温度は、ある程度正確に計測する必要がある。

（２）架設時の変位やケーブル張力の計測値に誤差が含まれている場合でも、温度同定法を適用することによって、温度の影響だけを除去できることがわかった。

（３）ファジィＳＩ法を適用すれば、計測値に計測誤差が含まれている場合でも、誤差要因分析を行い、誤差寄与率を求めることができる。しかし、その精度を上げるためには、温度の影響を精度よく除去する必要がある。

（４）ファジイＳＩ法を適用しても、誤差要因の影響値が小さい場合や、影響値が２つ以上の誤差要因で同じような値となる場合、分析結果の精度は悪くなる。

参考文献

[1] 亀井正博、福本和弘、松下泰弘、古田　均、中井　博：温度を考慮した斜張橋架設精度管理法とケーブル温度計測の一提案、土木学会、構造工学論文集、Vol. 40A、pp. 1203-1214、1994年3月

[2] 古田　均、亀井正博、金吉正勝、田中　洋：ファジィＳＩ法による昼間ケーブル張力調整の基礎的研究、土木学会、第２回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp. 323-328、1991年11月

[3] 古田　均、亀井正博、金吉正勝、田中　洋：斜張橋の架設管理へのＳＩ法とファジィＳＩ法の適用、土木学会、構造工学論文集、Vol. 36A、pp. 459-467、1990年3月

連絡先

〒592 大阪府堺市築港新町1丁5番1
日立造船（株）　橋梁設計部
松下泰弘
TEL (0722)43-6807
FAX (0722)43-6834

TF3-3

地すべり自動監視システムのファジィ理論による高度化

Advanced System for Automatic Landslide Monitoring by Fuzzy Theory

大野 研　　東 崇史
Ken Ohno　　Takashi Higashi

三重大学生物資源学部
Department of Bioresources, Mie University

農林水産省
Ministry of Agriculture, Forestry & Fishery

Abstract: Ordinarily, Landslide prevention works cost a lot but save a relatively small number of people. Consequently, automatic monitoring systems for warning people of the dangers of landslide is getting attention. However, warnings of those systems sometimes can not be believed because those systems use simple rules. We propose an advanced system for automatic landslide monitoring by fuzzy theory. By using fuzzy theory, the system is approaching to experts.

1．まえがき

地すべり等の土砂災害は、有史以来続いてきたものであると考えられる。人間は、地すべり・崖崩れなどの発生しやすい場所を察知し、その場所に住んだり活動したりする事をできるだけ避けて生活してきたものと思われる。しかし、人間が活動域を広げるにつれ、かつての危険域での活動が増えてきていることも事実である。したがって、土砂災害が比較的多発するようになってきたわけである。このような土砂災害を防ぐ方法には、大きく分けて２種類のものがある。すなわち、対策工などを施すハードな対策と、地すべりの危険が近づくことを予測し、危険区域の居住者を避難させるというソフトな対策である。地すべりに対するハードな対策は、お金がかかる割には防護される人家等が少なくはなはだ費用効率の悪いものであると言われている。そこで近年では、計測器を斜面に埋め、その計測結果から、危険区域の居住者を避難させるための警報を出すシステムが考えられてきている。しかし、現在のところ比較的単純なルールにしたがって警報を出すことになっているために、警報があまり信用されていないことも多い。そのため、計測結果を人間の専門家が最終的に判断して、警報を出していることも多い。これでは多くの斜面を24時間体制で監視するということは不可能である。そこで本研究では、専門家が計測結果からその斜面が土砂災害に対して危険であるという判断する過程を、地すべり自動監視システムに取り込むことを目的としている。これがうまくいけば、24時間体制で信頼できる警報を数多くの斜面で出せるようになる。今回は、なんらかの斜面監視用の計測器が設置されている114ヶ所の斜面の管理者に対するアンケート結果（地すべり対策技術協会）と聞き取り調査に基づいて作成した高度化された地すべり自動監視システムのプロトタイプについて報告する。

2．方法

アンケート調査によると、全部で114の監視斜面には、18種類の計測器が設置されており、設置計器総数は402である。そのうち、174の計器に対して、警報出すための基準値など（管理基準値）が設定されている。現在の警報を出すためのルールは、ほとんどの場合、計測値がある基準値を超えたかどうかだけである。この基準値の値が、各斜面の個性によって変化するハズであるが、アンケート結果から見る限るでは、明確な相関を発見するのは困難である。しかし我々はひとまず計測値から信頼できる警報を出すという問題を、次の３つの問題を考えることから始めることにした。すなわち、1)警報への斜面固有の特徴の反映、2)計測値と危険度の関係、3)単純に計測値を信用するのか？　である。

2－1　警報への斜面固有の特徴の反映

アンケートなどから判断して、次の７つの情報が斜面の特徴と警報に大いに関係すると思われた。すなわち、1)計器の設置目的（監視目的・挙動解析など）、2)防護対象（人命・道路・鉄道・田畑など）、3)規模、4)地盤の種類、5)対策工の有無、6)活動状況、7)流れ盤 or 受け盤？ である。そこで、我々はこれらの情報と警報の出安さを、ファジィ化されたDempster&Shafer法で関連づけることにした（例えば、防護対象が人命であれば、防護対象が田畑であるよりも早期に警報を発する必要がある）。ここで、この関連づけをファジィ化されたDempster&Shafer法で行ったのは、アンケート結果から見た斜面の個性と管理基準値の関係（すなわち、斜面の個性と警報の関係）があいまいであったからである（確信度付きのファジィルールを行えば、同様なことが行えると思われるが）。

2－2　計測値と危険度の関係

従来の監視システムの大きな欠点は、基準値を越

えたか越えないかだけで警報がでる単純なルールと複数多種類の計測器間の相関が考慮できないことにある。例えば、地表伸縮計によって管理基準値以下ではあるがある程度大きな伸びが観測されているときに、管理基準値以下ではあるがある程度多量の降雨が観測されたときには、警報を発令すべきであると思われるが、従来のシステムでは、これは不可能である。そこで、我々は管理基準値が比較的多く設定されている7種類の計測器（地表伸縮計、地中伸縮計、地盤傾斜計、孔内傾斜計、パイプひずみ計、水位計、雨量計）に関して、計測値と計器ごとの危険度をファジィルールで関連づけることにした。これで、多種類の計測値を危険度という同じ基準に変換したことになる。ただし、計測器ごとにやや対応が異なる。パイプ歪計・水位計・地盤傾斜計・地中伸縮計の４つに対しては計測値のみと危険度の関係を考えた。地表伸縮計・雨量計・孔内傾斜計の３つに対しては、計測値とある一定以上の計測値の継続時間の２つの値と危険度の関係を考えた。ここまでは、複数他種類の計測器間の相関に関する問題は解決されていない。しかし、各計測器ごとの相関という問題に関しては、明確な知識のある関係は少ないと思われるので、次の「単純に計測値を信用するのか？」の問題に含めて考えることにした。

２－３　単純に計測値を信用するのか？

斜面に設置された計測器は故障することも多く、専門家は計測値を単純に信用しないことが多い。専門家は目視などその他の情報を総合して計測値を信用するかどうか決定すると思われる。そこでビデオ装置による画像情報をシステムに取り込むことなども必要と思われる。現在設置されている計測器からの情報のみで、少しでも専門家に近い判断をするためには、複数多種類の計測値を総合判断することが有効と思われる（アンケートから分かるように、各斜面には平均で3-4個の計測器が設置され、5-6種類10個以上の計測値が設置されているところもある）。聞き取り調査によると、複数の計測器が設置されている斜面では、ある程度近くに設置された複数の計測器が同時に異常値を示したときには、専門家は異常事態であることをかなり確信するようである。そこで、任意の２つの計測器の計測値から推定された危険度とそれらの計測器間の距離という３つの値と、総合危険度をファジィルールによって関連づけることにした（例えば、計測器Ａからの危険度が中、計測器Ｂからの危険度が中、両者の距離が小であれば、総合危険度は大というようなルール）。３つ以上の計測器がある時には、任意の２つの計測器からの総合危険度大・中・小への帰属度を基礎確率と考えて、ファジィ化されたDempster&Shafer法でさらなる総合化を行った。

３．計算例

いくつかの斜面での計算例を示す。

例	1	2	3
観測目的	監視	監視	挙動
防護対象	人命	道路	山地
規模（m^3）	1000000	800000	12000
地盤の種類	風化岩	崩積土	岩盤
対策工	なし	調査中	維持管理中
活動状況	潜在中	活動中	休眠中
受け・流れ盤	受け盤	複合	流れ盤
斜面固有危険度	87.64	82.34	53.60
計測器	伸縮計	伸縮計	雨量計
計測値	0.7mm/日	3.5mm/日	10.0mm/時
継続時間	０．３日	１０日	５時間
座標	(1,10)	(10,10)	(10,12)
危険度	21.13	72.68	17.51
計測器	雨量計	伸縮計	雨量計
計測値	0.5mm/時	5.2mm/日	17mm/時
継続時間	８時間	０．８日	１３時間
座標	(2,11)	(50,64)	(21,29)
危険度	17.51	73.54	21.29
計測器	雨量計	パイプ歪計	
計測値	0.6mm/時	2000μm/月	
継続時間	４．８時間		
座標	(1,11)	(18,30)	
危険度	17.51	48.67	
計測器	水位計	水位計	
計測値	0.7m/日	2.1m/日	
継続時間			
座標	(1,14)	(30,15)	
危険度	24.59	24.15	
総合危険度	51.00	23.34	17.33

３．まとめ

ナンセンスな部分も存在するが、現在のシステムよりは専門家が斜面の危険度を判断するのに近い、地すべり監視システムのプロトタイプを作成することができた。今後各ファジィ集合の定義の部分を改善していけば、かなり合理的な判断を下せるようになるのでは期待している。

連絡先：〒514　津市上浜町1515
三重大学生物資源学部　大野研
TEL:0592-31-9584
e-mail:oono@bio.mie-u.ac.jp

TF3-4

多段ファジィ推論を用いた経路選択モデルの作成

Travel Route Choice Modelling with Multi-Stage Fuzzy Reasoning

秋山　孝正　　安藤　彰記
Takamasa Akiyama　　Akinori Ando

岐阜大学工学部土木工学科
Department of Civil Engeneering, Faculty of Engineering, Gifu University

The fuzzy reasoning description of travel route choice behaviour has been regarded as an useful technique to consider the real traffic control system. The empirical data is obtained as a result of questionnaire servey for typical route choice behaviour in Gifu city. Multi-stage reasoning is applied to modify the conventional reasoning to describe the travel behaviour more precisely. Comparison of the various methods of fuzzy reasoning is carried out in terms of accuracy of the model. Finally, the advantage of the combination with neural network, or genetic algorithm is discussed to improve the basic fuzzy reasoning model.

1．はじめに

近年、情報機器の飛躍的な進歩により交通情報を用いた交通管理が重要視されている。例えば、道路管理者による道路利用者の交通情報を利用した経路誘導は今日的課題である。

こうした交通管理方策の具体的な検討のためには道路利用者の交通情報に対する行動変化を把握する必要がある。こうした利用者の意思決定行動を言語変数によりモデル化する方法としてファジィ推論によるモデルが提案されている。これは従来から用いられているロジットモデルなどの関数型選択モデルで記述しにくい現実的思考過程を記述するためのものである。

そこで本研究では、これまで交通行動記述のために作成されてきたファジィ推論モデルに対して、いくつかの改良法を利用する。

以上により作成されたモデルから利用者の経路選択行動を分析し交通情報を用いた交通管理について検討することを目的とする。

2．経路選択モデルの作成

2－1　経路選択モデルの概要

実際の例として岐阜大学～ＪＲ岐阜駅前間の経路選択行動をファジィ推論を用いてモデル化する。この選択経路を図－１に示す。

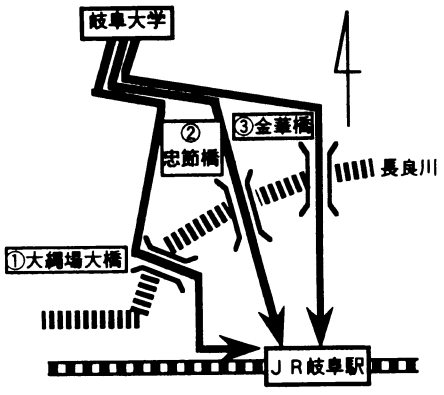


図-1　岐阜大学～ＪＲ岐阜駅前間の選択経路

経路選択調査として、岐阜大学の学生に対して朝・昼・夕方の３時間帯について各経路の認知所要時間・認知混雑度順位・選択経路・選択理由等を質問した。また４条件（通常時、雨天時、大縄場大橋渋滞時、大縄場大橋通行止め時）を想定した場合についても同様の質問を行った。

このアンケート調査で得られたデータに基づいて「岐阜大学～ＪＲ岐阜駅前間」の経路選択モデルを作成する。実際のモデル作成には、アンケート調査で集計された５７サンプルから、ランダムに抽出された４０サンプルを用いる。また残りの１７サンプルはモデル作成後の推計精度チェック用データとする。また説明要因は２変数とし、ファジィ推論モデルへの入力としてつぎのように構成している。

（１）各経路の「認知所要時間」

各経路の対する個人の認知所要時間を表現する。調査結果から各個人について（最小値，中央値，最大値）の３つの値で構成される「三角型ファジィ数」を使用する。

（２）各経路の「混雑度」

本研究では、各経路の混雑を相対的な混雑として考えている。具体的には各個人が調査結果に対して混雑順位を決定しているので、「１位である」、「２位である」、「３位である」というクリスプ変数を設定することができる。

つぎに具体的に、実際のデータを用いてファジィ推論による「経路選択モデル」を作成する。推論手順の概要を図－２に示す。このときの「推論手順」として、まず所要時間と混雑度から各個人の各経路の選択評価値（選択魅力度、選択効用と考えられる）を０～１の間の得点として推論（ファジィ推論）する。つぎに３経路の得点を比較し、最大得点を与える経路を個人の選択経路とする。したがって、推論は各経路の選択効用を決定する部分と各効用値を実際的な経路として選択する部分の２段階で構成されている。その意味で「多段推論」により記述できるものと考える。

具体的なモデル作成にあたって、収集データに対応して３時間帯（午前８時～９時、午後１２時～午後１時、午後５時～午後６時）ごとに推論モデルを作成した。基本モデルとして、交通状態に関する条件（通常時、雨天時、大縄場大橋渋滞時、大縄場大橋通行止め時）に対して、ルール構成、メンバシップ関数形態（三角型）は変化しないものと考えた。ファジィ推論の方法としては、モデル設定が容易で推計精度面でも有効な「簡略ファジィ推論」の方法を用いている[1)]。

この推論では、結論は事実「x_0 and x_1」と各規則の前件部「A_i and B_i」との適合度が

$$w_i = \mu_{Ai1}(x_1^*) \times \mu_{Ai2}(x_2^*) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

と与えられる。この適合度W_iは、x_0, y_0が与えられたとき各ルールの結論z_iが得られる度合いを表しているものといえる。最終的な結論z_0は、これら$z_1, \cdots, z_n$を適合度$w_1, \cdots w_n$で荷重平均することにより得られる。

$$Z_0 = \sum_{i=1}^{n} w_i b_i / w_i \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

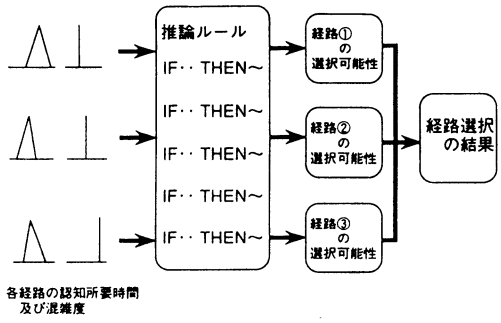


図-2　ファジィ推論モデルの手順

2－2　ファジィ推論モデルの作成

つぎに、ファジィ推論モデル構築に関して、本研究で採用した「ルール構成法」と「メンバシップ関数決定方法」について説明する。

① 初期設定として、メンバシップ関数とルール構成の設定をする。このとき、関数の基本的形状（三角型）とラベル数はあらかじめ決めておく。

② ①のメンバシップ関数を固定して、最適なルール構成の選定を「試行錯誤」により変更する。すなわち最も正解率が高い（推計誤差が少ない）ルール構成を決定する。

③ つぎに②のルール群を固定して、メンバシップ関数のパラメータを遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）により決定する[2]。ここで、最適化されるパラメータは、前件部の所要時間のメンバシップ関数の幅と後件部の評価得点の値である。【簡略ファジィ推論を用いるので後件部はクリスプである】

④ 最適なルール構成と妥当なメンバシップ関数の組み合わせを抽出することができない場合には②に戻る。【推計精度の向上がみられない場合】

ここで、具体的なＧＡの計算方法については、「単純ＧＡ」法を用いる[3]。またＧＡにおける各設定変数は、集団数：30、淘汰割合：0.5、交差率：0.9、突然変異率：0.02とした。

上記のアルゴリズムにしたがって、時間帯ごとに「推論ルール」と「メンバシップ関数」の設定を行った。ただし利用者の基本的判断を表す「推論ルール」表現については、時間帯によって変化はないものと考えた。したがって、まず朝の時間帯（午前８時～午前９時）について、「推論ルール」および「メンバシップ関数」を設定した（推論ルールを表－１に示す）。その後、他の２時間帯については、ＧＡによるメンバシップ関数の推定のみを行った。このようにして得られた時間帯ごとのメンバシップ関数を図－３に示す。また、後件部のメンバシップ関数値を表－２に示す。

表－１　ファジィ推論のルール構成

R-1	IF	T is small	and	R=3	THEN	P is	VERY LARGE
R-2	IF	T is small	and	R=2	THEN	P is	LARGE
R-3	IF	T is small	and	R=1	THEN	P is	LARGE
R-4	IF	T is medium			THEN	P is	MEDIUM
R-5	IF	T is large	and	R=3	THEN	P is	SMALL
R-6	IF	T is large	and	R=2	THEN	P is	SMALL
R-7	IF	T is large	and	R=1	THEN	P is	VERY SMALL

T：認知所要時間　R：認知混雑度順位　P：経路の選択可能性得点

表－２　後件部のメンバシップ関数値

	VERY SMALL	SMALL	MEDIUM	LARGE	VERY LARGE
朝　午前８時～午前９時	0.00	0.15	0.43	0.81	1.00
昼　午後１２時～午後１時	0.00	0.26	0.48	0.75	1.00
夕方　午後５時～午後６時	0.00	0.22	0.40	0.85	1.00

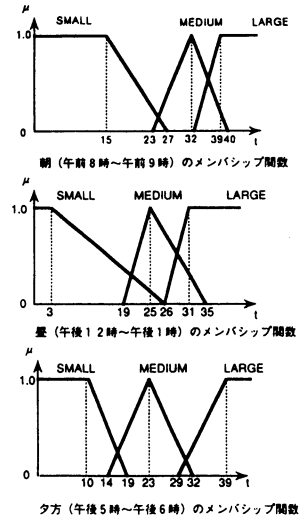


図-3　所要時間のメンバシップ関数

以上のようにして、「通常時」の利用者行動を記述するファジィ推論モデル（簡略ファジィ推論）が作成された。ここでは、このモデルを「通常時」以外の交通条件が変化した場合の交通行動に対しても適用する。これらの推計結果を表－３に示す。ここで、意識調査時の選択経路と、推計された選択経路が一致した場合を正解と考える。このとき「通常時」では、時間帯に関係なく、４０サンプル中３０サンプル（７５％）以上正解となった。しかしながら、その他の条件下では、６割程度の正解率である。なかでも、個別のモデルでは「夕方」の雨天時の推計精度が悪い。また、３経路問題における条件設定を考えると、「大縄場大橋渋滞時」の推計精度が悪くなっている。さらに「大縄場大橋通行止め時」の場合は、２経路問題となり本モデルでは適合性が悪く５割程度の正解率である。これらのことから、交通条件の変化をファジィ推論モデルで考慮する場合には、所要時間や混雑度以外の要因を付加する必要があるということがわかる。

表-3　ファジィ推論による推計結果（正解率）

	朝 午前8時～午前9時	昼 午後12時～午後1時	夕方 午後5時～午後6時
通常時	90.0 %	75.0 %	75.0 %
雨天時	62.5 %	75.0 %	50.0 %
大縄場大橋渋滞時	62.5 %	70.0 %	60.0 %
大縄場大橋通行止め時	67.5 %	60.0 %	55.0 %

3．経路選択モデルの改良

3－1　外生要因を考慮したモデル化

前項では、利用者が経路選択をする時、まず所要時間や混雑度などの基本的な要因から各経路に対する評価を行うと考えた。しかしながら、天候の悪化、渋滞等のいろいろな条件が加わった場合は、その他の要因も考えて更に複雑な評価を行うと考えられる。本研究では条件変化に対する別の要因を加えたモデル化を考える。この場合、通常時の推論結果に基づいて、さらに他の説明要因を考慮して各経路の評価の比較するという推論形式を考える。すなわち、通常時の推論モデルでの評価値を用いて、条件変化に対応した２段階目の推論過程を持つということである。

ここでは、条件ごとに異なる２段階目の推論過程を持つ３種類の多段推論モデルを作成する。ただし、時間帯については同一の

２段階目の推論を行うものとする。

この第２段階目の推論で使用する説明変数は以下のものである。

（１）各経路の評価得点

通常時の推論モデルで得られた各経路の評価得点を基本量として用いる。

（２）通常時の選択経路

通常時の選択経路は各利用者の経験程度を示すと考える。したがって、選択可能な経路は同じであって交通条件が変化した場合には、通常時の行動が経路選択結果に影響を与えると考えられる。そこで、この指標として「①環状線」、「②忠節橋通り」、「③金華橋通り」というクリスプ変数を設定する。

（３）経路選択理由

特定の経路が通行できない場合、従来の当該経路利用者は他経路への変更を余儀なくされる。このとき経路選択理由として慣れを重要視するものとそれ以外で行動基準が異なると考える。具体的には、理由１「使い慣れている」を回答したか否かをクリスプ変数として設定する。このとき、例えば本研究の例では、大縄場大橋を慣れにより通行しているものは、近隣の道路状況を把握しており通行止め時には忠節橋通りに経路変更をすると考えるものである。

この２段階目の推論ルールを表－４に示す。この部分のルール構成は、アンケート調査の集計結果から得られた経路選択に対する知識をもとに作成した。このルールでは、先に求めた通常時推論モデルで得られた、各経路の評価得点が付加条件によって変更（増加）される事を表している。そして、第３段階目の推論として、新たに得られた評価得点の最大の経路を個人の選択経路として採用する。採用する点は通常時推論モデルと同様である。

表－４　２段階目の推論のルール構成

雨天時のルール構成

R-1	IF TJ=1	THEN P1=P1+α
R-2	IF TJ=2	THEN P2=P2+β
R-3	IF TJ=3	THEN P3=P3+γ

大縄場大橋渋滞時のルール構成

R-1	IF P1≒P2 and P3≪(P1+P2)/2	THEN P2=P2+0.05
R-2	IF P2≒P3 and P1≪(P2+P3)/2	THEN P2=P2+0.05
R-3	IF P3≒P1 and P2≪(P3+P1)/2	THEN P3=P3+0.05
R-4	IF P1≒P2 and P2≒P3 and P3≒P1	THEN P2=P2+0.05

大縄場大橋通行止め時のルール構成

R-1	IF TJ=1 and RY is (1)	THEN P2=P2+δ
R-2	IF TJ=1 and RY is not (1)	THEN P3=P3+ε

TJ：通常時の選択経路　RY：通常時の経路選択理由

P1,P2,P3：各経路の選択可能性得点

Pi≒Pj：|Pi－Pj|＜0.03　Pi≪Pj：Pj－Pi＞0.06

２段階目の推論での各経路の得点増加量は、正解率の最大化を基準として遺伝的アルゴリズムにより決定した。この場合の計算方法及び設定変数については、前項と同様である。

この３段階推論を用いて求められた推計結果を表－５に示す。雨天時、大縄場大橋通行止め時の場合は、正解率が８０％前後となり推計精度が向上している。しかしながら、大縄場大橋渋滞時の場合は、さきに示した２段階目のルールを用いても正解率を向上させることはできない。すなわち、交通渋滞時の経路選択過程は推論形式では表現することが難しいといえる。

表-５　２段階推論による推計結果（正解率）

	朝 午前8時～午前9時	昼 午後12時～午後1時	夕方 午後5時～午後6時
雨天時	87.5 %	82.5 %	82.5 %
大縄場大橋渋滞時	60.0 %	70.0 %	55.0 %
大縄場大橋通行止め時	77.5 %	75.0 %	67.5 %

３－２　ニューラルネットワークによるモデル化

大縄場大橋渋滞時における経路選択モデルでは、あらゆる要因が複雑に絡み合うため、論理が複雑になり推論モデルでは説明が難しい。さらに、他段推論によって問題解決を図ったが結果的に推計精度を改善することは不可能であった。このような非定型で複雑な判断プロセスを表現するために階層型ニューラルネットワークの導入を考える[4]。

ここでは、図－４に示すような入力層７、中間層４、出力層２のニューラルネットワークを用いた。つまり、１段階目の推論結果（３変数：０～１変数）に加えて、通常時選択経路とその経路選択理由を変数（ニューロン数４：０１変数）として用いた。この場合、各時間帯ごとに３種類のモデルが作成される。また、１段階目がファジィ推論で、２段階目がニューラルネットワークとなり、この場合も多段推論の一つであると考えることができる。これらの入力変数について具体的に説明する。

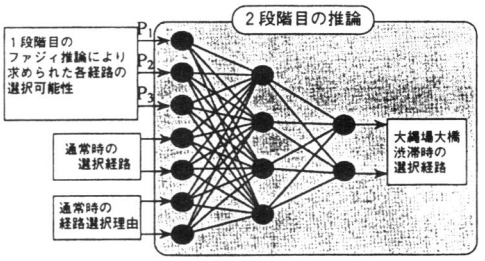


図-4　ニューラルネットワークを用いた２段階推論

（１）各経路の評価得点

通常時のファジィ推論で求めた３経路の評価得点、P_1，P_2，P_3を用いる。評価得点は、０～１数でありこれをニューラルネットワークの入力値とする。

（２）通常時の選択経路

通常時の選択経路を２桁の２進数で表し、①環状線は００、②忠節橋通りは０１、③金華橋通りは１１とした。

（３）経路選択理由

通常時の経路を選択した理由の中でもっとも重要とされているものを用いる。ここでは回答頻度の高い「理由１」、「理由２」、「理由３」を用いる。従って２桁の２進数で表すと、理由１は００、理由２は０１、理由３は１０、それ以外の理由の場合は１１となる。

（４）経路選択結果

出力層は大縄場大橋渋滞時における選択経路を示す。表現方法は、（２）の場合と同様に２桁の２進数で表す。

ここでは、ニューラルネットワークの学習は推計誤差が3.5以下（約8.8%）を基準とした。結合係数を決定すべきパラメータと考えるとファジィ推論に比べて多数のパラメータ数を必要とするモデルである。この結合荷重を用いて計算した推計結果と推計誤差を表－６に示す。ファジィ推論の場合に比べて推計精度が向上し、正解率はすべての時間帯において９割以上になった。このことから、ファジィ推論では表現できない複雑な論理を記述するためにはニューラルネットワークの利用が有効であるということがわかる。

表-６　ニューラルネットワークを用いた２段階推論による推計結果（正解率）

	朝 午前8時～午前9時	昼 午後12時～午後1時	夕方 午後5時～午後6時
正答率	92.5%	95.0%	95.0 %
推計誤差	3.493	3.498	3.480

3－3　経路選択モデルの検証

前項までに条件ごとに適合性を重視した「経路選択モデル」として、①通常時の推論モデル（簡略ファジィ推論）、②雨天時の推論モデル（簡略型多段ファジィ推論モデル）、③渋滞時の推論モデル（ニューラルネットワーク利用型多段ファジィ推論モデル）、④通行止め時の推論モデル（簡略型多段ファジィ推論モデル）を作成した。

これらのモデルの一般性を検証するために、アンケート調査で得られたデータのうち、モデル作成に用いなかった１７サンプル（チェック用データ）に対して経路選択モデルに適用した。

推計結果を表－７に示す。「朝」については、８割近い正解率であった。しかし大縄場大橋渋滞時においては正解率が４７％とかなり少なかった。「昼」については、正解率はどの条件下においても６０％前後であった。しかし大縄場大橋渋滞時と通行止め時においては、正解率７０％となり朝に比べて正解率が高かった。「夕方」についても昼と同様正解率はあまり高くなかった。しかし大縄場大橋渋滞時においては、正解率８２％となり、正解率は高かった。これらのような結果になった原因として、抽出したデータに偏りがあり、メンバシップ関数やルール構成が抽出されなかったデータに適合しなかったためではないかと考えられる。

表-７　経路選択モデルの検証結果（正解率）

	朝 午前8時～午前9時	昼 午後12時～午後1時	夕方 午後5時～午後6時
通常時	76.5 %	52.9 %	47.1 %
雨天時	82.4 %	64.7 %	70.6 %
大縄場大橋 渋滞時	47.1 %	70.6 %	82.4 %
大縄場大橋 通行止め時	70.6 %	70.6 %	76.5 %

4．経路選択行動の分析

今回作成されたモデルからは以下のような経路選択行動の分析を行うことが可能である。

①時間帯が変化した場合の各経路交通量の変化の予測
②交通条件が変化した場合の各経路交通量の変化の予測
③交通情報が整備された整備されたときの各経路交通量の変化の予測

いずれの３つの場合もメンバシップ関数の推定、推論ルールの一般化などモデルの形式を変更することで対応が可能となる。

ここでは分析例として、③の場合について考える。交通情報が整備された場合、例えば目的地までの所要時間表示が行われたとすると、利用者すべてが一致した認識を持つようになる。そして、情報のファジィ性が小さくなり、認知所要時間のファジィ数の幅が小さくなると考えられる。そこで、午前８時～午前９時の通常時において金華橋通りにおける交通情報が整備された場合の経路交通量の変化を図－５に示す。この場合の各利用者の認知所要時間はクリスプ数となっている。本例では、金華橋通りの利用者が増加したことがわかる。

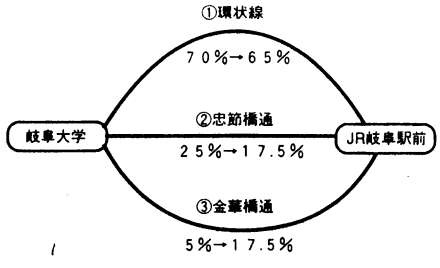


図-５　金華橋通における交通情報が整備された場合の選択経路の変化

5．おわりに

本研究では、交通情報による交通管理の基礎となる利用者行動の分析を行った。従来、主要な統計的モデルとしてロジットモデルが知られる。個人の交通行動を的確に表現しようとする意味では、本研究も同様である。しかしながら、ファジィ推論モデルでは、個人の行動を効用最大の経済原則に従うとするモデル化方法を採用しない。そして、我々のもつ経験的知識による判断過程を記述することを目的としている。

ファジィ推論を中心とする「経験的知識」に基本をおくモデリングでは、既存の各種法のハイブリッド化によって、高度な推論が可能となる。本研究では既存研究の成果を踏まえ、実際の交通現象の記述をファジィ推論によって行った。ファジィ推論の展開に援用された手法は「多段推論（ＭＦＬ）」・「ニューラルネットワーク（ＮＮ）」・「遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）」である。これらの手法を用いたことによって得られた、交通行動モデリングにおけるファジィ推論の適用性について簡単に整理する。

●多段推論（ＭＦＬ）

本研究では経路選択に関する意思決定に対して、通常時間帯に係わる「基本推論過程」と交通条件変化に対応する「付加的推論過程」をモデル化した。この段階的な推論により、我々が日常的に行っている定常的推論部分と交通条件によって実行される可変的な推論を設定したことになる。初期推論における中間出力（本研究では、経路利用有効性の程度；効用に近い概念）を参照しつつ、次段階の推論を進行する点で、現実的記述となったものと考えられる。

●ニューラルネットワーク（ＮＮ）

本研究では多段推論における複合的推論過程（経路選択可能性の比較プロセス）の記述に用いている。一般に推論システムが複雑化・大規模化する場合にプロダクション型の推論ルールの構成が困難な場合や推論ルール群で実現象を十分に捉えられない場合にＮＮは有効に機能するものと思われる。

●遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）

本研究での遺伝的アルゴリズムはモデル作成における必然性は乏しいが、その性質上、微分不可能な関数最適化（メンバシップ関数のパラメータ設定）の有利な方法として位置づけられる。遺伝的な操作はファジィ推論で利用される知識に基づく、自己組織的なモデル構造決定に有効である。特に従来ファジィ推論のモデル化において、中心的課題であった台集合上のファジィ数の規定に利用できる点では意義深い。

最後に今後の研究に期待すべき研究の方向性を今後の課題として整理する。

●ネットワーク形態を考慮した実態調査法の再考
●意識データと交通流動実態との関連性の把握
●ハイブリッド数を基本とするモデル構築法の検討
●各種技法の整理と標準的モデル構築手順の提示
●ＮＮ・ＧＡのモデルへの適用とモデル利用法との関連

【参考文献】

１）日本ファジィ学会編：講座ファジィ②　ファジィ集合，日刊工業新聞社，1992
２）秋山孝正：ファジィ理論を用いた道路交通流解析，土木計画学研究・論文集，No.11，PP13-27，1993
３）安居院猛・長尾智晴共著：ジェネティックアルゴリズム，昭晃堂，1993
４）中野馨監修・飯沼一元編・桐谷滋著：入門と実習　ニューロコンピュータ，技術評論社，1989

連絡先
〒501-11　岐阜県岐阜市柳戸1-1
岐阜大学工学部土木工学科
秋山孝正
TEL:058-293-2443
FAX:058-230-1528

一般講演論文
7月14日（金）

A室

FA1	英語セッション (1)	【企画セッション】 司会：尾知 博 (琉球大学)
FA2	英語セッション (2)	【企画セッション】 司会：陳 延偉 (琉球大学)
FA3	エキスパートシステム (1)	【企画セッション】 司会：鬼沢 武久 (筑波大学)
FA4	エキスパートシステム (2)	【企画セッション】 司会：金子 隆臣 (九州東海大学)
FA5	認識 (学生)	【企画セッション】 司会：吉川 歩 (京都工繊大学)

B室

FB1	ロボティクス (1)	司会：片井 修 (京都大学)
FB2	ロボティクス (2)	司会：柴田 崇徳 (機械研)
FB3	意志決定 (1)	司会：中村 和男 (長岡技術科学大学)
FB4	意志決定 (2)	司会：長沢 伸也 (立命館大学)

C室

FC1	ヒューマンインターフェイス	司会：伊達 惇 (北海道大学)
FC2	医療 (1)	司会：星野 聖 (琉球大学)
FC3	医療 (2)	司会：北條 暉幸 (産業医科大学)
FC4	医療・健康・感性	【企画セッション】 司会：有田 清三郎 (関西医科大学)

D室

FD1	クラスタリング	司会：宮本 定明 (筑波大学)
FD2	ニューラルネットワーク (1)	司会：金城 寛 (琉球大学)
FD3	ニューラルネットワーク (2)	司会：五百旗頭 正 (明電舎)
FD4	ニューラルネットワーク (3)	司会：田中 雅博 (岡山大学)
FD5	ニューラルネットワーク (4)	司会：辻村 泰寛 (足利工業大学)

E室

FE1	カオス	司会：安田 恵一郎 (東京都立大学)
FE2	カオス	【企画セッション】 司会：山口 亨 (宇都宮大学)
FE3	ファジィ制御	【企画セッション】 司会：小沢 和浩 (法政大学)
FE4	ファジィ制御 (1)	司会：山崎 東 (日揮)
FE5	ファジィ制御 (2)	司会：前田 幹夫 (九州工業大学)

F室

FF2	ファジィ工学応用 (1)	司会：安田 昌司 (三洋電機)
FF3	ファジィ工学応用 (2)	司会：長堂 勤 (琉球大学)

FA1-1

Evolutionary Reconstruction of Plane Images from Projections

Zensho Nakao Yen-Wei Chen Fath El Alem F. Ali Midori Takashibu

Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, Okinawa 903-01, Japan

Abstract A GA-based technique for reconstucting plane images from projections is presented; the algorithm gets the accumulated projection data from three different viewing angles. A root population of strings, each of which contains encodings of an image, is generated randomly. Typical and some new genetic operations are performed on every generation of population to produce a new generation. Results obtained are compared to those obtained using the well known algebraic reconstruction technique ART.

1. Introduction

In computed tomography (CT) applications, some projection data of a multi-dimensional distribution (target image) are given. Several techniques are known for reconstructing the original image by manipulating the projection data.

Here, we use a *genetic algorithm* (GA) to reconstruct a two-dimensional image from its three one-dimensional projection data.

A projection $P(\theta,S)$ holds the accumulated weight of some physical amount $f(x,y)$ obtained through projecting at different observing directions $L_{\theta,s}$

$$p(\theta,S) = \int_{L_{\theta,s}} f(x,y)\, dl$$

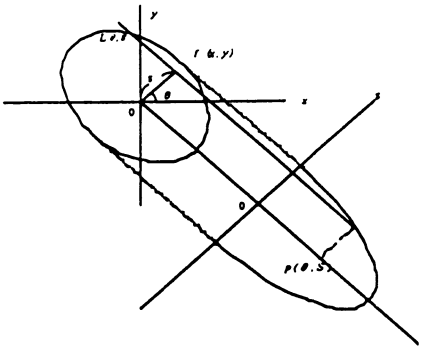
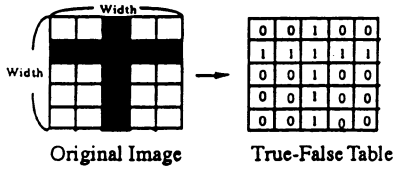


Fig.1 A projection profile

2. The genetic algorithm

In order to apply the genetic algorithm to this problem, an image has to be encoded into a genetic string, and a suitable fitness function has to be defined.

To encode an image into a genetic string, the plane of the image is considered to be composed of bits as dividing it into a finite number of fine vertical and horizontal lines. Then the picture grid is mapped into a string of finite length. Since the uniformity of the image is assumed here, a binary alphabet is used. An example is shown in Fig.2.



Original Image True-False Table

Fig.2 Image Encoding

Corresponding binary string :

01000 01000 11 111 01000 01000

string length = 5×5 (25)

A string fitness is evaluated by comparing the calculated projections of the encoded image with the projections of the original image. The following formula is used for estimating a string fitness (F):

$$F = \frac{\sum_{\theta=1}^{c} \frac{1}{width} \sum_{t=1}^{width} \frac{1}{1+\left[P(\theta,S) - R(\theta,S)\right]^2}}{c}$$

(c : number of projections,
$P(\theta, S)$: projection of the original image,
$R(\theta, S)$: projection of the reconstructed image,
θ : index of projection angle)

Strings for the initial population are generated randomly with bias to provide possible consistency among the projection data.

Genetic operations are performed on a population of binary strings, each of which contains encoding of an image. In the reproduction operation of a new generation, an *elitist* selection scheme is used. In this scheme, the most fit strings are copied directly in the next generation without undergoing any GA operation, and strings with low fitness are replaced with offsprings mated from among the more fitted strings.

A *uniform* crossover operation is performed on parents to produce better posterity. Bits of the new string are copied in sequence from one of two mated parents having equal probability of choice (Fig.3).

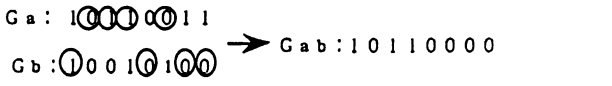


Fig.3 Uniform crossover

Two mutation schemes are used: a normal *uniform* mutation whose application depends on the rate of convergence of the population average fitness, and another new mutation, to be named *chameleon* Chameleon mutation performs a local small scale survey of the area surrounding the concerned bit and mutate it into the prevailing value (Fig.4).

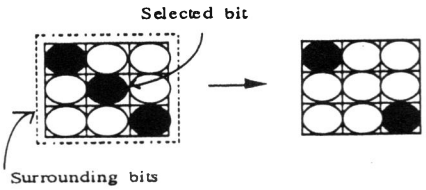


Fig.4 Chameleon mutation

Production of a new generation is shown in Fig.4:

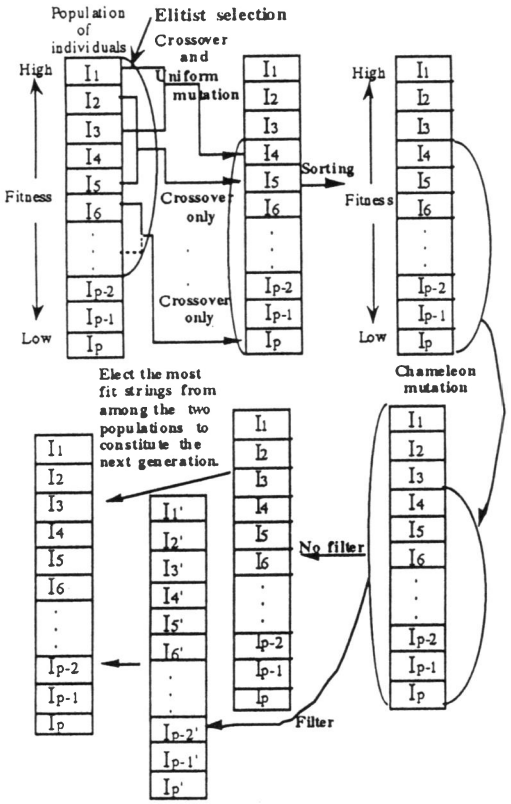


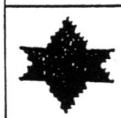
Fig.5 Production of a new generation

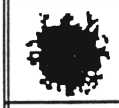
In addition to the GA operators, a filter operator is used: with a large-scale survey, a refining process is performed and aims to provide most possible consistency between two mutual projection subdata and that of the corresponding ones in the original image projections.

3. Results of the experiments

The experimental results for three images are shown below:

(Population size: 300; Size of the image: 45×45; Angle of projections: 0°, 90°, 135°)

Original	Reconstructed		
Image 1	Generation 0	Generation 5	Generation 15
			
	Fitness 0.6570	Fitness 0.9422	Fitness 1.0000

Original	Reconstructed		
Image 2	Generation 0	Generation 20	Generation 39
			
	Fitness 0.7010	Fitness 0.9326	Fitness 1.0000
Image 3	Generation 0	Generation 5	Generation 300
			
	Fitness 0.5640	Fitness 0.8628	Fitness 0.9818

As we can see, the first two images were reconstructed perfectly; good reconstruction was obtained for the last. Here are the images reconstructed by ART:



Image 1 Image 2 Image 3

For plane images using just *three* projections, comparing the GA with the ART, we found that the GA is more efficient in image reconstruction.

4. Experimental Work

Intensive and long time consuming computational experiments were performed. Many schemes were tried and tested for GA operations; parameters were tweaked to achieve robust performance; finally, optimal schemes and the related parameters values were settled.

The GA was applied to variety of target images with broad diversity.

5. Results and future work

Good agreement between the reconstructed image and the original one was obtained. Comparison of the GA results with those obtained by ART consolidated the feasibility of the GA, and its use will enhance the commonly known CT techniques.

The satisfactory results obtained so far have inspired us to continue to apply GAs to 2-dimensional nonuniform imaging and then to 3-dimensional one.

References

[1] T. Agui & T. Nagao: *Genetic Algorithms* (in Japanese), Shokodo, 1993.

[2] D. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.

[3] A. Rosenfeld and A.C. Kak: *Digital Picture Processing*, Academic Press, 1976.

Contact

E-mail: ali@augusta.ie.u-ryukyu.ac.jp

FA1-2

Evolutionary Reconstruction of Plane Color Images from Projections

Zensho Nakao Yen-Wei Chen Midori Takashibu Yasuyuki Kina

Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

Abstract A new evolutionary image reconstruction technique is presented; a *genetic algorithm* (GA) is used to estimate a two-dimensional image from its *three* one-dimensional projections taken from different angles, where nonuniformity of the target image is assumed. Genetic operations are performed on a population of strings containing encodings of images. The initial population is generated from images reconstructed by ART which is an iterative method known as the *algebraic reconstruction technique*.

1. Introduction

In computed tomography (CT) applications, some projection data of a multi-dimensional distribution (target image) are given. Several techniques are known for reconstructing the original image by manipulating the projection data.

Here, we use a *genetic algorithm* (GA) to reconstruct a two-dimensional image from its three one-dimensional projection data.

A projection $P(\theta,S)$ holds the accumulated weight of some physical amount $f(x,y)$ obtained through projecting at different observing directions $L_{\theta,s}$.

$$p(\theta,S) = \int_{L_{\theta,S}} f(x,y)\, dl$$

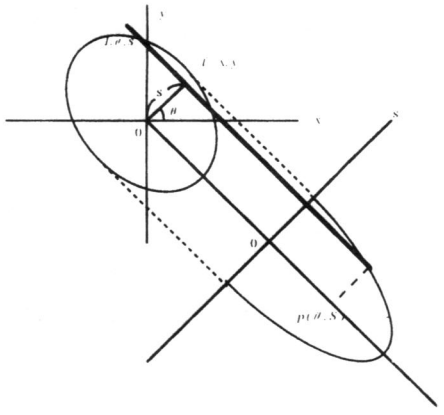
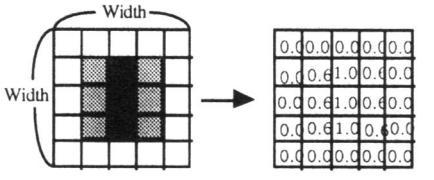


Fig.1 A projection profile

2. The genetic algorithm

In order to apply the genetic algorithm to this problem, each pixel in the plane of the image is represented with one allele value in a genetic chromosome. A *floating* point representation is used, which is capable of representing large domains.

Genetic operations were performed on a population of *float* type strings, each of which contains encoding of an image. A string allele normal value range is 0.0 ~ 1.0 with a 0.2 step, and thus, the possible allele values are: 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0. An example is shown in Fig.2.



Original Image Float representation

Fig.2 Image Encoding

Corresponding string :

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.6 1.0 0.6 0.0 0.0 0.6 1.0 0.6 0.0 0.0 0.6 1.0 0.6 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

A string fitness is evaluated by comparing the calculated projections of the encoded image with the projections of the original image. This is based on the necessary and sufficient criterion that the agreement of three or more projection data of two images implies the consistency of the images. The following formula is used for calculating a string fitness (F) measure:

$$F = \frac{\sum_{\theta=1}^{c} \frac{1}{width} \sum_{s=1}^{width} \frac{1}{1+\left[P(\theta,S)\times\lambda - R(\theta,S)\times\lambda\right]^2}}{c}$$

(c : number of projections,
$P(\theta, S)$: projection of the original image,
$R(\theta, S)$: projection of the reconstructed image,
θ : index of projection angle,
λ : integer factor)

First, ART is used to reconstruct three images from the given projection data. Based on those images reconstructed by ART, strings for the initial population are generated.

In the reproduction operation of a new generation, an *elitist* selection scheme is used for selection of parents instead of the normal replacement schemes. In the elitist scheme fittest strings are given chance to contribute in the next generation without undergoing any GA operation and strings with low fitness are replaced by offspring mated from the more fitted strings. A crossover operation is performed on parents to produce strings for the next generation.

A *uniform* crossover scheme is used; two parents are

selected randomly to produce an offspring. Bits of the offspring are copied in sequence from one of the two parents with equal probability of choice. Following the steps, mutation operations take place. Two mutation schemes are used: a normal *uniform* mutation and another new scheme. The normal uniform mutation scheme is defined as: if $s_v' = < v_1, \ldots, v_n >$ is a chromosome, then each element v_k has exactly equal chance of undergoing the mutative process. The result of a single application of this operator is a vector $< v_1, \ldots, v_k', \ldots, v_n >$, with $1 \leqq k \leqq n$, and v_k' a random value from the interval [0.0,1.0]. The second one uses the following formula:

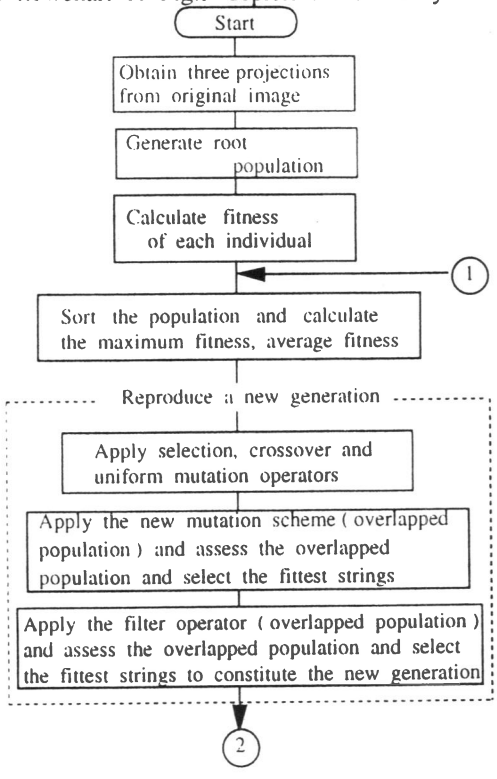
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}(v_{\cdots})^2}{9} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3} v_{\cdots}}{9}\right)^2}$$

$$v_k \in [v_k - \sigma,\ v_k + \sigma]$$

(k : randomly selected allele;
v_k : allele old value;
v_k' : allele new value)

and it is used to provide local genesis of consistent subsegments. In addition to the GA operators a filter operator is used: with a large-scale survey, a refining process is performed and aims to provide most possible consistency among three mutual projections subdata and that of the corresponding ones in the original image projections.

The flowchart of Fig.3 depicts the entire system.



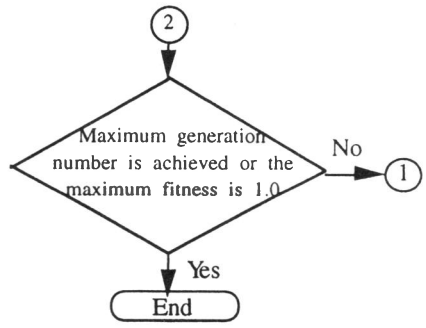
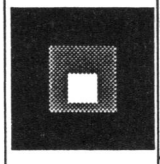
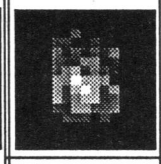
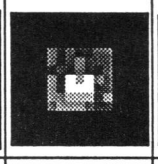
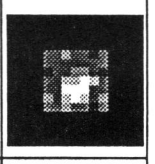


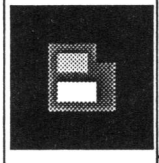
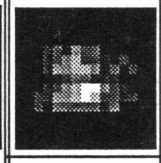
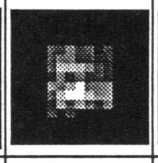
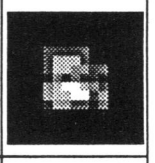
Fig.3 The image reconstruction system

3. Results of the experiments

Experimental results for two images are shown below:

(Size of the image : 15 × 15;
Angle of projections : 0° , 90° , 135° ;
Population size : 300;
Elite selection rate : 0.95;
Mutation rate for normal uniform mutation : 0.05;
Mutation rate for the new mutation : 0.05;
λ : 10)

Original Image 1	Reconstructed		
	Generation 0	Generation 20	Generation 200
			
	Fitness = 0.61349	Fitness = 0.75771	Fitness = 0.98257

Original Image 2	Reconstructed		
	Generation 0	Generation 20	Generation 200
			
	Fitness = 0.64444	Fitness = 0.74047	Fitness = 0.98257

4. Comments and future work

Fairly good agreement between the reconstructed image and the original one was obtained. Parameter values in the algorithm need to be adjusted for further improvement of the fitness.

References

[1] D. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning,* Addison-Wesley, 1989.

[2] Z. Michalewicz: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs,* Springer-Verlag, Berlin, 1992.

[3] A. Rosenfeld and A.C. Kak: *Digital Picture Processing,* Academic Press, 1976.

Contact

Midori Takashibu, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, Okinawa 903-01, Japan
E-mail : midori@augusta.ie.u-ryukyu.ac.jp

FA1-3

Image restoration based on genetic algorithms

Yen-Wei Chen, Zensho Nakao and Makoto Iguchi

Faculty of Engineering, University of the Ryukyus
1 Senbaru, Nishihara, Okinawa 903-01, Japan

Abstract : A genetic algorithm is applied to the deconvolution problem of image restoration. The simulated image convolved by a blurring function is successfully recovered by the proposed method.

1. Introduction

Many image processing applications, such as satellite remote sensing, medical and scientific imaging, require a high resolution image. However, currently available image sensors have certain physical limitations, and the image $g(x,y)$ we usually observe is a degraded one by the convolution of the original image $f(x,y)$ and the point spread function (blurring function) $h(x,y)$ of the imaging system, which can be expressed as

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x',y')\cdot h(x-x',y-y')dx'\cdot dy' + n(x,y)$$
$$= f(x,y) * h(x,y) + n(x,y) \qquad (1)$$

where * denotes the convolution operator and $n(x,y)$ is the random noise contained in the blurred image. In order to recover the original image $f(x,y)$ from the blurred image $g(x,y)$, we have to deconvolve the $g(x,y)$ with the point spread function $h(x,y)$. In general, deconvolution techniques are very sensitive to the noise $n(x,y)$, because $n(x,y)$ will be amplified to very high levels at spatial frequencies with an amplitude close to zero. Although a large number of filters such as Wiener filter [1], where the mean-square error is minimized, have been proposed to overcome this limitation, it is impossible to avoid reduction of resolution and quality of the recovered image. In this paper, we proposed to apply genetic algorithms (GAs) to the deconvolution problem of image restoration.

2. The genetic algorithms

GAs [2] is a search algorithm based on mechanics of natural selection and natural genetics. It uses probabilistic transition rules to guide itselve toward optimum solution. It is thus an approach particularly suited to the interpretation of poorly defined data. The typical flowchart of simple genetic algorithm for image restoration is shown in Fig.1.

We firstly define a binary vector as a chromosome to represent real values of the original image in coding process and then create a population of chromosomes randomly. Each chromosomes is constrained with *a priori* information such as positivities, boundary conditions and total intensities. Fitness (F) for each chromosomes, which is used as a measure of the accuracy of the reconstruction, is calculated by using following formula:

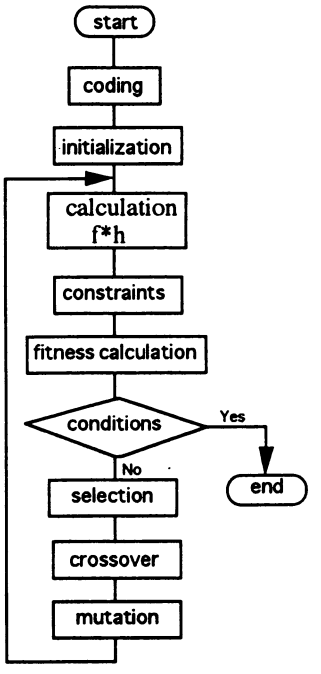


Fig.1 *A typical flowchart of genetic algorithm for image restoration.*

$$F = \frac{1}{1+\sqrt{\sum\left(g(x,y)-\hat{f}(x,y)*h(x,y)\right)^2}\Big/\sqrt{\sum g(x,y)^2}}, \qquad (2)$$

For perfect reconstruction we have F=1. Three genetic operators (selection, crossover and mutation) will be performed on the whole populations until the fitnesses of chromosomes close in 1 (perfect reconstruction condition).

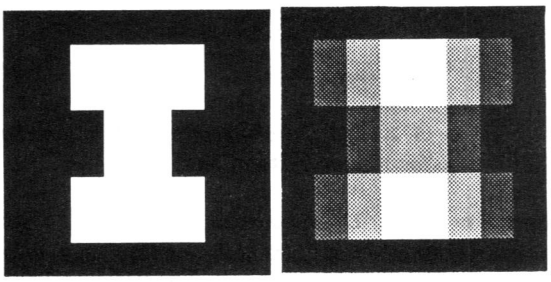
3. Simulation results and discussion

We have carried out computer simulations to validate the applicability of GAs for image restoration problem. The image is blurred in x-direction by a slit located in the x-axis. Figures 2(a) and 2(b) show the original image $f(x,y)$, which is a binary image, and the blurred image $g(x,y)$ used in simulations, respectively In the reproduction operation of a new population, we used *an elitist model* for selection process, *a uniform-crossover scheme* for crossover process and *a uniform mutation scheme* for mutation process. The calculation parameters are shown in Table 1.

Table 1. Parameters used in calculations

image pixel size	population size	selection rate	crossover rate	mutation rate
6×6	36	0.8	0.2	0.1

The calculation results after 10th, 100th and 366th generations are shown in Figs. 3(a), 3(b) and 3(c), respectively. It can be seen that the image is improved with increasing the generation. The improvement of the fitness value with generation is shown in Fig.4. The solid line is the maximum fitness value and the dashed line is the averaged fitness value. The fitness values for Figs.3(a), 3(b) and 3(c) are 0.75, 0.82 and 1.00, which are shown in Fig.4 with "●". The fitness=1 means the perfect image restoration from the blurred image.



(a) (b)

Fig.2 *(a) Original image; (b) blurred image.*

4. Conclusion

We have applied genetic algorithms (GAs), which is based on natural selection and natural genetics, to image restoration. The computer simulation results show that it is possible to recover the original image (binary image) from the blurred image. A further investigation is also under way to recover a gray-level image from the blurred image.

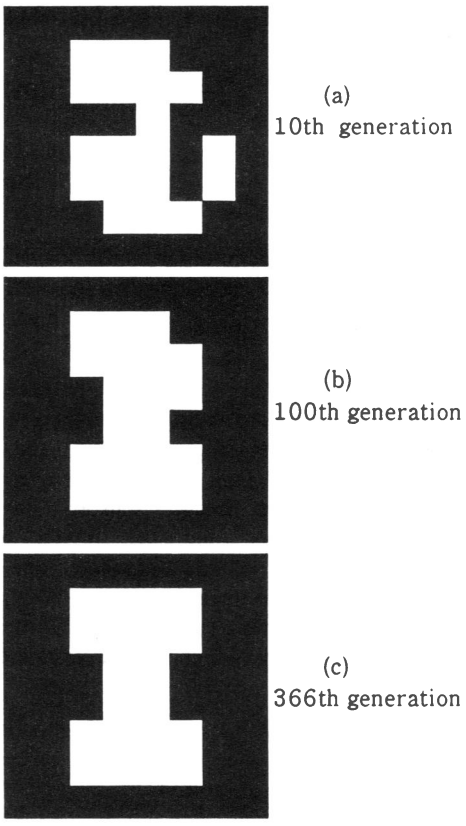


Fig.3 *Reconstructed images. (a) after 10th generation; (b) after 100th generation; and (c) after 366th generation.*

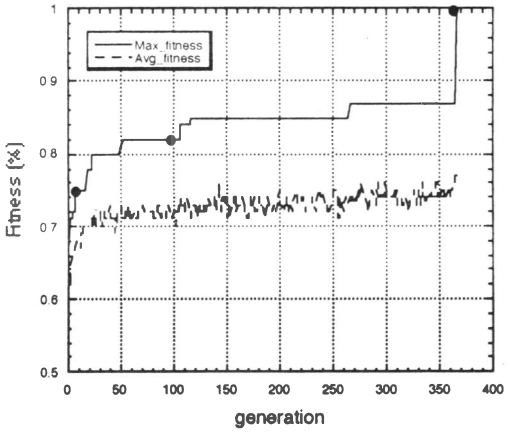


Fig.4 *Fitness value as a function of generation.*

References:

1. A. Rosenfeld and A.C. Kak: *Digital Picture Processing*, Academic Press, New York, 1982.
2. Z. Michalewics: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin, 1992.

FA1-4

類似性概念を用いた近似推論

Approximate Reasoning using Concepts of Similarity

フジト・エドアルド・トシロウ
Fujito, Eduardo T.

大里有生
Ohsato, Ario

長岡技術科学大学
Nagaoka University of Technology

要約： 本論文の主たる目的は、類似性概念に基づく意味論の観点からファジィＩＦ－ＴＨＥＮルールによる近似推論を表現することである。まず第一に、前件部におけるファジィ命題間の近似性を類似性概念によって定める。第二に、証拠世界における類似性の観点から、前件部における類似性を後件部における類似性に写像する方法を示す。第三に、後件部における類似性を用いることによって、近似的結論が可能性と必然性の観点から導出される。最後に、数値例を示すことによって、近似推論において類似性概念を用いることの意義について議論する。

1.- Introduction

The present work is an attempt to represent approximate reasoning under semantical point of view using concepts of degree of implication and degree of consistency, metrics used to evaluate similarity or resemblances between possible worlds [1].

At present there are two main lines of semantical approaches to possibilistic reasoning. The first one, known as a possibilistic logic is a preference-based approach and was developed by Dubois-Prade[2]. The second one, similarity logic that was developed by Ruspini [1] is a similarity-based approach. According to Dubois-Prade [3], the difference between them is that Ruspini's approach accounts for some metrics on possible worlds while the possibility logic distinguishes between more or less plausible interpretations. Then their inferential behaviors are completely different and they serve different approximate reasoning purposes. Esteva, F. et. ali. [4] did some re-interpretations of Ruspini's approach and established semantical relationships between these two main approaches. The present authors in [5] used these extended results and did some extra re-interpretations concerning the definition of evidential set.

2.- Motivation

Until some years ago researches didn't get into the semantics of "if...then..." statements and also they were only assuming that material implication, and multiple-valued extensions were enough to express precisely these conditional statements [6]. Nowadays the question of the semantics of fuzzy "if...then..." statements has been recently investigated with the view that the presence of fuzzy predicates affect the meaning of such statements. Since fuzzy "if..then.." rules may have several interpretations, maybe for this reason there are several families of implications in fuzzy logic.

Let's consider the following rule of inference, always mentioned during the study of approximate reasoning:

$$\begin{array}{l} P_1: \tilde{A} \rightarrow \tilde{B} \\ P_2: \tilde{A}' \quad (o_1(\tilde{A})) \\ \hline C: \tilde{B}' \quad (o_2(\tilde{B})) \end{array} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

where: o_i means an un-ary connective associated to some linguistic modifier i [7].

During the analysis of the conclusion, two types of assumptions are often done:

a) $\tilde{A}$ and $\tilde{A}'$ are semantically approximate and $\tilde{B}'$ is close to $\tilde{B}$ as $\tilde{A}'$ is to $\tilde{A}$ is done;

b) the unary connective o_2 of the conclusion is considered equal to the unary connective o_1 of premise P_2.

Concerning to the first assumption, what is the meaning of the expressions "be semantically approximate" or "one proposition be close to another one"? How to measure it?

About the second assumption, do the unary connectives of the conclusion and the minor premise need to be the same? It can be easily understood that if $\tilde{A}'$ is represented by "very $\tilde{A}$" ($= \tilde{A}^2$), then the value of $\tilde{B}'$ can be ranged between "very $\tilde{B}$" and more or less $\tilde{B}$" ($2 \cdot \tilde{B} - \tilde{B}^2$) since the similarity between $\tilde{B}$ to "very $\tilde{B}$" is the same as the similarity between $\tilde{B}$ to "more or less $\tilde{B}$". In fact in many cases when the connectives o_1 and o_2 are assumed the same, it means that some meta-knowledge is present or the idea of distance or similarity is associated with the orderness or at least partial orderness of sets or worlds [8]-[10]. What would happen if we don't have such

meta-knowledge or even a partial ordeness is not possible to be considered?

The method proposed by the authors in [5] try to answer these questions, specially those originated from the second assumption, giving one interval in the space where one possible, acceptable, conclusion can be inferred.

Inside the literature there are many variations for the definition of similarity(S) as for example: $S(x,y) = 1 - d(x,y)$ (Eq. 2) where $d(x,y)$ means the distance between x and y. Independent of which definition selected, it satisfies the following properties:

a) reflexive: $S(x,x) = 1$;
b) symmetric: $S(x,y) = S(y,x)$; and
c) transitive: $S(x,z) \geq T\,(S(x,y), S(y,z))$ where T is a t-norm.

For more deep studies on the properties of the similarity structures and operators and their relationship with metrics, see the work developed by Valverde [11].

3.- Approximate Reasoning & Similarity approach

The advantage to make one semantical approach is that the interpretation of the results can be easier analyzed rather than those approaches that make use of purely algebraic operations.

The main idea that guides the present approach for the execution of the approximate reasoning is "the more $\tilde{A}'$ is similar to $\tilde{A}$, proportionally the more $\tilde{B}'$ is similar to $\tilde{B}$".

Let's consider the case where we have two universes of discouse related each one to another under some rule of the type "if..then.." (Fig. 1). Given some fact $\tilde{A}'$, how to infer the conclusion $\tilde{B}'$?

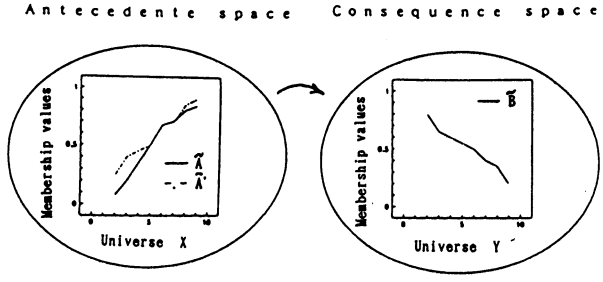


Fig. 1- Rules and the Observed fact.

The first step in the present approach is to define the similarity between the observed fact and the antecedent part of each rule. This similarity function that we called similarity of G can be determined using for example the equation (Eq. 2). For each rule one correspondent curve G is built, which membership degrees are degrees of similarity (Fig. 2).

Once that the similarity in the antecedent

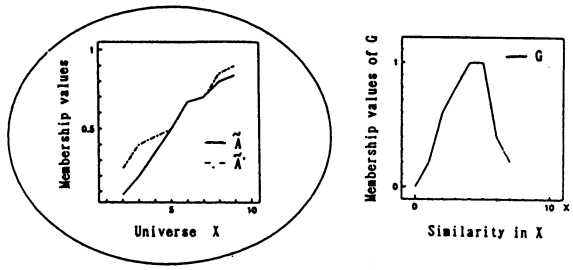


Fig. 2- Similarity between the observed fact and the antecedent part of the rules.

space is defined, the second step is to propagate it from the antecedent universe to the consequence universe. At this point [5] used the re-interpretation that the interval between the unconditioned implication and consistency measures can be considered as a range of truth-values when the evidential set is taken as a reference according to [4]. In addition the present authors did one re-interpretation about the evidential world E.

In the antecedent space and in the consequence space, the respectives evidential worlds E_X and E_Y are regions that are selected in order to identify elements in each space that can be considered examples of a concept. The relation between E_{Xi} and E_{Yi} is called E_i (Fig. 3).

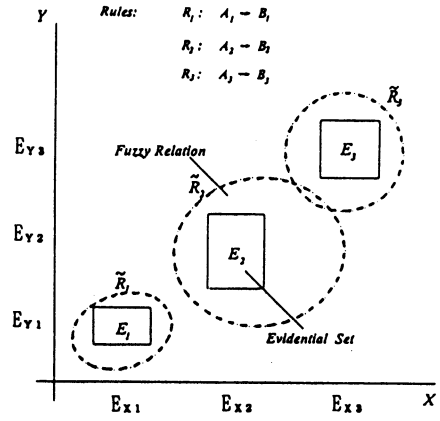


Fig. 3- Evidential Set and Fuzzy Relation.

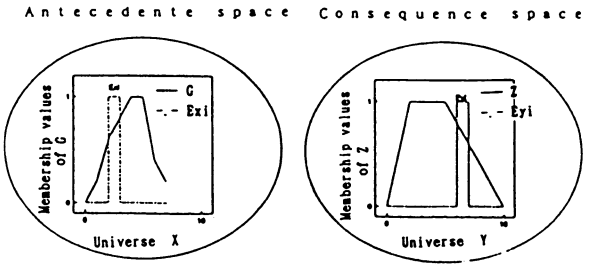
We considered that the propagation must keep the same level of similarity in the consequence universe as it is in the antecedent universe. Then this relation E_i is represented by one matrix which contains only elements which values are 1 or 0. If its values could be other than 0 and 1, the similarity of the consequence domain would be equal or smaller than in the antecedent domain.

Then using the equations:

$I\,(Z|E_{Yi}) = I\,(G|E_{Xi}) \bigcirc E_i$ (Eq. 3)

$C\,(Z|E_{Yi}) = C\,(G|E_{Xi}) \bigcirc E_i$ (Eq. 4)

where $\bigcirc$ is the max-min composition, the propagation can be executed (Fig. 4). Note that we are in fact propagating the unconditioned degrees of implication, $I(\cdot|\cdot)$, and consistency, $C(\cdot|\cdot)$.



$$I\ (Z|E_{Yi}) = I\ (G|E_{Xi}) \bigcirc E_i$$
$$C\ (Z|E_{Yi}) = C\ (G|E_{Xi}) \bigcirc E_i$$

Fig. 4- Propagation of the similarity.

The next step is to define the similarity function, denominated similarity of Z, in the consequence space. Once that all degrees of implication and consistency are propagated taken as a reference the evidential sets, using some criteria, a function passing through them will determine the similarity Z in the consequence space(Fig. 5). The criteria used was that the difference between the normalized areas below the similarity G and the similarity Z will be the smallest.

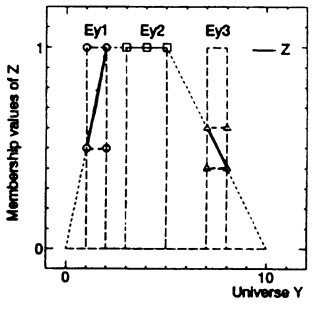


Fig. 5- Similarity in the consequence space.

Then a range around the consequence part of each rule will be defined (Fig. 6). The upper and the lower bounds of this range means possible and necessary conclusions respectively. This terminology was selected since to the degrees of implication and consistency we have associated a possibility and necessity distributions.

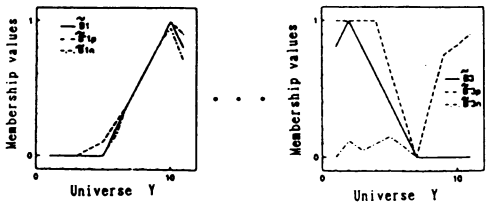


Fig. 6- The range of the inferred conclusion.

The last step is to select one of these ranges to be the base of the final conclusion. This will request extra criterias as for example

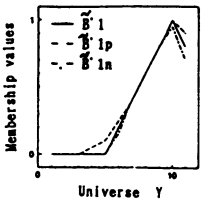


Fig. 7- The range of final conclusion.

the smallest area between the upper and lower bounds. Once this range is selected, any curve inside it can be considered an acceptable final conclusion $\tilde{B}'$ (Fig. 7).

4.- Numerical example

As a numerical example consider a system characterized by three rules of the type: "If X is $\tilde{A}i$ Then Y is $\tilde{B}i$", i=1,2,3 (see Fig. 8).

Some results are shown at Table 1.

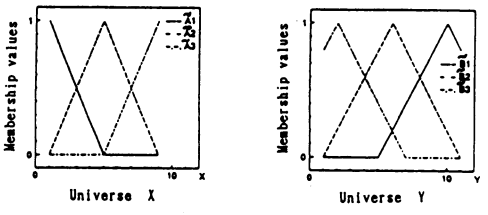


Fig. 8- Membership values for each rule.

5.- Conclusion

At first view, the present approach seems inappropriate since it doesn't give only one conclusion as other methods, rather a range inside which any conclusion can be considered acceptable. The reason for this pseudo-drawback originates from the fact that this process takes in consideration that none meta-knowledge is known a priori and an orderness or even a partial orderness is not necessary.

Using the present approach from the point of view of semantics, despite the fact that it does not use fuzzy relations, some approximate reasoning is possible to be done.

6.- References

[1]- E. H. Ruspini: "On the semantics of fuzzy logic." International Journal of Approximate Reasoning, 1991, vol. 5, n°1, pp. 45-88.

[2]- D. Dubois, J. Lang & H. Prade: "Fuzzy Sets in Approximate Reasoning - Part 2: Logical approaches". Fuzzy Sets and Systems, 40 (1991) pp. 203-244.

[3]- D. Dubois & H. Prade: "Comparison of two fuzzy set-based logics: similarity logic and possibility logic". Proceedings of the Inter-

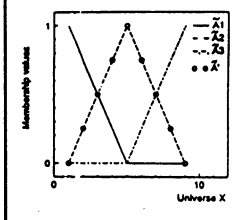
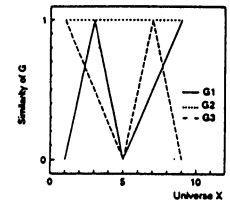
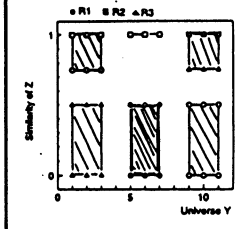
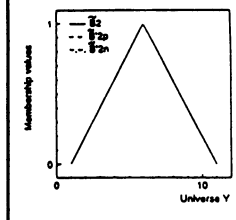
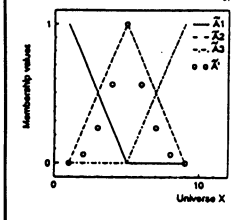
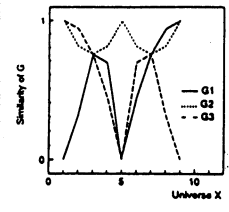
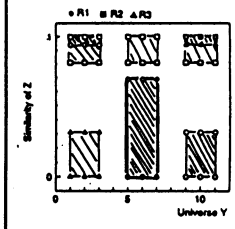
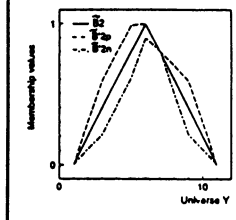
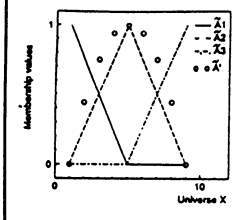
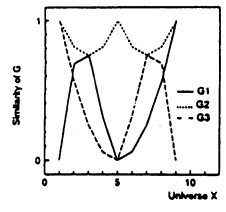
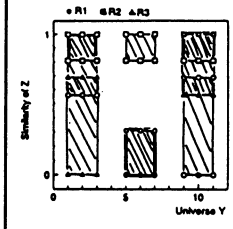
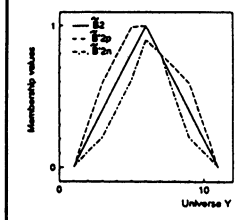
A'	Observed Fact	Similarity in the Antecedent Space	I(·|·) & C(·|·) in Consequence Space	Range of the final conclusion
A_2				
Very A_2				
More or Less A_2				

Table 1- Some numerical results.

national Joint Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium, March 20-24, 1995, Yokohama-Japan, pp. 1219-1226.

[4]- F.Esteva, P.Garcia-Calves & L.Godo: "Relating and extending semantical approaches to possibilistic reasoning." International Journal of Approximate Reasoning, 1994, vol. 10, n°4, pp.311-344.

[5]- Fujito,E.T.&Ohsato,A.: "The semantical approach to approximate reasoning using concepts of similarity". Proceedings of the International Joint Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium, March 20-24, 1995, Yokohama-Japan, pp.1469-1474.

[6]- D.Dubois & H.Prade: "Fuzzy sets in approximate reasoning. Part I: Inference with possibility distributions." Fuzzy Sets and Systems 40 (1991) pp.143-202.

[7]- V.Novak:"Fuzzy logic as a basis of approximate reasoning" in Fuzzy logic for the management of uncertainty. Edited by L.A.Zadeh & J.Kacprzyk - John Wiley & Sons Inc. 1992, pp.247-264.

[8]- A.Ohsato: "Reconsideration of approximate reasoning". Joint Hungarian-Japanese Symposium on Fuzzy Systems and Applications, July 1-5, 1991, Budapest, Hungary.

[9]- L.Koczy & K.Hirota: "Ordering, distance and closeness of fuzzy sets". Fuzzy Sets and Systems 59 (1993) 281-293.

[10]- L.Koczy & K.Hirota: "Approximate reasoning by linear rule interpolation and general approximation". International Journal of Approximate Reasoning, 1993, vol.9, n°3, pp. 197-225.

[11]- L.Valverde: "On the structure of F-indistinguishability operators." Fuzzy Sets and Systems 17 (1985) pp.313-328.

連絡先

〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1
長岡技術科学大学工学部
計画・経営係　大里研究室
フジト・エドアルド・トシロウ
e-mail: fet@voscc.nagaokaut.ac.jp
電話番号: (0258)-46-6000 (内:3160)

FA2-1

A Fuzzy-Neuro Approach for Operational Reliability Classification Analysis in Mechanical Systms

ZHANG Miaokang[1]

Mechanical Engineering Department, University of the Ryukyus

Abstract: The fusion techniques of fuzzy systems and neural networks used for operational reliability classification analysis in mechanical systems are presented in this paper. This approach is to equip neural networks with fuzzy systems. The fuzzy neural networks consist of five layers which are input layer, fuzzy predicate layer, fuzzy rule layer, classification evaluation layer and decision layer. An example for the application of this model is shown.

1. Introduction

The performances of continuous mechanical systems are in many cases characterized by a gradul transtion from the range of acceptable behavious to that of unacceptable ones[1]. This defines an unsharp boundary faulty and non-faulty behaviou which has to be adequately managed especially when the fault develops incipiently. In this case the fault shows up gradually, via the fault symptoms developing continuously or intermittenly in time as increasing or decreasing process variables (measurable signals, parameters, states). This gradual transition of the performance in mechanical systems can be described by the operational reliability which is taken as a control parameter for monitoring mechanical systems and deciding optimal preventive maintenance[2]. The fuzzy theory has been widely used in systems reliability evaluation, such as the theory of fault tree analysis[3] and the fuzzy evaluation in systems reliability tests[4]. In this paper the fusion techniques of fuzzy systems and neural networks have been actively used for operational reliability classification analysis in mechanical systems.

2. Fuzzy Neural Networks for Evaluation of Operational Reliability

2. 1 Structure of the Model

In this type of networks, neural networks are used to train data, and fuzzy systems are used to express the rules and knowledge. The membership functions and logic neural networks have the embeded forms and connected weights as shown in Figure 1. This networks consist of five layers.

2. 2 Definitions and Implementation of Layers

2. 2. 1 Input layer s consists of all related available informations for evaluating the operational states of mechanical systems, such as vibration, noise, temperature, electrical current and power et al. There are n input variables $x_{1t},\cdots,x_{nt}$ at time t and n neural nodes $S_1,\cdots,S_n$. We take Mcculloch-Pitts type neuron function[5], the values of input variables are transformed into the interval $[-1,1]$.

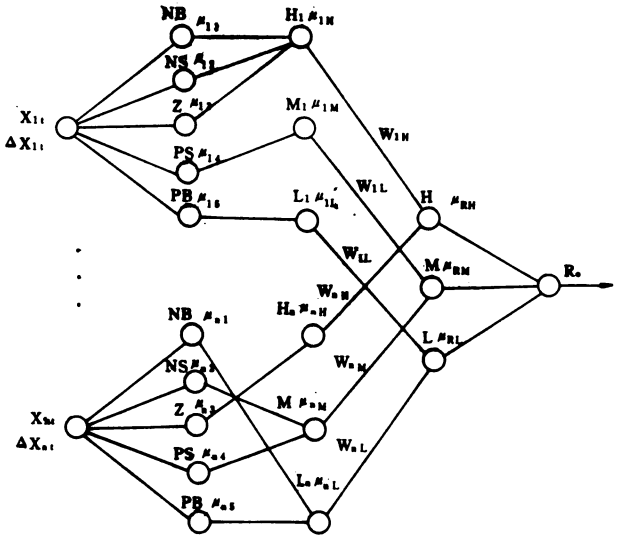


Figure 1. Structure of fuzzy neural networks

$$E_j=(W_jx_{jt}+\Delta W_j\cdot\Delta x_{jt})-\theta_j$$

$$S_j=\frac{2}{1+e^{-E_j}}-1 \qquad (1)$$

where $\Delta x_{jt}=x_{jt}-x_{j(t-1)}$, W_j and ΔW_j are the weights, θ_j is the threshold value.

2. 2. 2 In predicate layer p we define five membership functions of fuzzy predicates as the transfer functions, that are "Negative Big(NB)", "Negative Small (NS)", "Zero(Z)", "Positive Small(PS)" and "Positive Big(PB)" over the interval $[-1,1]$ as shown in Figure 2.

2. 2. 3 Fuzzy rule layer consists of all related fuzzy rules for the evaluation of operational reliability in mechanical systems. We use if-then production rules to implement logic operations for example,

Rule: If the temperature of bearings is slight high (PS), then the operational reliability is moderate (M).

Rule: If the vibration velocity of rotating shaft is very big(PB), then the operational reliability is low(L).

The inputs are the membership grades $\mu_j,\cdots,\mu_{j5}$ (j=1, $\cdots$,n) which are transfered from layer p, and the outputs are membership grades μ_{jH}, μ_{jM} and μ_{jL} (j=1,$\cdots$, n) of operational reliability predicate which are obtained by computing logic formulae.

2. 2. 4 Reliability classification evaluation layer e con-

[1]on leave from Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, Nanjing, China

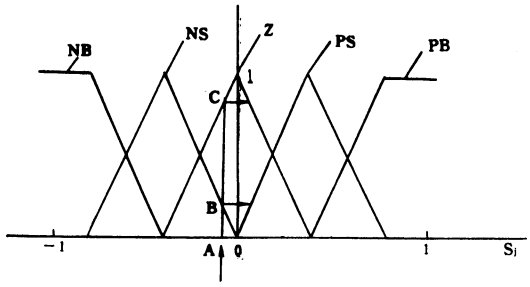


Figure 2. Fuzzy predicates in the interval[−1,1]

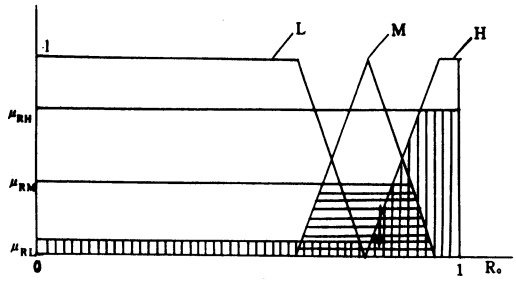


Figure 3. Membership functions of operational reliability and α-cut sets

sists of all operational reliability classification evaluations that are the succedents of some related rules. Three type membership functions of high, moderate and low reliability are shown in Figure 3. The outputs in node H, M and L are the shadow area got from α-cut of membership functions which represent fuzzy grades μ_{RL}, μ_{RM} and μ_{RH} calculated by a nonlinear composite approach(as follows).

2. 2. 5 Decision layer d is the final evaluation of operational reliability in mechanical systems . The input in node R_0 is the union of all shadow areas obtained from layer e (Fig. 3). The output is the abscissa value of barycenter of th union set.

2. 3 The Definitions of Weights between Layer r and e

The weights W_{1H}, W_{1M} and $W_{1L}, \cdots, W_{nH}, W_{nM}$and W_{nL} attached to each connection between layer r and e reflect the individual credibility and strength of these rules. We take Sigmoid type function as nonlinear transformation between the inputs and outputs. The fuzzy grade μ_{RH} is

$$E_H = (W_{1H} \cdot \mu_{1H} + , \cdots , + W_{nH} \cdot \mu_{nH}) - \theta_H$$

$$\mu_{RH} = \frac{1}{1+e^{-E_H}} \qquad (2)$$

and μ_{RM}, μ_{RL} have the same relation forms, the weights W_{jH}, W_{jM} and W_{jL} can be given according to their engineering knowledge, and otherwise it will be tuned by the following relations,

$$\mu_{1H} \wedge \mu_{2H} \wedge \cdots \wedge \mu_{nH} > \mu_{RH} > \mu_{1H} \odot \mu_{2H} \odot \cdots \odot \mu_{nH};$$

$$\mu_{1M} \vee \mu_{2M} \vee \cdots \vee \mu_{nM} > \mu_{RM} > \mu_{1M} \wedge \mu_{2M} \wedge \cdots \wedge \mu_{nM};$$

$$1 \geqslant \mu_{RL} > \mu_{1L} \vee \mu_{2L} \vee \cdots \vee \mu_{nL}, \qquad (3)$$

where the operator $\vee$ and $\wedge$ take the maximum and minimum respectively, and the operator $\odot$ denotes a $\odot b = \max(0, a+b-1)$. The above relations consider the guiding influence of "bad" symptom information on the operational states of mechanical systems.

2. 4 Example

Get bearing temperature $x_{1t} = 52℃$, $\Delta x_{1t} = 0.05℃$; shaft vibration velocity $x_{2t} = 0.72$mm/sec. (m. s. r), $\Delta x_{2t} = -0.02$mm/sec; and terminal pressure $x_{3t} = 0.69$MPa, $\Delta x_{3t} = 0$ for evaluating operational reliability of a centrifugal refrigerant compressor at time t.

step 1. Input layer s consists of three neural nodes. According to equation (1), get $S_1 = 0.10$, $S_2 = -0.34$, $S_3 = -0.04$.

step 2. Set up the fuzzy membership functions in layer p (Fig. 3). The outputs for S_1 is $(\frac{0.75}{Z}, \frac{0.25}{PS})$, $(\frac{0.15}{Z}, \frac{0.85}{NS})$for S_2 and $(\frac{0.90}{Z}, \frac{0.10}{NS})$ for S_3.

step 3. Set up predict rules which are given by experts from experience. On the extension principle, get $\mu_{1H} = 0.75$, $\mu_{1M} = 0.25$, $\mu_{1L} = 0$; $\mu_{2H} = 0.85$, $\mu_{2M} = 0.15$, $\mu_{2L} = 0$; $\mu_{3H} = 0.90$, $\mu_{3M} = 0.10$, $\mu_{3L} = 0$

step 4. Estimate the values of weights before using equation(2), take W_2 bigger than other two weights. fuzzy grades should be $0.75 > \mu_{RH} > 0.50$; $0.25 > \mu_{RM} > 0.10$; $\mu_{RL} = 0$. The final results are $\mu_{RH} = 0.54$ and $\mu_{RM} = 0.18$.

step 5. Set up the membership functions of reliability and get the union area from α-cut of these functions based on $\mu_{RH} = 0.54$ and $\mu_{RM} = 0.18$. Find out the abscissa value of barycenter of this union set, $R_0 = 0.87$.

3. Conclusion

This paper presents a fuzzy-neuro system, and discusses its application for evaluating operational reliability in mechanical systems.

4. Acknowledgment

Many thanks to Prof. Tadashi MURATA for urgeing me to present this paper.

References

1. Zhang Miaokang, Wang Guangyuan. Discussion on the serviceability for machinery operations. Journal of vibration, Measurement & Diagnosis (in Chinese), 1991(3),PP1-7

2. Zhang Miaokang. Maintenance policies of machinery. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute(in Chinese), 1991(3),PP37-44

3. Ulieru M. Diagnosis by approximate reasoning on dynamic fuzzy fault trees. Proceedings of the IEEE Conference on Fuzzy Systems, Jone, 1994

4. 村田　忠　ファジィ理論による電子機器 の信頼性評　日本ファジィ学会志 1993(5), PP981-990

5. Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992

Correspondence:
ZHANG Miaokang
Mechanical Engineering Department,
University of the Ryukyus
Senbaru 1, Nishihara, Okinawa, 903-01, JAPAN

FA2-2

STABILIZATION OF MULTI-MACHINE POWER SYSTEM WITH FACTS EQUIPMENT APPLYING FUZZY CONTROL

Tomonobu Senjyu Marta Molinas Katsumi Uezato

University of the Ryukyus

Abstract — This paper presents an alternative application of fuzzy control to determine the control signal of Variable Series Capacitor (VSrC) for improving power system stability. VSrC is one of FACTS equipment and has the ability to control the power flow directly by adjusting the condenser capacity. The adjustment of the condenser capacity is made according to the control signal U_{VSrC}. The effectiveness of the proposed control is demonstrated by computer simulations.

1. INTRODUCTION

Recently, much effort has been directed towards the improvement of power system stability. In order to achieve this purpose, many control methods such as VSC [1], Fuzzy Control [2,3], etc have been studied up to the present. These control methods have been applied making use of the characteristics of FACTS equipment[4]. By means of FACTS equipment power flow can be actively controlled, achieving a rapid control response of active/reactive power, and a damping performance of power systems. However, there are not enough reports in which fuzzy control is discussed from system stability point of view; so we consider the important issue to explore the system stability by applying fuzzy control.

In this paper an alternative method to determine the control signal of VSrC based on fuzzy control is proposed. With a quite simple form, proposed fuzzy control provides a method to control highly nonlinear processes. Based on sliding mode control [5] with robustness against uncertainties of state variables and parameter variations, the fuzzy control law is derived. The electrical power output error at the location of VSrC and the speed deviation, are used for fuzzy reasoning.

The output power through VSrC should be increased or decreased as a function of the state of the system which is represented by the error of electrical power output. The control signal is calculated using fuzzy membership functions and fuzzy rules. Simulations on a multi-machine power system with VSrC set up in two different ways, show the effectiveness of the proposed control.

2. CONTROL SCHEME

2.1 Power System Equations

We consider the multi-machine power system whose schematic diagram is shown in Fig.1, as object of study. The synchronous machines are equipped with automatic voltage regulator (AVR) and governor (GOV). The block diagram of each control apparatus AVR and GOV, are shown in Fig 2 (a)-(b), respectively.

Armature resistance and transformer reactance are ignored in order to ease the analysis.

The VSrCs are placed at the sending end of the generators 2 and/or 3, on conditions of simulations. The control block diagram of VSrC is shown in Fig 2 (c).

The dynamic equations of each generator and control apparatus are expressed as follows:

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} + D\frac{d\delta}{dt} = P_m - P_e \tag{1}$$

$$\frac{dP_m}{dt} = -\frac{1}{T_G}\left(\Delta P_m + K_G\frac{\Delta\omega}{\omega_o}\right) \tag{2}$$

$$\frac{d\Delta e_f}{dt} = -\frac{1}{T_A}(\Delta e_f + K_A\Delta V_t) \tag{3}$$

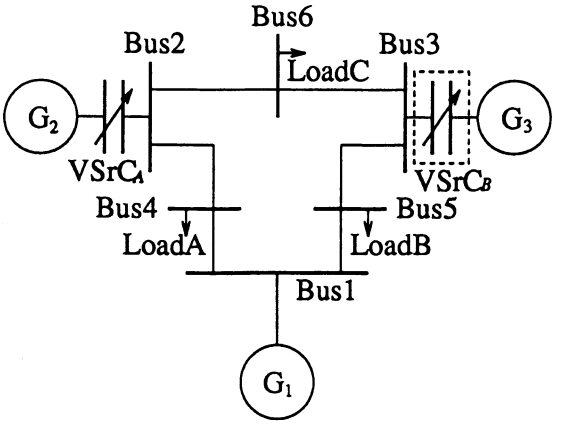


Fig.1. System configuration.

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}}\{e_f - (x_d - x'_d)i_d - e'_q\} \tag{4}$$

$$\frac{d\Delta X_{VSrC}}{dt} = -\frac{1}{T_{VSrC}}\Delta X_{VSrC} + \frac{K_{VSrC}U_{VSrC}}{T_{VSrC}} \tag{5}$$

The generating power, relation of terminal voltages and currents in each synchronous generator are treated in the following equations:

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & x_q \\ -x'_d & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ e'_q \end{bmatrix} \tag{7}$$

In this paper, preceding equations are used for controller design and computer simulations.

2.2 Application of Sliding Mode Control

One of the major approaches to deal with model uncertainties is the so-called sliding control methodology. Sliding controller [5] provides a systematic approach to the problem of maintaining stability and consistent performance in the presence of modeling imprecision.

In this section we indicate the procedure for applying the sliding mode control method to improve transient stability of power systems by using the control law of sliding mode in the application of fuzzy control.

The dynamic equation for the synchronous machine, Eq.(1), can be rewritten in the form using state variables

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{M}(-Dx_2 + P_m - P_e + w) \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

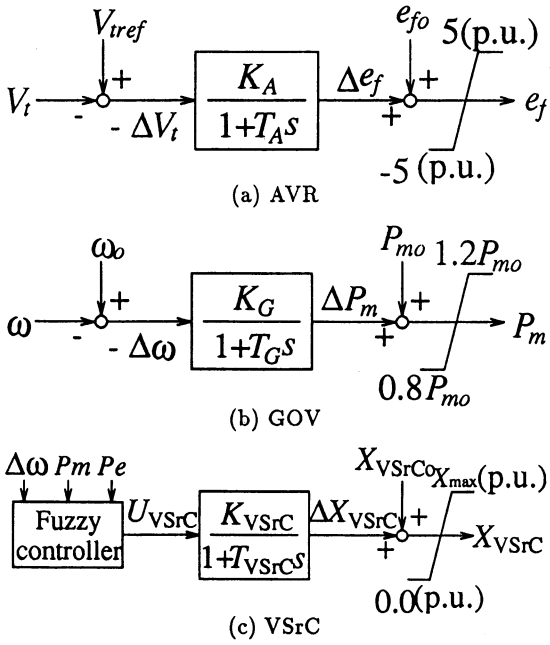


Fig.2. Block diagrams of AVR, GOV and VSrC.

where $x_1 = \delta - \delta_o$, $x_2 = dx_1/dt$, and δ_o is a stable equilibrium point of phase angle. w represents a disturbance and/or modeling error. Sliding mode control can design robust controller taking into account the effect of w. The switching line S which gives the desired dynamics to the system is defined as

$$S = Cx_1 + x_2 \tag{9}$$

where C is the slope of switching line, $C > 0$. By introducing the following Lyapunov function V, a tracking performance in $S = 0$ can be examined:

$$V = \frac{1}{2}S^2. \tag{10}$$

The condition that sliding mode can generate in $S = 0$ is expressed as $\lim_{S\to 0} S\dot{S} < 0$ ($\dot{V} < 0$). Accordingly, the time derivative of V is given by

$$\dot{V} = S\dot{S} = \left(C - \frac{D}{M}\right)S^2 + SP_a < 0 \tag{11}$$

where, we define P_a as the effective acceleration power and represent it in the following equation:

$$P_a = \left(\frac{D}{M} - C\right)Cx_1 + \frac{1}{M}(P_m - P_e + w). \tag{12}$$

Judging from Eq.(11), the following two relations must be satisfied to stabilize the system:

$$C < \frac{D}{M} \tag{13}$$

$$\left.\begin{array}{ll} P_a < 0 & : \text{if } S > 0 \\ P_a > 0 & : \text{if } S < 0 \end{array}\right\}. \tag{14}$$

Substituting the effective acceleration power P_a, Eq.(12), into Eq.(14) and rewriting it in the form of P_e, we obtain

$$\left.\begin{array}{l} P_e > P_m + (D - MC)Cx_1 + w \\ \qquad\qquad : \text{if } S > 0 \\ P_e < P_m + (D - MC)Cx_1 + w \\ \qquad\qquad : \text{if } S < 0 \end{array}\right\}. \tag{15}$$

The first term in the right hand side of Eq.(11) is always negative by setting such that the slope of switching line, C, satisfies Eq.(13). If Eq.(15) is always satisfied, Eq.(11) will always be negative and thus stabilization of the system can be achieved. However, it is difficult to determine the disturbance and modeling error w, so a dither function η is used instead of w:

$$\eta = k\sqrt{x_2^2 + \Delta V_t^2} \quad ; k > 0\text{: constant.} \tag{16}$$

By using Eq.(16), Eq.(15) is rewritten as

$$\left.\begin{array}{l} P_e \geq P_m + (D - MC)Cx_1 + \eta \\ \qquad\qquad : \text{if } S > 0 \\ P_e \leq P_m + (D - MC)Cx_1 - \eta \\ \qquad\qquad : \text{if } S < 0 \end{array}\right\}. \tag{17}$$

Eqs. (13) to (17) represent the control law of sliding mode. The preceding control law will now be extended to derive the robust control law. Firstly, we consider uncertainty of the state variables. Secondly, robustness for parameter variations is discussed.

To begin with, the uncertainty of the equilibrium point of phase angle δ is analyzed. In multi-machine systems, measurement of phase angle, δ, is generally difficult. Following we get rid of the information of δ. Assuming that the range of uncertainty of the equilibrium point δ_o is $\delta_{o\min} \leq \delta_o \leq \delta_{o\max}$, then Eq. (17) is rewritten as

$$\left.\begin{array}{l} P_e \geq P_m + (D - MC)C(\delta - \delta_{o\min}) + \eta \\ \qquad\qquad : \text{if } C(\delta - \delta_{o\max}) + x_2 > 0 \\ P_e \leq P_m + (D - MC)C(\delta - \delta_{o\max}) - \eta \\ \qquad\qquad : \text{if } C(\delta - \delta_{o\min}) + x_2 < 0 \end{array}\right\}. \tag{18}$$

$\delta_{o\min}$ and $\delta_{o\max}$ are assumed as

$$\left.\begin{array}{l} \delta_{o\min} = \delta - \rho \\ \delta_{o\max} = \delta + \rho \end{array}\right\}. \tag{19}$$

ρ is a sigmoid function and is defined as

$$\rho = -0.5 + 1.0/(1.0 + e^{-\tau}) \tag{20}$$

where $\tau = \sigma_1|x_2| + \sigma_2|P_m - P_e|$; $\sigma_1, \sigma_2 > 0$: constant. Substituting the sigmoid function ρ into Eq. (18), we obtain

$$\left.\begin{array}{l} P_e \geq P_m + (D - MC)C\rho + \eta \\ \qquad\qquad : \text{if } x_2 > C\rho \\ P_e \leq P_m - (D - MC)C\rho - \eta \\ \qquad\qquad : \text{if } x_2 < -C\rho \end{array}\right\}. \tag{21}$$

Note that in Eq.(21) it is not necessary either to measure or to estimate the phase angle δ and equilibrium point δ_o.

Assuming that the ranges of the inertia constant M and the damping constant D as parameter variations are $M_{\min} \leq M \leq M_{\max}$ and $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$, respectively, then, considering the worst situation Eqs. (13) and (21) are rewritten as follows:

$$C < \frac{D_{\min}}{M_{\max}} \tag{22}$$

$$\left.\begin{array}{ll} P_e \geq P_e^* & : \text{if } x_2 > C\rho \\ P_e \leq P_e^* & : \text{if } x_2 < -C\rho \end{array}\right\} \tag{23}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_e^* = P_m + (D_{\max} - M_{\min}C)C\rho + \eta \\ \qquad\qquad : \text{if } x_2 > C\rho \\ P_e^* = P_m - (D_{\max} - M_{\min}C)C\rho - \eta \\ \qquad\qquad : \text{if } x_2 < -C\rho \end{array}\right\}. \tag{24}$$

where P_e^* expresses the desirable electrical output power in order to stabilize the generator.

Eqs. (22) and (23) give the final form of the slope of switching line C and the desirable electrical output power

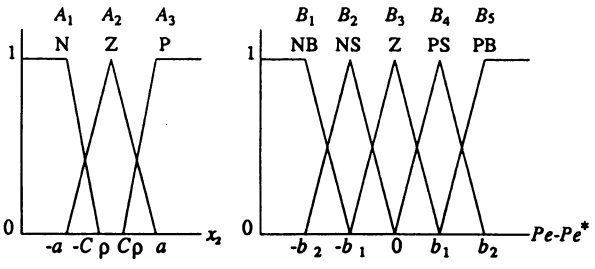


Fig.3. Membership functions.

P_e^*, respectively. Note that these equations take into account the uncertainty of δ and the parameter variations of M and D.

2.3 Fuzzy Controller

This section presents the control method used to apply fuzzy control to power systems in order to determine the control signal of VSrC.

VSrC is one of FACTS equipment and has the ability to control the power flow by adjusting the condenser capacity. From this point of view we define the control signal of VSrC, U_{VSrC}, to stabilize the synchronous machines, by using fuzzy control. Once, the control signal U_{VSrC} is determined, the adjustment of the condenser capacity is made according to the value of this control signal.

Therefore, we can find that the stabilization of the system will be achieved by determining the control signal, U_{VSrC}.

The fuzzy implications which are used to express the control rules, derived from the ideas of sliding mode control, are expressed as follows

$$C < \frac{D_{\min}}{M_{\max}} \tag{25}$$

$$\left.\begin{array}{ll} P_e \geq P_e^* & : \text{if } x_2 > C\rho \\ P_e \leq P_e^* & : \text{if } x_2 < -C\rho \end{array}\right\}. \tag{26}$$

The membership function of the speed deviation, x_2, and the deviation of electrical output, $P_e - P_e^*$, are composed of 3 parts and 5 parts, respectively, as shown in Fig. 3.

The fuzzy rules are constructed in the form of " if then"(if : precondition ; then : operation part), and are shown in Table 1. The operation part is given by the functions represented in linear forms of fuzzy variables, such that

$$f^i = p_i|x_2| + q_i|P_e - P_e^*| \quad : i = 1, \cdots, 15. \tag{27}$$

p_i, q_i are the coefficients of the functions of the operation part. These coefficients are determined based on Table 1.

Finally, we determine the control signal U_{VSrC} by weighting average as

$$U_{\mathrm{VSrC}} = \sum_{i=1}^{15} \omega_i f^i \Big/ \sum_{i=1}^{15} \omega_i. \tag{28}$$

Thus the control signal is determined by defuzzifying all the individual fuzzy inferences. w_i is defined as the product of membership functions.

3. SIMULATION RESULTS

3.1 Simulation Conditions

A three line-to-ground fault (3LG-O-C) is considered for simulations. A time sequence of line conditions is assumed as follow:

Table 1. Fuzzy rules.

Rule	x_2	$P_e - P_e^*$	U_{VSrC}
R^1	N	NB	PS
R^2	N	NS	PT
R^3	N	Z	NS
R^4	N	PS	NM
R^5	N	PB	NB
R^6	Z	NB	PM
R^7	Z	NS	PS
R^8	Z	Z	Z
R^9	Z	PS	NS
R^{10}	Z	PB	NM
R^{11}	P	NB	PB
R^{12}	P	NS	PM
R^{13}	P	Z	PS
R^{14}	P	PS	NT
R^{15}	P	PB	NS

Table 2. Abbreviations of fuzzy rules.

N :	Negative	B :	Big
Z :	Zero	M :	Medium
P :	Positive	S :	Small
		T :	Tiny

(1) $0 \leq t < t_f$: parallel transmission
(2) $t_f \leq t < t_c$: three phase ground fault continued in one side of parallel transmission
(3) $t_c \leq t < t_c'$: fault transmission line opened and the other transmission line sending
(4) $t_c' \leq t$: parallel transmission (re-closing).

System constants and operating conditions used in the simulations are shown in Table 3. Control parameters of VSrCs (VSrC_A and VSrC_B) are determined by trial and error in a large number of simulations.

The performance of the proposed control has been investigated in two cases: first, the installation of only VSrC_A at the sending end of generator 1, and second, the installation of both, VSrC_A and VSrC_B at the same time as shown in Fig.1.

For preliminary simulation studies, we set only up VSrC_A and the maximum value of the capacity of VSrC_A, $X_{\max}$, is 0.7(p.u.). The simulation results are shown in Figs.4 and 5. The simulations results with constant capacity for VSrC_A, no control of VSrC_A, are also shown in these figures (dashed lines). Finally, in this case, we can see that the speed deviations are suppressed, mainly in the case of generator 2. However, poor speed deviations are still observed in generator 1. We have identified this problem as caused by the interference of other generators through transmission lines. So we propose improving this responses by setting up both, VSrC_A and VSrC_B.

In this second case, when both, VSrC_A and VSrC_B are set up, the maximum value of the capacity of both of them, $X_{\max}$, is fixed to 0.3(p.u.) We can see from the simulations results shown in Fig.5, that although the total capacity of VSrC_s is smaller than in the previous case the ability of VSrCs for generator damping is increased considerably, since the interference of each generator is attenuated by these equipment.

Table 3. System constants and operating conditions.

Generator 1
$P_1 = -0.227$, $V_1 = 1.00$, $M = 100.0$, $D = 2.0$,
$x'_d = 0.324$, $x_d = 1.569$, $x_q = 1.548$, $T'_{do} = 5.14$,
$T_A = 0.3$, $K_A = 50$, $T_G = 2.0$, $K_G = 20.0$
Generator 2
$P_2 = 0.34$, $V_2 = 1.05$, $M = 9.0$, $D = 2.0$,
$x'_d = 0.55$, $x_d = 1.651$, $x_q = 1.590$, $T'_{do} = 5.9$,
$T_A = 0.3$, $K_A = 50$, $T_G = 2.0$, $K_G = 20$
Generator 3
$P_3 = 0.25$, $V_3 = 1.10$, $M = 6.0$, $D = 2.0$,
$x'_d = 0.40$, $x_d = 1.22$, $x_q = 1.16$, $T'_{do} = 8.97$,
$T_A = 0.3$, $K_A = 50$, $T_G = 2.0$, $K_G = 20$
Load
$P_A = 0.30$, $Q_A = 0.12$, $P_B = 0.24$, $Q_B = 0.08$,
$P_C = 0.27$, $Q_C = 0.10$
VSrC$_A$ and VSrC$_B$
$T_{VSrC} = 0.1$, $K_{VSrC} = 1$,
$C = 2.0$, $\sigma_1 = 3.0$, $\sigma_2 = 20.0$, $\kappa = 0.15$
Transmission lines
$Z_{l14} = 0.050 + j0.50$, $Z_{l15} = 0.030 + j0.30$
$Z_{l24} = 0.040 + j0.40$, $Z_{l26} = 0.035 + j0.35$
$Z_{l35} = 0.020 + j0.20$, $Z_{l36} = 0.045 + j0.45$
Line conditions
$t_f = 1.00$, $t_c = 1.15$, $t'_c = 1.25$

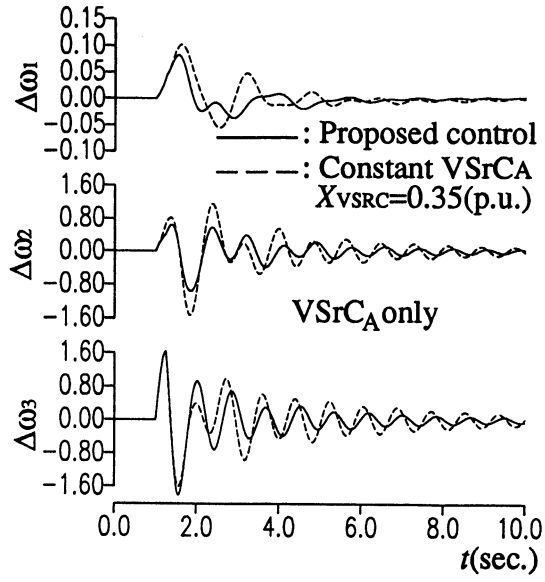


Fig.4. Time responses of speed deviation.

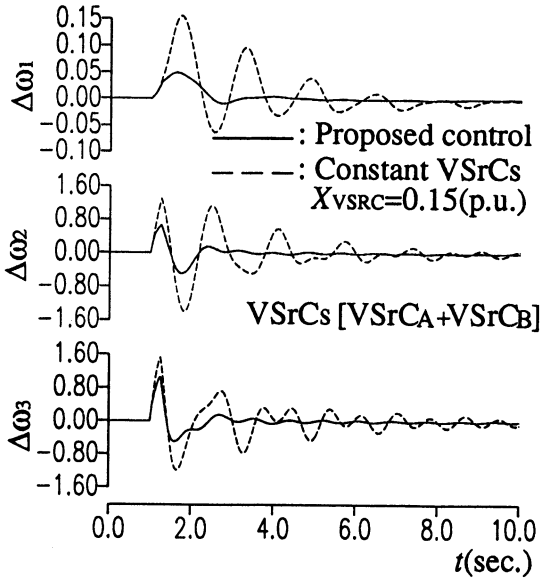


Fig.5. Time responses of speed deviation.

4. CONCLUSIONS

The fuzzy control based Variable Series Capacitor, VSrC, to improve the stability of power systems has been proposed in this paper. Since these equipment are placed at the sending end of the generators, they can be independently designed for each generator. The proposed control scheme is applied to a multi-machine power system with VSrC, and it is found that it has performed satisfactorily improving the system damping characteristic and providing robustness.

Therefore, we consider that the application of the proposed control is of remarkable importance for system stability and damping of real power systems, and finally, we conclude that fuzzy controller comes to play an important role from power system stability point of view.

References

[1] V.G.D.C. Samarasinghe,"A Universal Variable Structure Stabilizer for Power System Stability Control", *IASTED Proc. of International Conference*, 1994, 115-119.

[2] M.A.Iskandar, et al., "On Fuzzy Control Based Static Var Compensator for Power System Stability Control", *IEEE Proc. of ANNPS'93*, 1993, 201-205.

[3] T.Senjyu, et al., "Cooperative Control of AVR and GOV for Improving Transient Stability of Power Systems Using Fuzzy Controller", *IEEE Proc. of ANNPS'93*, 1993, 35-40.

[4] N.G.Hingoroni,"Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", *IEEE Winter Power Meeting Atlanta*, 1990.

[5] Cheng,Y., and Lin,P., and Chang,S.,"Design of Output Tracking Via Variable Structure System for Plants with Redundant Inputs", *IEE Proceedings-D, Vol.139,No.4,421*, 1992.

Address:

Tomonobu Senjyu
University of the Ryukyus
1 Senbaru Nishihara-cho
Okinawa 903-01 Japan
TEL: +81-98-895-2221 (Ext.3292)
FAX: +81-98-895-4377
E-mail: b985542@tec.u-ryukyu.ac.jp

FA2-3

DESIGN OF A FUZZY LOGIC CONTROLLER USING A FUZZY MODEL

Voldi Costa Zambenedetti Shuta Murakami
Kyushu Institute of Technology Department of Computer Science
1-1, Sensui-cho,Tobata, Kitakyushu, 804, Japan

Abstract - After a fuzzy model was built, it is used in this work to help to design a fuzzy logic controller. Using the phase-plane and fuzzy logic reasoning it is found many trajectories that show the stabilization of a system, where the error and variation of error are zeroed minimizing a performance index. To minimize the performance index the membership functions of the fuzzy rules are adjusted and a data set that shows the points in the trajectory is obtained. With this data set a fuzzy logic controller is designed.

1 Introduction

There are many approaches to design a Fuzzy Logic Controller (FLC), and one of them is based on an operator's control actions, for example, when in an industrial process the input-output relations are not known with sufficient precision to use classical control theory, but a skilled human operator can control such system [3]. To automate it the operator's actions can be expressed as fuzzy rules, and these fuzzy rules can be deduced from the observations of the operator's actions looking at the input-output data.

In this paper we propose that instead of taking only the input-output data given by the human controller, first a fuzzy model is built and then, from the model, more data is gathered. To do so we need an evaluating program that tests the model with many inputs and records the outputs. Looking at those outputs the evaluating program chooses one that has the best performance. That best output value corresponds to an input that neither drives the system to a worse state than before nor over reacts, causing an overshoot. To make this decision it is proposed that such evaluating program uses the phase-plane and fuzzy reasoning when looking to the output values.

In the following sections we explain our method of evaluating points in the phase plane and use the data acquired to design a Fuzzy Logic Controller (FLC). We also show a simulation example, with a multi-input multi-output system with strong non-linearity, a power plant generator.

2 The Phase-Plane

A phase-plane is shown in Fig 1.a, composed by the error (e) in the **x** axes and the change in error (Δe) in the **y** axis. It is possible, looking at the plane, to know whether and how a controller drives the system from a position of non-stability back to the origin, as in Fig. 1a and 1b.

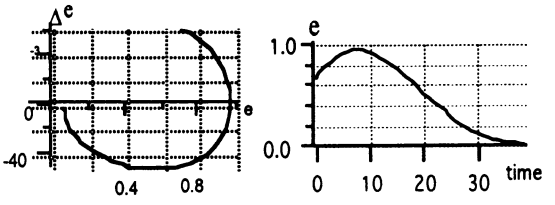


Fig. 1.a- example of a phase-plane 1.b- Variable versus time

As stated before, if one knows what values the control variables should assume in a given situation - a position in the phase plane - it is possible to design a FLC that emulates that behavior (for example: **if** the error is about 0.5 *and* variation of error is less than 0.01 **then** the value for the control variable should be 1.5). The desired behavior of a controller is that it brings the system back to the steady state the faster the possible and without overshoots. The controller performance is given by a performance index, which is minimized, so one can have the best response. Here it is used the sum of a quadratic error:

$$PI = \int_{t=0}^{t=\infty} e(t)^2\,dt \quad \text{or} \quad PI = \sum_{T=0}^{T=T_{max}} e(T)^2$$

where e=error of the variable

2.1 Using a Model and a Phase-plane to Calculate Points

Using a model which states are given at discrete time intervals T, one can calculate points, or system states, in the phase-plane. The model should have at least one control variable, called u, and an output variable, called y - see Fig. 2. The steady state value for y is known, as well as the minimum and maximum values of control variable u: u_{MIN} and u_{max}.

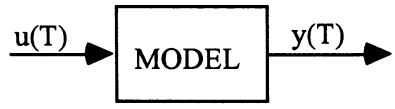


Fig. 2 General Model

To calculate a point, u is divided into n values, ranging from u_{MIN} to u_{max}. These n values of u will become n tries and, from a starting point p(T) and using the model, there will be n points $p(T+1)^i$, i=1,..,n - Fig. 3. $p(T+1)^i$ is generically called the "next point" and p(T) is called the "previous point".

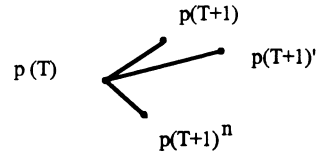


Fig. 3 Possible (T+1) points

Each point $p(T+1)^i$ is evaluated using fuzzy reasoning and one of them is chosen. This procedure is repeated until the origin is reached, or a given maximum number of steps are evaluated. When the origin is reached, the system has been driven back to a steady state, and its controllability is empirically proven.

2.2 Evaluation of the Points

A point in the phase plane indicates a state of the system. If the point is the origin, it means that the system is in steady state. Therefore, one of the objectives of a controller is to act over a system which point (state) is not the steady state in order to drive it back to the origin. An evaluating program that uses fuzzy logic reasoning decides about the "*good*" points in the phase plane. A set of good points defines a full trajectory that has a performance index value attached to it. The minimization of this performance index is used to adjust the membership functions in the evaluating program. Here we introduce the term "*degree of goodness*", that indicates how good is a point in the phase plane, when compared to the previous one (see Fig. 3). The fuzzy rule that evaluates the '*degree of goodness*' is called an evaluation rule.

The basic steps to make the evaluation rules consist of (see Fig. 4):

step 1 - Define variables

- Create a new variable, called τ, defined as the distance between two consecutive points in the phase-plane.
- Call θ the angle the line through points p(T) and p(T+1) makes with the e axis.
- Coordinates $(e,\Delta e)$ give the position of point in the phase plane.

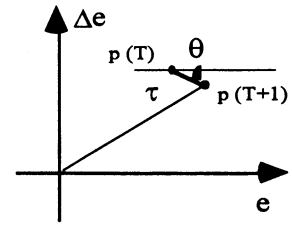


Fig. 4 Phase-plane and variables

step 2 - Divide variables into fuzzy partitions

The variables e, Δe, $\sin\theta$ and τ are divided in fuzzy partitions. Membership functions are then assigned to the partitions, and a combination of those will constitute the antecedent part of an evaluation rule. To this purpose, the Takagi-Sugeno method suggested in [1] can be used. As for adjustments of the membership functions, it can be used the simplex method.

step 3 chose the singletons in the consequent part

The consequent part of the evaluation rule can be composed of singletons, and it is suggested three values: BAD, FAIR and GOOD, that can assume the numerical values 0.05, 0.5 and 1.0, respectively. Using a desired trajectory in the phase plane it can be defined which singleton should be assigned to which rule. As a 'thumb rule', almost all fuzzy rules with 'τ is Big' should be assigned the value BAD, and most of fuzzy rules with 'τ is MEDIUM' should be assigned the value GOOD. Although a longer τ means a faster action, a too long τ can lead the system to overshoots, what is to be avoided.

A typical evaluation rule goes like:

R_p:IF(e is zero *and* Δe is zero *and* $\sin\theta$ is positive *and* τ is small)

THEN (point is GOOD).

The weight w_p of a rule R_p is defined by:

$$w_p = \prod_{j=1}^{N} \mu_{A_{jp}}(x_j)$$

Where N is the number of variables in the premise and $\mu_{Ajp}(x_j)$ is the grade of membership of variable x_j.

The 'degree of goodness' of a point is given by the sum of all w_p:

$$G = \sum_{p=1}^{r} w_p S_p \Big/ \sum_{p=1}^{r} w_p$$

Where r is the number of fuzzy rules, S_p is the singleton that defines the 'fitness' of rule R_p and G is the degree of goodness.

To have enough data to calculate the FLC many calculations should be performed in the phase plane. Taking a number of initial points, all of them are driven back to the origin, and the trajectories are recorded. Therefore, having starting points in the four quadrants, the optimal trajectory (according to the Performance Index adopted) from these points to the origin was found and recorded and this constitutes the data set for the FLC. Having different starting points it will be assured that all regions of the phase plane will be visited, meaning that the system was forced into many different states. In each one of these different states a control variable is given (by the evaluation of the degree of goodness), and an FLC that simulates that behavior can be designed.

3 Simulation Using a Power Plant

A single machine - infinite bus model of electric power system (Fig. 5) is used as a system to be controlled. The differential equations are taken as the real system and a fuzzy model was built [4].

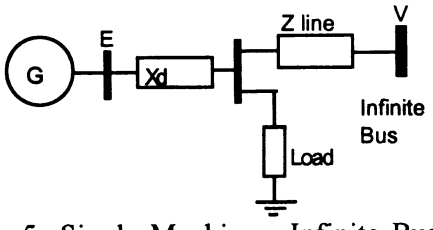


Fig.5 Single Machine - Infinite Bus model system

This system was chosen because it is a multi-input multi-output with strong non-linear characteristics, therefore suitable for the purpose of this work. The outputs of the system are mechanical power P, output voltage E and torque angle δ. The inputs are control of turbin governor u_2 and control of automatic voltage regulator, u_1 [2].

In this chapter we present some of the results obtained. The program that evaluates the points and records data will be called the 'evaluator', and the controller that was designed with these data will be called 'controller' or 'FLC'.

3.1 Results of Evaluation in the Phase-Plane

One important task for the FLC is to control the system during and after fault. Thus, the system was forced to a fault condition, where the Load (Fig. 5) is in short circuit (impedance zero). The system was also forced into states that, in the phase plane, is shown as starting points all over the graphic.

The controller will be active before, during and after fault. During the fault period it can set up the values of u_1 and u_2 and help the system to a faster come back to a stable state. Some results from the evaluator are shown here, that includes the phase-plane and variableXtime.

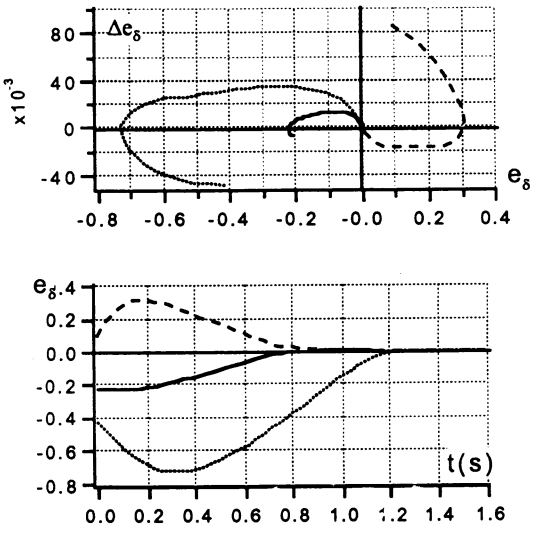


Fig. 6 phase plane for δ (a) and e_δXtime (b)

Observe that at the point 1.2s the variables had returned to error zero and are stable, what means that the system was successfully controlled. Only three trajectories was shown, but more is available. From these data the fuzzy controller will be designed.

4 Design of a FLC

This Section is about the design of a FLC using the data given by the evaluator described in Sections 2 and 3, and results of use of this control for fault condition are shown.

4.1 Definition of Rules for the FLC

The rules of the FLC built had the same format of a fuzzy model [1][3]: in the antecedent part there are the membership functions and in the consequent part there is a linear combination of the variables of the antecedent part. Other variables were included when necessary. The reasoning method was weighted average as well. Two sets of rule were built, one for control variable u_1 (output voltage) and another for u_2 (governor).

The antecedent part for both control variables u_1 and u_2 has error of rotor angle e_δ and variation of error of rotor angle Δe_δ as variables with 5 fuzzy partitions each (Negative, Negative Medium, Zero, Positive Medium, Positive), totaling 25 rules for u_1 and 25 rules for u_2.

The consequent part for both control variables u_1 and u_2 has error of rotor angle e_δ, variation of error of rotor angle Δe_δ, variation of error of angular velocity Δe_ω, error of output voltage e_E and a constant. The error of output voltage e_E appears only in three rules: e_δ is Zero and Δe_δ is Negative Medium, Zero or Positive Medium. The stabilization of rotor angle δ has a higher priority, and in case of a fault longer than 0.10s it was found that the controller had a poor performance if e_E was introduced in all rules. A control rule goes like:

R_j: IF e_δ is A_δ^j and e_ω is A_ω^j

THEN $y_j = a_0 + a_1 e_\delta + a_2 e_\omega + a_3 \Delta e_\omega + a_4 e_E$

The numerical values of parameters a_i for rule (e_δ is Zero and e_ω is Zero) of u_2 are:

2.1704252 -1.0412795 9.5313042 -19.501564 1.1508472

$a_0 = 2.1704$ is the steady state value for u_2.

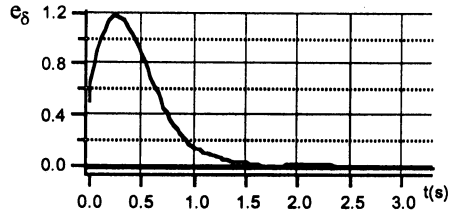


Fig. 7 Result of control for fault cleared in 0.15s - e_δXtime

4.2 - Results of Controlling

The following Figures show the results of controlling for a fault cleared in 0.15s. After 1.6s the torque angle δ is back to steady state and remains there while the output voltage E is being drive back to stability. As the torque angle δ has priority, so it is stabilized before E.

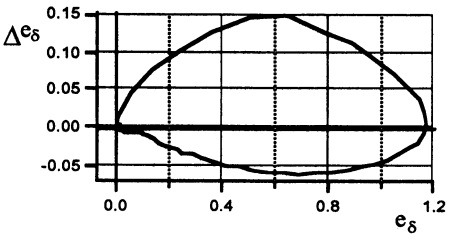


Fig. 8 - Result of control for fault cleared in 0.15s - phase plane $\Delta e_\delta X e_\delta$(b)

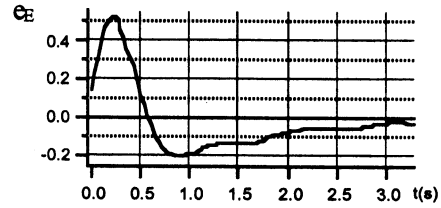


Fig. 9 Result of control for fault cleared in 0.15s - e_EXtime

5 Conclusions

In this paper we proposed a method to gather control data from a model using fuzzy reasoning in a phase plane. A simulation was made using a power plant, that was successfully controlled by a FLC designed using data gathered by the proposed method. It is intended to be used when a model has too many rules to use other approaches [3][5], or when more data than that provided by an operator is necessary.

Acknowledgments

The authors would like to thanks Prof. Hitoshi Takata for his invaluable opinions and orientation about electric power system.

References

[1] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control" - IEEE Trans. SMC vol. SMC-15 pp. 116-132, 1985

[2] A. Kumar and E. Richards, "A sub optimal control law to improve the transient stability of power systems" - IEEE Trans. on PAS vol. PAS-95 pp. 243-247, 1976

[3] C-C. Lee, "Fuzzy logic in control system - fuzzy logic controller - Part I and II" - IEEE-TSMC vol. SMC-20 pp. 404-435, 1990

[4] V. C. Zambenedetti and S. Murakami, "Application of Fuzzy Modeling to Power Plant Generator Control" - Proceedings of IEEE Conference on Tools of Artificial Intelligence (TAI'94) - New Orleans, USA, pp. 197-204, 1994

[5] K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems", Fuzzy Set and Systems vol. 45 pp. 135-156, 1992

Contact: Voldi Costa Zambenedetti
E-mail: costa@mura.comp.kyutech.ac.jp
Tel: 093-884-3249, Fax: 093-871-5835

FA2-4

Ada-based Support Packages for Fuzzy Expert System and GUI

Zensho Nakao*, Yen-Wei Chen*, Takeshi Tengan*, and Masaya Kinjo†

* Faculty of Engineering, University of the Ryukyus
†Alsys-KKE, Inc.

1. Introduction

Ada-basedpackages were developedwhich support fuzzy expert system construction, especially in terms of building the reasoning engine which is one of the fundamental parts of expert systems, including a graphical user interface; and fuzzy (approximate) reasoning is adopted in building the main inference engine which performs forwardapproximate reasoning.

We selectedthe Ada language to develop our system in terms of the strength in its elaborate support for software engineering, especially its modularity, data abstraction, and powerful constructs for implementing concurrency and synchronization.

2. A System Overview Through Ada Packages

The system structure is shown in Fig.2.1. It consists of six parts: a subject-predicate base, a fuzzy-rule base, a membership function base, management packages, reasoning packages, and GUI system packages. The subject-predicate base keeps a list of fuzzy linguistic variables and their values, the fuzzy-rule base has a list of groups of fuzzy rules, and the membership function base contains a list of nodes of membership functions.

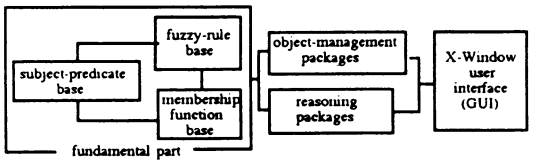


Fig.2.1 The structure of the system

3. Object-management Packages

Management packages consist of three packages and each of which handles one base; a subject-predicate related package provides the following operations: (a) input and deletion of subjects and their predicates groups, (b) displaying elements in lists, (c) saving and loading of lists; operations containedin a fuzzy-rule related package are: (a) in an if-then rule, the conditional parts are inputted interactively one at a time, (b) when subjects are given to a group of if-then rules, rules are generated automatically, thus users need to supply only the then-parts, (inferencerules can be grouped, and collections of several rules can be stored as separate groups), (c) addition or deletion of elements to existing rules, (d) deletion of rules or groups of rules, (e) displaying rules or groups of rules, (f) saving and loading of rules or groups of rules; generation of membership functions and their management are made by the following: (a) generation of membership functions and their deletion, where seven types are preparedfor user selection: *s_curve_type*, *π_curve_type*, *vec_type*, *tri_type*, *trape_type*,. *exp_type*, *bell_type*, (b) displaying of functions, (c) saving and loading of lists. The three bases are made of bi-directional lists, and whose coherence is maintained in a strict manner.

4. An X-Window GUI Supprt System

The GUI system provides users with a simple way for building an original graphical user interface which is operatedby a mouse. This GUI system is built based on two concepts: the event-driven methodology and a card type structure. The event-drivenmethod is a well-known one in which events are carried out in order of user's requests, usually done by clicking buttons on the active window by the mouse or the keyboard. Using the event-driven method to write programs related to GUI-based windows, we need not specify an order of flow of a program like we do to write a non-event-drivenprogram.

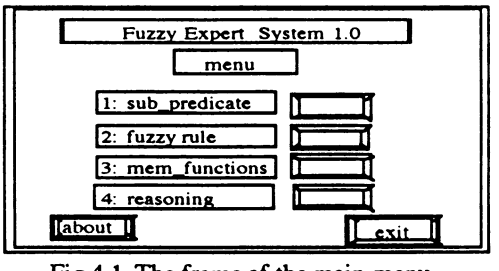


Fig.4.1 The frame of the main menu.

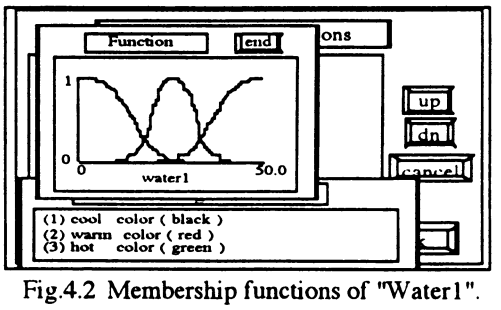


Fig.4.2 Membership functions of "Water1".

The frame type structure used in this GUI system is very simple in which frames are accumulated in a stack and the front most frame is the active frame manipulated. Each frame has a unique number with which we can specify a certain frame and bring it to the front most position. Two frames depictedin Figs.4.1, 4.2 are actual ones used in our developedGUI. The left one is the main

menu including four categories and the right one is displaying fuzzy membership functions in a popup frame.

5. The Approximate Reasoning Part

Based on the groups of inference rules and membership functions, approximate reasoning is made. Three different ways to display results are given. Main steps which are identical in these three methods for interactive input are: (a) selection of groups of rules to be used for inference; (b) operations used in if-then inference are selected from: (1) *logical*, (2) *algebraic* (3) *bounded* (4) *drastic* sums or products, and (5) *lambda* sum; (c) input of data and defuzzification; (d) display defuzzifiedresults in a specified way. Three methods provided for inference are the following:

(1) One crisp value

One crisp value is calculatedas a result of defuzzification of input values. Two or more combinations of operations applied to if-then inference can be used in this method to compare each result: where one combination consists of three operations applied to if-part, then-part and sum-of-then part in inference.

(2) One group with multiple combinations on the X-Y plane

On the X-Y plane, one element of if-part is used as the variable on X axis and one element of then-part is used as the variable on Y axis. This plane shows a transition of the Y value as X changes. Like first method mentioned above, multiple combinations of three operations applied to if-then inference can be given.

(3) Multiple groups with same rules on the X-Y plane

Groups which have same rules but different shapes of membership functions are used in this method. One combination of if-then inference operations is selected. Two or more groups can be used in this method. The way to select X,Y variables is the same as the second method mentioned above.

A result of the second reasoning method is shown in Fig.5.1; in this example, one water temperature is inputted as a constant value and other two are used as the X and Y variables on the X-Y plane. This plane shows a transition of the amount of drug as air temperature changes.

Different methods are applied to three parts of approximate reasoning. Combinations used in this example are:

a. *intersection, intersection, union,*

b. *intersection, bounded* product, *bounded* sum.

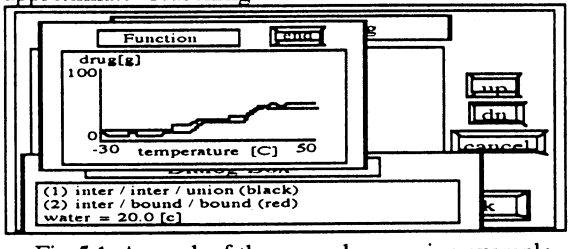


Fig.5.1 A graph of the second reasoning example.

6. Continuing and Future Work

The fundamental parts of the system were developed. As continuing and future work, there are several improvements to be made:

a. Development of more flexible ways of managing fuzzy rules such as input and deletion operations.

The flexibility of these operations on fuzzy rules is limited by: (1) Input/delete operation of an element or elements to/from a rule group. (2) Inserting a list of fuzzy rules at a specifiedlocation of a rule group.

b. Development of user friendly membership function input routines.

In the current version, the system provides an interactive way for creating membership functions, and it is not enough yet. A more graphical and intuitive way is desirable.

c. Additoinof more figures of buttons and frames.

In the GUI system only one figure is provided for each button and outline of frame. Addition of more figures will provide users with a variety of flavors for developping frames.

d. Development of a simple macro language for the event-drivenenvironment.

The present method for controling the event-driven environment has not yet integrated event loop and frame declaration parts. A macro language is necessary for development of a GUI and its simpler maintenance.

e. Applications of the system to some real world problems.

References

[1]Cox, Earl: ***The Fuzzy Systems Hand Book***, AcademicPress, Inc., 1994.

[2] Nakao, Z and Shiroma, N: Ada-based Packages for Fuzzy Sets and Systems, ***Proc. the 10th Fuzzy System Symposium*** , pp.547-550, 1994.

[3] Nakao, Z and Kinjo, M: Ada-basedSupport Packages for Fuzzy Expert Systems I, ***Proc. of 1994 Joint Conference of EEE in Kyusyu*** , p.921, 1994.

[4] Nakao, Z and Kinjo, M: Ada-basedSupport Packages for Fuzzy Expert Systems II, ***Proc. of 1994 IEICE Fall Conference*** , D-381, p.389, 1994.

[5] Nakao, Z: Ada-based Support Packages for Fuzzy Expert Systems Construction, ***Proc. of KFMS Fall Conference '94***, pp.48-51, 1994.

Contact

Takeshi Tengan, Fac of Engr, Univ of the Ryukyus, Okinawa 903-01, Japan.

E-mail: takeshi@augusta.ie.u-ryukyu.ac.jp

FA3-1

ファジィ制御テストシステム

A Test System with a Fuzzy Logic Controller

小山　健
Takeshi Koyama

徳島文理大学　工学部
Faculty of Engineering, Tokushima Bunri University

Test systems are widely used in the manufacturing processes of products, in particular, semiconductor devices. Most of these systems are very expensive, which causes high test cost. The author proposes a method which reasonably decreases the number of items to be tested so as to reduce test cost. First, he presents how to control the test system with fuzzy reasoning rules by utilizing fuzzy information about quality. Second, he shows that application of a fuzzy regression model is effective to obtain such fuzzy information for control. Finally, the results of simulations demonstrate that the test system with a fuzzy logic controller is more adaptive to sudden quality changes than the existing test systems controlled with statistical methods.

1. はじめに

テストシステムは，製品・部品，特に半導体デバイスの製造工程で，多く使われている．これらのテストシステムは，数百万円から数億円の高価なものが多く，効率的に稼動させることが製品コスト面から必要となる．テストコストは，1個あたりのテスト時間，単位時間あたりのテスト費用，ロットあたりのテスト個数に比例する．本報文では，ロットあたりのテスト個数を品質レベルに応じて調節，すなわち，品質が良いときはテスト個数を減らし，品質が悪いときにはテスト個数を増やして調節し，全体としてテスト個数を削減する方法について検討する．このため，ファジィ情報を利用して，品質の変化に対して適応性の良い制御を行う方法を提案する．

従来，一般的に行われている方法は，全数テストである．その他，ISO 2859－1 [1]，ISO 3951 [2] などの統計手法をベースにした調整型抜取検査方式を利用することも考えられる．しかし，全数テストでは，テスト個数が多くなり，コスト高となる．また，調整型抜取検査方式では，図1に示す小山 [3] の検討結果例のように，品質変化に対する適応性が悪い．

本報文では，小山の提案した図2のファジィ制御システム [4]，[5] について，前工程の品質情報（例えば，前工程におけるテスト結果）と対象にしているテスト工程の品質の間にファジィ関係が存在する場合について，ファジィ回帰式を導入して，①テスト結果，②後工程の品質情報及び③前工程のファジィ品質情報により，テスト個数の制御を行う方法について提案，検討する．この方法によれば，品質変動に対して適応性が良く，かつテストコストの削減ができることを示す．前工程の品質情報として，LSI製造工程の例により検討する．

2. ファジィ制御テストシステム

図2のテストシステムは，テスト結果の品質情報$\hat{p}_{It}$，後工程の品質情報$\hat{p}_{Ot}$に加えて，前工程情報から得られるファジィ品質情報$\underset{\sim}{p}_{It}$を組み合わせてファジィ推論を行い，テスト個数を決定する．ここで，tはt回目のテスト番号を示す．これらの制御器は特別なものでなく，通常のテストシステムに備えられているマイクロコンピュータ，ミニコンピュータに制御用のソフトウエアを組み込めばよい [6]．

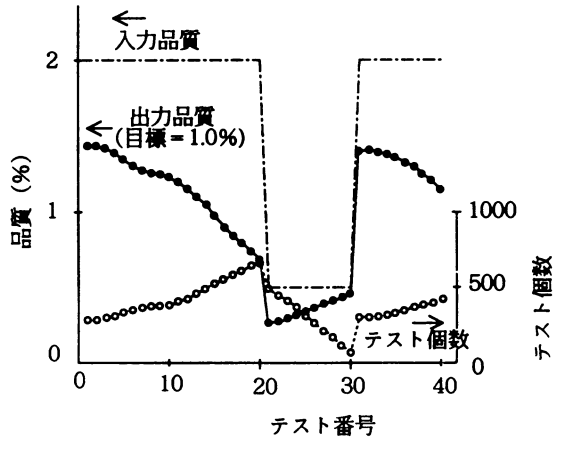


図1　ISO 3951の品質制御特性

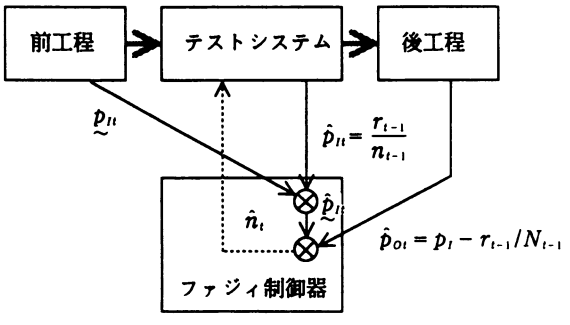


図2　ファジィ制御テストシステム

3. ファジィ制御ルール

図2のテストシステムのファジィ制御には，表1のファジィ推論ルールを用いた．ここで，入力ファジィ品質情報$\underset{\sim}{p}_I$，出力ファジィ品質情報$\underset{\sim}{p}_O$，ファジィテスト個数$\underset{\sim}{n}$の部分集合をそれぞれ，NS (negative small)，S (small)，PS (positive small)，NM (negative medium)，M (medium)，PM (positive medium)，NB (negative big)，B (big)，PB (positive big) とし，対応するメンバーシップ関数μ_{Ii}, μ_{Oj}, $\mu_{nk}(i, j, k = 1 \sim 9)$をそれぞれ図3 (a)，(b)，(c) とした．

それぞれのメンバーシップ関数の頂点に対応する値$n_k^{(c)}$, $p_{Ii}^{(c)}$, $p_{Oj}^{(c)}$を

$$\mu_{nk}(n_k^{(c)}) = 1$$
$$\mu_{Ii}(p_{Ii}^{(c)}) = 1$$
$$\mu_{Oj}(p_{Oj}^{(c)}) = 1$$

表1　$\underset{\sim}{n}_k$のファジィ推論ルール

$\underset{\sim}{p}_{Ii}$ \ $\underset{\sim}{p}_{Oj}$	NS	S	PS	NM	M	PM	NB	B	PB
NS	NS	NS	NS	S	PS	NM	M	PM	NB
S	NS	S	PS	NM	M	PM	NB	B	PB
PS	PS	PS	NM	M	PM	NB	B	PB	PB
NM	NM	NM	M	PM	NB	B	PB	PB	PB
M	M	M	PM	NB	B	PB	PB	PB	PB
PM	PM	PM	NB	B	PB	PB	PB	PB	PB
NB	NB	NB	B	PB	PB	PB	PB	PB	PB
B	B	B	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
PB	B	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

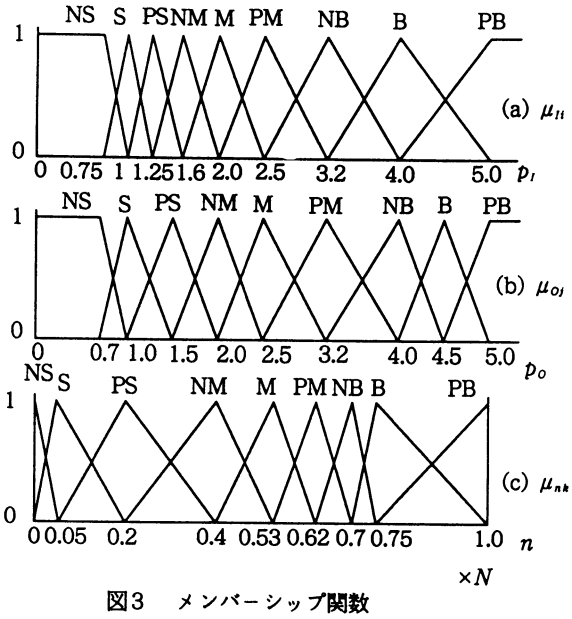


図3　メンバーシップ関数

で定義する．次に，実際の制御のための品質情報について考える．$(t-1)$回目のテスト時にn_{t-1}個のテストを行い，r_{t-1}個の不良が発見され，かつ，テスト中に発見された不良品を良品に置き換えて次工程に投入するとすれば，t回目のテストの入力品質の推定値$\hat{p}_{It}$，出力品質の推定値$\hat{p}_{Ot}$は次式で求まる．

$$\hat{p}_{It} = r_{t-1} / n_{t-1} \quad (1)$$
$$\hat{p}_{Ot} = p_I - r_{t-1} / N_{t-1} \quad (2)$$

一方，チップテストなど前工程のテスト結果などにより，ファジィ品質情報$\underset{\sim}{p}_{It}$を得ることができる場合には，制御情報として使用できる．この場合，t回目のテストの推定品質として

$$\left.\begin{array}{ll} |\underset{\sim}{p}_{It} - \underset{\sim}{p}_{I\cdot t-1}| > \delta & \text{なら} \quad \underset{\sim}{\hat{p}}_{It} = \underset{\sim}{p}_{It} \\ |\underset{\sim}{p}_{It} - \underset{\sim}{p}_{I\cdot t-1}| \le \delta & \text{なら} \quad \underset{\sim}{\hat{p}}_{It} = \hat{p}_{It} \end{array}\right\} \quad (3)$$

として制御を行う．

$(t-1)$回目のテスト結果を用いて，(1)，(2) 式で入力品質，出力品質を推定する場合には，図4 (a) に例を示すとおり，以下の式によりテスト個数nの推論を行う．ただし，$\underset{\sim}{n}_k$は表1のファジィ推論ルールにより決める．

$$h_i = \mu_{Ii}(\hat{p}_I) \quad (4)$$
$$h_j = \mu_{Oj}(\hat{p}_O)$$
$$h_{i,j} = min(h_i, h_j)$$
$$\underset{\sim}{n}_k = \underset{\sim}{n}_{i,j} = min(h_{i,j}, \mu_{nk})$$

とすると，テスト個数は (5) 式で推論できる．

$$\hat{n} = \frac{\sum_{j=j}^{j+1} \sum_{i=1}^{9} h_{i,j} \cdot \hat{n}_{i,j}}{\sum_{j=j}^{j+1} \sum_{i=1}^{9} h_{i,j}} \quad (5)$$

ただし，$\hat{n}_{i,j}$は$k = 2 \sim 8$のとき $\underset{\sim}{n}_{i,j}$の重心であり，

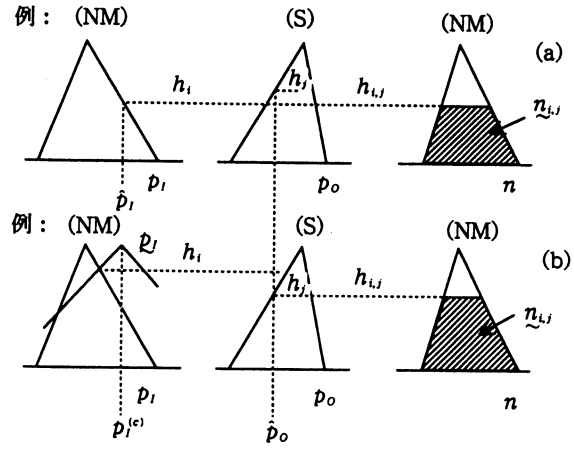


図4　テスト個数の推論例

$$\hat{n}_{t,j} = n_k^{(c)} + \frac{n_{k+1}^{(c)} - 2n_k^{(c)} + n_{k-1}^{(c)}}{3} \cdot \frac{1-(1-h_{t,j})^3}{1-(1-h_{t,j})^2} \quad (5)$$

$k = 1(NS)$のとき

$$\hat{n}_{t,j} = n_{k=2(S)}^{(c)} (1 - h_{t,j})$$

$k = 9(PB)$のとき

$$\hat{n}_{t,j} = h_{t,j} (N - n_{k=8(B)}^{(c)}) + n_{k=8(B)}^{(c)}$$

である.

入力品質情報がファジィ情報$\underset{\sim}{p}_I$のときには,図4 (b) の例のとおり,nの推論を行う.すなわち,(4) 式の代わりに,

$$h_i = max(\mu_{II} \wedge \underset{\sim}{p}_I) \quad (6)$$

を使用する.ただし,$\wedge$はmin演算である.具体的には,

$p_I^{(c)} < p_{II}^{(c)}$のとき

$$h_i = 1 + \frac{p_I^{(c)}}{e_0} - \frac{p_I^{(c)}(p_{II}^{(c)} - p_{I\cdot i-1}^{(c)}) + e_0 p_{II}^{(c)}}{e_0(p_{II}^{(c)} - p_{I\cdot i-1}^{(c)} + e_0)}$$

$p_I^{(c)} \geq p_{II}$のとき

$$h_i = 1 - \frac{p_I^{(c)}}{e_0} + \frac{p_I^{(c)}(p_{I\cdot i+1}^{(c)} - p_{II}^{(c)}) + e_0 p_{II}^{(c)}}{e_0(p_{I\cdot i+1}^{(c)} - p_{II}^{(c)} + e_0)}$$

を用いればよい.ただし,$p_I^{(c)}$は$\underset{\sim}{p}_I(p_I^{(c)}) = 1$で定義し,$e_0$は後述の (7) 式で定義され,$e_i = 0$の場合である.

4. 前工程ファジィ情報の利用

前工程のファジィ品質情報の利用ができる具体例として,LSI製造工程中のチップテスト (前工程) 結果 (歩留) と製品テスト時の品質との関連について述べる.一般に,前工程の歩留が高いとテスト時の不良が少なく,逆に,歩留が低いと後工程の不良率が高くなることが多い.具体例として,M電機T工場におけるマイクロコンピュータのチップテスト歩留 (数値変換してあり,数値が高いほど歩留が低くなる) $y_{WT\cdot m}$とテスト工程の不良率 (相対値で表している) $p_{I\cdot m}$のデータは表2に示すとおりである.

これらのデータ間の関係はファジィ関係になるとして,ファジィ回帰式 [7]

$$\underset{\sim}{p}_I = \underset{\sim}{A}_0 + \underset{\sim}{A}_1 y_{WT} = (a_0, e_0)_L + (a_1, e_1)_L y_{WT} \quad (7)$$

を求める.ここで,$\underset{\sim}{A}_0$, $\underset{\sim}{A}_1$はファジィ係数であり,$(a_0, e_0)_L$, $(a_1, e_1)_L$は対称三角型ファジィ数 [7] を表す.この回帰式の係数,すなわち,a_0, a_1, e_0, e_1は,$m = 1 \sim 23$のデータ$y_{WT\cdot m}$と$p_{I\cdot m}$より

$$\left.\begin{aligned} &a_0 + a_1 y_{WT\cdot m} + (1-\alpha)e_0 + (1-\alpha)e_1 y_{WT\cdot m} \geq p_{I\cdot m} \\ &a_0 + a_1 y_{WT\cdot m} - (1-\alpha)e_0 - (1-\alpha)e_1 y_{WT\cdot m} \leq p_{I\cdot m} \\ &e_0, e_1 \geq 0 \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

の条件の下で

$$\sum_{m=1}^{23} (e_0 + e_1 y_{WT\cdot m}) \rightarrow \text{最小}$$

として,決定できる.表2のデータからシンプレックス法 [8] による解を得ると,

$a_0 = 0.0189$, $a_1 = 0.0411$, $e_0 = 1.15$, $e_1 = 0$

となる.ただし,$\alpha = 0.5$としている.

5. テストシステムの特性

テストシステムの特性検討のために,4.で求めたファジィ関係を用いてシミュレーションを行った.(3) 式の$\delta = 0.01$とし,$p_{I\cdot i=1\sim10} = 2\%$, $p_{I\cdot i=11\sim20} = 0.5\%$, $p_{I\cdot i=21\sim30} = 3\%$ に設定して,目標品質1%に対する100試行のシミュレーションを行った結果を図6に示す.図1と比較して格段に優れた特性となっているといえよう.

表2　ファジィ品質情報の例

No (m)	$y_{WT\cdot m}$	$p_{I\cdot m}$	No (m)	$y_{WT\cdot m}$	$p_{I\cdot m}$
1	1.49	0.655	13	25.19	1.630
2	4.94	0	14	8.23	0.318
3	11.06	0	15	4.77	0.578
4	19.29	0.743	16	8.23	0.105
5	5.54	0.278	17	0.09	0.156
6	0	0.162	18	9.00	0
7	5.54	0.262	19	7.86	0.301
8	5.72	0.526	20	8.52	0
9	5.72	0.465	21	13.57	1.066
10	24.38	0.699	22	18.57	0.208
11	52.44	2.137	23	18.57	1.165
12	24.38	1.460			

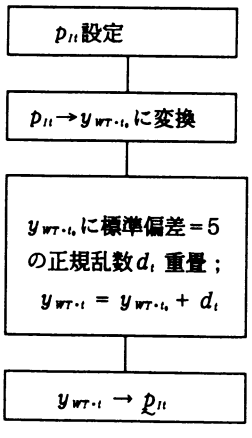


図5　シミュレーション・データの作成

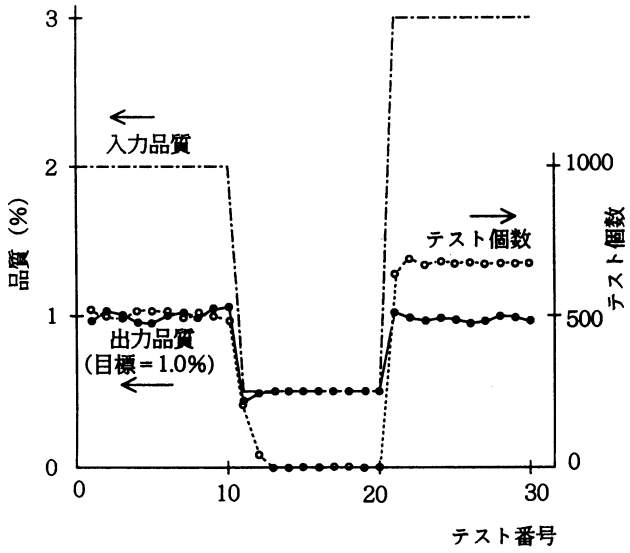


図6　ファジィ制御テストシステムの品質制御特性

6. まとめ

ファジィ制御のテストシステムについて，前工程のファジィ情報を利用する方法を中心に検討を行い，その有効性を確認した．ファジィ情報の具体例として，LSI製造工程のテスト情報を取り上げた．ファジィ情報は，本例のみならず，製造工程中に多く存在し，それらはエキスパートの判断により適宜活用されている．本報文で提案した方法によると，制御ルールとメンバーシップ関数の設定にエキスパートの知識を活用して，「再現性」(同じ条件を入れると同一結果が得られる)，「改良性」(新しい知見，異なった意見を積み上げて改良が図れる)のあるテストシステムを構築でき，効率的なテストが可能となる．これらの基本アルゴリズムは，例えば，C言語を用いてテストシステムに組み込み実用化できる．

参考文献

[1] International Organization for Standardization (1989)：ISO 2859－1, Sampling Procedures for Inspection by Attributes.

[2] International Organization for Standardization (1989)：ISO 3951, Sampling Procedures and Charts for Inspection by Variables for Percent Nonconforming.

[3] Koyama, T.(1994)："An Adaptive Sampling System with a Fuzzy Controller", Proc. V th Int. Workshop on Intelligent Statistical Quality Control, p. 51～62.

[4] 小山　健 (1994)：" 知的情報の活用による品質保証の効率化", 信頼性, 第15巻, 第4号, p. 3～10.

[5] Koyama, T.(1994)："Characteristics of a Fuzzy Test System", Proc. 3rd Asian Test Symposium (IEEE), p.379～384.

[6] Koyama, T. and R. Ohmura (1995)："A Practical Test System with a Fuzzy Logic Controller, Special Issue on Verification, Test and Diagnosis of VLSI Systems (IEICE), (to be appeared in July, 1995).

[7] ファジィ学会編 (1993)：ファジィOR, 日刊工業新聞社.

[8] 佐治, 白根, 横井, 大前 (1963)：オペレーションズ・リサーチ／理論と実際, 培風館.

連絡先

〒769－21 香川県大川郡志度町堂林1314－1
徳島文理大学　工学部　情報システム工学科
小山　健
TEL 0878－94－5111
FAX 0878－94－4201

FA3-2

部品の接続情報をファジィ化したプリント基板部品自動配置に関する研究

A Study on Placement of Parts on a Printed Circuit Board with Fuzzification of Parts Connections

行松徹　古橋武　内川嘉樹
Toru Yukimatsu Takeshi Furuhashi Yoshiki Uchikawa

名古屋大学工学部
School of Engineering, Nagoya University

Abstract: For computer aided design (CAD) / design automation (DA) for printed circuit board (PCB), automatic placement of parts has been a difficult problem. For realizing good placement, not only the structures but also the functions of the circuit should be grasped and some hierarchical methods for the placement should be done.

This paper describes a method of placement of parts on the PCB with fuzzification of parts connections. The parts are divided into several blocks based on the flows of main signals of the circuit. However it is very difficult to judge each part belongs to which block based on only the information included in the CAD data. We propose a method to fuzzify the degrees of belonging to the blocks of parts. The feasibility of the method is verified using an actual PCB.

1. はじめに

プリント基板のCAD/DAの分野では、実装設計（部品配置と配線設計）の自動化が大きな問題となっている[1][3]。特に、部品配置はほとんど人手によりなされている状態である。年々大規模化･高機能化するプリント基板の設計において、部品配置を自動化できることは実装設計の効率向上に大きく貢献する。

よい配置を実現するためには、回路の構造面だけでなく機能面をも把握し、階層的に配置を決定する必要があると言われている[1]。基板上の配置では、工場や製造設備ごとに異なる膨大な制約条件のチェックやよい配線が可能かどうかなどの非常に演算時間の掛かる評価が必要であり、部品の増加とともに著しく演算時間が増大してしまう。特に、よい配線という多大な演算時間を要する評価を何度もする事は現実的ではない。また、部品の配置は基板全体の見通しがよいなどの評価も必要であり、ボトムアップ的な手法では困難な問題であるといわれている[1]。

本論文では、プリント基板上での階層的な部品配置について検討する。まず、細かい制約条件などを無視し、配置の概略のみを決定する。そして詳細な配置をその概略配置に沿ったところから探索することにより、実際に探索する範囲を大幅に節約する高速な配置について検討する。まず、回路の主要な信号の流れを基に、部品群を主要部品を中心としたブロックに分割し、それぞれのブロックに配置範囲を割り当てる。CADデータの情報のみから適切なブロックを判定するのは困難であるため、本研究では各部品のブロックへの所属度合をファジィ化する手法を提案する。本手法では、主要部品のサイズを考慮した自由度の高い概略配置を行い、その概略配置に基づき各部品をブロックへの所属度に応じて配置する。ブロックへの所属度に応じて部品を配置することは、所属する/しないを2値で処理した場合に比べ、より多くのブロックに分割したことと同等の効果を持つと考える。

2. システムの概略

本研究では、配置する部品の集合をいくつかの部分集合に分割し、その各部分集合に配置場所を割り当てる作業を概略配置と呼ぶ。そして各部品の厳密な配置位置･方向を決定する作業を詳細配置と呼ぶ。Fig.1に本研究の部品配置システムの概略を示す。まず、CADデータから回路上の主要な信号線を抽出し、それを基に主要部品を抽出する。主要部品にその他の部品を加えてグループ化することにより、ブロックを生成する。しかし、CADデータの情報だけでは、どの部品がどのブロックに属するかを的確に判断することは困難である。そこで各部品のブロックへの所属度をファジィ化する。概略配置の段階では、部品の配置に必要な面積は、それぞれのブロックにおいて所属度に応じて考慮される。得られたブロックに対して、まずブロック間の接続のみを考慮し、ブロックの面積や基板の形状は無視して、概略のブロックの配置を決める。その後各ブロックに面積を持たせ、各ブロックの配置のための面積を基板上に確保できるように配置範囲を改善する。以上の概略配置の後、全部品の配置を行う。まずは初期配置として各部品を各ブロックへの所属度に応じて配置し、その後、部品の重なりの解消やその他の条件を考慮しながら配置の改善を行う。

3. 部品のブロック化

よい概略配置を行うためには、基板上の主要な信号の流れに着目する必要がある。つまり、対象となる回路のブロック図のようなものを考慮した配置である。もし、ブロック図のデータが回路データや部品データと対応した形でCAD上に存在するならば、それを用いることが可能である。しかし、そのためにはブロック図のデータの作成に新たな労力を

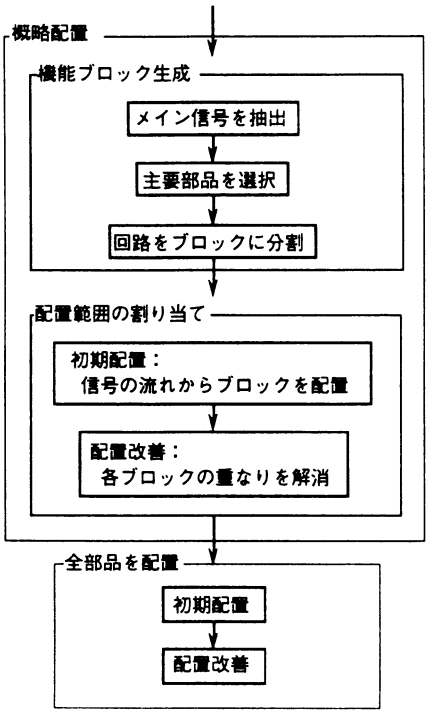


Fig.1　システムの概略

必要としてしまう。そこで回路のCADデータから、この信号の流れを抽出することになる。回路のCADデータからメインとなる信号線を抽出し、その信号線の接続状況を考慮することにより、機能ごとのブロックを生成できる。具体的には、CADデータ内の信号線名が類似している信号線を同類の信号線とみなし、同類の信号線が所定の本数以上存在すれば、メインの信号とみなす。本数の基準はCADシステムの使用者によって設定される。メイン信号が接続されている部品を主要部品とし、主要部品ごとにその他の部品をグループ化してブロックを生成する。しかし各部品がどの主要部品と同じブロックに所属するべきかを、CADデータの情報のみから的確に判定することは困難である。そこで各部品を曖昧に各ブロックに所属させる。非主要部品の各ブロックへの所属度合は、その部品と各主要部品との接続の強さに比例した値とする。接続の強さは、最短経路での主要部品への接続本数に比例させる。例えばFig.2のように周辺部品aが主要部品Aに6本、主要部品Bに2本の結線を持つ場合には、Aへの所属度を0.75、Bへの所属度を0.25とする。直接には主要部品と繋がっていない結線は無視する。Fig.3のように直接主要部品(A, B, C)に繋がる結線を持たない部品aは、最短経路により主要部品A, B, Cに到る結線のみを考慮し、図のように所属度を計算する。この方法は、主要部品と間接的に繋がる結線を極力無視して計算を速めることと、主要部品に直接繋がる部品が主要部品の近くに配置されることを重視している。実際のプリント基板上の回路をブロックに分割した。Fig.4にその回路のプリント基板（専門家が配置したもの）を示す。Fig.4の基板の回路のCADデータから、メインの信号線を抽出した。この場合、同類信号線数が8本以上のものをメイン信号線とみなしたところ、データバス、アドレスバスなど、233本中166本15種類の信号線がメイン信号として抽出された。以下、メイン信号をまとめたものをバスと呼ぶ。次にバスが接続されている部品を抽出したところ、Fig.4のA～Lの12個の部品が抽出され、これらの部品を主要部品とした。次に主要部品以外の部品を各主要部品に対してグループ化し、ブロックの形成を行う。但し、主要部品B～Iは揃えて並べるべきメモリであるので、あらかじめ同一ブロックとしておく。主要部品以外の部品は、上述の方法に従い、各ブロックへの所属度を計算したところ、Table 1のようになった。

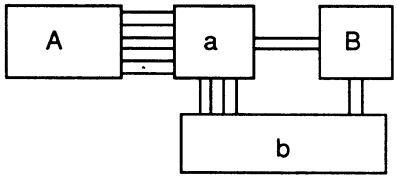


Fig.2　主要部品との結合力 I

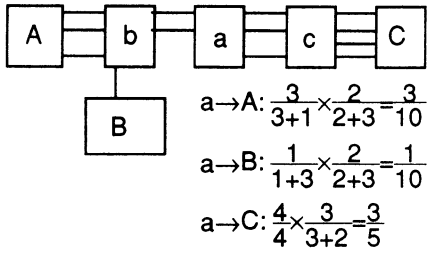


Fig.3　主要部品との結合力 II

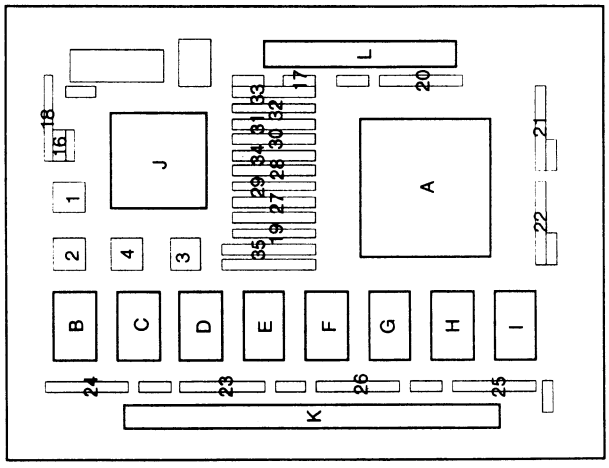


Fig.4　プリント基板の例

4. ブロックの配置

4.1 初期配置

各ブロックの初期配置として、主要な信号の流れに着目し、各ブロックの大きさや基板の形状を無視した配置を行った。具体的には、各ブロックを点で表し、格子点上に配置する方法を採った。概略配置において信号線の交差が多くなると、基板上の見通しが悪くなり、実際の配線が長くなってしまう。そこで、格子点上に配置した各ブロック間の結線の長さ（ユークリッド距離）と交差数が少なくなるように、シミュレーテッドアニーリング法[5]を用いて探索した。Fig.4の基板に対する以上の配置結果をFig.5(a)に示す。更にブロックに面積を持たせて基板上に展開する(Fig.5(b))。ブロックの面積はそのブロックに所属する各部品の配置に必要な面積にそれぞれ所属度を重みとして掛けた総和とする。今回の基板では、部品K,Lはあらかじめ位置が指定されている外部スロットであるので、それらを起点として他の部品の位置が決まる。

4.2 配置改善

4.1節での初期配置では、基板形状やブロックの面積を考慮しなかったため、各ブロック間に重なりが生じ、各ブロックに属する部品を配置するためのスペースが基板上に確保されていない。そのため配置改善をする必要がある。配置改善は、各ブロックを長方形近似で表現し、配置領域を確保する方向に、乱数で少しずつ改善していく方法をとる。

具体的には、まず主要部品の向きやメモリなどの並べ方をあらかじ乱数により決めておく。そして乱数でブロックを選び、そのブロックが他のブロックとの重なりを解消するように変形させ、それを繰り返す。このとき、最低限主要部品は配置できるように縦横の長さは確保したまま変形する。初期配置が格子点上の配置であるのでいくつかの最適解が存在し、また主要部品の向きメモリの並びによりいくつかの概略配置が得られる。概略配置なのでブロックの個数が少なく、複数の結果を出しても高速に改善を行うことが出来る。Fig.5(b)の初期配置結果に対して、ブロックの範囲を逐次改善していったところ、結果はFig.6のようになった。主要部品の並びを考慮し、他の部品の配置面積も確保している概略配置が得られている。今回の例では、ブロック数5個の初期配置から配置改善を行うのにSun SPARCstation IPCのCPU時間で0.01秒程度で収束し、うまくブロックの配置領域が確保されなかったものは破棄し、Fig.6のようにうまくいったもの概略配置のみを次章の全部品の配置に用いる。

5. 全部品の配置

5.1 ブロックの曖昧さ

3章で述べたように、各ブロックには部品の多くが曖昧に所属している。隣り合うブロックにまたがって所属する部品は、その境界付近に配置されるのが妥当と考えられる。そこでFig.6の得られたブロックの配置領域から曖昧に所属している部品の占める領域を曖昧な領域として分離させ、そのブロックに対して所属度が1であった部品だけの面積にする。結果は、Fig.6中の各ブロックの内側の長方形となる。

Table 1　各ブロックへの所属度

	A	B-I	J	K	L
1	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50
2	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33
3	0.60	0.00	0.00	0.00	0.40
4	0.56	0.00	0.00	0.00	0.44
16	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33
17	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50
18	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
19	0.50	0.38	0.12	0.00	0.00
20	0.30	0.00	0.35	0.00	0.35
21	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33
22	0.41	0.24	0.18	0.00	0.18
23	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
24	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
25	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
26	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
27	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
28	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
29	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
30	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00
31	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00
32	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00
33	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00
34	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00
35	0.50	0.00	0.25	0.00	0.25

5.2初期配置

5.2.1 主要部品

主要部品は、そのブロックへの所属度が1である。従って、5.1節の処理で残った領域に主要部品を配置すればよい。具体的には、残った領域の中心に主要部品の中心を合わせて配置する。

5.2.2 非主要部品

いくつかのブロックにまたがって所属する部品は、その所属度に応じて配置する。Fig.7のように2つのブロックA, Bに対する所属度がそれぞれ、0.2, 0.8である部品aを考える。この部品は、このブロックA,B間の曖昧領域の縦方向に対して0.2対0.8で内分した点に置く。横方向に関しては、A,Bの中央に置いておく。

3個のブロックA, B, Cに所属している部品bは、その3ブロックの曖昧領域が存在するので、その領域に配置する。2個のブロックの曖昧領域の場合と同様に縦方向·横方向に分けて初期配置位置を決定する。

主要部品以外でブロックへの所属度が1である部品があれば、主要部品の周辺に配置する。

このようにして、Fig.6のブロック配置結果に対し全部品を配置したところFig.8が得られた。

5.3配置改善

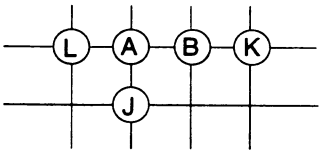
上記、全部品に対する初期配置結果に対して配置改善を施す。具体的には、以下に述べる評価に従い、少しずつ部品を移動·回転させていった。

1) 部品の重なりの解消

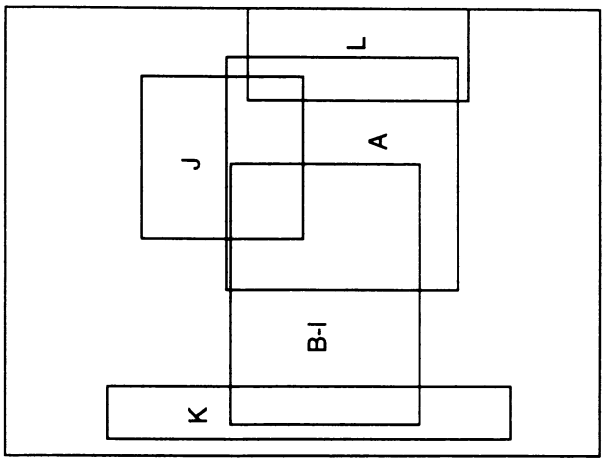
各部品は、他の部品と重なっている場合にその重なりを解消する方向に動こうとする。

2) 同型部品の整列

ある閾値より近くに同型部品がある場合は、その部品に揃って並ぼうとする。



(a)



(b)

Fig.5　ブロック初期配置の例

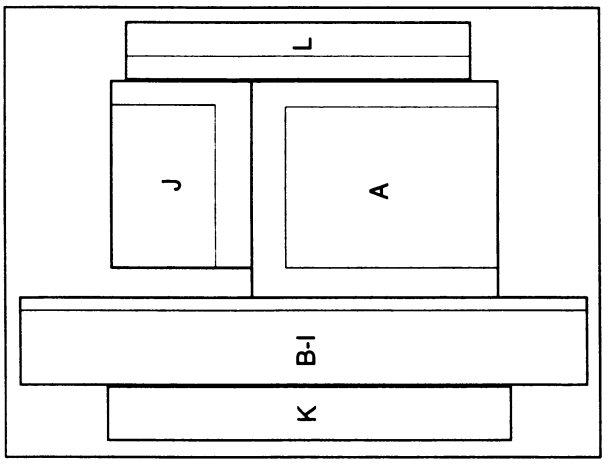


Fig.6　ブロックの配置例

3) 概略配置とのマッチング

概略配置にどれだけ沿っているかを評価して、その評価値が大きくなるように改善をしていく。

以下に概略配置とのマッチングの評価方法の説明をする。例えば、2個のブロックA,Bに属している部品cは、AとBの間に配置されるべきである。そしてAの方により大きく所属していれば、なるべくA付近に配置されるのが望ましく、A,Bに対して同じ所属度であれば、AB間の何処に配置されてもいいはずである。そこでFig.9のように、基板上の座標に対してブロックA,Bへの所属度を考え、(1)式を評価として用いる。

$$\sum_{j=A,B}\left(b_L(c,j)\times b_P(c,j)\right) \tag{1}$$

但し、ここで$b_L(i,j)$は、部品iのブロックjへの所属度であり、$b_P(i,j)$は、部品iの配置場所のブロックjへの所属度である。この式により、A,Bに所属している部品の中でも、よりAへの所属度が大きい部品ほどA付近

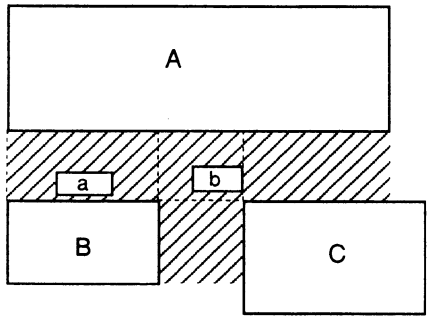


Fig.7　周辺部品の初期配置

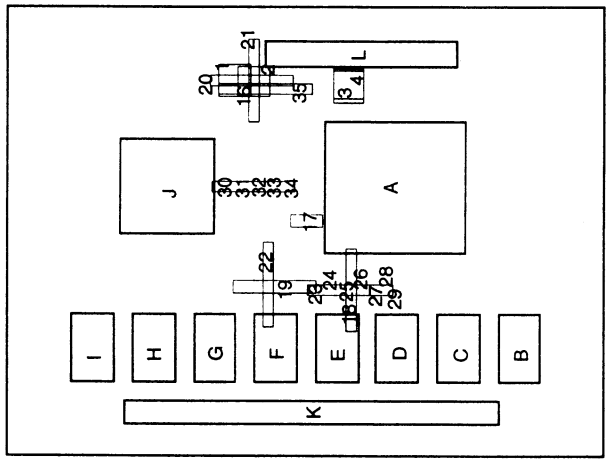


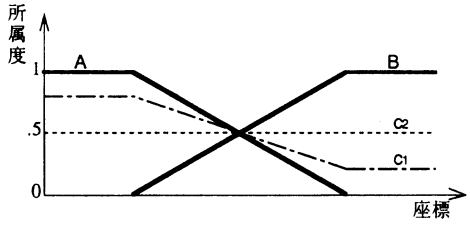
Fig.8　全部品の初期配置例

に配置されることが望ましくなる。すなわち、Fig.9の例では部品c_2よりも部品c_1が、よりA付近に配置されることが望ましい。

次に、一列にA-B-Dの順に並ぶ3ブロックに所属している部品eを考える。もし、部品eがAとDにより大きく所属しているならば、Bの存在はあまり考慮せず、A,D間に配置されれば問題ないであろう。つまり所属度が大きいブロックに挟まれているブロックは無視してもあまり影響が無い。そこで、評価対象の部品の左側で最も所属度の高いブロックをFig.9のA、右側で最も所属度の高いブロックをFig.9のBと想定し(1)式で評価することにした。上下方向についても同様に計算し結果を掛け合わせた。すなわち、(2)式により、各部品が概略配置に沿っているかを評価し、部品を移動させた。

$$\sum_{\text{各部品}i}\Big(\big(b_L(i,\text{右}_i)\times b_P(i,\text{右}_i)+b_L(i,\text{左}_i)\times b_P(i,\text{左}_i)\big)\times \big(b_L(i,\text{上}_i)\times b_P(i,\text{上}_i)+b_L(i,\text{下}_i)\times b_P(i,\text{下}_i)\big)\Big) \quad (2)$$

部品配置の改善結果をFig.10に示す。ブロック間の信号の流れに無理がない配置となったが、いくつかの部品に多少の修正が必要と思われる結果であった。これは、本手法が広い視野から空いている領域をきちん



$b_L(c_1,A)=0.8$　$b_L(c_1,B)=0.2$
$b_L(c_2,A)=b_L(c_2,B)=0.5$

Fig.9　部品のブロックに対する配置評価

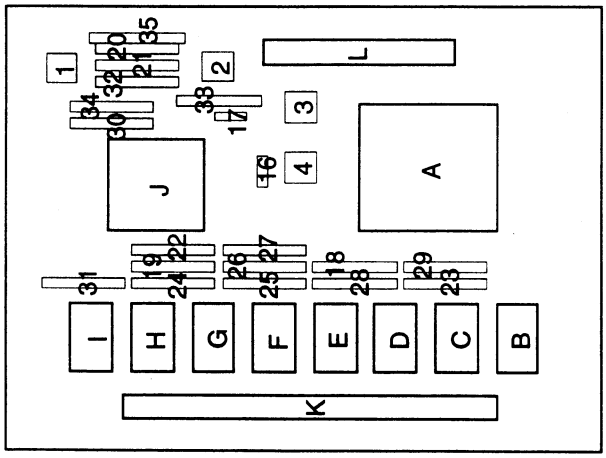


Fig.10　部品配置結果例

と探索し、面積を無駄なく利用する能力に欠けているためと思われる。これについては、今後改良する予定である。また、専門家の配置(Fig.4)で、23から26の部品が、B-Iのメモリと Kの外部スロットの間に配置されているが、Table 1を見れば分かるように、これらはメモリB-IとAの部品を繋ぐ部品であり、CADデータの情報からはこの専門家の意図は読み取れないため、本システムでは、23から26の部品はほぼ確実にメモリの反対側に配置されることになる。

6. まとめと今後の課題

本報告では、プリント基板上における部品の階層的な配置手法を検討した。部品の所属度をファジィ化したブロックを用いることを提案した。各部品は、それぞれの各ブロックへの所属度に応じて配置され、適切な部品配置が実現できると考えられる。

今後は、配置結果の定量的な良否判定や配置速度の評価を行うと共に、専門家の知識を獲得･実現しやすいシステムに発展させていく予定である。

＜参考文献＞

[1] 小田原、後藤　監修：最新プリント配線板のＣＡＤ；ミマツデータシステム, 1989

[2] 大岩、吉村、土田、植村、青江：プリント基板自動配置への知識利用；情報処理学会研究会報告, 89-DA-46, pp.65-72, 1989

[3] 粟島、金子、戸川、佐藤、大附：配置問題に対する分枝限定法の階層的適用とその評価；情報処理学会研究会報告, 92-DA-62, pp.179-184, 1992

[4] 荒川、小川：4分割初期配置手法；情報処理学会研究会報告, 92-DA-62, pp.185-190, 1992

[5] 喜多：Hopfield型ニューラルネットワークとシミュレーテッドアニーリング；人工知能学会誌, Vol.7, No.6, pp.970-979, 1992

［問い合わせ先］
〒464-01　名古屋市千種区不老町
名古屋大学工学部電子情報学科内川研究室
行松　徹
Tel.: 052-789-2793
Fax: 052-789-3166
e-mail: yuki@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

FA3-3

都市ごみ焼却炉の運転支援システム
Operation Support System for Refuse Incineration Plant

*藤吉　誠　　**大林　吉次
Makaoto FUJIYOSHI　　Yoshiji Ohbayashi

日立造船株式会社　技術研究所*
日立造船株式会社　電子・制御システム事業部**

Abstract

Recently, refuse incineration plants have become more and more complicated to obtain high efficiency and to realize the pollution prevention in the control performance. Operators of these plants strongly need good interface for easy understandings in order to maintain the stable condition and to prevent unstable conditions.

A new operation support system is proposed, which is applied fuzzy logic to express combustion condition and to present easy understanding, especially for unskilled operators. The system has equipped with many new human - friendly interface, so - called *process meters fuzzy meters, smile meters, fuzzy simulator* and so on. It proves to be more useful than the conventional system in the performance test.

Key word : refuse incineration plant, fuzzy logic, operation support system, fuzzy meter

1.はじめに

ごみ焼却プラントの自動化は高度化の一途をたどっている。これは、厳しさを増す一方の環境問題に対応していくため、システムが多機能化、多目的化しており、一方では省力化等の強い要請もあり自動化に拍車がかかっているためである。当社においても、昭和40年に大阪市西淀工場に日本で初めての自動化システムを納入して以来、立ち上げ下げの自動化、炉内監視のための画像処理の導入、漸次、自動化の高度化を推進し最近では熊本北清掃工場にファジィ自動燃焼システムを実機稼働させ現在に至っている。プラントの高度化、自動化が進むにつれシステム自体が複雑になり、従来のオペレーション上の問題が制御システム全体の問題として捉えられるようになってきた。運転員にとってオペレーションはシンプルで優しいものでなければならない。しかし、自動化が高度になればなるほど、運転員に要求される判断操作も高度でかつ複雑になってきている。とくに、異常や故障発生時に、適切かつ迅速な処置を要求される運転員には、プラントの特性や自動化の内容といった設計技術者レベルの黒板的な知識に加えて、鋭敏な判断と経験に裏打ちされた鋭い直感力が要求されることになる。このため、運転員の身になったMMI(Man Machine Interface)や運転支援システムが必要となってきている。このような背景から、とくに都市ごみ焼却炉のごみ燃焼のような複雑なプロセスを系統だてて「より　わかりやすい」人間とコンピュータの仲立ちをするような運転支援システムの開発を目指したものである。

2.ごみ燃焼制御

図1に示すのは当社のボイラ付ごみ焼却炉の自動燃焼制御（以下ACCという）の協調関連図である。主に、火格子によってごみの送り速度、種々の空気ダンパーによって燃焼空気量を調整、制御するシステムである。通常、この運転制御は自動化されているが、ごみ質の変動等の外乱が大きいため、燃焼不安定時に運転員の制御パラメータの調整や手動介入が避けられない。これらの運転上の障害を引き起こす問題点のほとんどのものが、ごみ燃焼プロセスに内在する種々の「あいまいさ」に起因していると考えられている。当社が開発したファジィ自動燃焼制御（ファジィACC）システムでは、ファジィセンサーを応用し、燃焼に関与する3種のファジィ概念量を定量化し、これらを制御指標としてさらに階層ファジィ推論を用いて制御を行っている。すなわち，第一段階で異種のプロセス量の統合化を行い、次の段階で制御の方向性を決定し制御量を加減している。たとえば、「ごみ・質量」

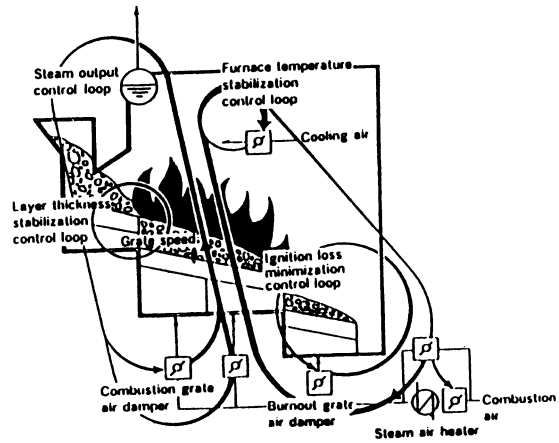


図1. ACC協調関連図

という概念は、従来のごみ質とごみ量を一つのあいまいな燃焼特性を示す物理量として捉え、その燃焼特性から推論したものである。図２に示すように「ごみ質・量」は燃料という観点から見た場合、ごみ質とごみ量の非線形な関係として表される。このようにセンシングしにくい、もしくはセンシングができないプロセス量は、複合したあいまいな概念量として、そのまま取り扱うと都合が良い。熟練した運転員は各々のプロセス状態をこのような「あいまいさ」を含む概念を駆

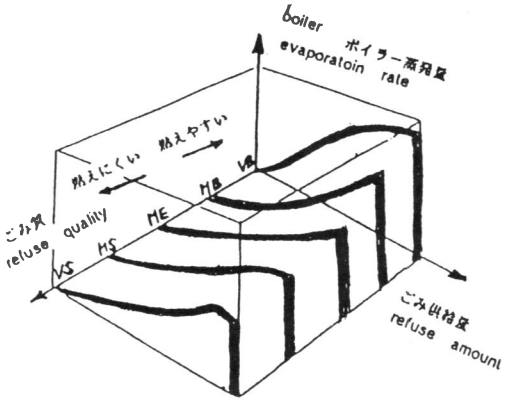


図２. ごみ質・量の概念

使しながらもプロセス全体をマクロ的に捉え、適切なパラメータ設定とタイミングにより安定燃焼を実現している。より高次な概念である「あいまいさ」をどう扱い、システムにどう吸収するかが目的達成のための課題となっている。

3.運転支援システム

当社ではごみ焼却プラントにおける運転支援システムを制御も含めて広い意味で捉え、従来制御 ACC より広い範囲をファジィ ACC がカバーし、制御しきれない部分を運転支援システムがサポートするものとしている。制御システムと運転支援システムとの棲み分けは、プラントの致命傷となり判断が必要である場合、あるいはセンサーが無い、制御端が無い等の実際上、制御が不可能な場合は運転支援システムがサポートするものとしている。このような場合には運転員に状況に応じた適切な情報を提供し運転員の判断を仰ぐものとしている。また、ごみ焼却プラントの運転支援について、その特徴により下記に示す３つのステージに分類している。

１）運転診断
２）機器故障診断
３）在庫管理、予防保全

特に、項目１）と２）を分けているのは、運転診断はどちらかというと「あいまいさ」を含むアナログ的な要因をもとに診断するのに対し、機器故障診断は on、off、故障、正常というようなクリスプな情報をもとに診断しているからである。

本稿では運転支援システムのうちファジィ推論を応用した上記１）の運転診断システムについて述べている。

4.ごみ焼却プラント運転支援システム

ごみ燃焼プロセスは、制御工学的には多変数の入力と出力が絡み合う非線形な相互干渉系である。しかも、炉内の燃焼の複雑な挙動に加えて、計測するセンサー自体にも大きな誤差が含まれている。したがって、各々の挙動をそのまま制御に結びつけると発散の危険性がある。

これまでの決められた手順に従うコンピュータ制御と状況を柔軟に把握して対応できる運転員の手動制御とを違和感なく近づけるメディアがどうしても必要である。今までは、自動制御の高度化という観点から運転員の介入を極力避ける傾向があった。今、制御系を「人間ー機械」の一体系として捉え、運転員が容易に理解でき調整操作も簡単なシステムが望まれている。ごみ焼却炉の運転診断システムの構成を図３に示す。ハードウェアとしては PC-AT を用い、システム全体を Windows のアプリケーションとして実現している。また、運転支援システムごとに異なるファジィ推論部分をダイナミック・リンク・ライブラリー(DLL)として独立させることでシステムの汎用性を高めている。MMI 部分は当社が取り扱う米国 iCONICS 社の監視用ソフトウェア「iCONICS-Win」を用いている。「iCONICS-Win」は Windows 上で動作する監視システム構築ツールであり、「Graph Works」と呼ばれる描画ツールにより MMI の作成からデータインターフェイスまでを完全にプログラミングレスで構築することができる。ファジィ推論部分もプログラムレスのツールを用いており、システム全体として設計の省力化、効率化をはかっている。運転診断画面の MMI 部分を図４に示す。この MMI の各部分の主な機能は次のとおりである。

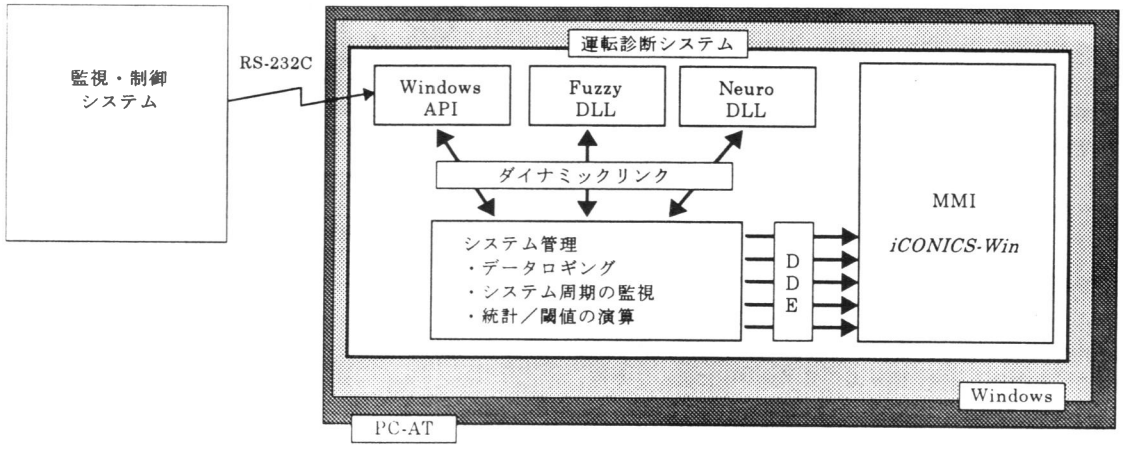


図３. 運転支援システム構成図

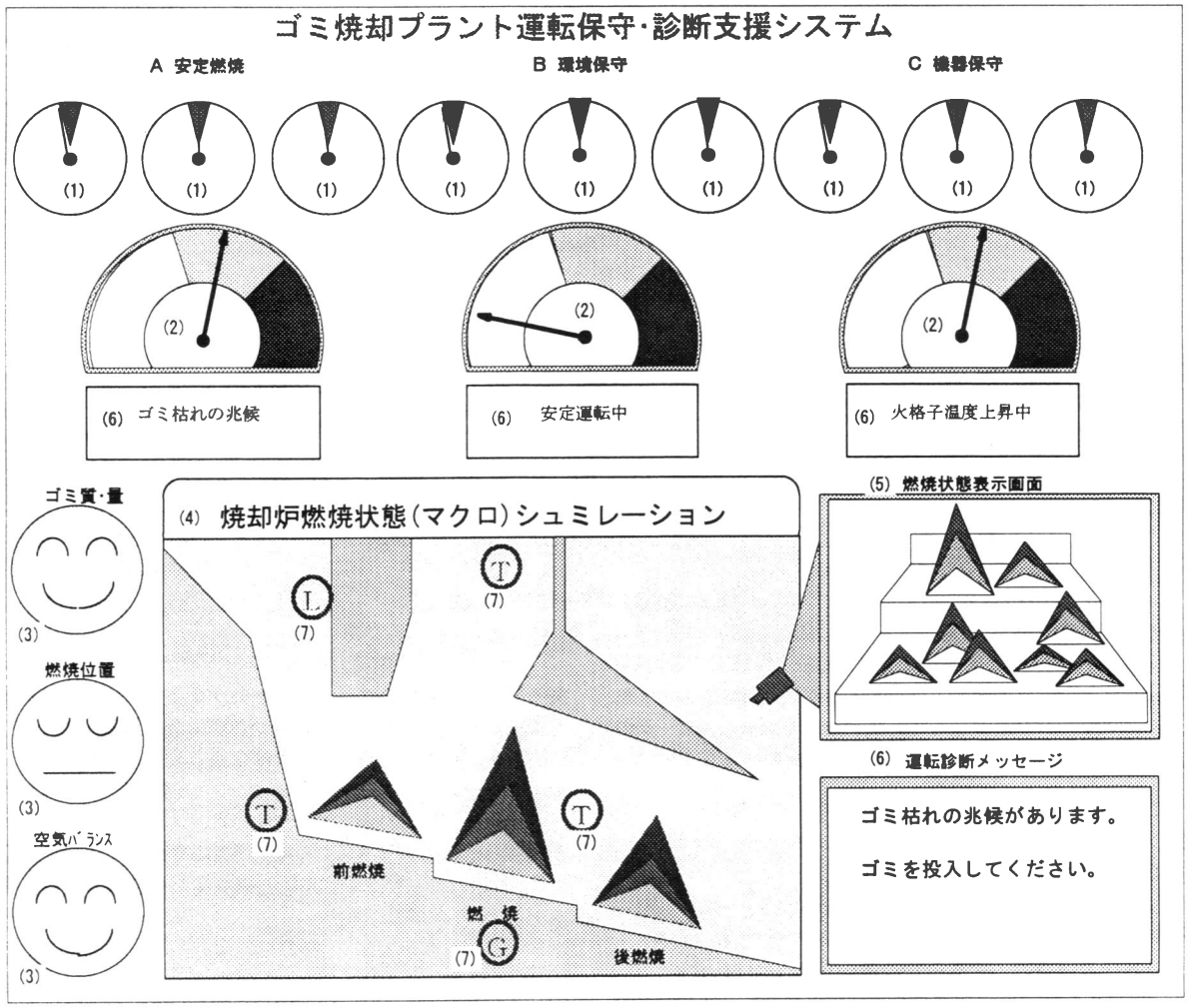


図 4. 運転診断システム マンマシーン画面

(1) プロセスメータ

制御システムから取り込んだプロセスデータを部分的な診断（燃焼状態、環境保全、機器保守）に関連するデータ毎にまとめて表示している。これらのデータ値によりファジィ推論を行い燃焼状態を判断している。

(2) ファジィメータ

ファジィメータはファジィ推論により診断されたごみ焼却炉の運転状態のマクロ的にメータ上に表示している。メータは青色（安定状態）、黄色（異常傾向）、赤色（異常状態）の三色でゾーン分けされ、針のさす位置と動きによって運転状態とマクロ的な傾向を表している。

(3) スマイルメータ

泣く（異常１）、笑う（正常）、怒る（異常２）といった特徴状態とそれぞれの中間状態を７段階に分け、マークの表情によって各診断（ごみ質・量、空気バランス、燃焼位置）結果を表示している。

(4) 燃焼状態（マクロ）シミュレーション

焼却炉内部の段階的な燃焼状態（前燃焼、燃焼、後燃焼の状態）を診断するためには炉後壁の ITV からの画像データしかなくまた、直接診断するためのセンサも無い。この運転診断システムでは、ファジィ推論によって得られた診断結果を焼却炉の断面上の炎の高さに投影することで炉内のマクロな燃焼状態を動的にアニメーションとして表示している。

(5) 炉内部表示画面

炉後壁の ITV からの画像を処理したものを表示している。これにより、炉後壁から見た炉内全体の燃焼状態を知ることが可能である。

(6) メッセージ表示画面

運転診断画面では各種メータ群によって焼却炉の燃焼状態の良否を把握できる。しかし、ファジィメータのみでは状態の遷移は予測できないので、どのような特徴状態にあるのかをメータ下のテキストボックスに一言で簡潔に表示する。さらに右下のテキストボックスには、発生した事象の中で最も重要であるものに対して、原因と対処方法を表示する。

(7) アラームマーカ

燃焼状態（マクロ）シミュレーション画面内部にアラームマーカを表示する。これにより焼却炉内のどの部分が異常なのかを知ることができる。

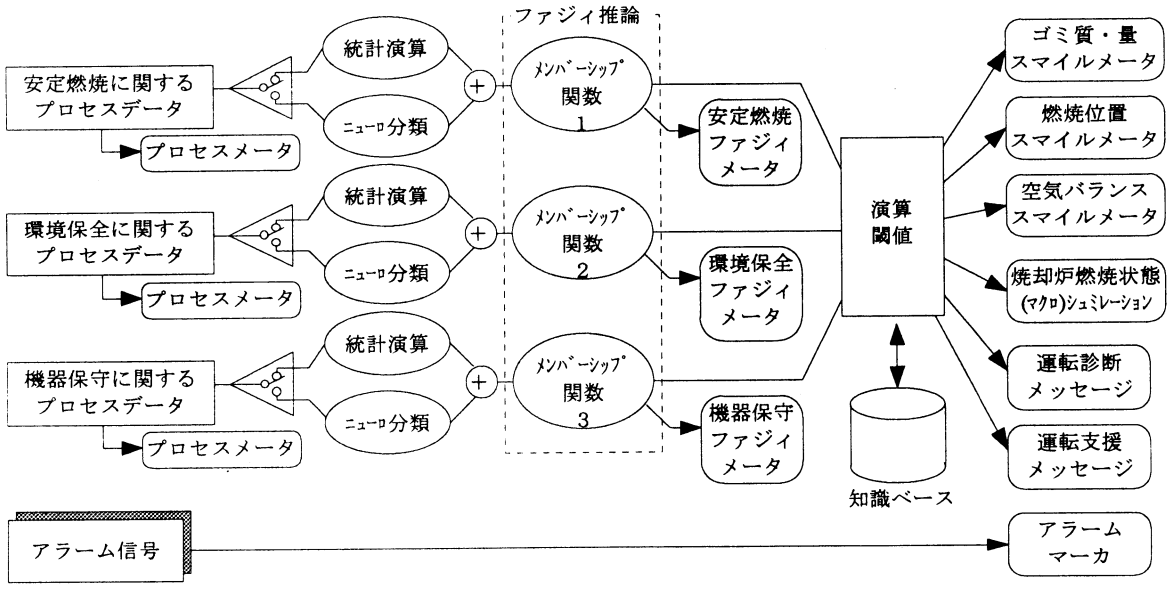


図 5. 運転診断データフロー図

システムのデータフロー図を図５に示す。制御装置側から取り込んだプロセスデータに対し前処理で「統計演算」あるいは「ニューラルネット」をスイッチで選択し、データの整理分類を行っている。このため、後処理のファジィ推論をより効果的なものとしている。

5.結言

天災が必ず起こるように，機械も必ず故障する。そのための安全対策は重要であるが完璧のものは不可能である。我々技術者は常にこの事を肝に銘じておかなければならない。異常時の大量の情報はかえって状況を混乱させ判断を遅らせることになる。その意図に反して情報の多様性が増すからである。とくに緊急時、異常時、人間は冷静さを失う。多くの情報は問題を複雑化させ普段、考えられないような二次的なミスを連鎖的に繰り返すことにもなる。ここには情報の絞り込みが必要であり，異種の情報の統合化が必要となる。天災の後の人災を最小限に押さえるようなヒューマンウエアがとくに必要となる。また、運転員に疎外感を与えるようなMMIではなく、納得感や満足感の伴うMMIが重要である。そのためにはグラフィック表示にも運転を飽きさせない工夫が必要であろう。今回，開発した診断システムはこのような観点からファジィメータ、スマイルメータ，燃焼状態アニメーションと，決してゲーム化に走ることなく運転そのものの面白味を追求したものである。今後さらに、このシステムを発展させ、より人間らしいシステムをニューロ、カオス、GA等を無理なく組み込んで応用改良していくつもりである。「人間らしい」、「人にやさしい」言葉の表現は違っても、この事はザデー教授の言われるSoft Comupitingの目指す目標の一つであろう。プラント制御に限らずロボット制御、あるいはシミュレーションと世の中のありとあらゆるものが新しい価値観を求めて変革しつつある。従来型の数式制御と知的なアドバンスト制御との棲み分け、協調が重要である。脳の働きに言い換えれば、緻密な左脳と感性の右脳との整合性を取りながら、どのように目的を達成していくかが今後のAIの課題となるだろう。

こうした背景の中で、我々プラントメーカが目指すのは、決して、人間自身のコピーを創りあげることではなく、人間と機械が一体化したような相互が信頼しあい協調しあう知的システム創りである。一方では企業として、エネルギー、労力等を念頭にコストパーフォマンスの高い製品作りを目指さなければならない。この意味では、ファジィは最適な手法の一つであると言える。今後も「人にやさしいシステム創り」を目指しファジィを応用した研究開発に邁進したいと考えている。

参考文献

1）ごみ焼却プラントの自動化の現状と将来展望　吉田、白水 1992 日立造船技報 第53巻 2号 p45～50

2）画像処理を組み込んだファジィ自動燃焼制御とファジィシミュレーション 藤吉、服部ほか 1993 人工知能学会研究会資料

3）プロセス制御分野におけるファジィ制御の意義と役割 伊藤 修 1995 日本ファジィ学会誌 Vol7,No1 Page19～34

連絡先
〒５５１大阪市大正区船町２丁目２番１１号
日立造船株式会社　技術研究所
藤吉　誠
TEL 06 - 551 - 9472
FAX 06 - 551 - 9876

FA4-1

ファジィ理論に基づく財務分析エキスパートシステムの一研究

A Study of Financial Analysis Expert System Based on Fuzzy Theory

金子　隆臣*　○森川　大昭*　泉　めぐみ　クリスチーナ**　矢野　幸重**
Takaomi Kaneko　Hiroaki Morikawa　Cristina Megumi Izumi　Yukishige Yano

*九州東海大学工学部情報システム工学科
Kyusyu Toukai University

**国際協力事業団上級研修員
Japan International Cooperation Agency

Abstract: The expert system performs a set of simulations that incorporate the aspects of knowledge refinement and qualitative simulations under some company cases, applying series of refinement rules for the parameters of the financial knowledge base.

This paper describes an expert system that integrates different sort of expertise for financial management consultation: the quantitative - qualitative financial indices, their relationship equations represented by knowledge production rules using a Fuzzy Sets Theory. The integrated inference engine performance and efficiency are depicted.

１．はじめに

多くの財務分析システムや意思決定支援システムは、会計上のデータを単なる数値として処理し、経営成績及び、財務状態の分析・評価を行っている。しかし、この方法では、単に統計的に数字を処理しているため、財務データの全体像を把握しながら総合的な処理・評価を下すことがかなり難しいものになっている。そこで本研究では、企業の財務分析を行なう場合、各評価要素の値を単なる数字として捉えるのではなく、グラフなどの視覚的な表現方法によりデータをファジィ理論を応用して形状的に処理し総合的に評価するエキスパートシステムの構築を試みる。

２．視覚的財務分析法の試み

一般的な財務分析システムは、個々の財務データや経営指標を単なる数字として把握しながら、企業の経営成績及び、財務状態の総合評価を数字的、又は言語的な形で表現する方法を行っている。しかし、このように個々のデータや指標を単なる数字として捉えることによって企業の経営成績や財務状態の全体像を把握しようとする方法では、企業の全体像を理解するにはかなりの熟練を要し、困難な作業である。

そこで本研究では、グラフを利用し、視覚的に各要素間の関係を判然とさせることにより、経営成績や財務状態の本質や全体像を、大まかではあるが、総合的に把握することができるようにするために各指標を単なる数字としてではなく、グラフなどによって数字データを視覚的に表現する方法を活用した総合的な財務状態の評価システムの構築を試みる。けだし、個々の数字データや指標を単なる数字として羅列する方法に比べ容易に総合的評価を下せると考えられるからである。

３．ファジィ理論の財務分析への応用

３．１　ファジィ理論の応用

ファジィ理論は、人間の行動、認識などに関する確定しにくい情報を解析し、意思決定を行う推論であり、制御やＯＲ等のエンジニアリングの分野に加えて、近年、経営者等のノンエンジニアリングの分野にも広く応用されるようになってきつつある。ファジィ理論に基づくファジィ理論は、人間の思考過程や感情表現などの定式化が難しい現象の解析やモデルの作成や分析に適用される。

分析にあたって意思決定を下す際、客観的な財務判断資料やデータ、情報を利用して、少しでも不確実性を減らして最終的判断を有利に導くことは、企業活動ならずとも今日的な課題である。特に、企業の経営活動の成果を判断する財務分析においては、意外と不確定要因が多いので、そこに客観的な指針や手法を導入できれば、財務分析にあたって有用なものとなると考えられる。そこで、我々は、企業の財務分析、さらに、それによる総合評価などのプロセス全般に、ファジィ推論を応用して、財務診断に有効な意思決定評価モデルの構築を試みると共に、現実の財務分析における意思決定に際しての適用事項を通して、その実際的な応用例を述べる。

３．２　ファジィ推論の意義

企業の財務分析は、多種多様な不確定要素・要因や人間の‘あいまい’な認識や判断などによる推論ルールにより行われていると考えられてる。これまで行われてきた非ファジィ理論を利用した推論方法では、このような意思決定問題を推論・判断した場合、結論として得た結果と、事実として得た結果との間に大きな誤差が発生することが多々ある。それに対して、ファジィ理論は、ファジィ理論をもとに、定式化が難しい‘不確定要素’を多く含む推論問題を客観的に評価・決定する方法であるので、このような不確定要因を含む命題の意思決定支援を目的としたシステムに適用することによって、より誤差の少ないよりリアルな結果を得ることができるものと考えられる。

本稿では、ファジィ命題のメンバシップどうしを直接合成す

る直接法の一つであるマムダニの推論法を使用する。この推論法は、ファジィ推論の推論ルールにあたるファジィ条件命題

If x is A_i and y is B_i then z is C_i eles …… を

$$R(A_i,B_i,:C_i)=(A_1\cap B_1\rightarrow C_1)\cup\cdots\cup(A_n\cap B_n\rightarrow C_n)\quad(i=1\sim n)$$

として置き換え、結論として求める近似的ファジィ命題C'を以下のような式で表す。

$$C'=(A'\cap B')\ \mathrm{OR}\ (A_i,B_i,;C_i)$$

ここでのA_i,B_i,C_iは各企業評価の属性値によるファジィ集合であり、A',B'は企業の各データ、C'は最終的に得られた評価対象の企業の評価（メンバーシップ関数）である。

直接法には、マムダニのほかにザデーの推論法などあるが、マムダニの推論法はファジィ制御などのエンジニアリング分野によく用いられるなど普及率が高いことや、ファジィ集合どうしの関係を直積というシンプルな形で表現していること、またノンエンジニアリング分野への応用という意味からもこの方法を採用する。

４．財務分析エキスパートシステムの構築

４．１　財政状態の把握

まず財務分析システムを構築するにあたって、企業の財政状態を把握するために、いくつかの代表的な財務指標を使い、企業の規模・収益性・生産性・効率性・安定性・流動性及び成長性をそれぞれ評価する。

４．２　企業評価のルール

企業評価のルールは、総合的には３個の属性として、経済力（収益性＋生産性＋効率性）不況抵抗力（安全性＋流動性＋規模）、成長力の三つに分類し、そこでファジィ理論を適用して総合評価する。各要素については、収益性（売上高利益率、売上高販管比率、売上高経常利益率、使用総資本利益率、自己資本利益率、使用総資本経常利益率）、生産性（一人当り売上高、一人当り利益、労働生産性、労働分配率）、効率性（使用総資本回転率、棚卸資産回転率、固定資産回転率、売上債権回転率、買入債務回転率）、安全性（固定長期適合率、自己資産比率、負債比率、固定比率、借入金依存率）、流動性（経常収支比率、流動比率、流動資産回転率、売上債務買入債務比率、当座比率）、規模（売上高、売上総利益、使用総資本、資本金、従業員数）、成長性（増収率、経常増益率、増益率、償却前利益増加率）について、日経経営指標から８８年度より９２年度のコンピュータ各社の値を例としてとる。

４．３　システムのフローチャート

Ｆｉｇ．１に今回我々が試みるシステムのフローチャートを示す。まず、はじめに日経経営指標より３４種類の経営指標を選び、それぞれをグラフ化してその動向を一定のファジィルールのもとで種々のファジィ合成法により合成していき最終的な総合評価を求めることを試みる。

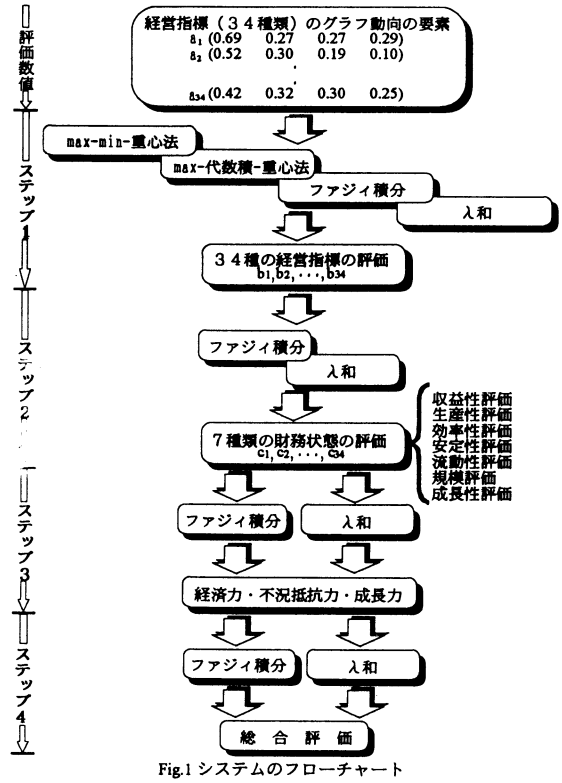


Fig.1 システムのフローチャート

５．　今後の課題

今後の課題として、実際の財務分析にあたって、真に役に立つものに仕上げるためには、単に財務的な分析のみに留まらず、もっとマクロ的な視点から総合的な企業の実態・状況を捉えて分析することが必要であると考えられる。そのためには、青山学院大学の辻正重氏らが提案されているように、企業の基礎的資源である人、もの、金、情報を評価する項目として、資源力（人的能力、財務力、情報力、設備力）、機能力（販売力、製造力、商品力、研究開発力）、経営展開力（多角化力、海外戦略力、組織化）等の総合力を考慮した上で総合的に企業を評価できるようなシステムを構築することが必要であろう。そのためには、将来、我々としてもまさにこういった諸分野にまでファジィ理論を広げて行きたいと思っている。さらにまた、これも今後の課題となろうが、全ての業種に対応できるような財務分析システムにすることも必要である。また今回は、分析型のエキスパートシステムを構築することを試みたのであるが、将来は企業の財務分析は、分析・診断だけにとどまらず、分析後の具体的な改善点を専門的立場から意見してくれるような意思決定支援システムを構築することが必要であると考えられる。

参考文献

1) 青山修、飯倉修三、山上達人著「現代の財務分析」（株）有斐閣
2) 定方繁男著「経営分析概論」（株）同文舘
3) 柴谷共次郎、木下照蔵著「経営分析－基礎と実践改訂版」（有）森山書店、１９８５年
4) 松本政男、青木茂男著「最新経営分析」千倉書房、１９８４年
5) 和田木松太郎著「財務管理」（株）泉文堂、１９７９年
6) 西澤修著「財務管理」（株）泉文堂、１９８４年
7) 青木茂男著「現代企業診断全集（第三巻）財務診断」（株）ビジネス出版社、１９８４年
8) サンワ・等松青木監査法人著「企業診断・評価の実務－財務調査の方法とその活用」（株）中央経済社、１９８８年
9) 村松司叙著「財務管理入門」（株）同文社、１９８４年
10) 近畿情報技術士会編「エキスパートシステム入門」（株）電波新聞、１９８９年
11) 前田哲司著「日経経営指標」日本経済新聞社、１９９２年
12) 小松　宏著「新経営情報システム編」白桃書房、pp.181-182、１９９１年

FA4-2

ファジィ指向型囲碁システム FOG
FOG — Fuzzy Oriented GO System —

横川 壽彦
Toshihiko Yokogawa
帝京平成大学
Teikyo Heisei University

西野 順二
Junji Nishino
東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

水野 勇一
Yuichi Mizuno
(株) 未来技術研究所
Future Technology Laboratories, Inc.

Abstract — In open game or beginning of middle game of GO, human players use vague GO-oriented concepts like "Atsumi" to explain the situations, to decide the strategy, and to do the next move. In this paper, we propose Fuzzy Oriented Go System, FOG, which is made to make such strategic decision in GO. FOG is programmed by C++ language on X11R5 window system. FOG has two parts, the Elementary GO System to and Fuzzy Orientation Engine. The former makes elementary data structures with various information of GO; the latter does strategic decision making using fuzzy rules. These two parts communicate each other to decide the next move using GO oriented concepts.

1. はじめに

チェスをはじめとするゲームは、人工知能の研究分野として精力的に研究されてきた。チェスにおいては、ゲーム木の探索による方法が有効であり、全解探索などの手法によりその実力を大きく向上させた。しかし、囲碁のプログラムにおいては、その探索空間の大きさなどの理由により、現実的には解決できない1)2)。そこで「とにかく人間がうまくやっているのであるからこれを手本にしよう」という発想が生まれ、人間のシミュレーションをするという形での研究もなされてきた3)4)。しかし、これらの思考内容は自然言語でも近似的にしか表現できないものであり、コンピュータ上にその知識を移転するに際してさらに誤差が生じる。したがって、ファジィ理論を応用することにより、人間の思考過程に近い処理への展望が開けるものと考えられる。

上記の背景のもとに、マクロな状況判断に関する研究分野として囲碁を取り上げ、囲碁における状況認識に関して、ファジィ理論の応用可能性、特に戦略的でマクロな局面認識へのファジィ的なアプローチを探ることを目的として研究を進めている。

囲碁の特に序盤から中盤初期の局面判断においては、特に全局的な判断が要求される。その際には、「厚い」「薄い」「重い」「軽い」等の判断を表わす用語が用いられる。そこで、これらの用語を手掛かりとして囲碁の局面を全局的に評価する実験を行っている5)6)。

本稿では、上記の目的で汎用のワークステーション上に実現した実験システムの概要を述べる。実験システムは、ファジィ実行部と基本囲碁システム部の2つからなる。各部は別プロセスとして実現し、プロセス間通信を行いながら着手を決定していく。

2. FOG の概要

2.1 FOGの基本構成

図1に「厚み」認識、戦略的着手選択を行うためのの囲碁実験システム FOG (Fuzzy Oriented Go System) の構成を示す。FOG は2つの主要構成部分からなる。

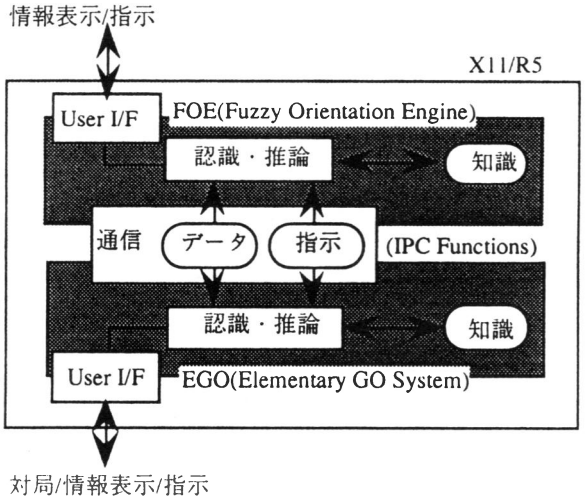


図1. FOGの基本構成

基本囲碁システム部 EGO (Elementary GO System) は、基本的な囲碁のための推論部であり、人間との対局インタフェースと囲碁の各種データを表示するインタフェースを備える。基本的なデータ構造、処理内容、インタフェースなどは、「碁世代」7)8) に基づくものであるが、不必要と判断した機能やデータ構造は実装していない。「厚み」認識に用いる要素を認識するためのデータ構造、処

理をつけ加えるとともに、ファジィエンジンとのインタフェース部を実装し、ファジィエンジンからの命令を受け付けるように構成している。また、ファジィエンジンからの推論結果を表示する表示環境をもうける。

ファジィエンジン部FOE (Fuzzy Orientation Engine) は、ファジィルールを用いて各種の推論を行う。基本囲碁システム部EGOとのインタフェースを持ち、EGOに対して指令を出し、EGO内のデータの受け取り、書き換え、追加などが可能となっている。

FOGは対局モード設定メニューにより、黒、白の各対局者を「FOEを用いて推論するFOG」、「EGOのみで推論する、いいかえるとファジィなしのFOG」、「人間」のいずれかに設定し対局を行うことが可能となっている。また、対局の途中で各種の情報をみるための実験解析モードを備えている。実験解析モードからFOEの推論機能を呼び出して推論を行わせることも可能となっている。

各構成部は別プロセスとして実現しており、両部の間のコミュニケーションは、UNIX System V Release 5 (SVR5) のプロセス間通信（IPC）機能の用いて実現する。インタフェースは文字列ベースのものとして定義しており、ファジィエンジン部を容易に他のものと交換可能である。

実装は、C++言語（実際には、G++ Version 2.5.8）を用いており、X11R5ウィンドウシステム上に実現している。

2.2 基本ループ

FOGの基本的な動きは、以下のようになる（図2）。

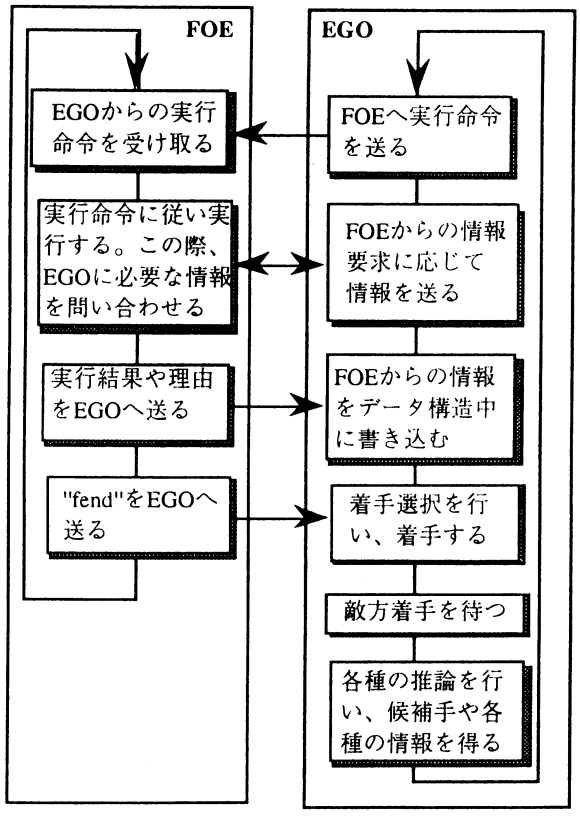


図2. FOGの基本ループ

FOEを用いて対局をする場合のFOGは、以下のように動作する。

ある手が打たれた場合にEGOは、

1) 囲碁の盤面評価データの再構成を行う。着手によって変化したゲーム状況に応じた各状況を推論し、各種の情報を得るとともに、候補手を出す。
2) FOEに対して、ファジィの推論を行うように通信する。
3) FOEからの各種の指示に応じてEGO内のデータを送る。
4) FOEからの推論結果を受けてEGO内のデータを書き換えるなどの処理を行う。これによって、候補手にファジィ評価値がセットされる。
5) FOEの処理終了の通信を受けて、処理を続行し、ファジィ評価値を含めた形で候補手の評価を行い、着手を決定する。
6) 相手方の着手を待つ。（FOG対FOGの対局の場合は、次の敵方の着手もまた、このループに従って推論する。）

一方FOEは、

1) EGOからの実行要求の通信が来るのを待っており、通信を受け取ると処理を開始する。
2) ファジィルールなどを用いて推論を行う。この際、必要に応じて、処理に用いる情報を送るようにEGOに指令を送り、必要な情報を得る。
3) 推論結果の候補手、候補手優先度の変更などの情報をEGOに送る。
4) 処理終了の通信をEGOに送り、EGOからの次の指示を待つ。

2.3 EGOのデータ構造、処理

EGOのデータ構造は、「碁世代」7)8)で用いられている意味付け、名称を援用し、「厚み」認識のためのデータ構造などを新たに付与した。囲碁の局面認識の処理などは、C++言語のクラスオブジェクトとして実現した。

今回、「厚み」認識のために新たに付与したデータ構造、処理について簡単に述べる。

2.3.1 領域データ構造

「厚み」認識の対象となる辺の領域を表現するために領域データ構造のクラスを導入した。領域は、石群間の辺の領域に現在は限っている。領域データ構造は、領域の範囲、領域における黒、白のエネルギー、領域の両側の石群へのポインタなどを持っている。

2.3.2 「石の強さ」認識のための要素

石群のデータ構造中に、石の強さ認識のための各種情報のためのデータ構造と、それらの認識処理を追加した。追加されたデータ構造は、石の強さ認識のための領域の広さ、群の外壁の連結強度、群の盤端からの距離、石群の外壁のダメ数などがある。同時に、近くにある別の石群からの影響力を見るために、近隣群を認識するようにした。そのためのデータ構造、処理も追加している。

2.3.3 候補手のファジィ評価値

各候補手には、元の評価値の他にFOEの推論結果から得られる評価値を入れるファジィ評価値のデータ構造を設けた。

着手決定では、ファジィ評価値は他の評価値と加算されもっとも高い評価値となる候補手が選択される。

2.3.4 実験解析モードの表示用データ構造

FOEを用いた推論結果の詳細を碁盤と対応させてみるために、群のクラスの中に、石の強さのファジィ表現および判断理由を、また、領域のクラスの中に、厚み及び重要度のファジィ表現およびそれらの判断理由を保存するためのデータ領域を設けた。これらは、実験解析モードの中で表示することが可能である。

2.3.5 EGOとFOEの間のインタフェース

FOE－EGO間のインタフェースは、UNIX SVR5のIPC機能を利用して実現する。インタフェースは、文字列ベースとする。これは、容易に他のファジィエンジンと入れ替えることができるようにするためである。

たとえば、"get(ro)" という命令がFOEから送られると、"OK(get=ro=19)" という形で情報を送り返す。命令には、情報のやりとりのための命令、碁盤イメージを書き換える命令、情報ウィンドウへの情報の表示の命令などがある6)。

2.4 FOEの処理

FOEは、

1) 石の強さを認識するルーティン、
2) 石の厚みを認識するルーティン、
3) 領域の重要性を認識するルーティン、
4) 重要性のファジィ集合を評価値へマッピングするルーティン、

に大きく分かれている。各ルーティンでは、必要な情報をEGOから取り出した後に処理を行い、その結果をEGOへ送る。対局中は上記の4処理を順に行う。実験解析モードでは、各処理を個別に起動することも可能である。

3. 「厚み」と重要度の認識

「厚み」は、言語表現される囲碁の概念の中でも重要な価値判断基準として用いられる用語である。形容詞で「厚い」という形でも用いられ、たとえば、以下のように定義される9)。

「厚い」：一団の石が強い形をしている状態、あるいは外部に対して強い影響力を持つ状態を示し、自分の領域（「地」）を作る前段階を示す。

「厚み」の認識に関しては、石の強さと影響力の大きさの2要素でそれを表現する方法を提案した5)6)。以下にその方法を簡単に説明する。

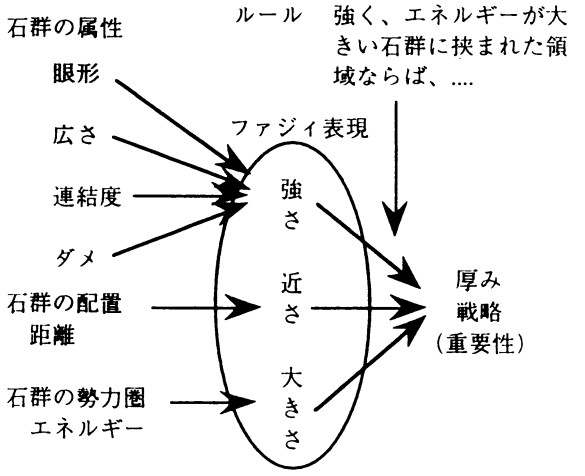


図3. 厚み、重要度認識の概要

石群の属性を用いて石の強さをファジィ表現する。石群の配置を用いる距離、勢力の大きさも同様にファジィ表現する。これを用いて、言語表現された「厚み」判断や重要度判断のルールとの適合度の計算を行う（図3）。

石の強さは、一つのグループであると認識した石群の眼形、地の大きさ、つながりの強さ、ダメの数などから判断され、[0,1] 区間のファジィ数として表現する。

影響力の大きさは、影響力の源となる石から遠ければ遠いほど小さな値になるようなエネルギーを定めて表現する。

上記の石の強さ、エネルギーの大きさを用いて、石群間の領域の「厚み」を言語表現可能なルールとして表現する。このルールの条件部と上記で認識した石の強さ、エネルギーの大きさをマッチングすることにより領域の「厚み」を表現する。ルールの帰結部は、4つの要素(厚い、中くらい、薄い、堅い）で表現されるファジィ集合である。

さらに、「厚み」算出に用いた要素の他に、領域の両側の石群間の距離の大きさを利用して各領域の重要度を算出する。重要度は、3要素（重要、中くらい、重要でない）で表現されるファジィ集合とする。

以下、ある局面においてどのように推論が進められるかの例を実験解析モードの表示を用いて示す。

まず、石の強さの認識が起動される。たとえば、数字1で示される群は、0.29を中心値としたファジィ数となり、（0.11/strong +0.73/middle +0.69/weak）となる（図4）。これらのメンバシップ値が「厚み」や重要度認識ルールにおいて用いられる。

次に領域の厚みを認識する処理が起動される。たとえば、数字4で示される領域では、白、黒の厚みは、以下のようになる（図5）。

黒：（0.09/厚い+0.16/中くらい+0.18/薄い+0.10/堅い）
白：（0.08/厚い+0.16/中くらい+0.18/薄い+0.04/堅い）

次に領域の重要度が認識される。たとえば、数字4で示される領域では、重要度は、（0.58/重要+0.22/中くらい+0.07/重要でない）となる（図6）。

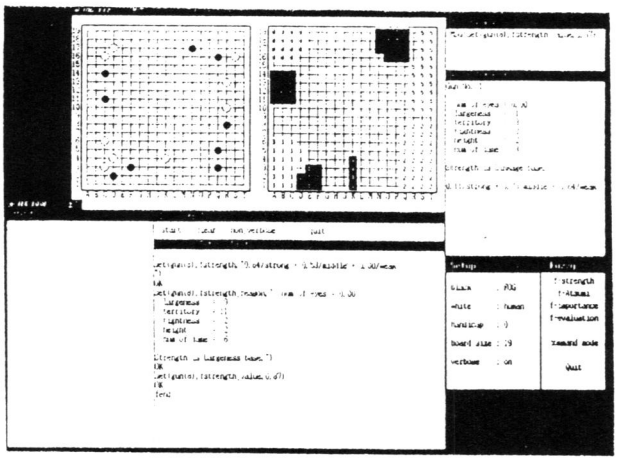


図4. 石の強さの認識結果

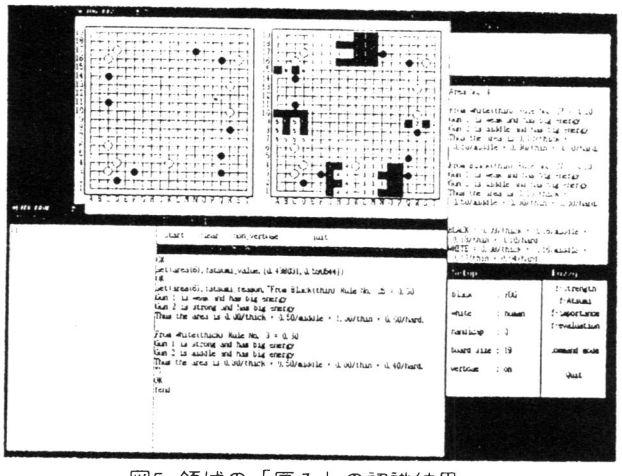


図5. 領域の「厚み」の認識結果

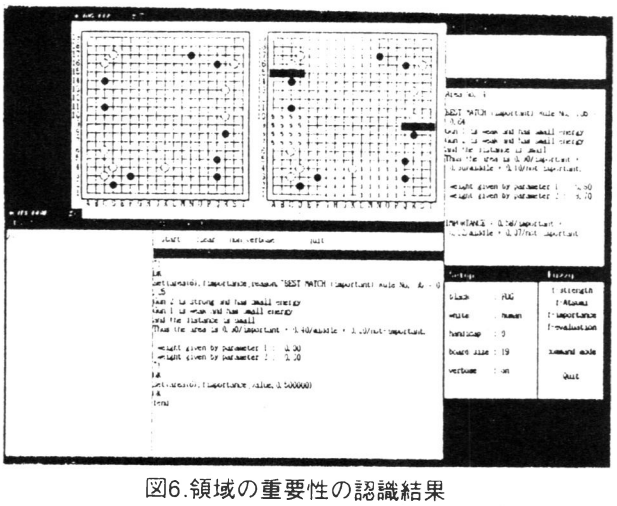


図6.領域の重要性の認識結果

最後に重要度のファジィ集合が評価値へマッピングされ、ファジィ評価値としてEGOに送られる。これが着手決定の際の評価値計算の際に用いられる。

4. おわりに

FOGは、基本的な囲碁の推論をする基本囲碁システムEGOとファジィ的な推論を行うファジィエンジンFOEからなり、互いにプロセス間通信を通じて情報交換を行いながら着手決定を行う。また、このためのインタフェースは文字列ベースのものとして実現したので、他のファジィ推論システムなどから利用することも容易である。

現在、FOEは、序盤から中盤にかけての特に辺領域の「厚み」や重要性を認識するための仕組みを実装したものであり、基本的な動作を確認した。

今後は、より多くの例題を試してFOE部における強さの認識を改良していく。また、「厚み」や重要性の認識ルールを改良していく予定である。

また、現在は序盤から中盤の辺領域に限定している認識範囲を広げ、中央領域や中盤以降の認識も行うようにすること、非ファジィの評価値との効果的な融合なども今後の課題である。

参考文献

1) 実近憲昭. ゲームとＡＩ. 人工知能学会誌, Vol.5, No.5, pp.527-537, 1990.

2) C. M. Hamann. Chronologie der programmierung des japanishcen brettspiels go - eine herausforderung an die kuenstiliche intelligenz. Angew Inf, Vol. 27, No.12, pp.501-510, 1985.

3) 実近憲昭. 囲碁のコンピュータ化. BIT, Vol. 20, No. 7, pp.35-43, 1988.

4) THEMSKY. ゲームが強くなるために. BIT, Vol. 21, No. 9, pp.68-76, 1988.

5) 横川壽彦. 囲碁アルゴリズムにおけるファジィ理論の利用. 第９回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.505-508, 1993.

6) 横川壽彦.マクロな思考と判断　～囲碁における局面理解～, 技術研究組合国際ファジィ工学研究所(編)　ファジィ思考による知的情報処理, コンピュータエージ社, pp.289-330, 1995..

7) 実近憲昭, 清慎一, 赤尾杉隆, 瀧和男, 吉川貞行, 吉岡勉, 村沢好信, 内田俊一, 沖廣明, 大島正行, 小木曽督, 水野勇一, 坂本淳. 囲碁システム「碁世代」の仕様. ICOT 研究報告 TR-719, 1991.

8) 清慎一, 実近憲昭, 赤尾杉隆. 棋士システム「碁世代」. ICOT 研究報告 TR-837, 1993.

9) Richard Bozulich (eds.) The Go Player's Almanac. The Ishi Press, 1992.

連絡先：横川　壽彦

〒290-01　市原市潤井戸字大谷 2289023

帝京平成大学　情報学部　文化情報学科

TEL: 0436-74-5511　　FAX: 0436-74-3287

Email: yokogawa@ci.thu.ac.jp

FA4-3

ファジィ・カラーネーミングシステム

Fuzzy Color Naming System

高橋和宏　○朝倉大輔　菅野直敏
Kazuhiro Takahashi　○Daisuke Asakura　Naotoshi Sugano

玉川大学工学部
Faculty of Engineering, Tamagawa University

Abstract: Human eye can skillfully distinguish a large number of colors. People can also present color names based on subjective expression for a color easily. However it is difficult to present color names objectively. Therefore we considered a fuzzy expert system which the color can be expressed in adjective words. This fuzzy color naming system can translate from a color spectrum as the input to color names as the output by using the conversion of the three primary colors (R:red, G:green, B:blue) system into the hue (H:hue, L:lightness, S:saturation) system. The membership functions are applied for the hue angle, the lightness, and the saturation.

はじめに

我々の目で見て判断できる色彩は一般に７５０万とも１０００万とも言われている。このように多種多様な色彩を我々の目は巧みにとらえて判断することができる。また「これは何色か」と聞かれたとき自分の知っている範囲で簡単に表現することができる。しかし、色彩名を客観的に表現することは難しい。そこで、いろいろな色を形容詞を用いて簡単に表現できるファジィ・エキスパートシステムを考案した。実際には任意の色スペクトルから色表示と色彩名を表現できるファジィ・カラーネーミングシステムを構築した。

方法と結果

色は光の波長だけでは定まらず、一般に色相（単色光の波長に相当するもの）、彩度（あざやかさ即ち白みを帯びていない度合）および明度

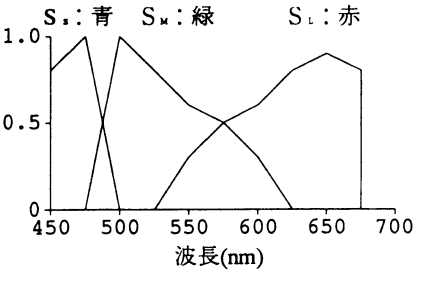
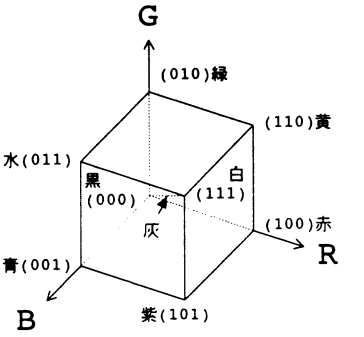


図1　長中短波長スペクトル



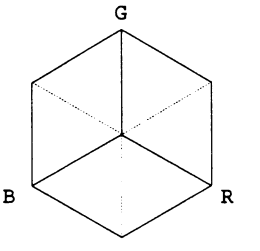


図2　三原色系ＲＧＢ表示

ある色のスペクトルX_1，X_2（図5）に対してＲＧＢの値からＨＬＳの値を算出すると

（ＲＧＢ）：X_1（1.00，0.99，0.41）
X_2（0.73，0.83，0.49）

↓

（ＨＬＳ）：X_1（59.2，0.64，0.56）
X_2（77.7，0.66，0.26）

のようになる。この値からＨＬＳの各ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数（図6）に代入すると、Ｈのﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数で最大を示すものを色名とし、最小を示すものを修飾語とした。また、その値（h_{min}）を

$0 < h_{min} < 0.2$の時“やや”
$0.2 \leqq h_{min} < 0.3$の時“－”（無修飾）
$0.3 \leqq h_{min}$の時“かなり”

と場合分けすることにより修飾語を変えた。ＬとＳのﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数は、Ｈが一次元的であったのに対し、Ｌを縦軸、Ｓを横軸にし、二次元的に考え双方の関係により修飾語を選ぶ（図７）。この修飾語の表はJISの規格を基にし作成した。

そこで、X_1、X_2のＨＬＳ値を代入すると、Ｈのﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数によりX_1は「＊＊＊黄」とX_2は「かなり黄味の＊＊＊黄緑」となり、Ｌ、Ｓのﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数によりX_1は「つよい」がX_2は「にぶい」が選ばれる。これらを組み合わせると

X_1：「つよい黄」
X_2：「かなり黄味のにぶい黄緑」

と表現される。

まとめ

ＲＧＢの色スペクトルがかなりあいまいなものであるにもかかわらず、系統色名という色のようすを示す組み立てた色名による適当な表現ができたと思う。

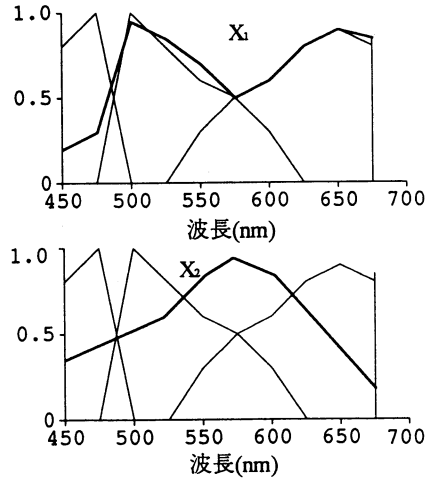


図5　ある色のスペクトルX_1、X_2

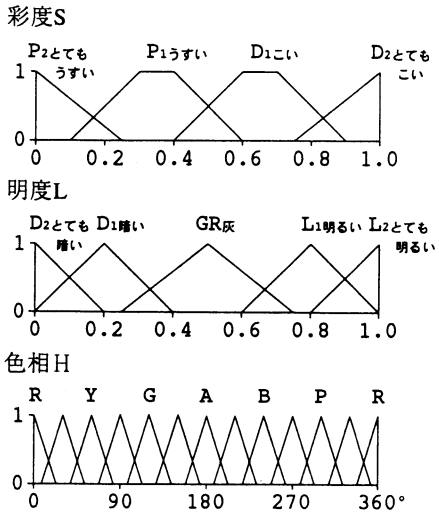


図6　ＨＬＳのメンバーシップ関数

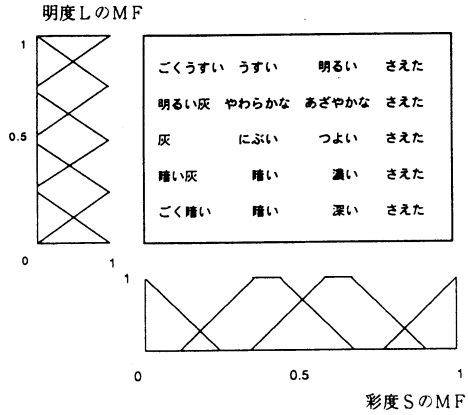


図7　明度Ｌ、彩度Ｓの修飾語

（明るさ即ち光の強弱）の三要素によって規定される。

まず、Kelly(1943)の提唱した色名と主波長の関係とBoyntonとGordon(1965)の色スペクトルに基づき長波長S_L、中波長S_M、短波長S_Sの3つの色スペクトルを三原色系（加法混色）の赤（R）緑（G）青（B）とした。（図1）。ここで図2に色立体を示す。色の三原色であるRGBをそれぞれの軸にもち、0～1の範囲で変化する。これらRGBの値により色が表現できる。

任意スペクトルXが入力され、それから、RGBの値を求める過程として、図3に示すような各スペクトルをファジィ集合と考える。S_LとX、S_MとX、S_SとXの各積集合をX_L、X_M、X_Sとし、これらの集合の面積比で計算する。

R＝X_Lの面積／S_Lの面積

G＝X_Mの面積／S_Mの面積

B＝X_Sの面積／S_Sの面積

次に三原色系RGBを色相角度H、明度L、彩度Sという色相系HLS系（図4）に変換する（平林，1992）。先の三原色系の白－黒軸上より見るとできる正六角形を円に拡張し、その円を基に色相系を形成する。色相系では、2つの円錐の底面を合わせた空間で表され、この内にすべての色が点在する。ここで、Hは円の角度で0～360°の値で指定する。赤色が0°、黄色が60°、緑色が120°、水色が180°、青色が240°、紫色が300°、そして360°で再び赤色に戻る。Lは、円の中心を貫く軸で0～1の実数値で指定する。0側が暗く、0.5が灰色、1側が明るい。0～0.5側は黒を加えた状態、0.5～1側は白を加えた状態、0.5はどちらも加えない状態である。Sは円の半径で0～1の実数値で指定する。0側が薄く、1側が濃い。特に、0の点が無彩色であり、1までの値を持つときは有彩色となる。

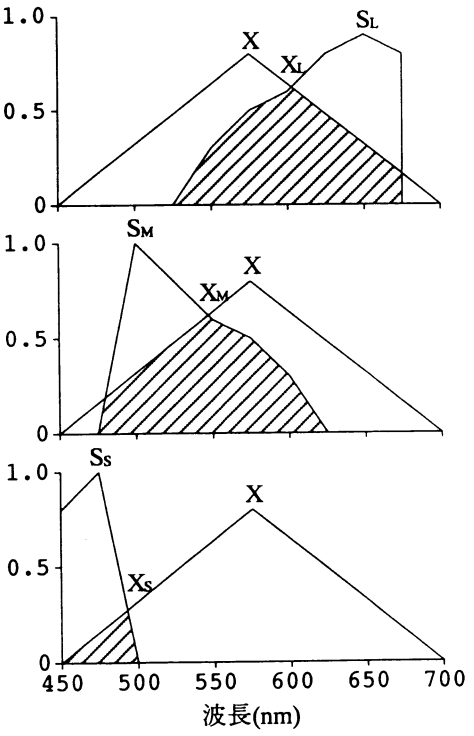


図3　RGBの算出法

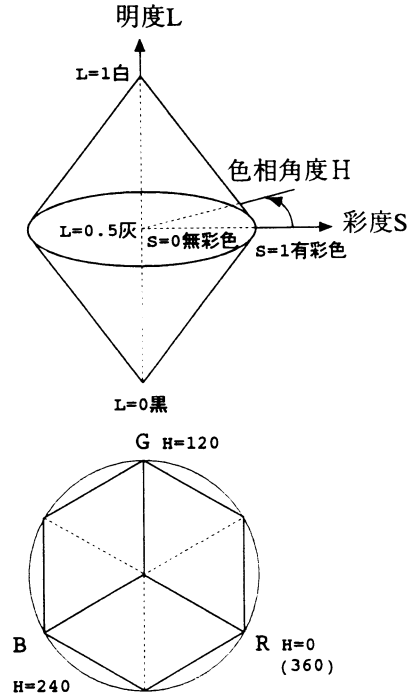


図4　色相系HLS表示

たとえば、X_1では慣用色名の「レモン色」のように見える色を「つよい黄」と表現し、X_2では表現に幅を持たせることが可能となった。

また、本システムでの任意スペクトルは簡単なものを用いたがどんなに複雑なものであっても入力できる点にも特徴がある。

今後は、色を相手に示したり、伝えたりするには慣用色名の方がわかりやすい場合が多いので、高橋と菅野(1993)のファジィ・エキスパートシステムの変更で慣用色名を表現できるようにしたい。

参考文献

Kelly, K. L (1943) : Color designations for lights.
J. Opt. Soc. Am. 33, 627-632

Boynton, R. M., Gordon, J. (1965) : Bezold-Brucke hue shift measured by color-naming technique.
J. Opt. Soc. Am. 55, 78-86

平林雅英 (1992) : C言語による最新プログラム事典. 技術評論社

川上元郎 (1992) : 色のおはなし.
日本規格協会

日本色彩研究所編 (1993) : これからの色彩計画. 日本規格協会

高橋、菅野 (1993) : 色彩感覚に関するエキスパートシステム.
第9回ﾌｧｼﾞｨシステムシンポジウム講演論文集, pp. 377-380

朝倉、高橋、菅野 (1995) : ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑ.
ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ・ﾌｧｼﾞｨ研究会第5回ﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ講演論文集, pp. 120-121

謝辞

本研究を進めるにあたり有益なご助言を頂いた本学の中田勝啓教授、菅野充教授に深く敬意を表します。

連絡先

〒194　東京都町田市玉川学園6－1－1
玉川大学工学部電子工学科
菅野直敏
TEL:0427-39-8402(直通)
FAX:0427-39-8858(共通)

FA4-4

状況に基づいた囲碁盤面と戦略の言語表現について
A verbal GO game model based on the Context of Situation

西野順二　　菅野道夫
Nishino Junji　　Sugeno Michio

東京工業大学 システム科学専攻
Department of Systems science Tokyo Institute of Technology

Abstract : GO game does not have complex rules. But there is no strong computer player, because of its large searching space. We introduce a concept of the linguistic information processing (LIP) which is a computing method using highly abstraction. The key point of LIP is a combination of fuzzy variables and the context of the situation which is a concept of systemic functional linguistic theory. A fuzzy set indicates a meaning of a term. The context of the situation give a structure of meanings. In this paper, A verbal model of situations and strategies in GO game are shown.

1　はじめに

最近、ファジィ集合と言語の積極的な関係についての研究がなされている。本稿はファジィ集合の言語の表現を情報処理に用いる枠組に関して考察する。簡単にはファジィ集合と言語に基づく情報処理はファジィ集合と機能文法の融合によるといえる。そのさい、ファジィ集合は言語の意味のあいまいさを表現するために使われ、意味の構造については機能文法を利用する [3. 2]。

ここでは、囲碁における「全局の判断」のようなマクロな情報処理を行なう枠組についての実例題を示そう。

2　ファジィ集合と言語に基づく情報処理

言語に基づく情報処理 [4] とは計算機内での情報の扱いを言語で行なおうというものである。ここでいう言語では自然言語ではなく計算機上での抽象化された記号という意味である。ただし、その記号は実世界と分離したものではなくてファジィ集合を利用することで現実的な意味を表現したものである。

例：3674 + 1356 を計算機上で扱うために約 4 千足す約千と変換しそのまま処理して合計約 5 千として出力する。

この例のように、言語に基づく情報処理は「厳密さ」をある程度犠牲にして大局的な「正確さ」と「効率」を与えることを目的とする考え方である。

3　囲碁プレイヤー構築上の問題点

囲碁プレイヤーを計算機上で構築する最大の問題は、勝敗を含めた「価値判断」が難しいことである。囲碁の勝敗は自石で囲った領域の大きさで決定するが、領域が決定する以前の状態から最終的な形を予測することは難しくその価値判断がプレイヤーのスキルを表しているといっても過言ではない。

着手に相互影響が無く比較的探索量の少ない最終局面（ヨセ）においての完全な計算モデルが BERLEKAMP によって提案されている。しかし、中盤のように探索空間が広く着手が互いに影響し合うような中で正確な価値判断を行なう方法はさまざまな研究 (文献 [7] 他) があるがまだ確立しておらず、人間のマクロな判断力をファジィ推論によって利用する方法 [1] などが提案されている。

そこで、先に述べたように盤上の状態をファジィ集合を実体として持つ言語的なラベルを利用して言語表現し、またその言語表現をもとに処理を進めやはり言語表現された中間結果である戦略を生成することを試みた。以下そのためのモデルについて説明する。

4　中盤の戦略決定モデル

中盤において、着手決定をするには戦略の決定と戦術的な着手の決定が必要である。戦略とは、いわゆる「石の方向」であり戦術的な着手以前にどの領域に対してどのような目的で着手を考えるかという方針である。

これを実現するために図 1のようなトップダウン型の着手決定モデルを提案する。このシステムは、1）大局的な形勢、状態の判断をし、2）必要な部分についての戦術を考え、3）場合によって読みで正確さを求める　という手順で着手を決定する。

大局的な判断はごく大雑把なグループわけをもとに行なってしまい、その不正確な部分を後から読みなどの精密な手法で保証するという考え方である。大局的な切りわけについては盤上の各格子点へのそれぞれの側からの影響力をもとにグループとしての連結、分離を行なっている。グループ分けした様子を図 3に示す。これはそのまま石があるわけではなく図 2から影響力を算出してそのまま石の形で表示したものである。これらのグループを以降で述べるように言語で表現することで盤面を認識する。

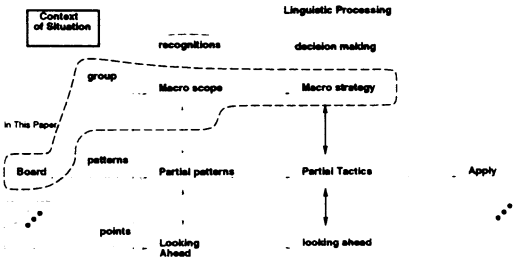


図 1: 中盤のトップダウン着手決定モデル

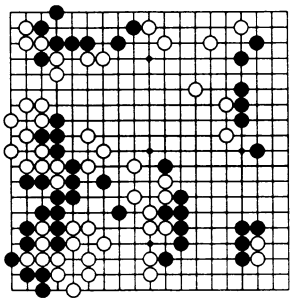


図 2: 元の盤面

5　盤面の言語表現

盤面を認識するということはすなわち物理的な盤面の情報を言語で表現し直すことである。この盤面の認識結果をもとにして戦略策定の手続きにより着手が決定される。例えばグループの位置の言語表現は、システムの持つ言葉のファジィ集合との類似度をとって決定する。システムはデータベース (FSDB:Fuzz Sets DataBase[2]) としてファジィ集合を持っているがその検索に当たっては現在の状況のコンテクストを利用している。

中盤の戦略策定に必要な盤面の表現にはさまざまな方法があるが今回利用した重要と思われる項目と代表的な値は以下のとおりである

- 全体の形勢：互角、優勢、劣勢
- 各グループの特徴：位置、強弱
- グループ間の関係：包囲、攻め合い

これらは大局の認識に必要である。

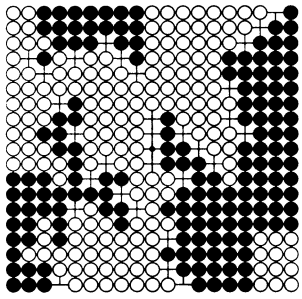


図 3: 大局的なグループわけ

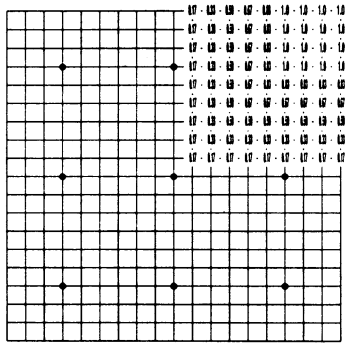


図 4: 「右上：中盤」のファジィ集合

例：「形勢は黒が良く白が勢力を持っている。右上の黒は強く、右辺の白は圧迫され危険である。」

例えば、盤面上の位置の概念は格子点のファジィ集合として表される。中盤における「右上」という位置は図4のように定義している。

6 状況とその影響

盤面、戦略ともにその表現は状況によってその内容が左右される。使われる用語そのものが変化するとともに、同じ用語であっても意味としてのファジィ集合が一意でない。

例えば図 4. 5に示すように「右上」という語の意味は格子点のファジィ集合で与えられるが、これはその状況（この場合は局面）によって変化する。位置に関しては序盤ならば盤面全体が広いためより広がった形となる。

戦略においては、形勢によってその志向が変化し例えば劣勢であれば頑張ることになる。また、対戦相手によっても強気、弱気の違いがある。

7 戦略の言語表現と利用

戦略の策定はファジィプログラム [9] によって行なわれる。プログラムの実行については文献 [8. 5] の方法によっている。

ここで策定される戦略は以下の三つの要素で表現されている。

着手の方面：盤面上の位置
着手の目的：守る／攻める
全局の目的：地／厚み

これらの表現の意味は盤面及び対局に関わる状況によって変化する。

例：決定された戦略：「右下のグループを助ける。隣を取ってしまうか、逃げて右辺とつなげる。全体としては地で先行することを考える。」ここで「右下」や「右辺」などの指す領域の広がりが序盤では大きく、中盤以降は小さくなる。

実際の着手決定はこの戦略をもとにして行なう。具体的には、中盤では目的に合う手をパターンと読みによって探索し、序盤では定石などのパターンのみによって探索する。このばあい、上記のように位置の指す領域が中盤では縮小することによって探索量を減らし精密な読みの負荷を軽減する効果がある。

また「助ける」や「つながる」という動詞もより具体的な手段のファジィ集合であり、図 1に示した戦術決定の際には状況に応じた具体的な手段として解釈される。例えば「助ける」は｛逃げ出す、根拠を持つ、連絡する、、｝のようにいくつかの実現手段を要素として持つファジィ集合である。これらのグレードが状況に基づいて変化し、より適切な選択が行なわれることをサポートする。

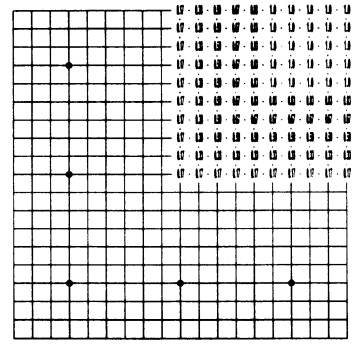


図 5: 「右上：序盤」位置の概念への状況の影響

8 おわりに

本稿では、

- 言語に基づく問題解決
- トップダウン型囲碁着手決定モデル
- 状況に基づく言語表現

について説明した。この中で言語に基づく情報処理（問題解決）は人間の大局的な認識が有効な問題、特に囲碁のような計算量的困難さをもつ問題に対して有効であることを示した。また、言語というマクロ認識のための道具をより有効に利用するためにトップダウン型の囲碁着手決定モデルを提案した。

今後の課題として、このような考え方を他の問題にも適用するために、言語として定義されるファジィ集合やその状況との関連などを解析、記述するための簡便な方法の開発が必要である。

参考文献

[1] Yokogawa T. et al. Macroscopic understanding of the game situation in igo. In *FUZZ-IEEE/IFES 95*, 1995.

[2] Nishino J. and Sugeno M. Fuzzy programs based on context of situation. In *FUZZ-IEEE/IFES 95*, 1995.

[3] Ruqaiya Hasan M.A.K.Halliday h. *Language,context, and text: Aspect of language in a social-semiotic perspective (in Japanese translation).* Deakin University Press, Australia. 1985.

[4] Michio SUGENO and Ichiro KOBAYASHI. An approach to social system simulation based on linguistic information an application to the forecast of foreign exchange rate changes (in japanese). *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 701 719, 1994.

[5] K. Tanaka and M. Mizumoto. Fuzzy programs and their execution. In L. A. Zadeh etc., editor, *Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes*, pp. 41 76, New York US., 1975. Academic Press.

[6] Takahiro YASUKAWA. *A fuzzy-Logic-Based Qualitative Sysytem Modeling.* PhD thesis, Tokyo Institute of Technology, 1994.

[7] 清慎一, 実近 憲昭他. 棋士システム「碁世代」. *ICOT Technical Report*, No. TR-0837, 1993.

[8] 西野, 菅野. ファジィアルゴリズム実行システムの構築と評価. 第九回ファジィシステムシンポジウム講演論文集. pp. 509 512. 日本ファジィ学会, 1993.

[9] 西野, 菅野. 状況に基づく、ファジィプログラム解釈・実行システム faps-2. 第十回ファジィシステムシンポジウム講演論文集. pp. 559 562. 日本ファジィ学会, 1994.

問い合わせ先：〒２２６
横浜市 緑区 長津田町 ４２５９
東京工業大学システム科学専攻
菅野研究室内 西野順二
Tel 045-924-5645
Email: nishino@sys.titech.ac.jp

FA5-1

ウェーブレット解析を用いた脳波による感情識別システムの構築

An Emotion Analyzer for Brain Waves in terms of Wavelet Transform

佐藤　秀樹[†] Hideki SATO　阪井　和男[‡] Kazuo SAKAI　武者　利光[§] Toshimitsu MUSYA　向殿　政男[†] Masao MUKAIDONO

[†]明治大学理工学部情報科学科 Department of Computer Science, Meiji University

[‡]明治大学法学部 School of Law,Meiji University

[§]脳機能研究所 Brain Function Laboratory

Abstract

An emotion analyzer for brain waves are proposed, which clarifys emotional fluctuations in microscopic time-scale. In terms of a wavelet transform of the brain waves, simultaneous analyses with respect to time and frequency are realized in a certain accuracy. And the brain waves are successfully classified into emotional elements such asrelaxation, joy, sadness and anger. It is also expected that the proposed method gives a possible analysis for an instantaneous emotion of as surprise.

1　はじめに

人間の感情は，怒り・悲しみ・喜び・恐怖・驚き・軽蔑などの基準感情要素に分けられる [1, 2]. 脳波 (EEG) から感情要素を分析・定量化する手法には感情スペクトル解析 (Emotion Spectrum Analysis: ESA) がある [1, 2]. 電極間の相関係数をもとにニューラルネットの学習能力を利用して基準感情要素への分類・識別を行う．10電極の入力によって，「リラックス」「喜び」「悲しみ」「怒り」の4つの感情要素の強度を5秒毎に離散的に出力できる．

感情スペクトル解析を他の感情要素，例えば「驚き」などの比較的短時間に表出する感情要素へ応用するためには，5秒より短い時間での識別を可能にする必要がある．

最近，時系列データの周波数成分を時間軸上で解析する手法として，ウェーブレット解析 [3] が注目を集めている．本報告では，ウェーブレット係数の時間変化を2次元位相空間で表現しファジィ的に区分することによって，連続的な感情要素の識別を可能とする新手法を提案する．

2　感情脳波の計測方法

一般に感情の導出は個人差が大きいため困難である．本実験ではイメージトレーニングによって意図的に感情をつくれる技術をもつ人を被験者とすることで安定した感情脳波の計測に成功した．被験者には，怒り，悲しみ，喜び，リラックスの感情を自らつくりだしてもらい，双極導出法を用いて脳波の計測・収集を行った．以下に実験方法をまとめる．(1) 被験者の頭皮上に国際 10/20 法で電極をつける．(2) 被験者にリラックスしてもらうために，実験前後，閉眼，開眼を1—2分ずつ行う．(3) 約3分ずつ「リラックス」「喜び」「悲しみ」「怒り」の4種類の感情を創出してもらう．(4) 被験者に実験中の感情の移行をアンケートする．

3　ウェーブレットによる脳波解析

ここではMeyerのウェーブレット [3] を用いた．これは周波数軸上でコンパクトサポートであるため，周波数軸での局所性が良く，周波数解析に向いている．

リラックス時の感情脳波のウェーブレット解析例を図1に示す．図上部が時系列，図下部はウェーブレット係数の振幅を，基数2の対数周波数を縦軸として図示した．

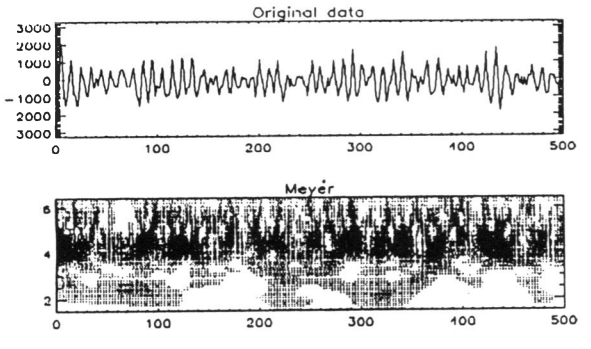


図 1: リラックス時の脳波とウェーブレット振幅．サンプリング周波数は 100Hz，全域で5秒間に相当．

図1の下図を見ると，α波 (12Hz 程度) の周波数領域に帯状のパターンが見られる．他の3つの感情要素とともに特徴を表1にまとめた．

感情要素	電極	特徴
リラックス	O2	α 波がほぼ全域で優勢
喜び	O2	α 波は 1 秒程度しか見られない
悲しみ	O2	α 波が観測されるのは 0.1 秒程度
怒り	P3	θ 波領域がもっとも強く出ている

表 1: 感情脳波のウェーブレット解析の主な特徴. α,β,θ 波の周波数はほぼ 12, 17, 5Hz.

4 感情脳波の識別

前節の濃淡図は，局所的な周波数成分をパターン化しているため，時系列の特徴を視覚的に捉えやすい一方，過剰な情報も含んでいる．感情を識別するには，α,β,θ 波に相当する 3 つの周波数軸上の係数だけで十分である．そこで，α,β,θ 波の成分として，各々 12, 17, 5Hz 近傍のウェーブレット係数だけを取り出し，感情の識別に用いた．

まず，取り出した 3 つの振幅をあらためて α,β,θ と名付ける．これらは互いの相対的な強弱に意味がある．以下では，位相空間として，横軸を $\log_{10}(\alpha/\beta)$ に，縦軸を $\log_{10}(\theta/\beta)$ とした．図 2 には，「リラックス」時の脳波を例にとり，位相空間内に相対振幅 500 サイクル分を図示した．

図 2から「リラックス」時の点の分布は右半分 ($\alpha > \beta$) の $y = x$ より下部 ($\alpha > \theta$) に集中している．

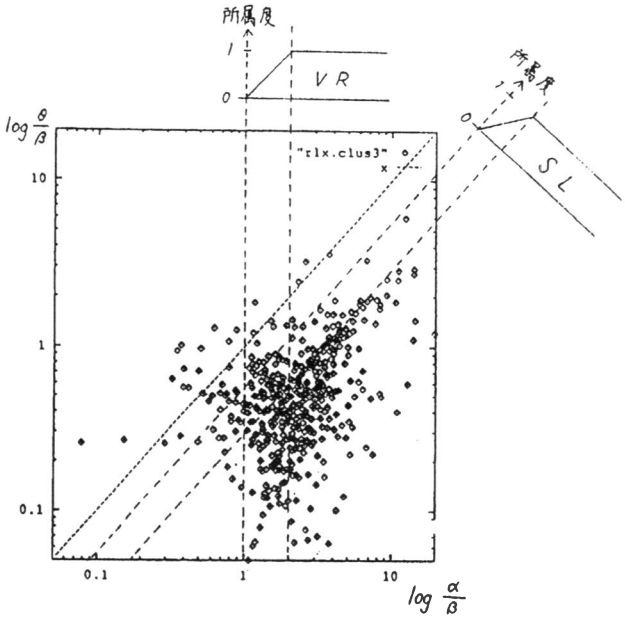


図 2: 「リラックス」時の位相空間表示. 相対振幅 500 サイクル分を表示. ファジィ分割用のメンバーシップ関数を枠外に示す.

同様な位相空間表示を他の 3 つの感情要素に行った結果，上下左右斜めの合計 3 方向に対してそれぞれ Small, Medium, Big に対応するメンバーシップ関数を定義することによって感情要素を使って感情要素を区別できることが分かった (表 2).

感情要素	振幅強度の関係
リラックス	$\alpha > \beta$ and $\alpha > \theta$
喜び	$\alpha \sim \beta$ and $\beta > \theta$
悲しみ	$\alpha \sim \theta$
怒り	$\theta > \alpha$ and $\theta > \beta$

表 2: 感情脳波のウェーブレット振幅間の関係. α,β,θ はそれぞれ対応する周波数のウェーブレット振幅.

位相空間内の点座標は時間とともにサイクル単位で移動する．したがって，各点におけるメンバーシップ関数の所属度を時間順に求め，感情要素に対して時系列として表示すると，感情識別システムを構築できる．

5 まとめ

感情のゆらぎをミクロな時間スケールで表現する方法を与えた．ウェーブレット解析による時間－周波数同時解析能力を生かし，ファジィ分割を用いて感情要素の識別を可能にした．さらに，脳波から 3 周波数を取り出し，相対振幅による 2 次元位相空間に散布図または軌跡として表示する新方法を提案した．これによって，時間順にサンプリング・サイクル毎の感情要素の変動が明らかにされ，「驚き」など瞬間的にしか表出されない感情の識別を可能にすることが期待される．

参考文献

[1] 武者 利光・武者 有仁子, α 波スペクトル解析による感情変化の識別, 日本エム・イー学会, 1994.

[2] 武者 利光, 快適感を計測する, Sut Bulletin, No. 12, pp. 24–25, 東京理科大学出版会, 1994.

[3] 山口 昌哉, ウェーブレットとその応用について, 応用数学, 1991.

連絡先

〒 214-71 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科 システム科学研究室
佐藤 秀樹 (Hideki SATO)
e-mail: hsato@cs.meiji.ac.jp
Tel:044-924-7442 Fax:044-934-7912

FA5-2

情動記憶モデルに関する研究
A Basic Concept of Emotional Memory Model

○吉田　香
○Kaori YOSHIDA

九州工業大学　工学部　電気工学科
Kyushu Institute of Technology

Abstract - We can classify a certain thing or concept into the constructing items in general. As we recognize a thing or concept, it is necessary to differentiate a particular one from others. The purpose of this paper is to introduce a basic concept of the Emotional Memory Model. The proposed model has two strong points as follows; (1) it can be represented by the matrix as a set of arbitrary attributes, (2) the emotional words are represented by real numbers considering how well fit the items of the matrix. The model is a part of the emotional process model. It can be developed to human cognitive process model.

1. Introduction

わたしたち人間の心というものを考えるとき，知・情・意の３つに分類するのが最も伝統的な方法である[1]．現在，知に関する研究が先行しており，心を構成する残りの部分，情とか意とかいったことについては，まだ研究が始まったばかりである．情は，主観的なものでうつろいやすく複雑多様でとらえ難い．

そこで，まず最初に情について心理学的な見地を述べ，次に情動記憶モデルを考える上での基本的なコンセプトに触れ，最後に情動記憶モデルについて述べる．

2. Basic Concept

2.1. What is emotion ?

情動は，人間の心に直接関係するものであり，個々人にとって独特なものであるので，科学的研究や説明は困難である．例えば，１人の人に強烈な情動を引き起こしても，他の人には何の影響も与えないようなこともある．感覚的経験はすべての人によって共有されるのに対して，情動的経験は本来個々人特有のものである．この主観的な経験は，繰り返し経験され観察されるものではないため，情動の科学的研究は困難なのである．

ここで，感情(feeling)とか情動(emotion)とは何かということを考えてみよう．感情とは，快や不快といった心的状態，ある意識的経験といってよいだろう[2]．feelingということばの中には，何かに触れるという感覚の要素が含まれている．その感覚から喚起される快・不快の状態を感情というのである．感情は，このように個人的な意識的過程，経験的作用であり，経験の対象ではなく経験作用そのものを重視するものである．

これに対して情動は，急激に生じ短時間しか持続しない比較的強い感情をいう．情動は主観的な内的経験であるとともに，行動的，運動的な外面反応でもある．emotionということばからもわかるように，運動(motion)と関係が深い．feelingが感覚的であるのに対して，emotionは運動的な側面を持つ，より強烈な感情ということができるであろう．従って，情動は感情の下位概念の１つということになる．

2.2. Analogy and Difference

類似性と相違性という概念は，互いに対立する概念である．しかし，ある任意の概念（事象Ａ，事象Ｂ）が類似しているか相違しているか，いずれを選択するかの判断基準がすでに確立していると考えられる．実際には，様々な事柄に遭遇したときにこのような判断基準が確立されていることは稀であり，どちらかに重点がおかれているような状態であるといえる．

ここでは，次のような立場をとっている．類似性があることは当然とし，どれだけ相違性があるのかを考える．類似性の統合操作が行われた結果，各カテゴリ（集合概念）ごとにそれに対応するprimitiveなものが確立される．そのprimitiveなもの同士にどれほどの相違性があるのかは，その分離条件がはっきりすれば良い．分離条件が満たされているprimitiveな１組が完成すれば，任意なものに対する１つの判定基準が確立する[3]．この判定基準に従えば，任意なものがどのカテゴリに類似・相違しているか明らかになる．

2.3. Memory and Oblivion

任意の概念を認識するには，その概念がどのカテゴリに属するかを判定するために必要な知識をあらかじめ記憶している必要がある[4]．ただし，１つのカテゴリに属する概念の種類は，おびただしい数にのぼるので，膨大な記憶容量が必要となる．実際には，このような記憶容量はいくらあっても足りないだろうと考えられるが，もし仮にこのような記憶が可能であるとしても，その記憶をたどるのに膨大な検索照合の手順を経なければならない．そこで，記憶内容をよく考えてみると，いくつかの基本的な概念の組み合わせと階層的な構造があれば，より効率的な記憶モデルが構成できるのではないかと考えられる．記憶の整理統合を行えば，個々の細かい記憶の大部分は忘れ去られてしまうことになるが，少ない記憶でも高い機能が得られるだけでなく，検索照合の実行も簡単になる．

2.4. Prediction and Creation

実際に獲得するであろう概念は無限に多いはずなので，そのすべてについて学習することは不可能である．従って，新しく入力された概念に関してはいずれの既存の概念とも異なっているはずである．それにもかかわらず，新しく入力された概念に関しても，正当な認識を行わなければならない．すなわち予測である．これは，概念パターンの集合が何らかの尺度によって相違の程度を定量的に測定することができれば可能である．このような構造を持った枠組みを想定して概念空間を構成すれば，未知の事柄について予測したり新しい知識を創造する能力が生み出されるだろうと考えられる．ただし，今回紹介するモデルでは，この域まで達していない．

3. Emotional Memory Model

人間の心の働きは統合的なものであり，人間の感情と行動は１つの枠組みの中に組み込むことが可能である．図１に人間の感情処理の概念図を示す．

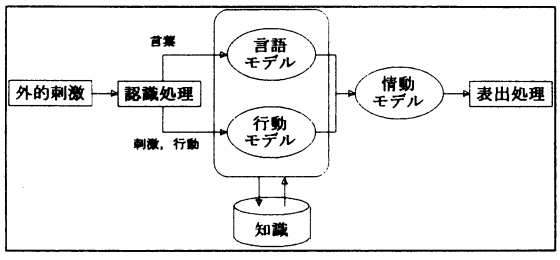


図１：感情処理の概念図

これまで用いてきた「感情を表す単語のイメージコード[5]」では，感情体験の種類と強度は扱われているが，持続時間に関しては全く扱われていない．これに持続時間を導入しようとすると，マトリクス形式の方が都合が良い．そこで，持続時間を考慮に入れた情動マトリクスの作成を試みる．マトリクスの構造には，次のような項目を考えている．

その感情は快（楽しい）か？
快を維持したい，または不快を回避したいか？
あるできごとに起因するものか？
他人に影響を与えるか？
その感情は突然発生したか？
その感情は持続性があるか？
その感情に順応できるか？

4. Conclusion

本論文では，情動記憶のフレームモデルを紹介した．基本的なコンセプトはほぼまとまっているのだが，実際の数理モデルの構築まではまだまだはっきりさせなければならない点が多々ある．今後，情動記憶モデルだけでなく，行動モデル等とも連携した人間の認識モデルに発展させたいと考えている．

5. References

[1] 松山義則，浜治世，感情心理学１感情と情動-理論と臨床-，誠信書房(1974)
[2]伊藤正男，梅本守，山鳥重，小野武年，往住彰文，池田謙一，岩波講座　認知科学６　情動，岩波書店(1994)
[3] Torao YANARU and Kaori YOSHIDA, "Theory for subjective observation concerning vectors derived from frame oriented patterns," Proceedings of the 3rd International Conference of Fuzzy Logic, Neural Nets and Soft Computing, pp. 319-322, (1994)
[4] 大村彰道：訳，GRロフタス，EFロフタス：著，人間の記憶，東京大学出版会(1980)
[5] 白浜成希，動的感情イメージコードと主観観測モデル理論に基づいた感情表現，平成４年度九州工業大学工学部電気工学科卒業論文(1993)

問い合わせ先

〒804　北九州市戸畑区仙水1-1
九州工業大学工学部電気工学科情報工学教室
吉田　香
Phone & Fax ： +81-93-884-3245
E-mail ： kaori@human1.comp.kyutech.ac.jp

FA5-3

主観観測モデル理論に基づいた感情語の処理
An Emotional Processing System Based On The Theory For Subjectve Observation

○ 白濱 成希　　矢鳴 虎夫
○ Naruki SHIRAHAMA　　Torao YANARU
九州工業大学 工学部 電気工学科
Department of Erectric Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract

At first, we show an example of Image Code Table (ICT) concerning Mixed Emotions which are regarded as general emotions in usual life, introduced by R.Plutchik[1], and also show that the values of ICT are produced based on 8 pure emotions. Next, we explain a mechanism of how internal emotion is affected by the inputted sequence of terms containing the mixed emotions, and the mechanism can be realized by application of fuzzy inference. Lastly, we refer to that, depending on the person's nature and his current emotion, dynamic transition of the emotions can be expressed (or drawn) applying the theory for Subjective Observation Model[2].

1. はじめに

ファジイ推論は，一般に定式化が極めて困難な対象のシステム分析やモデル作成に適用すると効果的である．我々は，この研究でファジイ推論を感性情報処理，特に感情を対象にしてシステムを構築した．

今回は「詩」という極めてあいまいな，しかし最も人間的な感性に対して，ファジイ推論でどの程度接近できるか，を主観モデル理論[2]とあわせて，その理論構築の方法とシミュレーション実験を紹介する．そして将来は，感情と理性とが連動する，いわゆる心の問題に対してもファジイ理論によるアプローチの意義が見出されることを期待している．

1. 感情心理学

感情語をどのように表現するかは，参考文献[3][7]において詳述しているのでここでは簡単に説明する．取り扱う感情語は感情心理学におけるR. Plutchik[1]の理論を参考とし，純粋感情という属性を考え，8次元ベクトル形式で表現した．これをイメージコードと呼ぶことにする．そして日常の主な感情語68個に対してイメージコードを設定した．表1にその1例を示す．

表1 イメージコードの例

感情語	喜び	怒り	期待	嫌悪	悲しみ	恐れ	驚き	受容
喜び	74	0	50	-30	-74	0	-50	30

イメージコード$\{\vec{x}_k\}$は，8個の属性を正規直交基底$\{\vec{e}_i\}$のどれかの基底ベクトルとそれぞれ対応させることによって，ベクトル列$\{\vec{x}_k\}$として

$$\vec{x}_k = x_{k1}\vec{e}_1 + x_{k2}\vec{e}_2 + \cdots + x_{k8}\vec{e}_8 ,$$

であらわすことにする．

2 単語の影響による感情変化を与える機構

感情は8つの属性としての内部状態をもって表現する．内部状態を変化(または，遷移)させるものは，ファジイイメージコードを持つ単語入力によって行われる．つまり，ある属性に対して「強度の強い単語が入力されると，その属性の内部状態の強度は，その単語の強度に応じて強められる」といった類のことが，ファジイルールとして客観的に認められるという立場で，各属性ごとに図1のような9個のファジイ推論ルールを設定した．例えばルール6は「現在の内部状態の強度が中間ぐらい(Zero)であり，かつ，入力単語の強度が高ければ(Positive)，新内部状態の強度をやや高い(Zero-Positive)にする」という意味を表している．

Rule 1 if old=N and word=N then new=N
Rule 2 if old=N and word=Z then new=NZ
Rule 3 if old=N and word=P then new=ZP
Rule 4 if old=Z and word=N then new=NZ
Rule 5 if old=Z and word=Z then new=Z
Rule 6 if old=Z and word=P then new=ZP
Rule 7 if old=P and word=N then new=NZ
Rule 8 if old=P and word=Z then new=ZP
Rule 9 if old=P and word=P then new=P

old 旧内部状態, **new** 新内部状態, **word** 次の単語
N=Negative, **Z**=Zero, **P**=Positive
NZ=Negative-Zero, **ZP**=Zero-Positive

図1 感情遷移のFuzzyルール

実際に使用したメンバシップ関数の形は三角形を基本とし，推論部はMamdaniの方法を用いている．

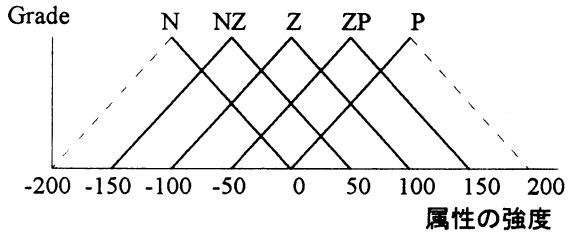


図2　実験に用いたメンバシップ関数

3. 計算機実験

下記の詩[4]を用いて計算機実験を行った.

雪がふる　雪がふる
てのひらに　それを受け
すぐにとけるのを　悲しむ

図3　詩「雪がふる」

まず，この詩の形態素解析がなされたという前提のもとに，下線部の構成単語列に分解する.

次に研究室の学生にアンケートをとって，単語から連想する混合感情を3個以内で選択させる．連想される混合感情はそれぞれ，"雪"に対して「平静，陰気」，以下，"降る"「平静」，"手のひら"「希望，注意深さ」，"受ける"「受容，好奇心」，"溶ける"「予期，感傷」"悲しむ"「悲しみ」となった．おして選ばれた感情の線形結合によって，それぞれのイメージコードを計算した．表2にその線形結合によるイメージコードを示す.

表2　構成単語に割り当てたイメージコード

	構成単語	イメージコード属性の強度							
		喜	怒	期	嫌	悲	恐	驚	受
1	雪	-10	0	5	0	10	0	-5	0
2	降る	30	0	10	-30	-30	0	-10	30
3	手のひら	28	0	60	-30	-28	0	-60	30
4	受ける	0	15	-5	-43	0	-15	5	43
5	溶ける	-17	0	30	-40	17	0	-30	40
6	悲しむ	-68	0	-40	40	68	0	40	-40

表中の"喜","怒","期","嫌","悲","恐","驚","受"は8つの感情の基本属性，喜び，怒り，期待，嫌悪，悲しみ，恐れ，驚き，受容を表わしている．こうして得られたイメージコードを入力として，属性ごとにファジイ推論を行い，詩を読んだときの感情の推移を求める．表3にファジイ推論によって得られた感情喚起過程を表わす．さらにこのイメージコードに対し68個のイメージコードの中から2乗ノルムが近いものを選びだし，感情語で表現したものを表4に示す.

表3　詩「雪が降る」の入力と混合感情喚起過程

	構成単語	イメージコード属性の強度							
		喜	怒	期	嫌	悲	恐	驚	受
1	雪	-4	0	3	0	5	0	-2	0
2	降る	14	0	7	-14	-12	0	-5	15
3	手のひら	23	0	35	-23	-20	0	-32	24
4	受ける	12	8	14	-35	-9	-7	-12	37
5	溶ける	-3	4	24	-41	5	-3	-21	43
6	悲しむ	-35	2	-12	8	38	-1	14	-6

表4　詩「雪が降る」の入力と混合感情喚起過程

	構成単語	混合感情		
		No. 1	No. 2	No. 3
1	雪	臆病	物思い	面倒
2	降る	平静	穏やか	謙遜
3	手のひら	合一	受容	平静
4	受ける	平静	受容	合一
5	溶ける	容認	運命	受容
6	悲しむ	物思い	陰気	落胆

この詩から喚起されるの最終的な感情は，主として物思い，陰気，落胆である，という結果を得た.

4. まとめ

ファジイ推論を用いて，詩を読んだときの感情遷移を表わす計算機実験を行った．主観観測モデル理論[3]を用いることで，主観により観測される感情が異なるという結果を得ている．今後さらに研究を進めていき，感性に対する基本的な処理系を構築していきたい.

参考文献

[1] Plutchik.R. (1960): "The multifactor-analytic theory of emotion", Journal of psychology, pp. 153-171.

[2] 矢鳴虎夫,白浜成希,玉木明和,廣田豊彦.(1993):" 主観観測モデル理論に基づく感情表現", 日本ファジイ学会誌 Vol.5, No.4, pp. 745-760.

[3] 白浜成希,吉田香,矢鳴虎夫: "主観に基づいた感情処理を用いた対話システム", 第11回ファジイシステムシンポジウム

[4] サトウハチロー(1989): "心のうた",サンリオ

連絡先 〒803 北九州市 戸畑区 仙水町 1-1
九州工業大学 工学部 電気工学科 情報工学教室
白浜成希
Phone and FAX : 093-884-3245
E-mail : naruki@human1.comp.kyutech.ac.jp

FB1-1

3次元簡易 Ping-Pong ロボット

3D Ping-Pong Robot

田中 一男[1]
Kazuo TANAKA

神田 大和[2]
Yamato KANDA

1 金沢大学 機械システム工学科
Kanazawa Univ. Dept. of Mechanical Systems Eng.
2 オリンパス光学工業（株）
OLYMPUS OPTICAL CO., LTD.

Abstract : A ping-pong robot, which has an arm of X-Y plotter type and a hand with a ping-pong racket, has been developed. The system mainly consists of three parts. The first part observes the 3D position of a ping-pong ball by using two CCD cameras. Based on 3D sensing in the first part, the second part predicts the future trajectory of the ball. The third part controls the arm and the hand with a ping-pong racket according the predicted trajectory. The experimental results show that the developed ping-pong robot can hit the ball with the successful rate of ping-pong action, 24%.

1．はじめに

知能ロボットに望まれることは、より人間に近い「センシング」、「思考・判断」、「動作」の実現である。近年、知能ロボットと称するさまざまな作業を行うロボットが開発されている。ファジィ制御の分野でも、いろいろな作業を行う知能ロボットが開発されている。これらの知能ロボットが行う作業は、時間的制約が比較的緩く、高度な「センシング」、「思考・判断」、「動作」の要求もそれほど厳しいものではなかった。一方、Ping-Pongロボットは、時間的制約が非常に厳しいうえに、

(1)球の3次元座標を認識する
(2)球の到達位置と到達時間を予測する
(3)予測到達位置と予測到達時間に応じてハンドによる打ち返し動作を行う

などを正確に実現しなければならない。従って、Ping-Pongロボットの開発は非常に難しい。

廣田ら[1]は、2次元Ping-Pongロボットを開発した。これは、2次元空間内を転がってくる球を打ち返すもので、具体的な成功率等には言及していない。2次元空間を3次元空間に拡張すると

(1)ピンポン球の位置座標の検出
(2)ピンポン球の到達位置、到達時間の予測
(3)マニピュレータによる打ち返し

というすべての面でその実現は極端に難しくなる。

本論文では、ピンポンの基本である飛んでくる球を打ち返すという動作を実現する3次元簡易Ping-Pongロボットを開発したので、その制御法と実験結果を述べる。

2．システムの構成

図1にシステム構成の概要を示す。飛んでくる球を打ち返すという全体の動作を3つの部門に分けて説明する。

2.1 センサー部　センサー部では、2台のカメラより得られる画像を処理し、3次元画像処理装置により飛んでくる球の3次元座標を得る。1/60秒間隔で飛んでくる球の3次元座標を測定する。図1の左側に設置されているビデオは実験結果を録画するためのものである。

2.2 予測部　予測部では、センサー部で得られたデータを基に球の軌道を予測し、到達予測位置と到達予測時間を決定する。球は上から見たとき直線に移動するものとして予測を行い、また横から見たときは球の速度の2乗に比例した空気抵抗が働くとして運動方程式を立てる。この方程式は非線形の微分方程式であり、解析的に解を求めることは一般に困難である。そこでルンゲクッタ法を使って数値的に解く方法を用いる。なおタイミングの計り方は後で述べる。

2.3 アクチュエータ部　アクチュエータ部では、予測部で決定されたデータを基に、実際に球を打ち返す動作を行う。この動作はアーム部とハンド部に分かれる。

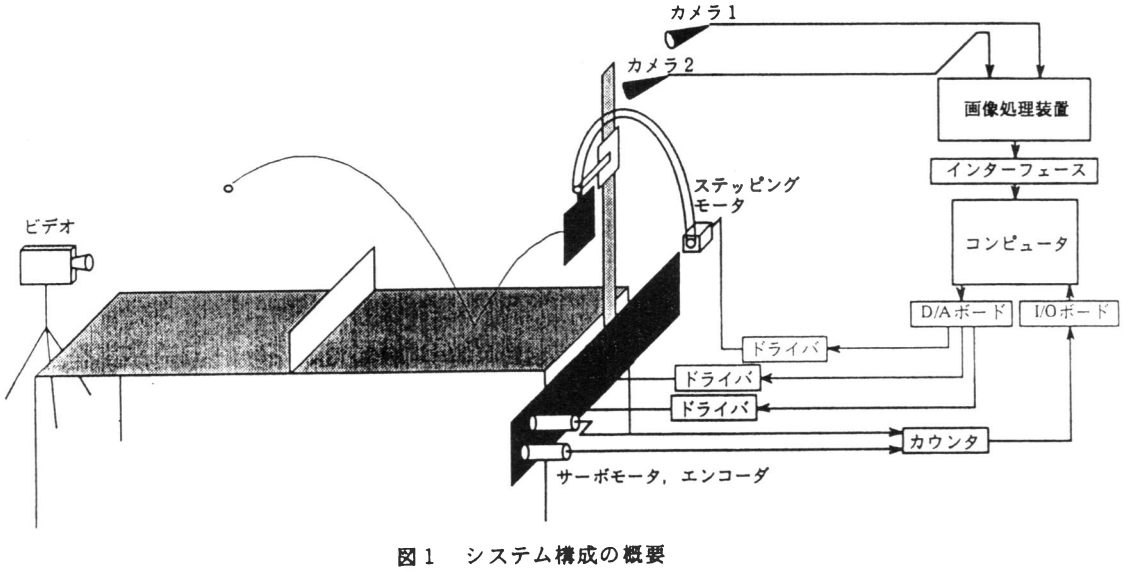


図1　システム構成の概要

3．実験装置

3.1 装置概要　使用するピンポン台は実際のものより小さいもので縦横1800mm×900mmである。また、通常のピンポン球を使用し、人間が投げ入れる。図2にアームの機構、図3にハンドの機構を示す。アームは平面内を移動するｘｙプロッタのような機構であり、縦横各1台のサーボモータを動力としている。また、移動部分の加速能力を高めるため、重量の大きいモータは移動部分には乗せず静止した部分に設置し、動力伝達にワイヤーとプーリーを利用した。なお、構造上縦横の動きは独立したものとなっている。一方、ハンドは通常のペン型ラケットの柄を短くカットしたものを前向きに固定し下から振り出す機構であり、ステッピングモータを動力としている。またアームと同様モータは別の静止部分に設置し、動力伝達にスチールチューブにワイヤーを通したもの（自転車のブレーキのようなもの）とプーリーを利用した。

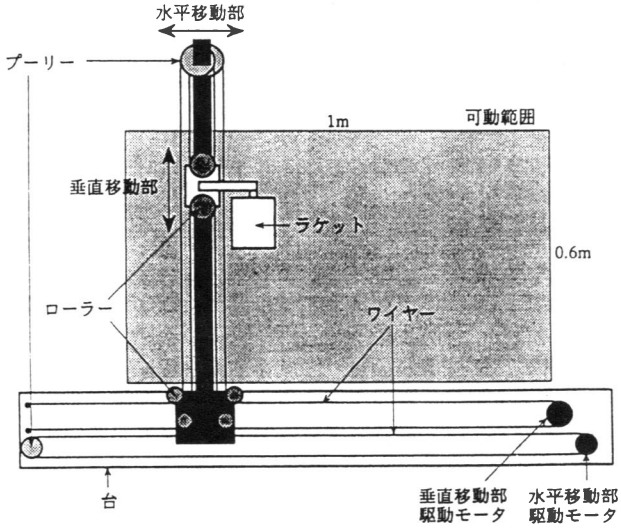


図2　アームの機構

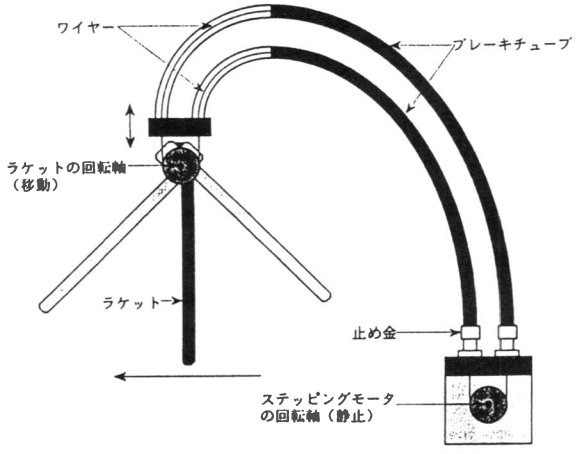


図3　ラケットを振る機構

3.2 信号の流れ　実際に動作を行う際の各装置間の信号の流れについて説明する。図1に示したように、飛んでくる球を2台のCCDカメラでとらえ、画像処理装置によってその3次元座標を検出する。そのデータをインターフェースを介してコンピュータへ送る。一方、サーボモータに付いたエンコーダからは回転角に比例したパルスが発生し、そのパルス数はカウンタによってカウントされ、I/Oボードを通してコンピュータに送られる。このため、基準位置でカウンタをリセットすることによりモータの回転角、しいてはアームの移動位置を知ることができる。コンピュータはこれらのデータより2つのサーボモータへの指令電圧を決定し、それらをD/Aボードを通して各ドライバに送信する。また、ステッピングモータへの指令パルスもD/Aボードを通して送信する。

3.3 アームの制御　アームの制御は各軸で目標位置への距離に応じた指令電圧をサーボモータに送ることによって行う。図4に5種類の距離と電圧の関係を示す。これらは次の式においてjの値を変化させたものである。（kはパラメータである）

$$V = k \times (\text{distance})^{j} \qquad (1)$$

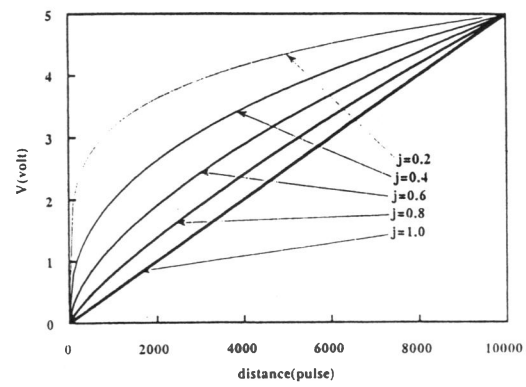


図4　距離と電圧の関係

j=1.0は一般的な比例関係であるが、アームの速応性をよくするために他の4種類の曲線を考え、それぞれの応答を測定した。その結果を図5に示す。なお、これは縦軸（ｙ軸）のものである。最もすばやく移動するのはj=0.2のときであるが、移動後の振動が大きく不安定なため、本実験ではj=0.4の値を使用した。これは横軸（ｘ軸）においても同様の結果であった。PI制御のような典型的な制御則を使うこともできる。上記のような制御則を用いた深い意味はないが、これを使用した理由は上記の簡単な制御則で十分満足のいく結果が得られたからである。

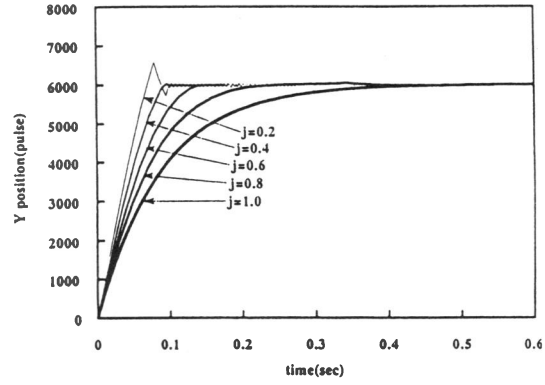


図5　アームの応答（ｙ軸）

4．実験

本研究における実験は3段階で行った。以下各実験について説明する。

4.1 2次元空間での球のキャッチ（実験1）
これは転がってくる球をアームの横軸のみの動きでキャッチする実験である。アームの垂直移動部にはハンドの

代わりに110mm四方の枠を取り付ける。図6にプログラムのフローチャートを示す。アームの制御における目標位置への誤差は±5mm程度を許容範囲としている。なお、実験の際なるべく球は回転がかからないように転がした。実験結果を表1に示す。キャッチできたのは87%であり、キャッチまたは枠にあたったのは94%であった。

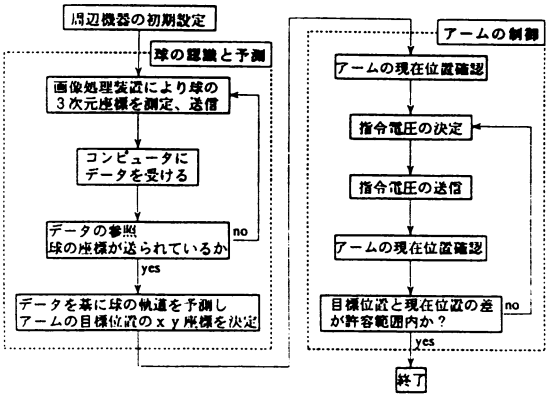


図6　実験1のフローチャート

表1　実験1の結果

キャッチした	キャッチしなかった			
	枠に当たった		当たらなかった	
87	左	右	左	右
	5	2	4	2

4.2　3次元空間での球のキャッチ（実験2）

これはアームの横軸の制御に縦軸の制御を加え飛んでくる球をキャッチする実験である。プログラムは図6に示した各処理のそれぞれに縦軸の要素を加えたものとなる。また縦軸の予測に必要となる空気抵抗係数と跳ね返り係数は実際の球の軌道と予測による球の軌道を比較することにより試行錯誤的に決定した。なお、実験の際に球は実際のピンポンのサーブに見立てピンポン台上で2回バウンドするように投げ入れ、なるべく回転がかからないようにした。実験結果を表2に示す。キャッチできたのは52%であり、キャッチまたは枠にあたったのは70%であった。

表2　実験2の結果

キャッチした	キャッチしなかった							
	枠に当たった				当たらなかった			
52	上	下	左	右	上	下	左	右
	3	4	7	4	9	12	6	3

4.3　ハンドを付けての打ち返し（実験3）

これはアームの垂直移動部にハンドを取り付け、飛んでくる球をラケットの振りにより打ち返す実験である。この実験で最も重要なのはタイミングの計り方であるが、これはアームの移動後に適当なタイミング合わせの時間を取った後、ラケットを振るというプログラムで実行した。タイミング合わせの時間t_0は図7に示すように球の予測到達時間Tからデータの獲得、予測、アームの移動の処理にかかる時間を引いたものと考え、次の式で求める。

$$t_0 = T - (t_1 + t_2 + \max(t_{ax}, t_{ay})) \qquad (2)$$

なお、この計算において最も大きな要素はアームの移動にかかる時間$\max(t_{ax}, t_{ay})$である。図8にアームの応答曲線に見られる移動距離と時間の関係を示す。図中の丸は各目標位置へのアームの移動完了時間である。この図を基にアームの移動にかかる時間t_{ax}（ｘ軸のアームの移動時間）を10個のファジィ規則により表現する。ｙ軸のアーム移動時間t_{ay}についても同様に算出する。実験の様子を図9～図13に、実験結果を表3に示す。相手の台に打ち返したのは10%、ただ単に打ち返したのは24%であった。またタイミングの関係で打ち返すことはできなかったが、打点には移動しているというのは70%であった。これによりタイミングを取ることが非常に難しいことがわかる。またアームの移動面の低めに飛び込んでくる球に対する打ち返しの成功はほとんど見られなかった。

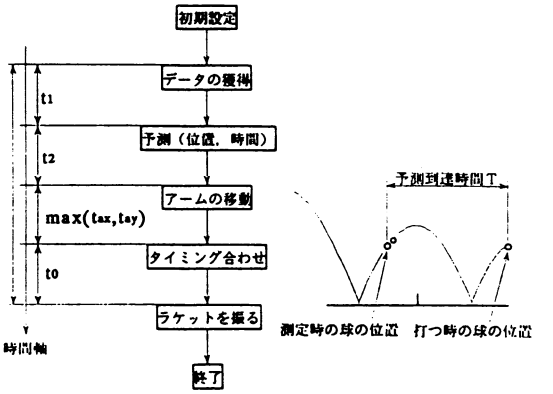


図7　タイミング合わせ

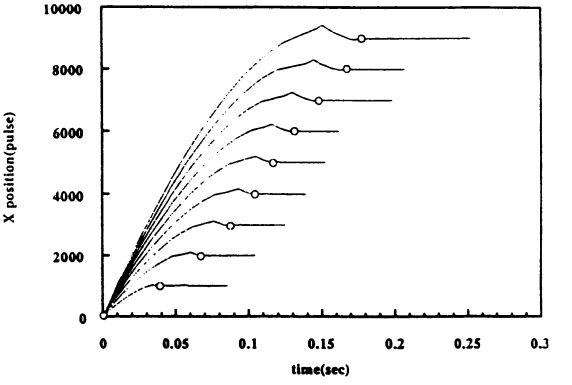


図8　アームの移動距離と時間の関係（ｘ軸）

表3　実験3の結果

打ち返した		当たらなかった					
相手の台へ	その他へ	振りが早い	振りが遅い	追いつかない			
				上	下	左	右
10	14	20	26	10	12	5	3

5．考察

実験3に見られる失敗には打点に移動できないもの（キャッチできないもの）と、移動はできてもタイミング良く打ち返せないものとがあった。この原因としては、まず球の到達予測位置と到達予測時間の誤差が挙げられる。これは球の軌道予測の際に使用したパラメータの適性の問題である。改善策としては、より実際の球の動きに近い予測システムの構築が有効であると考えられるが、あまり複雑なシステムではそれを処理するための時間が

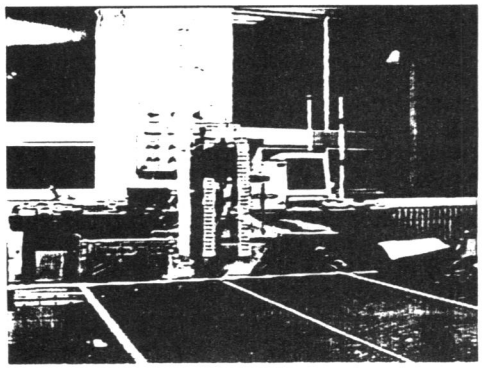


図9　打ち返し連続写真1（投げ入れ）

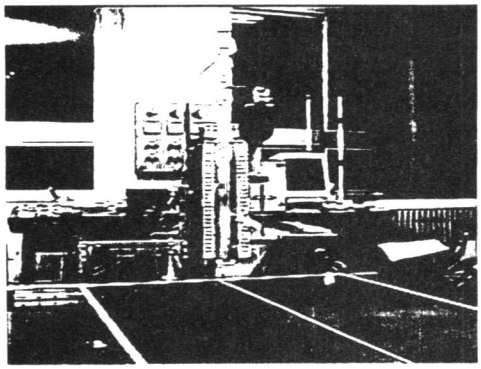


図10　打ち返し連続写真2（バウンドの瞬間）

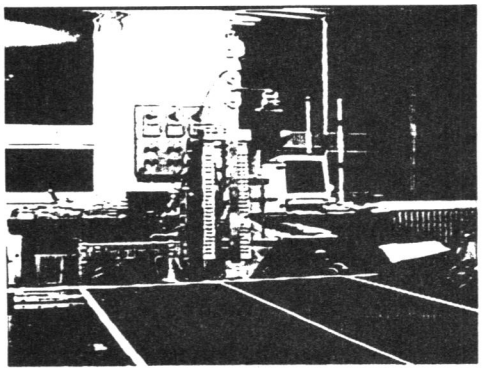


図11　打ち返しの連続写真3（インパクトの瞬間）

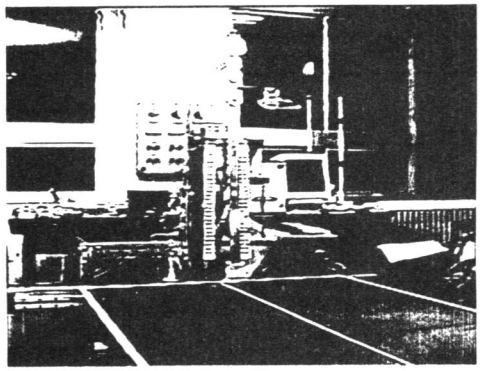


図12　打ち返しの連続写真4（インパクト直後）

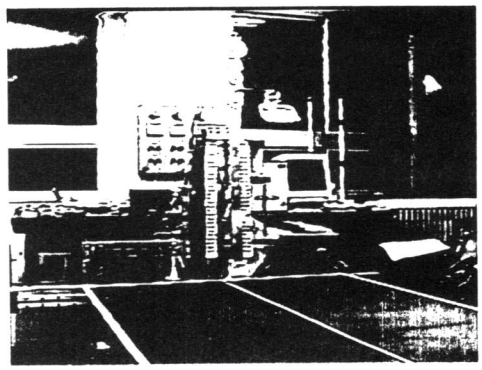


図13　打ち返しの連続写真5（相手コートへ）

かかりすぎ実用的ではないと考えられる。また、空気抵抗係数、跳ね返り係数、タイミング合わせ時間などを自らの測定方法に基づいて求め使用したが、最適な値とは言えなかった。これら使用するパラメータの決定にはより多くの実験データが必要であると思われる。最後になるがアームの移動面に進入する球の角度も成功の確率に関係する。球がネットを越えて相手側の台に返るために は、ラケットが幾分前側に振れている状態で打つのが良く、この時のラケット面に垂直な角度での進入はスウィートスポットを最も広く使用でき、成功の確率が高い。この進入角度より上側であったり下側であったりするとその度合いに応じてスウィートスポットの面積が狭く感じられ、正確な位置で球を待たない限り打ち返すのは困難となる。実際低めに飛び込んでくる球はこれが失敗の主な原因となっている。投げられた球がピンポン台上を2回のみバウンドしてくると考えると、低めの球というのは、スピードが速く全体的に低い軌道で跳ねてくる球か、スピードはそれほどでもないが上側あるいは下側からアームの移動面に鋭角に飛び込んでくる球のどちらかである。前者の場合はアームが球に追いつかず、後者の場合には前述の通りである。

6．まとめ

本研究においては簡易的なシステムで飛んでくる球を打ち返すことができた。以下に成果をまとめる。

(1)球の軌道予測による打点の決定
(2)平面を移動するアーム機構の作成とその制御
(3)ラケットを振る機構の作成とその制御
(4)システム内の周辺機器の選択とその構成
(5)打ち返しのタイミング計算

今後の課題としては打ち返しの成功率を高めるために

(1)より正確な到達位置と到達時間の予測の実現
(2)より正確に打ち返すことのできる機構の開発とその制御
(3)学習による打ち返しの方向・強さ・タイミングに関する制御則の修正の実現

等が挙げられる。

参考文献

(1)横田、ファジィロボットの作り方、Computer Today「特集ファジィコンピュータ」、PP61-65 (1988)
(2)H.Fassler et al.、A robot ping pong player: optimized mechanics,high performance 3D vision ,and intelligent sensor control、robotersysteme 6、PP161-170(1990)
(3)神田、”3次元簡易ピンポンロボットの開発に関する研究”、金沢大学修士論文(1995)

[問い合わせ先]〒920　金沢市小立野2-40-20
金沢大学工学部機械システム工学科
田中一男
TEL&FAX　0762-34-4736
EMAIL tanaka@kicews2.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

FB1-2

外乱トルクオブザーバにファジィ推論機能を付加したロボットアームの軌道制御法

Trajectry Control of Two-Link Robot Arm Using Disturbance Torque Observer with Fuzzy Reasoning

千住 智信　安次嶺 伸吾　上里 勝実
Tomobobu Senjyu　Shingo Ashimine　Katsumi Uezato

琉球大学
University of the Ryukyus

Abstract — It is expected that a direct drive (DD) robot can keep high positioning accuracy and quick-responce and so on, because it does not have back-lash without gear. However, it is found that the non-linear force of joints interference is big, so the control performance is inferior. Therefore, to keep the control performance with a high-performance, the control system which can make up for the non-linear force is needed. In order to make up for the non-linear force, we consider the non-linear force as a disturbance, and we estimate the disturbance using observer, and add it to the control input. However the estimated disturbance torque contains estimation error. So, the control system which can compensate the estimation error is needed. The observer-based robot arm controller with fuzzy reasoning, which can infer the estimation error and can compensate the influence of estimation error, is proposed in this paper.

1. まえがき

ダイレクトドライブロボット(DDロボット)はギヤによるバックラッシュがないため，高い制御性能を持たせることが可能であると期待されている。しかし減速機構を用いていないため，各関節の非線形干渉力が制御性能に非常に大きな影響を与えるため，高精度かつ高速応性を必要とする用途で問題が発生する。

このような問題を解決するため，多くの研究が行われている。その中で，各関節に加わる重力や遠心力等の非線形な外乱トルク成分を等価外乱トルクオブザーバで推定し，その影響を抑制する手法がすでに紹介され，その有効性が知られている[1]。しかし，パラメータ変動やオブザーバの推定誤差等が大きくなると，従来の制御装置は十分に対応できない。さらに,一般に速度情報はエンコーダの出力を微分することによって得ているが,エンコーダの分解能に制限が有るため,低速時に誤差を生じてしまう.従って,システムを高性能に制御するためには,それらの影響を考慮できる高性能な制御法が必要である.

そこで本論文では，等価外乱トルクとアームの回転速度を推定するため，等価外乱トルクオブザーバと速度オブザーバの2つのオブザーバを用いる。また，等価外乱トルクの推定誤差を補償するためフィードバック制御を併用する。さらにロバスト性を高めるためにスライディングモード制御を導入する。またフィードバック制御において，フィードバックゲインの決定にはリヤプノフ直接法を用いる。リヤプノフ直接法により導出されたフィードバックゲインを用いることで，システムの安定性が保障される。

ところが，リヤプノフ直接法に基づいて導出されたフィードバックゲイン決定式には，測定が不可能な情報である等価外乱トルクオブザーバの推定誤差を含んでいる。この推定誤差の影響は，位置制御性能に顕著に現れると思われる。そこで，本制御法ではロボットアームの高性能化をねらい，位置誤差とスライディング状態の時間的変化に基づき，ファジィ推論により等価外乱トルクオブザーバの推定誤差を推定する。その値を用いてフィードバックゲインを決定する。また，等価外乱トルクの推定誤差は時間の経過とともに変化すると考えられることから，最大許容誤差を設定し，その条件が満足されている場合には，制御エネルギーを小さくするためフィードバックゲインの大きさを減少させる調整則も考慮する。

一般に，リヤプノフ直接法により導出されたフィードバックゲインはハイゲインとなりやすいが，フィードバックゲインの大きさを減少させる調整則を考慮しているため，必要以上のハイゲインとなることが避けられる。

本制御法の有効性はシミュレーションにより確認した。

2. 軌道制御法

ロボットアームの第1リンクに関する運動方程式は次式で表される[2]。

$$J_{1n}\ddot{\theta}_1 + D_{1n}\dot{\theta}_1 + T_{d1} = K_{1n}i_1^* \tag{1}$$

ここでJ_1：慣性係数，D_1：粘性係数，K_1：トルク出力係数，添字n：ノミナル値，T_{d1}=$\Delta J_1\ddot{\theta}_1 + \Delta D_1\dot{\theta}_1 + T_{l1} - \Delta K_1 i_1^*$：等価外乱トルク，$\Delta J$，$\Delta D$，$\Delta K$：ノミナル値からの変動分，$T_{l1}$：負荷トルク，$i_1^*$：制御入力

ここで，指令電流 i_1^* と実電流 i_1 が $i_1^* = i_1$ と制御されていると仮定している。

次に，実際の位置 θ_1 と指令位置 θ_1^* との位置誤差を $e_{\theta 1} = \theta_1 - \theta_1^*$，速度オブザーバによって推定された速度の推定値 $\hat{\omega}_1$ と指令速度 $\dot{\theta}_1^*$ との速度誤差を $e_{\omega 1} = \hat{\omega}_1 - \dot{\theta}_1^*$ と定義し，制御入力として次式を考える。

$$i_1^* = \frac{1}{K_{1n}}\left\{ J_{1n}\ddot{\theta}_1^* + D_{1n}\dot{\theta}_1^* + \hat{T}_{d1} - \alpha_1 e_{\theta 1} - \beta_1 e_{\omega 1} \right\} \quad (2)$$

ここで，速度オブザーバによって推定される速度推定値 $\hat{\omega}_1$ に付随する推定誤差は通常小さいため，(2) 式の制御則ではその推定誤差を考慮していない。また，$\hat{T}_{d1}$ は等価外乱トルクオブザーバで推定された等価外乱トルクであり，α_1 は位置制御フィードバックゲイン，β_1 は速度制御フィードバックゲインである。

等価外乱トルクの影響は，(2) 式の制御入力に等価外乱トルクトルクオブザーバで推定された等価外乱トルク $\hat{T}_{d1}$ を加えることで，そのほとんどを抑制することが可能であると考えられるが，等価外乱トルクオブザーバで推定された等価外乱トルクには推定誤差が存在するため，制御性能が劣化してしまう。そこで，その影響を小さくするためフィードバック項を付加している。

3. ファジィ推論を用いたフィードバックゲイン決定則

3.1 フィードバックゲイン決定則

システムが非線形であるため，安定性の解析にリヤプノフの直接法[3] を用いる。

まずシステムの誤差方程式を示すと (1)，(2) 式より次式になる。

$$J_{1n}\dot{e}_{\omega_1} + (\beta_1 + D_{1n})e_{\omega_1} + \alpha_1 e_{\theta_1} = \eta_1 \quad (3)$$

ここで η_1 は等価外乱トルクオブザーバにより推定された等価外乱トルク $\hat{T}_{d1}$ と実際の等価外乱トルク T_{d1} との差 $(\eta_1 = \widehat{T_{d1}} - T_{d1})$ である。

次に次式のスライディングライン s_1 を導入する[4]。

$$s_1 = e_{\omega_1} + \lambda_1 e_{\theta_1} \quad (\lambda_1 > 0) \quad (4)$$

システムの安定性を保証するフィードバックゲイン α_1，β_1 を決定するため，リヤプノフ関数 $V(s_1) = \frac{1}{2}s_1^2$ を導入する。

位置誤差 $e_{\theta 1}$ の許容できる最大誤差 (以後最大許容位置誤差とする) を $\varepsilon_{\theta 1}(> 0)$ で与え，位置誤差が最終的に次式を満たすようにフィードバックゲインを決定する。

$$|e_{\theta 1}| \leq \varepsilon_{\theta 1} \quad (5)$$

リヤプノフ関数の時間微分 $\dot{V}(= s_1\dot{s}_1)$ は (3) 式および (4) 式を考慮すると次式になる。

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s_1^2\left(\lambda_1 - \frac{\beta_1 + D_{1n}}{J_{1n}}\right) \\ &\quad + s_1 e_{\theta_1}\left(\frac{\beta_1 + D_{1n}}{J_{1n}}\lambda_1 - \frac{\alpha_1}{J_{1n}} - \lambda_1^2\right) + \frac{\eta_1}{J_{1n}}s_1 \\ &\leq s_1^2\left(\lambda_1 - \frac{\beta_1 + D_{1n}}{J_{1n}}\right) \\ &\quad + |s_1 e_{\theta_1}|\left(\frac{\beta_1 + D_{1n}}{J_{1n}}\lambda_1 - \frac{\alpha_1}{J_{1n}} - \lambda_1^2\right) + \frac{\eta_1}{J_{1n}}|s_1| \quad (6)\end{aligned}$$

ここで位置誤差 $|e_{\theta 1}|$ が最大許容位置誤差 $\varepsilon_{\theta 1}$ 以下の場合，システムは安定であることから安定性の議論を避ける。

$|e_{\theta 1}| > \varepsilon_{\theta 1}$ の状態におけるフィードバックゲイン α_1，β_1 は，$\dot{V} < 0$ となる条件から次式のようになる。

$$\alpha_1 > (\beta_1 + D_{1n})\lambda_1 - J_{1n}\lambda_1^2 + \left|\frac{\hat{\eta}_1}{\varepsilon_{\theta_1}}\right| \quad (7)$$

$$\beta_1 > J_{1n}\lambda_1 - D_{1n} \quad (8)$$

ここで，(6) 式中の η_1 は等価外乱トルクの推定値に含まれる推定誤差を表しているが，その値を実際に測定することは不可能である。この推定誤差が存在すれば位置制御の際，制御系に悪影響を与え，位置誤差を生じると考えられる。そこで，この値を位置誤差の情報とスライディング状態の時間的変化を基に，ファジィ推論により推定し，その同定値 $\hat{\eta}_1$ を用いてフィードバックゲインを決定する。

すなわち (7) 式の $\hat{\eta}_1$ を

$$\hat{\eta}_{1(t_n)} = \hat{\eta}_{1(t_{n-1})} + \Delta\hat{\eta}_1 \quad (9)$$

として，$\Delta\hat{\eta}_1$ をファジィ推論を用いて決定する。

ここで $\hat{\eta}_{1(t_n)}$ は現時点の $\hat{\eta}_1$ の状態を表し，$\hat{\eta}_{1(t_{n-1})}$ は現時点から 1 サンプリング前の $\hat{\eta}_1$ を表す。

上記のフィードバックゲイン α_1，β_1 を用いれば，リヤプノフ関数の時間微分 $\dot{V}$ が負となることから，位置誤差 $|e_{\theta 1}|$ は最終的に最大許容位置誤差内に収束する。第 2 リンクについても全く同様な議論に基づいて，フィードバックゲイン α_2，β_2 を決定する。

3.2 ファジィルールとメンバシップ関数[5]

本論文で用いるメンバシップ関数を図 1 に，ファジィルールを表 1 にそれぞれ示す。

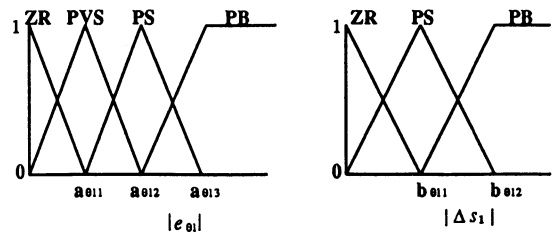


図 1 Membership functions.

表1. Fuzzy rules.

		$\|e_{\theta 1}\|$			
		ZR	PVS	PS	PB
$\|\Delta s_1\|$	ZR	NVB	NB	PVS	PS
	PS	NB	NS	PVS	PS
	PB	NVS	NVS	PS	PB

P : Positive, N : Negative, ZR : Zero
B : Big, S : Small, V : Very

$$\Delta e_{\theta 1} = e_{\theta 1(t_n)} - e_{\theta 1(t_{n-1})}$$

表1のルールマトリクスは(11)式のファジィルールを表している。

if $|e_{\theta 1}|$ is A_θ^j and $|\Delta s_1|$ is B_θ^k then $\Delta\hat{\eta}_1$ is C_θ^i(10)

A_θ^j, B_θ^k, C_θ^i はZR,PBなどで表され，前件部関数$|e_{\theta 1}|$, $|\Delta s_1|$や後件部関数$\Delta\hat{\eta}_1$の状態を表す。例えばNVBは，"Negative Very Big"のことであり，負で非常に大きいことを表している。ファジィルールについては，例えば次のルールは「$|e_{\theta 1}|$が正で大きく$|\Delta s_1|$も正で大きい時，推定誤差が大きいと考えられるのでその調整量$\Delta\hat{\eta}_1$を正で大きくする」ことを表す。

if $|e_{\theta 1}|$ is PB and $|\Delta s_1|$ is PB then $\Delta\hat{\eta}_1$ is PB(11)

また，$|e_{\theta 1}|$が(5)式を満たす場合($|e_{\theta 1}|$ is ZR or PVS)には，制御エネルギーを小さくすることを目的にフィードバックゲインの大きさを減少させるルールを構成している($a_{\theta 11} = \varepsilon_{\theta 1}$としている)。

実際の推定値$\hat{\eta}_1$の計算にはC_θ^iに対応する推定誤差の調整値$\Delta\hat{\eta}^i$をファジィ推論する。最終的な推論結果は重み付き平均値により次式で決定される。

$$\Delta\hat{\eta}_1 = \sum_{i=1}^{12} W_\theta^i \Delta\hat{\eta}_1^i \ / \ \sum_{i=1}^{12} W_\theta^i \qquad (12)$$

ここで，W_θ^iは前件部の適合度であり，メンバシップ関数の積で定義する。例えば，前件部変数$|e_{\theta 1}| = x_{11}$, $|\Delta s_1| = x_{12}$に関する適合度W_θ^iは次式で表される。

$$W_\theta^i = A_\theta^j(x_{11}) B_\theta^k(x_{12}) \qquad (13)$$

等価外乱トルク推定誤差の推定値$\hat{\eta}_1$は(13)式で得られた$\Delta\hat{\eta}_1$を用いて(10)式で計算される。

4 シミュレーション結果及び考察

上記の手法の有効性を確認するためシミュレーションを行った。本シミュレーションは，第1リンク，第2リンク共に2秒間で時計方向へ360° 回転させた(第2リンクの回転角の基準は第1リンクの延長上であるため，2秒間で720° 回転する)。またパラメータ変動はすべてのパラメータで−30%発生させ，負荷トルクとして運動開始0.6秒後から質量2(kg)を第2リンクの先端に付加している。シミュレーションの条件及びパラメータを表2に示す。

表2 Simulation conditions and parameters.

$J_{1n} = 8.0 \times 10^{-1}(\mathrm{kg{\cdot}m^2})$, $J_{2n} = 2.0 \times 10^{-1}(\mathrm{kg{\cdot}m^2})$,
$D_{1n} = 5.0 \times 10^{-1}(\mathrm{N{\cdot}m{\cdot}s/rad})$,
$D_{2n} = 1.0 \times 10^{-1}(\mathrm{N{\cdot}m{\cdot}s/rad})$,
$K_{1n} = 0.8(\mathrm{N{\cdot}m/A})$, $K_{2n} = 0.8(\mathrm{N{\cdot}m/A})$,
$m_1 = 5.0(\mathrm{kg})$, $m_2 = 1.0(\mathrm{kg})$, $l_1 = l_2 = 1.5 \times 10^{-1}(\mathrm{m})$,
$\lambda_1 = 1.0 \times 10^1$, $\lambda_2 = 4.5 \times 10^1$, $\beta_1 = \beta_2 = 8.0$

表3 Parameters of membership function (1st. link).

$(a_{\theta 11},\ a_{\theta 12},\ a_{\theta 13})(\times 10^{-3})$	$(b_{\theta 11},\ b_{\theta 12})(\times 10^{-5})$
(1.0, 3.0, 5.0)	(5.0, 8.0)

表4 Adjustment values of feedback gain.

PB	PS	PVS	NVS	NS	NB	NVB
30	5	1	−0.001	−0.005	−0.08	−0.3

$(\times 10^{-4})$

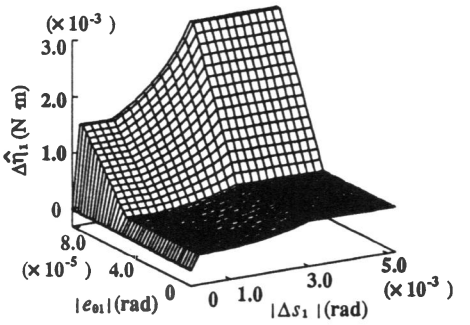


図2 Result of Fuzzy reasoning.

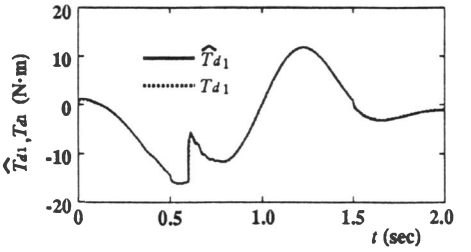


図3 Disturbance torque of 1st link.

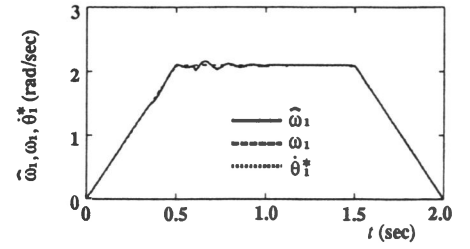


図4 Velocity of 1st link.

本シミュレーションに用いた第1リンクに関するメンバシップ関数のパラメータを表3に，フィードバックゲイン調整則を表4にそれぞれ示す。また，ファジィ推論結果を図2に示す。

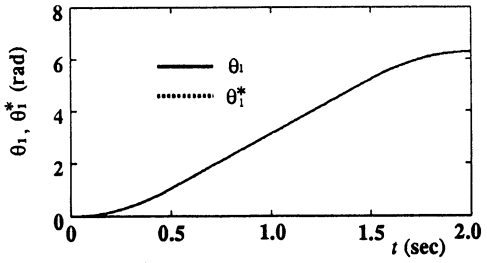


図5 Position of 1st link.

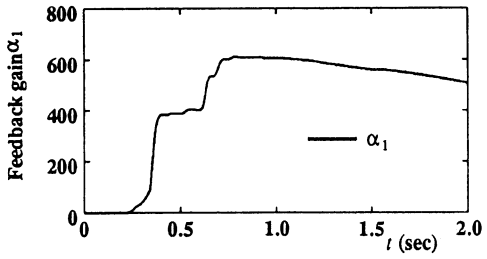


図6 Feedback gain α_1.

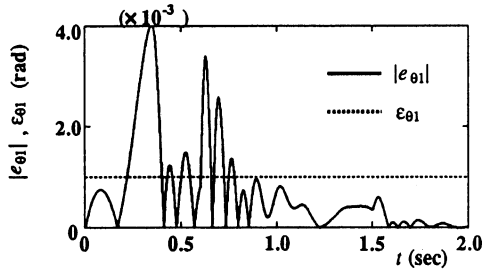


図7 Position error of 1st link.

図3は第1リンクの等価外乱トルクを示している。このように等価外乱トルクは大きく変動する。したがって等価外乱トルクオブザーバにより，この値を推定することの重要性が確認できる。また，推定された等価外乱トルクには若干の推定誤差が含まれているが，レンジの関係上わかり難い。

図4に第1リンクの指令速度と実速度及び推定速度を示している。等価外乱トルクに推定誤差があるものの，速度を指令速度にほぼ正確に追従させることができた。

図5は第1リンクの指令位置と実際の位置を表す。脈動も見られず，良好な追従が達成できる。

図6は第1リンクにおけるフィードバックゲインα_1を示している。この結果より，フィードバックゲインはシステムの状態に応じてその値が調整されていることが理解できる。

図7は第1リンクの位置誤差を示している。最大許容位置誤差内に位置誤差が収束する様子がわかる。このことより，本制御法の有効性が確認できる。

本制御法は，等価外乱トルクオブザーバの推定誤差をファジィ推論で推定しているため，チャタリングが発生しない制御則をスライディングモード制御で実現できる点も特筆すべき事項である。

5 あとがき

本論文では，ファジィ推論を用いて等価外乱トルクの推定誤差を推定し，その値をフィードバックゲインの決定に用いることで，等価外乱トルクの推定誤差の影響を補償する制御法を提案した。

本制御法において，等価外乱トルクオブザーバの推定する等価外乱トルクに含まれる推定誤差は，位置誤差を生じる原因と考えられることから，位置誤差情報とスライディング状態を基にファジィルールを構成している。

ファジィルールを構成する際，過度なハイゲインを避けるため，等価外乱トルクの推定誤差の影響が小さいと考えられる範囲では，フィードバックゲインを減少させるルールを採用している。このことにより，フィードバックゲインは小さく抑えられ，しかも高精度な軌道制御が達成された。また，フィードバックゲインの導出にはリヤプノフ直接法を用いているため，安定性が保障されている。

しかし，本制御法において，実機制御の際に必要な各間接の駆動アクチュエータであるDCサーボモータに流れる制御電流は，指令電流に追従していることを前提にしている。そこで，電流制御法を付加した制御法の構築と，提案する制御法の実機への適用による制御法の有効性の確認が今後の課題である。

文　献

(1) 例えば 河村：「外乱オブザーバを併用したスライディングモード制御」，平成4年電気学会産業応用部門全国大会論文集 pp.s.232-s.237

(2) 美多，大須賀：ロボット制御工学入門，コロナ社 (1989)

(3) 小郷，美多：システム制御理論入門，実教出版 (1979)

(4) 原島，橋本：「Sliding Mode とその応用 -I」，システムと制御 Vol.29, No.2, pp94-103 (1985)

(5) 千住，上古殿，上里：「ファジィー適応則を用いた直流サーボモータのロバスト速度制御」，半導体電力変換研究会資料, SPC-94-72, (1994)

連絡先

〒903-01　沖縄県中頭郡西原町字千原1番地
琉球大学工学部電気電子工学科
千住 智信
TEL：098-895-2221(内線)3292
FAX：098-895-4377
E-mail：b985542@tec.u-ryukyu.ac.jp

FB1-3

動作指示に基づく自律移動ロボット

An Autonomic Moving Robot Based on Gestural Instructions

秋田幸治　金澤直幸　吉原道宏　山口亨
Koji AKITA　Naoyuki KANAZAWA　Michihiro YOSHIHARA　Toru YAMAGUCHI
宇都宮大学 工学部 情報工学科
Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utsunomiya University

abstract

This paper proposes a ABL (Activation Bidirectional Propagation Learning) algorithm and a gestural instruction learning algorithm. These algorithm realise an actual moving robot which can learn knowledges about human gestural instruction recognition and robot movement. By experiments, we demonstrate that the robot can organize a new knowledge which does not exist before learning. Furthermore, the robot can understand, on the same level that a dog might, both the meaning of a human macro sign (i.e. a figure-eight sign) and the qualitative sense inherent in a human macro qualitative instruction (i.e. a figure-eight trajectory with a large width). So, we verify the proposed robot intelligence.

1　はじめに

本稿では、人間のマクロな動作指示から知識の獲得と洗練による学習が可能な自律移動ロボットを提案する。提案のロボットは、既存の知識にない人間の動作指示を理解し動作するための知識を自律的に組織化する。また、動作指示からそのコマンドだけでなく、質的な程度も理解（マクロな指示をミクロな要素に分解して理解）し、既存の知識を洗練する。この自律移動ロボットの実現において、ABL（Activation Bidirectional Propagation Learning）法と動作指示学習法の二つの学習法を提案する。ABL 法は、既存の知識にない新たな知識を自律的に組織化するための学習法であり、この学習法により従来のように、人間がデータを収集し知識を与えるといった一連の作業の必要はなくなる。動作指示学習法は、既存の知識を洗練するための学習法であり、BP 法 [1] などに代表される従来のニューラルネットの学習方法の様に、ミクロな教師データを与える必要がなく、また従来の AI の学習法におけるマクロな指示による学習は出来るが質的指示から質的な程度を理解することは出来ず、学習の安定性がないといった問題点を改善したものである。

ABL 法と動作指示学習法は、認識と学習機能に優れたファジィ連想記憶システム [2] [3] を用いることで実現している。連想記憶システムの推論機能は、人間のマクロな質的指示を表す数値的な入力データを a）人間のマクロな指示の意味と、b）その質的な程度のデータへと変換するのに有効である。また、連想記憶システムの相互伝搬機能を用いることで上述の a）と b）のデータは知識により洗練されたミクロな要素へと変換できる。そのため、提案の学習法は従来のミクロな指示による学習法に比べ、より高速に学習が行なえる。

本稿では、具体例として、ABL 法を用いたハート型動作指示の認識と動作生成、動作指示学習法を用いた８の字型動作の洗練を行なうことで、提案のロボットの知的性を示す。

2　実験システム

本実験では自律移動ロボットとしてマイクロマウス（以下、宇都宮犬とよぶ）を用いている。この実験に用いられるシステム全体の概要を図 1 に示す。この実験システムにおいて、人間のマクロな質的指示動作は CCD camera によりとらえられる。CCD camera、color extractor、color image tracker からなるトラッキング部はこのマクロな質的指示をいくつかの数値的な入力データへと変換する。このデータは GP-IB により計算機に転送される。特徴点抽出部ではこれらのデータから人間による動作指示の特徴点を抽出し、連想記憶部ではそれらの特徴点により学習を行なう。計算機と宇都宮犬とは Modem を通してつながっており、学習されたミクロな要素により宇都宮犬に人間の指示に対応した動きをさせる。

3　学習法

ここでは、自律移動ロボットに対する学習法として２つの手法を提案する。

3.1　ABL 法

ファジィ連想メモリシステムの持つ相互伝搬作用を用いることによりファジィルールを新たに生成したり、それに関連したメンバシップ関数を修正する学習を行なう。この学習法を ABL (Activation Bidirectional Propagation Learning) 法と呼ぶ。

ルールを生成するにあたり、信頼度の変化を考慮する。これは学習により得た知識に対する信頼度であり

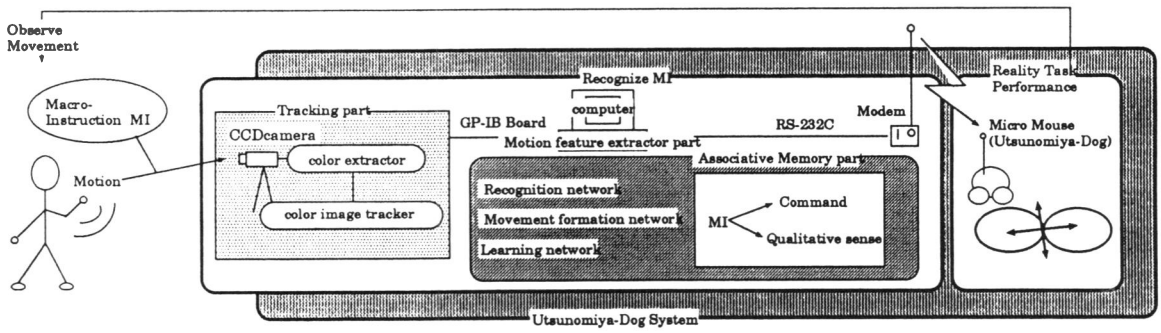


図 1: 実験システム

学習を行なっていくにつれ大きくなっていき、最終的には既存のルールと同等の信頼度になる。ここではこの信頼度をノード間の重みとして連想メモリに記憶する。

ここで、この学習に必要な式を次に示す。

$$Wnew = (Mnow * \alpha - Mold)/2\ \alpha * (1 - Wnow * \delta) + Wold \quad (1)$$

$$Wnow = Wold - (1 - Mold) * \gamma \quad (2)$$

$$DI = (1 - Wnow) * \beta \quad (3)$$

Wはルールの信頼度を表現するものでIf レイヤとRule レイヤとの重み（0≦W≦1）である。MはIf レイヤにおけるメンバシップグレード値（0≦M≦1）、またこれらの添字のｏｌｄは学習前、ｎｏｗは学習中、ｎｅｗは学習後を表す。ＤＩはメンバシップ関数の修正度を表すものとする。また、α、β、γ、δ は学習の進展の程度により任意に決められる定数である。

まず、新たにルールを追加する場合は、入力値を基に任意の大きさの三角型メンバシップ関数を作成する。続いて同入力によりこのルールでのメンバシップグレードを求め、最後に式 (1) により重みを決定する。この手順により初期段階のファジィルールを生成する。次に、生成したルールを修正する場合は、式 (2) により仮の重みを求める。続いて式 (3) を基にメンバシップグレードの最も低かったメンバシップ関数を修正し、同入力による推論によりIf レイヤにおけるメンバシップグレードを求める。最後に式 (1) によって重みを決定する。

このABL 法を自律移動ロボットに適応することで、ロボットが自律的に知識を組織化できる。

3.2 動作指示学習法

学習を行なうにあたり、生体間の学習を模擬することはスムーズに学習を行なうための有効な手段と考えられる。現在、生体間を模擬した学習法として言語を使用して行なう言語指示学習法 [4] が提案されている。これに対して、手の動きによって形成されるマクロな質的指示で学習を行なうものが提案の動作指示学習である。提案の学習法により宇都宮犬（ロボット）は犬（生物）と同様に、人間によるマクロな質的指示からその指示の意味と質的な程度を理解することが出来るようになる。

本実験では、以下の３つを前提条件としている。

（１）宇都宮犬の動作認識：犬は基本的な人間の動作指示（８の字、前進、止まれ、など）の認識が可能。

（２）宇都宮犬の動作生成：犬の動作の軌跡は動作指示の動きと同様。

（３）犬の動作修正（動作指示学習）：

（3-1）修正時に動作において対称性などの基本的事項を理解。

（3-2）修正時に指示における動作の大きさが修正の程度となることを理解。

この動作指示学習はファジィ連想記憶システムを用いることで実現する。図２にこのシステム構成の概要を示す。このシステムは（１）認識ネットワーク、（２）動作生成ネットワーク、（３）動作洗練ネットワークの３つの要素により構成されている。認識ネットワークは前提条件（１）を用いて、動作指示を表したミクロな数値的データをマクロな指示の意味に変換する。動作生成ネットワークでは前提条件（２）を用いて、マクロな指示の意味を犬の動作の軌跡に変換する。動作洗練ネットワークでは前提条件（３）を用いて、マクロな指示の意味とその質的な程度を宇都宮犬の動作の軌跡に対するミクロな洗練要素に変換する。図２において、ノード'H'は８の字の軌跡を表し、ノード'C'は円の軌跡を表している。人間が８の字の指示をした場合、数値的データとして表される指示は図２の左側に示すような６つのミクロな特徴点に変換される。この６つのミクロなデータの内の４つ（図２に示す人間

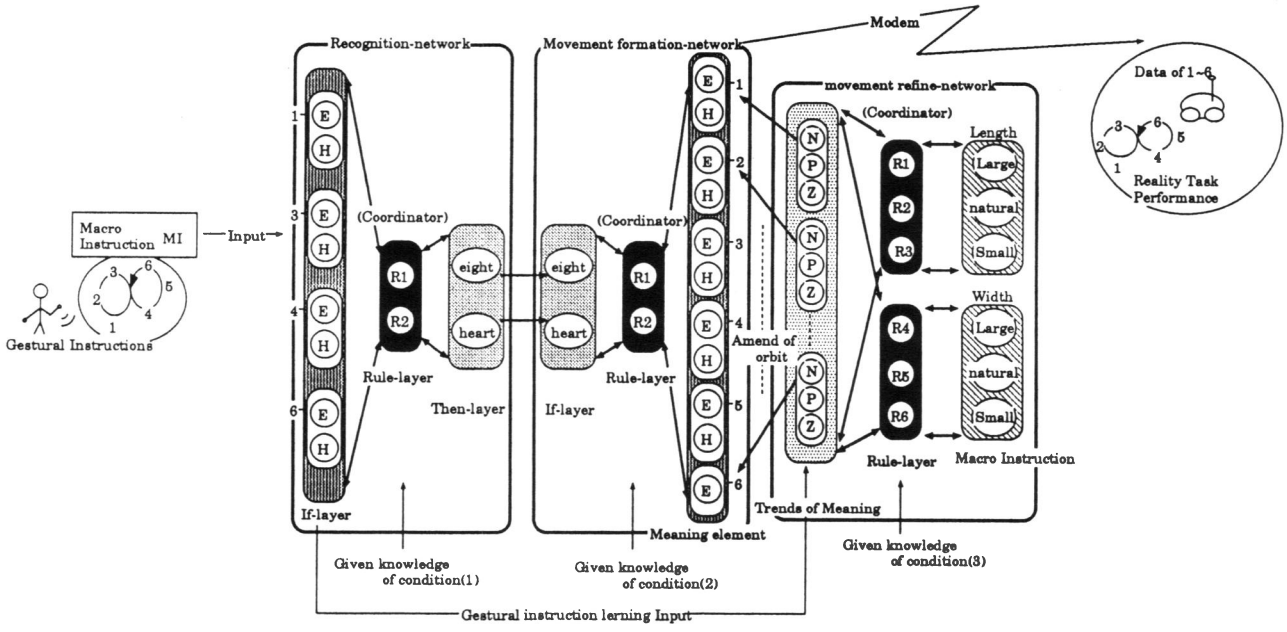


図 2: 動作指示学習におけるネットワーク

の指示での８の字の １、３、４、６ の４つ）を認識ネットワークの If レイヤに入力し、そして認識ネットワークにおける認識結果が Then レイヤに出力される。この結果が動作生成ネットワークの If レイヤに対する入力となり、これにより宇都宮犬の動作軌跡が動作生成ネットワークの Meaning element レイヤに出力される。軌跡の学習においては、(a) 認識ネットワークにより人間のマクロな指示の意味を認識し、(b) 動作洗練ネットワークにおいては、１～６の特徴点における典型的なミクロデータと動作によるミクロデータの差を Trends of Meaning レイヤへの入力値として指示におけるマクロな質的程度を認識（例えば認識結果として Length レイヤに Large、Width レイヤに Small と現れた場合、質的な程度は縦に大きく、横に小さい軌跡となる。）し、(c) 動作洗練ネットワークではさらに、このマクロな質的程度を軌跡に対するミクロな洗練要素へと変換する。このミクロな洗練要素により動作生成ネットワークの出力の洗練を行なう。この提案の学習法はファジィ連想記憶システムの持つ２つの主な特徴である連想におけるロバスト性の高さと相互伝搬作用により具体化されている。これらの特徴が、ファジィ連想記憶システムにおける高い認識能力とマクロからミクロへの高い変換能力の実現に有効である。

4 実験

まず提案の ABL 法を用いて既存の知識に存在しないハート型動作を認識、生成するための知識を宇都宮犬に獲得させ、動作を行なわせた。この場合の宇都宮犬の軌跡を図 3 に示す。

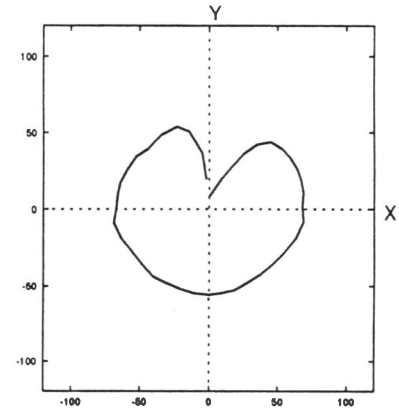


図 3: ABL 法によるハート型の軌跡

宇都宮犬は明らかにハート型の動作を行なっており、ハート型動作のための知識を獲得したことが検証できた。

次に、提案の動作指示学習法（マクロ学習）と前提条件（３）に対する知識を持たない従来の学習法（ミ

クロ学習）の比較として、それぞれの学習法を用いて既存のルールに従った宇都宮犬の８の字の動作の軌跡が、仮定した理想の８の字の軌跡となるように学習を行なった。

提案の動作指示学習を一度行なった宇都宮犬の８の字動作の軌跡の推移を図 4 に示す。

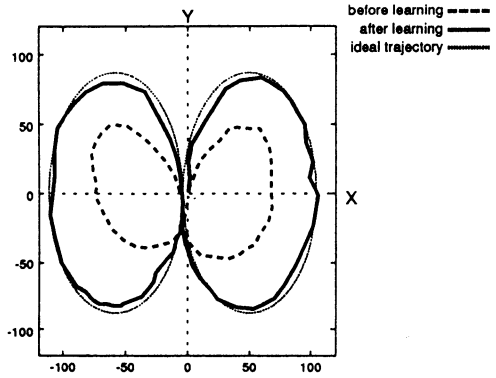


図 4: 動作指示学習（マクロ学習）

また、従来の学習法を一度行った軌跡の推移を図 5 に示す。

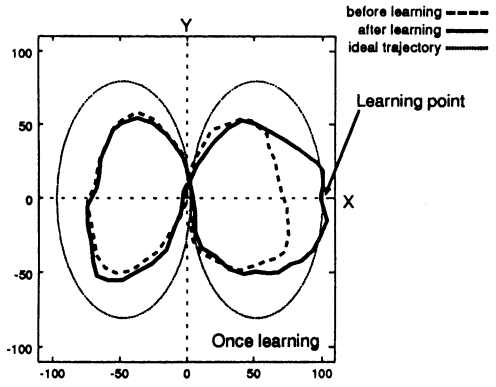


図 5: 従来の学習法（ミクロ学習）

図 4 に示す学習後の軌跡は一回の学習によりほぼ理想の軌跡となった。一方、図 5 に示す学習後の軌跡は理想の軌跡に対して一箇所しか近付いておらず、理想の軌跡に近付くためには、さらに学習する必要がある。提案の学習法と従来の学習法における学習回数に対する理想の軌跡との２乗誤差を図 6 に示す。

この図 6 が示すように提案の動作指示学習の方が従来の学習法に比べより高速に理想の軌跡に近付くことが明らかであり、その有効性が実証された。

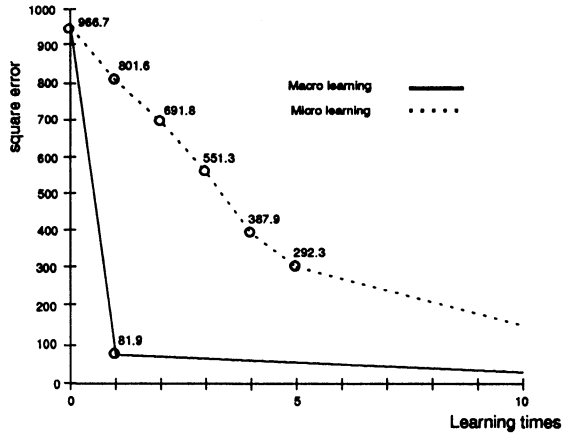


図 6: 学習の比較

5 おわりに

本稿では、ABL 法と動作指示学習法の２つの学習法を提案した。これら２つの学習法を適応することで、人間のマクロな動作指示から知識の獲得と洗練による学習が可能な自律移動ロボットを実現した。実験により、ロボットは既存の知識にない新たな知識を自律的に組織化することができた。さらに、ロボットは犬（生物）のように人間のマクロな質的指示からその指示の意味（例えば８の字の軌跡の指示）と、質的な程度（例えば横に大きな軌跡）を理解することが出来た。以上により、提案の自律移動ロボットの知的性を検証した。

参考文献

[1] D.E.Rumelhart, et al. : Parallel Distributed Processing, The MIT Press(1986).

[2] 山口亨：ファジィ連想記憶システム, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.2, 245-260(1993).

[3] B.Kosko : Adaptive Bidirectional Associative Memories, Applied Optics, Vol.26, No.23, 4947-4960(1987).

[4] 牛田、他：連想記憶と言語指示学習に基づく表情モデルの構築, 電学論 C, Vol.113-C, No.12, 1062-1071(1993).

[問い合わせ先]

〒 321 宇都宮市石井町 2753
宇都宮大学 工学部 情報工学科 山口研究室
秋田 幸治
TEL:0286-89-6259
E-mail:koji@sophy.infor.utsunomiya-u.ac.jp

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

FB2-1

概念形成と強化学習による マニピュレータ操作技能の自律獲得

Skill Acquisition by Concept Formation and Reinforcement Learning

○ 椹木 哲夫　岩津 賢　片井 修

Tetsuo Sawaragi　Satoshi Iwatsu　Osamu Katai

京都大学工学部
Dept. of Precision Engineering, Kyoto University

Abstract　This paper presents a computational model of two aspects important to human motor behavior: the acquisition of skills from observations and the improvement of skills through practice. The former is implemented using a concept formation technique and the latter is modeled as reinforcement learning. We show that the proposed multi-strategy learning paradigm can provided the foundations for realizing skill transfer between different agents such as human and robots.

1　はじめに

従来人間の身体機能，知覚・情報処理機能を代替し拡張してきたロボット技術に関する研究は，近年より高度な知能化への途と人間との親和性と協調性に焦点が絞られてきている．このような次世代ヒューマン・フレンドリィ・ロボット・システムの基本アーキテクチャとしては，図1に示

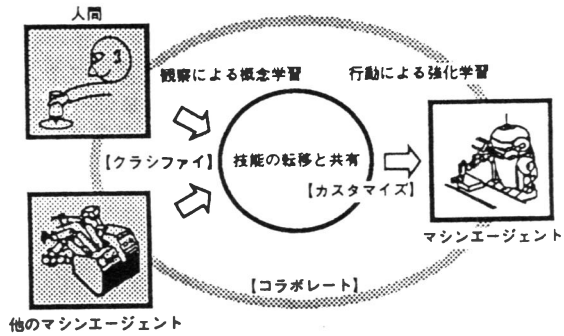


Fig. 1: 異種エージェント間でのスキルトランスファ

すように，最初は教師としての人間熟練者（あるいは他のロボット）が直接こなす一連の作業を肩越しに観察して見習いながら，作業を要素タスクに分割して認識し，その意味や意図を理解するとともにさまざまな特徴を検出して，既存の概念に的確に帰属させたり既有概念との間の関係付けを行う機能，すなわち分類(classify)の能力が不可欠である．そして一端これらの概念を獲得できれば，今度は特定のマシン・ハードウェアで実行可能な形に，あるいは個人ユーザ環境に特化できるように個別化(customize)する機能をもたなければならない．これらの機能が実現されて初めて人間共同作業者や他のロボットとの間での協同(collaborate)が可能となる．ここでの学習は，従来のティーチング・プレイバック方式の教示や決められたタスクを一定の評価関数や外部からの教師信号に基づいて最適に実行できるようにパラメータをチューニングしていくような狭義の学習のみではなく，教示されたものの本質を理解してその良否を自ら判断しながら幾多の経験を組織化していけるような概念形成（concept formation）をも含む広義の学習能力を意味する．本研究では以上の考察に基づき，マニピュレータの操作技能を例に人間が技能を獲得する際に構築する階層的な概念構造である運動スキーマ(motor schema)の考え方に着目し，観察による概念学習と行動による強化学習を併用することで階層的な概念構造をもつ運動プログラム(motor program)の構築を試みる．

2　技能転移：スキルトランスファ

人間が観察することにより獲得する概念構造は，経験の積み重ねにより，以前に経験し記憶している事例との類似点や相違点などから分類され，次第に洗練された構造となる．そして観察によって構築した概念に基づき実際に試行を積み重ね，失敗や成功を繰り返すうちに自然にその技能を獲得する．ここで事例とは，教師たる人間もしくは異種のエージェントが実行してみせることによって教示するもので，これを観察したエージェントは，教示された事例の背後にある行動や操作の意図，タスク構造を認識した上で技能の本質を見極め，これを自らのアクチュエータでも実行可能な運動プログラムに変換処理して自らの技能としていかなければならない．この種の研究は技能転移，あるいは「スキルトランスファ」の問題として，近年，遠隔操作ロボットやマン-ロボットによる協調制御システム(shared autonomy system)の研究分野において端緒についたばかりである．ここでの問題は，そもそも末端のエンド・エフェクタ（効果器）として異なる機構を有し，従って各々での運動記述の表現系が異なるようなエージェント間で，技能レベルの概念知識をどのように共有して授受し合えるかが最重要の研究課題となる．

ところで認知科学分野においては従来より運動記憶の構造に関する研究，すなわち状況の認識から始まって動作の実行に至る一連の運動プログラムを「記憶」との関連において説明付ける「運動スキーマ（motor schema）」の理論[4]が広く受け入れられている．運動スキーマは，よどみ

ない運動活動のコントロールを可能にするための認識と行為の生成の働きが一体となった感覚—運動からなる複合的知識構造体であり，認識に基づいて的確な運動のシーケンスを生成するための行為の汎用的なプログラムである．さらにこのような運動的側面の他に分類概念としての知識構造としての側面が重要であり，行為の大まかな全体的な計画を受け持つ概略的・抽象的なスキーマから，行為のより詳細な仕様や行為を構成する各部分を受け持つ細部的・具体的なスキーマにわたるまでの階層的な構造をもち「一般—具体関係」と「全体—部分関係」の2種類の概念間関係に関連づけられ全体としても網状の構造体を形作る[1]．これにより他者のエージェントの行動の部分的な観測からその背後の意図や行動目的を認識し，この認識された概念クラスに固有な運動系列を発火することによって，他者エージェントからの教示信号を得る一方で固有の運動を生成できるような自律系・他律系を混在させたロボットシステムの構築が可能になる．

以下本研究では，異なる表現系を持つロボット間での技能転移に関する基礎的な研究として，以下の2種類の学習能力を機械に実装することを試みる．

1. あるエージェントの行動を観察することにより運動クラスの抽象–具象関係及び一連の運動を構成する全体–部分関係（タスク構造）の二つの階層的構造から成る運動の分類認識概念の学習．
2. 1. で構築された様々な抽象レベルでの各運動概念に対して，実際に行動した結果とそのクラス下で予想される結果との偏差を報酬として得ることによってなされる一連の動作系列の学習．

前者に対して人工知能の機械学習分野での概念形成手法に基づく手法を，また後者に対しては行動からの学習手法として近年注目を集めている強化学習手法を導入し，両者のハイブリッド学習による運動記憶，すなわち運動スキーマの構築を試みる．

3 概念形成手法による観察からの学習

他者エージェントの実行を観察した経験を組織化する方法として本研究では機械学習の教師なし帰納学習の一手法である概念形成（concept formation）の手法を用いる[3],[2]．本研究では図2(a)に示すような2自由度マニピュレータの操作を観察し，手先位置をある開始点から終了点まで移動させる際の連続的なアーム状態の遷移系列を一つの観察事例と考える．アームの状態の表現には，肘関節の位置 r_1，速度 $\dot{r}_1$，及び，手先の位置 r_2，速度 $\dot{r}_2$ を一定の時間間隔の時刻 t_i に対して2次元のデカルト座標（xy座標）で算出した9つの属性値を用いる．なお運動記憶としてすべての時刻での状態を記憶しているとは考えにくいことから，一連の連続的な動作系列から速度成分がゼロとなるような時刻での状態ベクトルのみを切り出し離散的な系列データとして以下の概念学習を適用する．

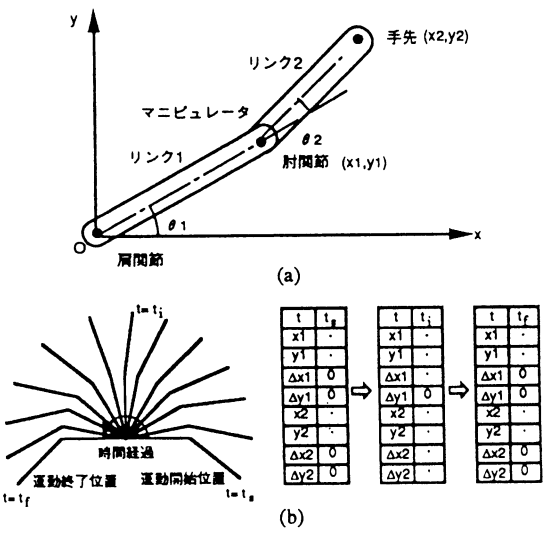


Fig. 2: 観察されたマニピュレータ操作運動の表現

観察学習により構築を目指す運動記憶の構造としては図3に示すように，事例の抽象と具象(IS-A)の関係を表す木（図の縦方向に延びる木）を生成し，更にその木の各ノードに対して時系列の状態の全体と部分(PART-OF)の関係を表す木（図の横方向に延びる木）を生成する．前者の木のノードをスキーマ(schema)，後者の木のノードをステート(state)と呼ぶ．スキーマ木の葉の部分のノードには個別の観察事例が対応しこれに対するステート木は図2(b)で示された離散的な状態ベクトル系列に対応する．スキーマ木の上位のノードになるに従って，類似の異なる観察事例を包含する運動クラス概念に抽象化が進み，そのもとでのステート木の各ノードは当該スキーマを構成するステート群がその生起時間の類似性に基づいて分節化された（当該スキーマに対してその部分となる）ステートクラスを表現することになる．ここで個々のスキーマならびにステートは明確な定義属性をもつようなクリスプなクラス概念としてではなく正規分布を仮定した確率概念として扱う[5]．

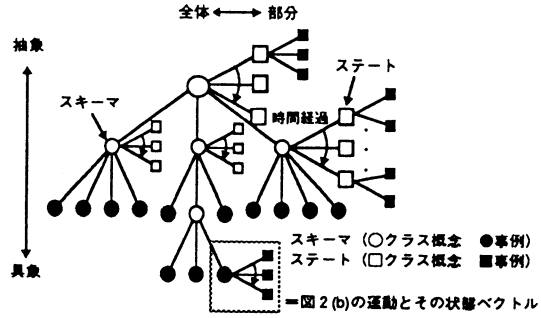


Fig. 3: 運動記憶の概念構造

このような運動概念の具象—一般ならびに部分—全体の両関係を同時に組織化する概念形成のアルゴリズムは以下の手順に従って新規な観察事例が与えられる度に逐次的に進める．いま仮に図3のような構造化がなされている段階で新たに観察事例が入力されたとすると，アルゴリズムはルートノードから順次階層を下位に降りてそのサブクラスのいずれに新事例を帰属させるべきかを判定する．これにはとりあえず新事例をこの各々のクラスに帰属させてみてクラス内類似度とクラス間非類似度の両者が上昇するようなクラスへの帰属を判定する．この際，既存のサブクラスのスキーマを構成するステート数と新事例を構成する状態ベクトル系列長は必ずしも一致しないので，各々のステート木のステートクラスに対して状態ベクトルの各々をどのように割り当てるかを判定しなければならない．この操作は観察された運動を当該スキーマの規定する文脈のもとでの複数の要素タスクへの分節化（セグメンテーション）を意味する．つぎに当該スキーマに帰属させた結果として生成されるカテゴリの評価指標として以

下のような指標

$$\frac{\sum_{k}^{K} P(C_k) \sum_{j}^{J} P(S_{kj}) \sum_{i}^{I} \frac{1}{\sigma_{kji}} - \sum_{m}^{M} P(S_{pm}) \sum_{i}^{I} \frac{1}{\sigma_{pmi}}}{K} \quad (1)$$

$P(S_{kj})$ ：スキーマ C_k の j 番目のステートの生起確率
$P(S_{pm})$ ：親スキーマの m 番目のステートの生起確率

を定義する．ここで $\sigma_{kji}, \sigma_{pmi}$ は各々子スキーマと親スキーマを構成するステート概念における各属性値の分散を標準偏差を表す．そして以下の4つのクラス操作; (i) 新事例の既存クラスへの付加 (ii) 新事例による単独クラスの生成 (iii) 既存クラスの統合 (iv) 既存クラスの分割, のうち最大の評価指標をとる操作を決定する．これをスキーマ木の各レベルにおいて再帰的に実行し観察事例の既存概念への帰属（あるいは新規概念の創製）を決定する．以上の操作を教示される事例に対して逐次的に実行され運動スキーマ概念木を生成する．

以上が概念知識の学習アルゴリズムであるが，同様の手順に従って新たな運動の動作の開始から終了時点まで観測した際に，それが既に学習されているいずれの概念クラスに属するかを上述のカテゴリ評価指標を用いることにより分類認識することも可能である．さらに全体—部分関係の構造も併せて学習していることから，新規の例の部分的な観測，すなわち動作の開始からの幾つかの状態ベクトルのサブ系列を観測した時点において，以後の動作を予測し運動全体としての概念クラスを同定することも可能であり，教示された運動を能動的に解釈して既存の概念を想起するメカニズムが実現できる．図4は2自由度マニピュレータの操作として手先が等速直線運動と等速円弧運動をするものを混在させた合計28の運動を教示例として観察学習した教示した結果で，ルート近くでほぼこれらの2種類の運動に相当する運動概念クラスが構成されており，下位概念で更に詳しい分類がなされていることがわかる．

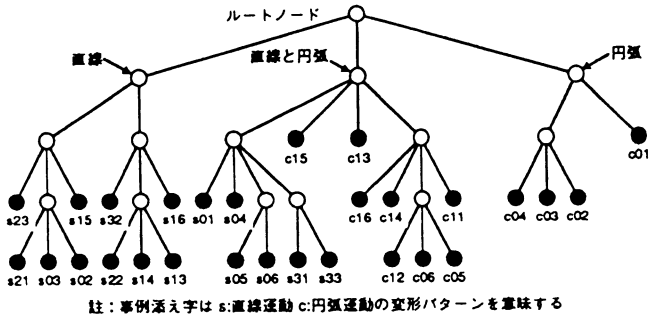


Fig. 4: 構築された概念構造の例

4 強化学習による運動プログラムの学習

前節の観察学習は他者エージェント（人間もしくは他者のロボット）の教示を観察して認識用の概念を構築するための手法である．本節ではこのような教示を受けたエージェントが構築された各々の運動概念のクラスのもとで自らのアクチュエータにより実行可能な運動プログラムを生成し認識と行為の生成の働きが一体となった運動スキーマを構築するためのプロセスについて述べる．ここではこのために行動からの学習法として知られる強化学習 (reinforcement learning) を用いる．強化学習には様々な実現方法があるが，本研究では C.J.C.H.Watkins によって提案された Q-Learning を用いる[7]．Q-Learning では，状態と行動の組に対して「Q値」と呼ばれる評価を見積もる．状態と行動の組からQ値を導く関数を「Q関数」と呼ぶ．時刻 t において，ある状態 x_t からある行動 a_t を選択すると，その状態と行動の組に対するQ値が

$$Q_{t+1}(x_t, a_t) = (1-\alpha)Q_t(x_t, a_t) + \alpha(r_t + \gamma \max_{b \in A} Q_t(y, b)) \quad (2)$$

と更新され，それ以外のQ値は更新されない．ここで γ は割引率，α は学習率，y は行動後の状態，A は実行可能な行動の集合である．学習の途上では次式に従い確率的な行動決定を行う．

$$P(a_t|x_t) = \frac{\exp(Q(x_t, a_t)/T)}{\sum_{b \in A} \exp(Q(x_t, b)/T)} \quad (3)$$

ここで，T は温度定数と呼ばれる定数であり，これにより探索の度合いが決まる．T が大きい程Q値の差が反映されず行動の選択がランダムになり，逆に T が0に近づくとわずかなQ値の差が行動の選択に大きく影響を与え極限では貪欲 (greedy) な政策となる．

強化学習はそもそも迷路環境内でのラットの認知マップ生成実験において餌を報酬とするオペランド条件づけ学習のモデルとして提唱されたものであるが，これを複雑な作業を行うロボットなどに応用するためには個々の行動の背後に存在する階層的な行動計画との関連を持たせなければならない[6]．本研究ではこのようなタスク分割に際して，前節で述べた概念形成手法により様々な抽象レベルで学習された全体—部分関係を活用することによって自動的に割り付けることが可能になる．さらに同概念知識には一連の行動系列の実行に伴いどのような観察が予測できるかについての情報も併せて学習されていることから，実際の行動結果が予測した状態と比較してどれほどのずれがあるかを評価の基準とした強化信号を内部的に生成することが可能となる．この結果学習される行動系列は教示を受けるエージェントのアクチュエータ機能に固有のものであり教示側エージェントでなされた運動制御決定をそのまま写し取るものではないが，逆にこのことが「観察」を媒介とした技能の転移の実現に途を拓くものと考えられる．

ここではこのための基礎的実験として，マニピュレータの手先が第2象限から第1象限へと向かう「右向き」の等速直線運動と第4象限から第1象限へと向かう「上向き」の等速直線運動をそれぞれ15例ずつ合計30例の観察から前節の手法に従って構築された階層的運動概念知識のうち，ルートノードの直下の「右向き」と「上向き」の2つのスキーマの各々に対して強化学習を行った実験結果について述べる．各スキーマを構成するステート系列は間隔の疎 (sparse) な時間に対する状態ベクトルの系列である．そこで各時間の間を連続的に補間するような運動系列をQ-Learningを用いて学習させる．なお観察学習がデカルト座標系の表現であったのに対し，強化学習では各関節のトルク調整による行動制御を行うことになることから関節座標による表現系を採用する．なおヤコビアン行列を使えば両表現系の間の変換は算出可能であるが，ここではあえてこのような解析的な計算は行わず，被教示側エージェントに固有な表現系として関節座標系のみを考える．また二つのスキーマ概念に対し，各々これを構成する一つのステート区間，すなわち等速直線運動のタスクを構成する要素タスクの一つについてのみ運動プログラム学習の実験を行う．

Q-Learning ではQ値の定義に必要な状態や行動は離散値を扱う．状態は手先の位置 $r_2 = (x_2, y_2)$ を「右向き」と「上向き」の概念スキーマに対し，それぞれ xy 平面上に格子状に分割した状態を考え，行動については，肩関節，肘

関節の回転角の増分$(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$で与え[6]，行動変数を

$$\Delta\theta_i \in \{-0.2, -0.1, -0.05, -0.025, -0.0125, -0.00625, 0.0, 0.00625, 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2\} \quad (\text{rad}) \tag{4}$$

とする．また1タイムステップは2.5秒とする．なお行動の選択に際しては各関節に対してあまり大きなトルクをかけられないことを考慮に入れ，途中のタイムステップにおける$\Delta\theta_i$は前時点における$\Delta\theta_i$より一つ小さい値，一つ大きい値，あるいは等しい値の三つの中から選択する．強化信号rは，途中で予め定められたマニピュレータ手先の許容可動範囲を逸脱した場合に一定量の罰（負の報酬）を与えるとともに，概念学習によって構築されたステート間の移動時間を経過した時点でのアームの予測状態からの偏差に応じた罰を強化信号として与える（図5参照）．温度

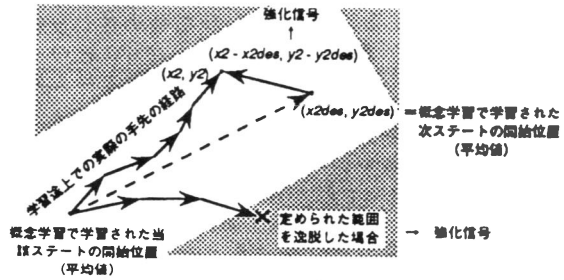


Fig. 5: 強化学習によるステート間の動作系列の学習

定数Tは探索開始時は高い値（$T = 2.0$程度）から始め学習が進むにつれて徐冷を行う．また学習率と割引率は各々0.5と0.99に設定した．

先に示した状態と行動の組に対して学習後に得られたQ-Tableに基づき，貪欲な政策(greedy policy)をとらせた場合のマニピュレータの手先の軌跡を「右向き」と「上向き」のそれぞれに対し図6(a)(b)に示す．

5 まとめ

以上までに構築された運動スキーマ概念に基づいて実際の運動制御を実現するには，教示される行動の部分的な観測に対する運動スキーマの活性化の制御機構ならびに多重の概念が想起された場合の各々のスキーマ下で学習されている運動プログラムからの内挿推論によって適合する運動系列を生成する機構を実現する必要がある．現在このような概念駆動の推論についてファジィ推論による定式化を試みている．

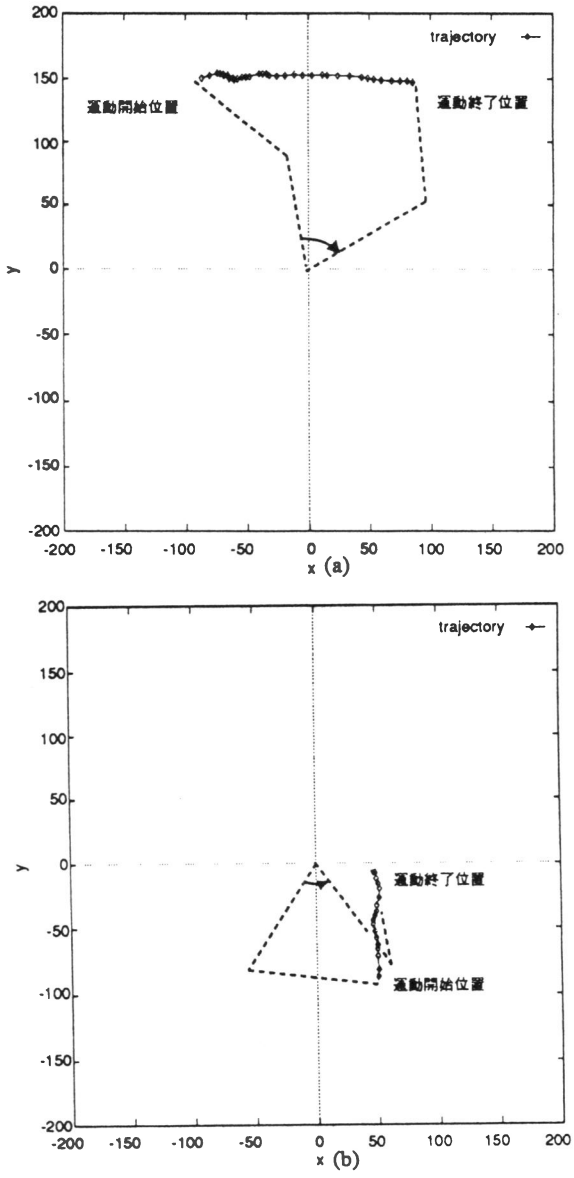


Fig. 6: 学習後の手先位置の軌跡 (a)「右向き」 (b)「上向き」

参考文献

1) F.C.Bartlett: Remembering: A Study in Experimental and Social Psychology, Cambridge Univ. Press, 1932.

2) D.H.Fisher: Knowledge Acquisition via Incremental Conceptual Clustering, *Machine Learning*, 2, 139-172, 1987.

3) W. Iba and J.H. Gennari: Learning to Recognizing Movements, in *Concept Formation: Knowledge and Experience in Unsupervised Learning*, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 355–386, 1991.

4) R.A.Schmidt: Motor and Action Perspectives on Motor Behaviour, in Meijer, O.G. and Roth, K. (Eds.), *Complex Movement Behaviour*, Elsevier Sci., Pub., pp.3-44, 1988.

5) E.E. Smith and D.L. Medin: Categories and Concepts, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1981.

6) C.K. Tham: A Modular Q-Learning Architecture for Manipulator Task Decomposition, in *Proc. of the 11th International Conference on Machine Learning*, pp.309–317, 1994.

7) C.J.C.H.Watkins and P.Dayan: Q-Learning, *Machine Learning*, Vol.8, pp.279-292, 1992.

[問い合わせ先]
〒606-01 京都市左京区吉田本町
京都大学工学部精密工学教室
槎木哲夫
Tel.: (075) 753-5266 Fax.: (075) 771-7286
Email.: sawaragi@prec.kyoto-u.ac.jp

FB2-2

自律移動ロボットの走行制御における遺伝的アルゴリズムを用いたファジィルールの自動チューニング

Self-Tuning of Fuzzy Control Rules with the Genetic Algorithm for the Travelling Control of an Autonomous Mobile Robot.

宮田仁志 Hitoshi Miyata　大木誠 Makoto Ohki　柴田修吾* Shugo Shibata　田中幹浩 Mikihiro Tanaka　大北正昭 Masaaki Ohkita

鳥取大学工学部, *関西日本電気株式会社

Faculty of Enjineering,Tottori University, *NEC Corporation Kansai, Ltd.

Abstract - We have developed an autonomous mobile robot "DREAM-1" controlled by the fuzzy theory. For its travelling control of "DREAM-1",fuzzy control rules have to be determined.For its determination,the genetic algorithm is used. In this report,a self-tuning of fuzzy control rules with the genetic algorithm method to the fuzzy reasoning for controlling a crossing travel of an autonomous mobile robot is described with simulation results.

1．はじめに

ファジィ制御は，系の既知の入出力関係をファジィ集合を含むルールの形で表現・記述し，ファジィ推論によりその制御手順を決める方法である。

ファジィ制御は，一般にｉｆ－ｔｈｅｎ形式でファジィルールを表現できるのでモデルの構造が理解しやすく，非線形な入出力関係をも容易に表現できるという特徴がある。

我々は，このファジィ制御の特徴に注目し，ファジィ制御を用いた自律移動ロボットの開発に取り組んでいる。しかし，人間が試行錯誤して作成したファジィルールでは，実際の入出力関係を表現できない場合があり，ファジィルールの調整が必要であった。

本研究では，ファジィルールの調整のために，遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）を導入し，このアルゴリズムにより調整されたファジィルールを用いて自律移動ロボットの交差点走行制御を行った。ここでは，ＧＡの導入手順と計算機シミュレーションによる学習結果について述べる．

2．遺伝的アルゴリズムの導入手順

ＧＡの導入に当たり，まず最初に行う作業は，ファジィルールを構成するメンバーシップ関数の決定である．以下に，走行制御のために決定した前件部メンバーシップ関数（式(1)）と後件部メンバーシップ関数（式(2)）を示す。

$$\mu = 1 \cdot \exp\left(-\frac{(X - Xc)^2}{2 \cdot d^2}\right) \quad \text{---（1）}$$

$$\theta = \frac{h}{1 + \exp(-g(\mu - 0.5))} \quad \text{---（2）}$$

式(1)において，Ｘは入力変数、μは適合度，X_cは関数の中心位置，ｄは関数の標準偏差である．また関数の高さは１である．式(2)において，ｈは関数の高さ，ｇは傾き，θは前輪切り角である。

図１に，式(1)と式(2)のメンバーシップ関数を示す。前件部においては，メンバーシップ関数が左右非対称な形状を表現できるように、ｄを中心位置の左右でそれぞれd_1，d_2と個々に定義する。メンバーシップ関数の決定後，式(1)では変数X_c，d_1，d_2，式(2)では変数ｈ，ｇをチューニング・パラメータとして，図中，矢印が指す遺伝子にコーディングする。

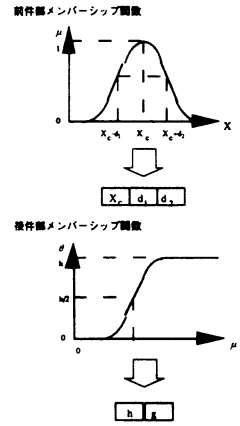


図１．メンバーシップ関数の決定と遺伝子へのコーディング

図２に，式(1)と式(2)を用いて決定したファジィルールを示す．入力変数は距離X_1，X_2，X_3，と移動ロボットの姿勢角ϕの４個であり，出力変数は前輪切り角θの１個である。またｉはルール番号を示し，０，１，．．．，５の値を取る。次に、図中，矢印が指すように１個のファジィルールを遺伝子１個に対応させてコーディングする。このコーディングを６個のファジィルールについて行う。ここで，１個の遺伝子には，１４個のチューニング・パラメータがあり，遺伝子全体では，８４個ある。

各チューニング・パラメータに入る値は，メンバーシップ関

数中では１０進数であるが，遺伝子中では２進数である。遺伝子の長さはビット数で表され，この長さが各チューニング・パラメータに入る値の領域を決める。各変数のビット数を以下に示す。

チューニング・パラメータX_{1ci},d_{11i},d_{12i},X_{2ci},d_{21i},d_{22i},X_{3ci},d_{31i},d_{32i},ϕ_{ci},$d_{\phi 1i}$,$d_{\phi 2i}$は全て９ビットであり，h_i,g_iは共に７ビットである。ここで，ϕ_{ci}とh_iの最上位ビットは符号専用である。また１個の遺伝子の長さは，１２２ビットである。以上のような設定の後，ＧＡによる遺伝子の進化の過程で適切な知識表現を発見できることを期待する。

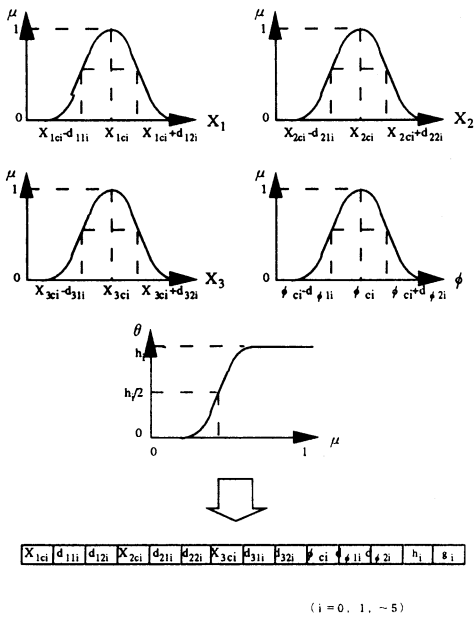


図２．ファジィルールと遺伝子

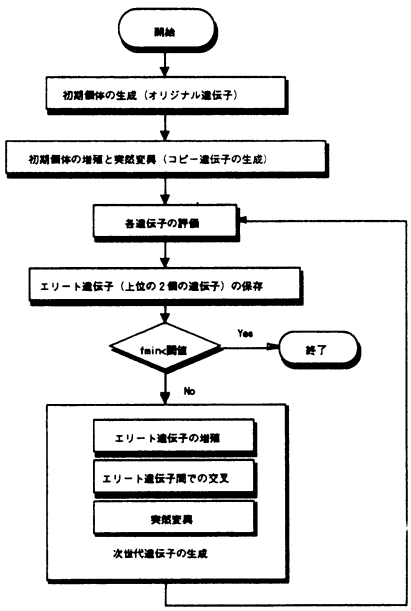


図３．遺伝的アルゴリズム

３．遺伝的アルゴリズム

本研究におけるＧＡを図３のフローチャートに示す。

まず最初に，ＧＡで用いる遺伝的処理（淘汰とエリート遺伝子の保存(selection)，増殖(multiplication)，突然変異(mutation)，交叉(crossover)）について簡単に述べる。

（ａ）淘汰とエリート遺伝子の保存

この処理は，遺伝子の進化の過程で最も大切な生殖に属する。例えば，同一世代にある４個の個体（遺伝子I_1，I_2，I_3，I_4）が生成されたと仮定すると，その４個の個体それぞれに対する評価値（学習誤差）を比較して最も評価値の小さい個体とその次に値の小さい値個体をエリート遺伝子として次世代に保存し，残りの２個の遺伝子を淘汰（削除）する。

（ｂ）増殖

増殖は，前世代までで最も評価の高かった遺伝子をオリジナル遺伝子として，これと全く同じ遺伝子を生成し，遺伝子の数を増加する処理である。

（ｃ）突然変異

突然変異は，遺伝子中のあるビットの値が低い突然変異確率（＝１５％程度）で，０なら１に，１なら０に変化する処理である。

（ｄ）交叉

現在，交叉の種類には，１点交叉，２点交叉，多点交叉，一様交叉，ブレンド交叉，シャッフル交叉等数多くの交叉があるが，ここでは，これらの交叉のうち最も簡単な処理である１点交叉を用いる。交叉は，２個のエリート遺伝子間で起こり，この両遺伝子のある同一箇所に交叉位置(crosspoint)が決定し，その交叉位置より以下のビットを交換する処理である。交叉率は，８０％程度である。

次に図３のフローチャートに従って、以下にアルゴリズムを述べる。

① 初期個体の生成：初期ファジィルール（６ルール分）から第１世代の元となるオリジナル遺伝子を生成する。

② 初期個体の増殖と突然変異：オリジナル遺伝子からコピー遺伝子を４個増殖し、そのコピー遺伝子に突然変異率１５％の確率で突然変異を起こさせて第１世代を生成する。

③ 各遺伝子の評価：生成した遺伝子に対応するファジィルールを用いて、走行制御シミュレーションを行う。その走行結果を評価関数によって評価する。第１世代では，オリジナル遺伝子を含む５個の遺伝子について評価を行い，第２世代以降は，４個のコピー遺伝子について評価を行う。

④ エリート遺伝子の保存：オリジナル遺伝子をも含めた各遺伝子の評価値を比較し、最も小さい評価値を持つ遺伝子とその次に小さい値を持つ遺伝子を次世代に残す。エリート遺伝子以外の遺伝子は淘汰する。もしオリジナル遺伝子の評価値（f_{min}）が、ある閾値よりも大きければ⑤へ進み、小さければ終了する。

⑤ 次世代遺伝子の生成：淘汰によって削減された個数だけオリジナル遺伝子を増殖する。またエリート遺伝子間に交

叉率８０％の確率で交叉を施す。最後にオリジナル遺伝子以外の４個の遺伝子に突然変異を施して次世代遺伝子を生成する。

⑥ f_{min}＜閾値の条件を満たすまで、①、②、③、④の操作を繰り返し、遺伝子を進化させる。

４．シミュレーションにおける諸条件

上述のアルゴリズムを移動ロボットの交差点走行制御に適用する。ここでの計算機シミュレーションによる自動チューニングのために採用した諸条件を説明する。

４－１．問題設定

以下に、走行シミュレーションにおける前提条件を示す。

１．コースは、交差点タイプとした。
２．コースは、二車線であり左側通行である。
３．コース上には、移動ロボット以外に車はない。
４．学習時の移動ロボットのスタート位置は左車線の中央とする。
５．信号機等による交通規則は導入しない。
６．移動ロボットは、一定速度で走行する。

４－２．入力変数の定義

図４に、入力変数の定義を示す．入力変数は、X_1，X_2，X_3，ϕの４個である。以下にこれらの入力変数の意味を示す。

X_1：移動ロボットの右側面から壁又は信号機までの距離
X_2：動ロボットの左側面から壁又は信号機までの距離
X_3：移動ロボットの正面から壁又は信号機までの距離
ϕ：移動ロボットの姿勢角ϕである。出力変数は前輪切り角θの１個である。

４－３．評価関数の定義

評価関数は、遺伝子の情報から作成したファジィルールによる移動ロボットの走行を評価するものである。評価関数によって算出する評価値は，遺伝子の適応度に相当し，エリート遺伝子の保存時に用いる。

図５に，以下の評価関数を用いて，移動ロボットの走行状態を評価するコース上の位置を示す。図中点線で示す位置に移動ロボットが到達した時に，評価を行い，評価地点１，２の２ヶ所で行う。そしてそれぞれの地点で得られる評価値を合計した値を遺伝子の評価とする。遺伝子の評価は，評価値が零の時，最も高くなる。

評価地点１で用いる評価関数；

$$f_{1a}=2\,|\,X_1-24\,|+3\,|\,\phi-0\,|\qquad(3)$$

$$f_{1c}=3\,|\,X_1-64\,|+2\,|\,\phi-0\,|\qquad(4)$$

評価地点２で用いる評価関数；

$$f_{2a}=3\,|\,X_1-24\,|+2.5\,|\,\phi+90\,|\qquad\ldots(5)$$

$$f_{2c}=3\,|\,X_1-64\,|+2\,|\,\phi-90\,|\qquad\ldots(6)$$

総合評価；

$$f_a=f_{1a}+f_{2a}\qquad\ldots(7)$$

$$f_c=f_{1c}+f_{2c}\qquad\ldots(8)$$

ここで，式(3)と式(4)は，移動ロボットに左折を学習させる時に用いる関数であり，式(5)と式(6)は移動ロボットに右折を学習させる時に用いる関数である。またこれらの関数の入力変数は距離X_1と姿勢角ϕである。式(7)と式(8)は，評価地点１での評価値と評価地点２での評価値とを合計する式であり，この式により最終的な評価値を算出する。

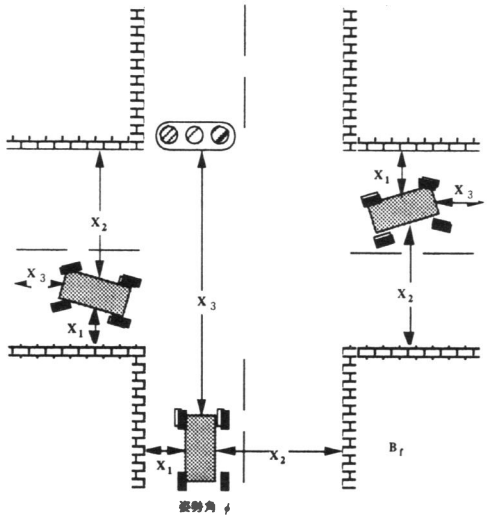


図４．入力変数の定義

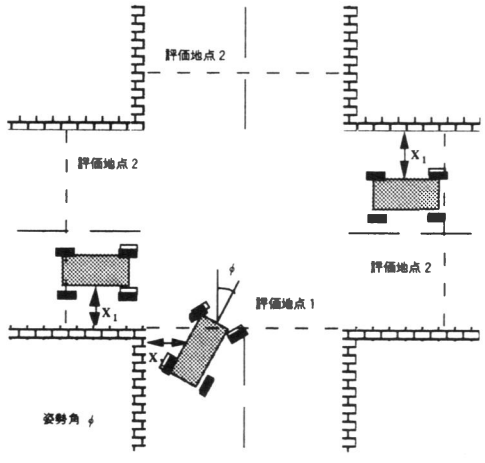
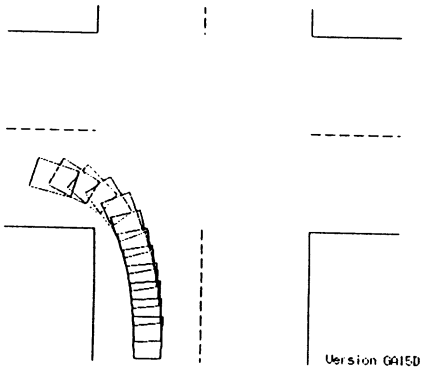


図５．評価関数の定義

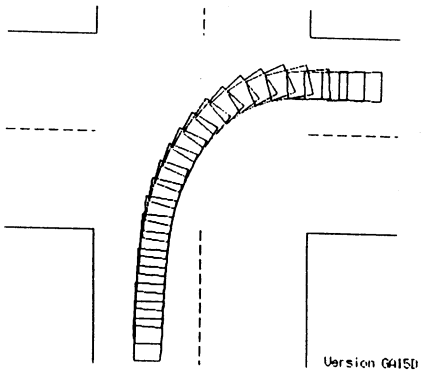
5．シミュレーション結果

図6（a）に，思考的に与えたファジィルールを初期値としてＧＡにより左折を学習した結果を移動ロボットの走行軌跡で示す．移動ロボットは，車線の中央付近からスタートして比較的柔軟に走行している。このチューニングに要した世代数（学習回数）は1202であった。　続いて図6（b）に，思考的に与えたファジィルールを初期値としてＧＡにより右折を学習した結果を示す。移動ロボットは，上で述べた左折の時と同じ位置からスタートして比較的柔軟に走行している。このチューニングに要した世代数（学習回数）は324であった。

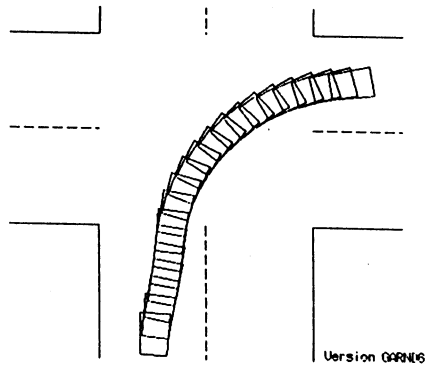
また右折については，乱数で与えたファジィルールを初期値とした場合も学習を行った。図6（c）に，その学習結果を示す。移動ロボットは，比較的柔軟に走行している。むしろ思考的に初期値を与えて学習したときよりも，右に寄ってから右折を行っている分柔軟に走行している。このチューニングに要した世代数（学習回数）は62であった。



(a)



(b)



(c)

図6．シミュレーション結果
(a)左折（初期値を思考的に与える場合）
(b)右折（初期値を思考的に与える場合）
(c)右折（初期値を乱数で与える場合）

6．まとめ

本研究では，連続的な関数の解を求める事だけでなく，離散的な関数の解をも求める事ができる遺伝的アルゴリズムを取り入れ，移動ロボットの走行制御におけるＧＡの有効性を追求した。

ＧＡによる学習では、初期値によらず収束するという傾向を確信した。しかし、初期値によっては学習時間が長くなるという傾向も示された。この点については、今後、更なる検討が必要である。

参考文献

（1）安居院猛，長尾智晴：ジェネティックアルゴリズム，（株）昭晃堂　1993
（2）古橋武，中岡謙，内川嘉樹：１０ｔｈ　Ｆｕｚｚｙ　Ｓｙｓｔｅｍ　Ｓｙｍｐｏｓｉｕｍ（Ｏｓａｋａ，Ｊｕｎｅ，1-4，1994）

連絡先

〒６８０　鳥取市湖山町南４丁目１０１番地
鳥取大学工学部電気電子工学科
大北正昭
ＴＥＬ　0857-28-0321（内）4192
ＦＡＸ　0857-31-0880

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

FB2-3

マルチエージェントロボットの進化型行動学習

Evolutionary Behavior Learning for Multi-Agent Robot

前田　陽一郎
Yoichiro MAEDA
大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

Abstract—In this research, the evolutionary algorithm is applied to behavior learning of an individual agent in multi-agent robots. Each robot which is an agent is given two behavior duties both collision avoidance from the other agent and target (food point) reaching for recovering self-energy. Collision avoidance behavior is described with fuzzy rules in advance. Every agent learns the behavior strategy, that is the ratio of two behavior duties which the agent moves, and is selected by its self-energy. Simulation results of strategy learning are also reported in this paper.

1．緒　言

最近、生命や生物を計算機を用いて人工的にシミュレートしようとする人工生命（ALife）がロボット分野でも盛んに研究されている。生物学や動物行動学では小さな要素の相互作用の集合から生物的な振る舞いが生じてくることが明らかになっている。人工生命では、局所的な下位のルールを積み上げ、ボトムアップにより定義していない上位のルールを自発的に発生すること、すなわち創発という概念が基本となっている。このような概念は従来のトップダウンの階層型ロボット制御システムにはなかった考え方である。

これについて１０年近く前にブルックス[1]も進化機構こそ含まれていないが、従来の階層制御構造ではなく、上位の行動が下位の行動を包含しているというサブサンプションアーキテクチャを提唱している。コーザ[2]らのグループは遺伝的プログラミングと呼ぶプログラムの発生機構にGAを適用した手法を用いてロボットの壁伝い移動、アリの迷路移動、などの例題でその有効性を証明している。またマルチエージェントの研究では畝見[3]が強化学習の概念を用いてエージェントの集団行動をシミュレートし、集団の中の棲み分けの発生を確認している。

本論文ではマルチエージェントロボットを対象とし、個々のエージェントにおける行動学習に進化アルゴリズムを適用した。複数のロボット（エージェント）にはそれぞれ他のエージェントに衝突しないための衝突回避（CA）とエネルギー回復のための目標到達（TR）の２つの行動が課せられている。ここでCAに関する行動はあらかじめファジィルールで記述しておき、エージェントがCAとTRのどちらを重視して行動するかの重み付け（戦略）を衝突回避性能や目標到達性能に応じて修正する。CAとTRはそれぞれの行動結果に応じて自己エネルギーと行動ゲインを上下させ、集団進化において評価値の高いものには子孫を残し、低いものは死滅させる。これを繰り返してエージェントの行動学習・集団進化を行なうことにより、最終的に優秀な戦略が集団を支配し、エージェントが淘汰される。

2．エージェントの行動ルール

ここでは問題設定として、自律移動ロボットの衝突回避（CA）および目標到達（TR）の２つの行動に着目して進化アルゴリズムによる行動学習を行うことを考える。これら２つの行動はいずれもロボットにとって重要ではあるが、相反する目的であるため、ロボットにとっては行動決定の際に自己矛盾を引き起こす。

これらの行動をより人間に近い表現をするため、CAは簡略化ファジィ推論を用いて回避ルールを記述した。TRはロボットにとっては餌場（FP）と考え単純に最も近いFPに向かって進むように設定している。CAに用いたファジィルールを図１に示す。

尚、各エージェントは個別に個体エネルギーを保有しており、これがゼロになると死滅する。すべてのエージェントの初期エネルギーは本シミュレーションでは同じにしている。

方位＼距離	LT	LL	LR	RT
CL	PS	PS	MS	MS
MD	PS	PM	MM	MS
FR	PM	PL	ML	MM

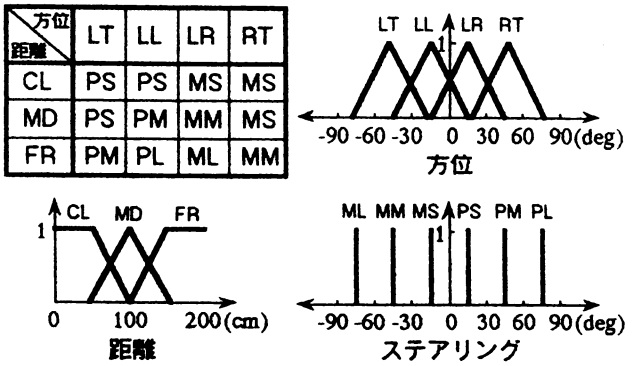


図１　エージェントの衝突回避に用いたファジィルール

3．エージェントの戦略学習

次に個々のエージェントにおけるCAとTRの行動結果に基づき、エージェントの個体エネルギーと行動ゲインによる行動戦略（CAとTRの重みなど）の学習を行う。これは実際のロボットが行動した結果に基づき、自分自身に報酬を与えることにより学習を促進するもので一種の強化学習とも考えられる。

この問題設定では簡単のため、各エージェントの移動速度は一定とし、方位角を以下の式で決定している。

$$\theta = \theta_0 + Gs \times (dSfp + Gcol \times dScol + Gwall \times dSwall) \quad (1)$$

それぞれ、θ_0：前回のロボットの絶対方位、Gs：ステアリングゲイン、dSfp：目標（餌場）到達旋回角、Gcol：衝突回避ゲイン、dScol：衝突回避旋回角、Gwall：壁回避ゲイン、dSwall：壁回避旋回角を示している。

そこで報酬は、以下のように与えられる。尚、ここで＋は報酬、－は罰を意味している。

＜個体エネルギー＞

エージェント（ロボット）は以下のように移動すればするほど自己の個体エネルギーを失う。

$$Eloss = -dEloss \times T \quad (2)$$

Eloss：移動消失エネルギー、dEloss：単位時間あたりの消失エネルギー（一定）、T：経過時間である。

またエージェントが目標（餌場）に到達したときにだけ以下の報酬が与えられる。

$$E_{TR} = +Erew \quad (3)$$

E_{TR}：目標到達の報酬、Erew：餌場で与えられる報酬（一定）である。

さらにあるエージェントAが最も近いエージェントB（障害物）が一定の危険領域（Dc）以内に入っていた場合、Bが最も接近したときに以下の罰がAに与えられる。

$$E_{CA} = -Gp \times Emax \times (Dc - Dr) / Dc \quad (4)$$

ここで、E_{CA}：衝突回避の罰、Gp：罰ゲイン、Emax：初期エネルギー（一定）、Dc：危険領域（一定）、Dr：最も近いロボットまでの距離、を示している。以上よりエージェント個体の総エネルギーは以下の式で与えられる。

$$Eall = E_0 + Eloss + E_{TR} + E_{CA} \quad (5)$$

Eall：個体エネルギー、E_0：前回のエネルギーである。

＜行動ゲイン＞

あるエージェントがもっているエネルギーの状態により、以下のようにステアリングゲインを修正する。

$$Gs = Gs + Gs\_up \quad (Eall < Elow)$$
$$= Gs - Gs\_up \quad (Eall > Ehigh) \quad (6)$$

Gs_up：ステアリングゲインの増分（一定）、Ehigh, Elow：ゲイン修正のエネルギー上,下限値（一定）である。また衝突回避ゲインは以下のように修正される。

$$Gcol = Gcol + (Dc - Dr) / Dc \times Gcol\_up \quad (7)$$

Gcol_up：衝突回避ゲインの増分（一定）を示している。オンラインでこれら２つのゲインを修正することにより、行動戦略（CAとTRの重み）の学習がなされる。

4．エージェントの集団進化

ここではすでに求めた個体エネルギーを用いて、各エージェントの進化を行う。個体エネルギーEallは生物進化に例えると、環境の変化に対するエージェント（個体）のロバスト性に対する評価と考えることができる。そこで以下の判断基準でエージェント集団を自然淘汰させる。

Eall＜０のとき

・その個体を死滅、かつ

・集団の中で最も個体エネルギーの大きい個体を増殖

あるエージェントが死滅した場合に限り、残りのすべてのエージェント（個体）の中から、Eall最大のものを１個増やす。これはいわゆる自然淘汰に相当するが、この増殖において新たに作るエージェントの行動ルールや戦略学習のパラメータを一部変化させることによって突然変異の効果を導入することができ、この場合、優秀な個体を発生させる可能性をもたせることもできる。

尚、ある個体が死滅したときに個体エネルギー（適応度）に比例した確率でランダムに２個体を選んで遺伝的アルゴリズム（GA）の手法を用いて集団を進化させることもできる。但し、この場合には親を必ず残し、集団の個体数を保存するようにする。遺伝子は図１の簡略化ファジィ推論の後件部実数値をはじめとして前述の一定値であるパラメータを要素として表現すれば、交叉、突然変異によりエージェントのもつパラメータを最適化するように世代交代させることが可能になる。

5．シミュレーション

今回のシミュレーションでは、エージェントの集団進化を除く、戦略学習までの評価を行った。シミュレーション結果を図２に示す。各パラメータの初期値は、Emax=200、dEloss=1.0、Erew=50.0、Dc=30.0、Gs=0.1、Gcol=1.5、Gwall=0.5、Gp=0.3、Gs_up=0.01、Gcol_up=0.1、Ehigh=50.0、Elow=200.0である。この例題ではエージェントが４つで、a)は目標（餌場）が４つの場合、b)は３つの場合である。

a)は餌場の数がエージェントと同数なため、それぞれ異なる餌場に棲み分けが起こっているが、ある時間が経過すると他の餌場に出かけていくものも出てくる。b)ではエージェントの数より餌場の数が少ないため、いきなり激しい餌場の奪い合いが始まり、３つのエージェントは２つの餌場の取り合いをしている。

実際にはこれ以外のパラメータを変えたシミュレーションも数多く行なったが、いずれもエージェントが自分の失敗や成功を基に行動戦略を徐々に自己学習していく様子が見られた。但し、本シミュレーションでは集団として秩序のある行動形質を獲得するところまでは期待できず、これにはエージェントの集団進化まで含めたシミュレーションを行なう必要がある。発表ではこのシミュレーション結果についても報告する予定である。

6．結　言

複数ロボット（マルチエージェント）の衝突回避と目標到達の２つの相反する行動を例にとり、個体エネルギーと行動ゲインを基に行動戦略の学習を行なうことを試みた。エージェント集団は進化的アルゴリズムによりさらに優れた子孫を生み出すことも可能である。今後は特に集団進化の効果的なアルゴリズムに重点をおいて研究を進めていく。

参考文献

[1] R.Brooks, "A Robust Layered Control System For a Mobile Robot," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-2, No.1, pp.14-23 (1986)

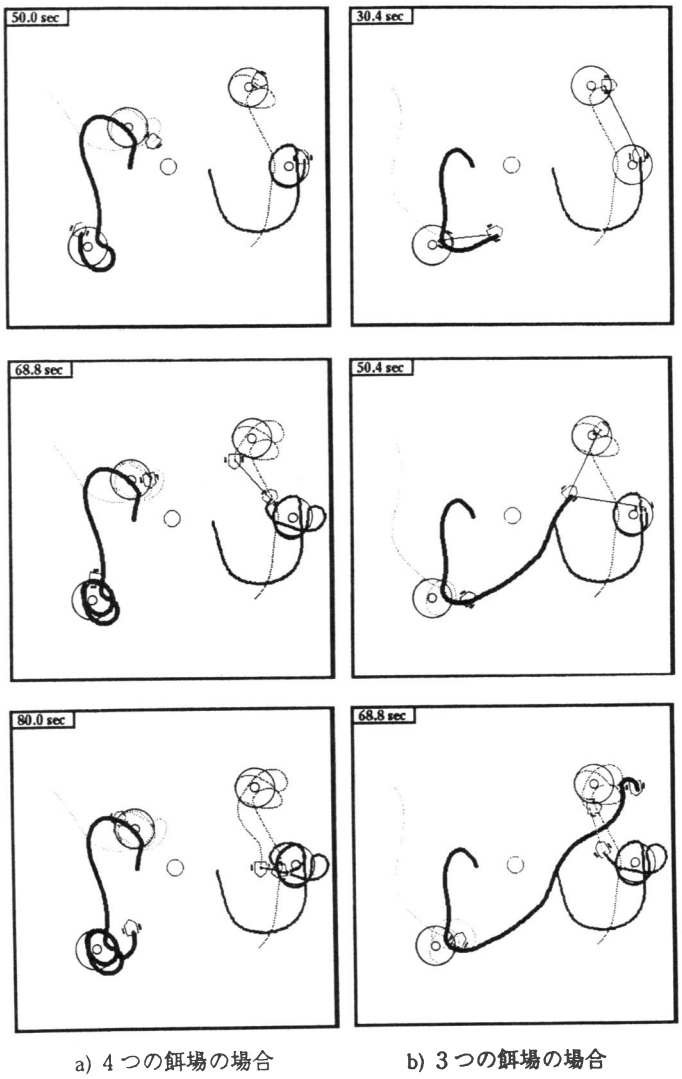
[2] J.R.Koza, *Genetic Programming*, The MIT Press (1992)

[3] 畝見達夫, "実例に基づく強化学習法," 人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp.697-707 (1992)

＜連絡先＞〒572　大阪府寝屋川市初町18-8

大阪電気通信大学　経営工学科　前田陽一郎

TEL:0720-25-4698 FAX:0720-24-0014



a) ４つの餌場の場合　　b) ３つの餌場の場合

図２　シミュレーション結果

FB2-4

ファジィ，ニューラルネットワーク，RBF ネットワークを用いた隊列移動する複数移動ロボットに関する研究

Robots Moving in formation by using Fuzzy, Neural Network and RBF Network,

廣田薫* Kaoru hirota　森下巌** Iwao Morisita　桑原強司** Tuyoshi Kuwabara　石田健一** Kenichi Ishida　大舘裕章** Hiroaki Ohdachi

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科
Dept. of Systems Science, Tokyo Institute of Technology
** 法政大学工学部大学院工学研究科システム工学専攻
Dept. of Systems Eng. , Engineering Division. ,Hosei Univ. Graduate School

Abstract - Vision-based moving robots in formation are presented, where one robot leads the other robots. Then robots play the game of carrying an object in cooperation. Each robot must detect the object for the chase using the image information, where each robot is painted in different color and the 3-layer neural network is used for classification. The simplified fuzzy reasoning method and the Radial Basis Function(RBF) network are used for the control of the mobile robots.

1　はじめに

複数移動ロボットが，同一空間内において，ある決められた位置に移動する問題を考える．複数ロボットが互いに協調的行動をするとき，ロボットが周囲の環境を認識する場合において画像処理による視覚センサを用いることは有効である．本稿では，４台の移動ロボットの視覚画像処理に基づく隊列移動について述べる．このような行動は，複数移動ロボットにとって基本行動要素の一つである．またその隊列移動行動に続く応用行動例を挙げる．本研究では，各ロボットに異なった色を塗装し，その特徴的色情報に基づく色分類を行うことで，画像認識が行われる．そこで色分類手法には，３層ニューラルネットワークを用い，学習によって色をパターン分離する関数を獲得する．また，移動ロボットの制御にはラジアル基底関数（ＲＢＦ; Radial Basis Function)によるＲＢＦネットワークを用いる.[1]

2　複数移動ロボットシステムの構成

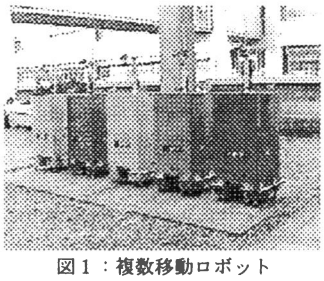


図１：複数移動ロボット

図１に示すような，幅５０ cm，高さ１６０ cm の直方体形状の，５台のロボットを所有している．各ロボットは，視覚としてのＣＣＤカメラ，触覚としての４つのバンパースイッチ，５つの超音波距離センサを搭載している．視覚センサは，レンズ(キャノン製)，カラーＣＣＤカメラ(ソニー製)，画像フレームメモリ(サイバーテック社製)によって構成されている．ＣＣＤカメラより取り込んだ画像を，フレームメモリに格納し，カラー１ピクセルの赤(Ｒｅｄ)，緑(Ｇｒｅｅｎ)，青(Ｂｌｕｅ)に，それぞれ８ビットの階調値を有している．カメラは，回転頭部に搭載されて，ステッピングモータによって駆動される頭部を回転することでさらに広い画角を得ることができる．ボディの前方，左右方向には４つのバンパースイッチを搭載し，衝突を感知する．また，２つのステッピングモータによって独立に駆動される車輪と，ロボットの本体を支える４つキャスター車輪を有している．

各ロボットは，オンボードのノートパソコン(NEC PC 9801NS/R, 32-bit, 16MHz)により，制御，動作計画，センシングといった全ての処理を行う．

3　画像認識

本研究では，各ロボットの外板に，それぞれ目立つ異なった色を塗装しており，特徴としての色情報を用いて，ロボットと非ロボット領域の分割を行う．カラー画像は，一つの画素に関して，赤（Ｒｅｄ），緑（Ｇｒｅｅｎ），青（Ｂｌｕｅ）の３要素の強度値によって特徴づけられる．従って，各画素は，ＲＧＢ空間における１つの点あるいはベクトルとして捉えることができる．

典型的に，色彩表現の手段としては，色強度が周囲の照明によって様々に異なるため，そのままＲ，Ｇ，Ｂの各強度値を用いるより，一画素中に含まれる赤と緑の割合がよく使われ，次式によって与えられる．

$$x=\frac{R}{R+G+B},\quad y=\frac{G}{R+G+B},\qquad (1)$$

ここでxとyは，それぞれ赤と緑の割合で，R,G,Bは，それぞれ赤，緑，青の強度値である．上式によって，全ての色が，xとyの２次元平面上に表現される．

５台のロボットには，それぞれ赤，紫，青，緑，黄色に塗装する．ここでの目的は，カラー画素をそれぞれの色クラスに分類することである．本研究では，２つの入力層，３つの中間層，６つの出力層をもつ３層ニューラルネットワークを色パターン分類問題に適用する．バックプロパゲーション法による学習によって，ネットワークは，色クラスを分離するような関数を獲得するようになる．また，実際にネットワークの出力値は，連続値であるので，全出力ユニット中で最大値のユニットをその画素における色とする．その結果として，２値の画像$I\in\{0,1\}$を得る．なお，利用可能な全画素数は５１２×４８０画素であるが，実時間処理を考慮して，実際に処理される画素数を６４×６０画素に縮小している．上記の処理によって得られる２値画像Iは，画像上の小領域や変化するカメラによる色反応によるノイズを含んでいるので，誤認識した点や孤立特徴点を除去する必要がある．得られた画像が２値であるので，ノイズ除去法として３×３の小領域において，次に示されるような多数決フィルタを用いる．

$$I'(i,j)=\begin{cases}1 & if\ \sum_{k=i-1}^{i+1}\sum_{l=j-1}^{j+1}I(k,l)\geq 5,\\ 0 & otherwise.\end{cases}\qquad (2)$$

最終的に，画像上における追従すべきロボットの位置は，２画像I'におけるロボット領域の重心値を求めることによって，画像上のxy座標として得られる．

4　ファジィ、ＲＢＦネットワークによる移動ロボット制御

隊列移動において，追従を行う各ロボットは，追従すべきロボットの画像上の位置情報を用いて操舵角と速度の両方を制御する．

4．1　ファジィ

カメラの回転部の制御に簡略ファジィ推論を用いている。これは画面フレームから目標物が外れたときに追従させるためのもので、回転のオーバーシュートを減らすためである．

4．2　ＲＢＦネットワーク

ロボットの制御にはＲＢＦネットワークを用いる．ＲＢＦネットは３層構造のネットワークで表すことができる．基底関数をガウス関数に選んだ場合，ＲＢＦネットワークは次のように定式化される．

$$y_k(x_1,\ldots,x_n)=\sum_{j=1}^{m} w_{jk}\mu_j(x_1,\ldots,x_n)\ , \qquad (3)$$

$$\mu_j(x_1,\ldots,x_n)=A_{1j}(x_1)\ldots A_{nj}(x_n)=\prod_{i=1}^{n} A_{ij}(x_i)\ , \qquad (4)$$

$$A_{ij}(x_i)=\exp\left(-\frac{(x_i-a_{ij})^2}{b_{ij}}\right)\ , \qquad (5)$$

ここで，a_{ij} と b_{ij} は，それぞれ，ガウス関数の中心と幅と呼ばれ，w_{jk} は中間層と出力層の間の重み係数である．

4．3　学習則

ＲＢＦネットは，勾配法を用いて，ネットワークの出力を期待出力に近づけるように学習することができる．
この方法は，誤差関数 E を減少する方向へ，中心 a_{ij}，幅 b_{ij}，重み w_{jk} を最適に調整する手法であり，多層パーセプトロンの学習則である一般化デルタルールに相当し，ラジアル基底関数に関して文献［2,3］で紹介された．学習則は次のようになる．

$$\Delta a_{ij}=\alpha\sum_{k=1}^{l} w_{jk}\,\mu_j\,\frac{2(x_i-a_{ij})}{b_{ij}}\,\delta\ , \qquad (6)$$

$$\Delta b_{ij}=\beta\sum_{k=1}^{l} w_{jk}\,\mu_j\,\frac{(x_i-a_{ij})^2}{b_{ij}}\,\delta\ , \qquad (7)$$

$$\Delta w_{jk}=\gamma\sum_{k=1}^{l}\mu_j\,\delta\ , \qquad (8)$$

ここで，

$$\delta=y_k^*-y_k\ , \qquad (9)$$

α，β，γ は，最急降下法の係数である．

4．4　中間層ユニットの自動生成

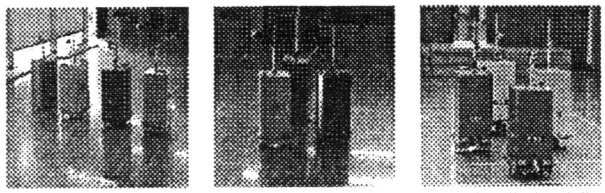
ＲＢＦネットは，新たな中間層ユニットを生成することで，ネットワークの構造を容易に変更することができる．この戦略は，誤差関数 E がもうこれ以上収束しないと判断されたとき，中間層に新たなユニットを加えて，前節で述べた学習則を適用し，さらにネットワークを適応させるものである［2］．すなわち，次の条件が満足されたときに，中間層ユニットの生成が行われる．

$$\Delta E=\left|\log_{10}E(t-1)-\log_{10}E(t)\right|\le\varepsilon\ , \qquad (10)$$

実際は，今回用いたネットワークは２出力であり，２つの独立した誤差関数 E_1 と E_2 を用意し，それぞれ独立して処理される．

5　幾つかの形態による隊列移動の実験結果

直列，三角状，ダイヤモンド状の３つの形態の隊列移動を，図２に示す．図２(a)は，４台の移動ロボットを用いた直列隊列移動のデモンストレーションの様子を示したものである．これは，追従すべきロボットの背後に追従する簡単なルールのみを使っている．
図２(b)は，３台の移動ロボットを用いた三角形状隊列移動，図２(c)は，４台の移動ロボットを用いたダイヤモンド形状隊列移動のデモンストレーションの様子を示したものである．これらは，それぞれ，追従すべきロボットの左後方，右後方に追従するようなルールを用いている．各ロボットの平均移動速度は，１７cm/sである．



(a)直列隊列移動　(b)三角形状隊列移動　(c)菱形状隊列移動

図２：様々な形状による隊列移動実験

6　応用行動例（オブジェクトを使ったゲーム）

隊列移動行動からの発展行動として，２台の移動ロボットを用いて，同一空間内にオブジェクトを与え，それを２台のロボットが互いに協調的に，あらかじめ定めた位置に運んでゆくというゲームを行わせる．これにより複数移動ロボットにおける協調性の評価を行う．

7　おわりに

視覚に基づく幾つかの形状による複数移動ロボットによる隊列移動及び応用行動例に関して述べた．幾つかの制御則の知識を用いることで，複数の形態の隊列移動を行うことができることをデモンストレーションによって示した．また，ニューラルネットワークを用いたカラー画像の色分類法，及びＲＢＦネットワークを用いた移動ロボットの制御法について述べた．これらの手法は，いずれも，人間がこれまで行ってきたような煩雑な作業・操作を軽減することをねらった学習能力に着目している．将来は，これらのアプローチを適用することによって，ロボットシステムの適応能力が，さらに高まると思われる．

参考文献

［1］ T. A. Poggio and F. Girose："Networks for Approximation and Learning", Proceedings of the IEEE", 78, PP. 1481-1497(1990).

［2］ 片山、鍬田、梶谷、西田："自己増殖型C∞級ファジィモデルとカオス時系列同定問題への応用", 第８回ファジィシステムシンポジウム, pp. 253-256(1992).

［3］ H. Ichihashi："Iterative Fuzzy Modeling and a Hierarchical Network", IFSA '91, Brussels, pp. 49-52(1991).

連絡先：　〒184
東京都小金井市梶野町3-7-2
法政大学工学部システム制御工学科 森下研究室
TEL 0423-87-6256
石田健一／大舘裕章

FB3-1

尺度変換を用いた多目的意思決定法

Multiple Criteria Decision-Making Using Measure Transformation

宮城隼夫 Hayao Miyagi　平良直之 Naoyuki Taira　山下勝己 Katsumi Yamashita

琉球大学工学部
Faculty of Engineering, Ryukyu University

Abstract：The pairwise comparison technique has been widely used in the decision making process. AHP(Analytic Hierarchy Process) developed by T.L.Saaty utilizes this technique well. The method utilizes the relationship between the product-type pairwise comparison matrix and the eigenvector of this matrix. However, it has been pointed out by some reseachers that harmony between numerical consistency and linguistic consistency is precarious.

This paper presents the distance measure to harmonize numerical consistency with linguistic consistency. Thus, the paper constitutes the additive-type pairwise comparison matrix. The additive-type pairwise comparison matrix is then transfomed to the product-type pairwise comparison matrix, which is used to compute eigenvector, by a measure transfomation technique.

1．はじめに

人間の主観的判断による評価を定量化する手法として，Saatyが提案したAHP[1,2]がある．AHPには，a)乗法形一対比較行列の固有ベクトルを重みベクトルとする，b)整合性が満たされるまで一対比較行列を作成し直すことで人間の意思をより反映させる，という特徴がある．しかしながら，AHPでは言語的尺度を比尺度として扱うため，数値と人間の感覚量との整合性がとりにくいという指摘[3]がある．

本報告では，距離尺度による加法形一対比較行列から乗法形一対比較行列に尺度変換を行うことで，AHPの問題点に対処しうる意思決定法を提案する．また，b)を適用することができない状況おける一対比較行列の作成法についても考察する．

2．AHPによる意思決定

n個の項目$X_1,X_2,\cdots,X_n$があり，その本来の重みが$w_1,w_2,\cdots,w_n$として得られるものとする．AHPでは，各項目の重みの比を考えて一対比較行列を

$$A=\begin{bmatrix} w_1/w_1, w_1/w_2, \cdots, w_1/w_n \\ w_2/w_1, w_2/w_2, \cdots, w_2/w_n \\ \vdots \quad\quad \vdots \quad\quad\quad \vdots \\ w_n/w_1, w_n/w_2, \cdots, w_n/w_n \end{bmatrix} \tag{1}$$

で与え，その固有ベクトルを重みベクトルとみなす．また，式(1)の整合性は次式のようになる．

$$a_{ij}\cdot a_{jk}=\left(\frac{w_i}{w_j}\right)\cdot\left(\frac{w_j}{w_k}\right)=a_{ik} \tag{2}$$

整合性を式(2)で与えることから，言語間の合成演算は乗法的に考えていることになる．整合性が式(2)で与えられる行列に対して，これを乗法形一対比較行列と呼ぶことにする．

実際に一対比較行列$A=[a_{ij}]$を作成する際，意思決定者の回答には，言語的表現に対応させた1から9の数値あるいはその逆数を用いる．

AHPにおいて，言語間の合成演算を乗法的に考えるのに対し，人間が普通に行う言語間の合成演算は必ずしも乗法的ではなく，どちらかというと加法的であると思われる．

3．一対比較行列に対する尺度変換

本報告では，i)言葉による尺度を距離尺度とし，整合性が加法的になるような一対比較行を作成する．整合性が加法的に与えられる一対比較行列に対して，これを加法形一対比較行列と呼ぶことにする．ii)加法形一対比較行列に尺度変換を行うことで，乗法形の一対比較行列を得る．i)，ii)より，AHPにおける理論的特徴と言語的尺度で一対比較行列を得るという2つの利点を融合させることが可能となる．以下に尺度変換について述べる．

まず，Aの要素$a_{11},a_{12},\cdots,a_{nn}$と一対一に対応するパラメータ$\rho_{11},\rho_{12},\cdots,\rho_{nn}$を考える．次に，$\rho_{ij}$を要素とし演算＋が定義されている代数系（$P$；＋）を定義する．ここで，$P$を言語的尺度からなる要素をもつ集合とし，図1のような尺度変換f：$P\rightarrow A$を考える．

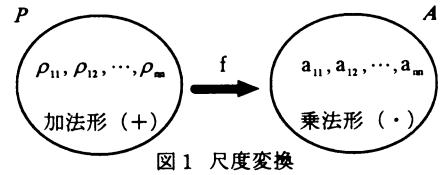


図1　尺度変換

fが尺度変換であるためには，次の2つの条件が成立しなければならない．

（Ⅰ）　fは全単射
（Ⅱ）　$f(\rho_{ij}+\rho_{jk})=f(\rho_{ij})\cdot f(\rho_{jk})$

（Ⅰ）の条件は仮定より明らかに成立する．（Ⅱ）が成立するためには，fとして指数関数を選べばよいことがわかる．本報告では$e^{\rho_{ij}}$を採用し，

$$a_{ij}=f(\rho_{ij})=e^{\rho_{ij}} \tag{3}$$

とする．

第一段階としての加法形一対比較は次のようにして作成する．まず最初に，意思決定者に「項目X_iは項目X_jよりもどの程度重要か」といった質問を行う．これに対して意思決定者は主観的判断に基づき，表1に示される言語的表現に対応させた数値あるいはその負の数で回答する．

表1　言語的表現に対応したρ_{ij}の値

同じ位重要	→	0
少し重要	→	1
かなり重要	→	2
非常に重要	→	3
圧倒的に重要	→	4

得られた一対比較の結果を以下のようにまとめる．

$$P=\begin{bmatrix}\rho_{11},\rho_{12},\cdots,\rho_{1n}\\ \rho_{21},\rho_{22},\cdots,\rho_{2n}\\ \vdots\quad\vdots\qquad\vdots\\ \rho_{n1},\rho_{n2},\cdots,\rho_{nn}\end{bmatrix} \tag{4}$$

ただし，P は次のような性質をもつ．

$$\rho_{ii}=0,\quad \rho_{ji}=-\rho_{ij},\qquad {}^{\forall}i,j=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

P の要素間の整合性は加法的に与えられ，式(2)と対比した形で表すと次式のようになる．

$$\begin{aligned}\rho_{ij}+\rho_{jk}&=(\rho_i-\rho_j)+(\rho_j-\rho_k)\\&=\rho_{ik}\end{aligned} \tag{6}$$

第二段階としての乗法形一対比較行列は，式(3)を用いた尺度変換により次式となる．

$$A=\begin{bmatrix}e^{\rho_{11}},e^{\rho_{12}},\cdots,e^{\rho_{1n}}\\ e^{\rho_{21}},e^{\rho_{22}},\cdots,e^{\rho_{2n}}\\ \vdots\quad\vdots\qquad\vdots\\ e^{\rho_{n1}},e^{\rho_{n2}},\cdots,e^{\rho_{nn}}\end{bmatrix} \tag{7}$$

上式は既約な正行列となるので Perron-Frobenius の定理[4]が満足されるとともに，rank $A=1$ となるので固有値の中で0でないものはただ一つ λ_{max} だけとなり，その値はnとなる．式(7)を変形すると以下のようになる．

$$A=\begin{bmatrix}e^{\rho_1-\rho_1},e^{\rho_1-\rho_2},\cdots,e^{\rho_1-\rho_n}\\ e^{\rho_2-\rho_1},e^{\rho_2-\rho_2},\cdots,e^{\rho_2-\rho_n}\\ \vdots\quad\vdots\qquad\vdots\\ e^{\rho_n-\rho_1},e^{\rho_n-\rho_2},\cdots,e^{\rho_n-\rho_n}\end{bmatrix}$$

ここで，式(7)に $v=\left[e^{\rho_1},e^{\rho_2},\cdots,e^{\rho_n}\right]^T$ をかけると

$$\begin{aligned}A\cdot v&=\begin{bmatrix}e^{\rho_1-\rho_1},e^{\rho_1-\rho_2},\cdots,e^{\rho_1-\rho_n}\\ e^{\rho_2-\rho_1},e^{\rho_2-\rho_2},\cdots,e^{\rho_2-\rho_n}\\ \vdots\quad\vdots\qquad\vdots\\ e^{\rho_n-\rho_1},e^{\rho_n-\rho_2},\cdots,e^{\rho_n-\rho_n}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e^{\rho_1}\\ e^{\rho_2}\\ \vdots\\ e^{\rho_n}\end{bmatrix}\\&=\begin{bmatrix}ne^{\rho_1}\\ ne^{\rho_2}\\ \vdots\\ ne^{\rho_n}\end{bmatrix}=nv\end{aligned} \tag{8}$$

となる．これより，v は A の固有ベクトルであることがわかる．したがって，A の固有ベクトルを重みとして考えるのではなく，求めた固有ベクトルの個々の要素を対数変換し，それを各項目の重みとする．

4．順序関係を考慮した独立要素の選定

4.1 一対比較行列における独立な要素

一対比較行列を作成する際，行列の右上三角部分の n(n-1)/2 個の要素に対してデータが必要となる．実際には，n(n-1)/2 個の要素には独立要素が n-1 個存在[5]し，独立要素に対して一対比較データを与えれば，残りの従属要素に対するデータは数値的整合性により一意的に決定することができる．

AHP では，人間の意思をできるだけ反映させるために，すべての要素に対して一対比較データを与え，整合性が満足されるまで一対比較行列を作成し直すという方法をとる．しかしながら，意思決定を行う状況によっては，一度しか一対比較行列を作成する機会が与えられず，行列を作成し直すことができない場合もある．

4.2 独立要素の選定

本報告では，一対比較行列を作成する際，一度しか作成することができない場合を考慮し，独立要素に対してのみ一対比較データを与えてもらう．独立要素の選定は，一対比較行列に意思決定者の意思がより反映されるように，項目間の順序関係[6]を考慮した以下の手順で行うことを提案する．

[step 1] 関係行列を作成する．

意思決定者に「項目 X_i は項目 X_j よりも優先すると思うか」といった質問を各項目のすべての組み合わせに対して行い，その回答に基づき，表2に示される値を用いて関係行列を作成する．但し，行列の対角成分は1とする．関係行列を作成することにより，各項目の順位を決定することができる．

表2 回答に対応した値

優先する	→	1（対称成分は0）
優先しない	→	0（対称成分は1）
同等である	→	0（対称成分は0）

[step 2] 関係行列から，各項目のすべての組み合わせに対しハミング距離を求める．

求めたハミング距離は，項目間の順位の開きの大きさとみなすことができる．

[step 3] ハミング距離の小さい組み合わせから n-1 個選択し，独立要素とする．

初めに，順位の開きが大きい項目間についての一対比較について考える．意思決定者は，どちらを優先するかという質問に対しては正確に回答することができるが，どの程度優先するかという質問に対して正確に回答することは困難である．

次に，順位の開きが小さい項目間についての一対比較について考える．意思決定者は，関係行列を作成した時点で各項目の順位が決定されていることから，どちらを優先するかという質問に対して回答することは可能である．また，どの程度優先するかという質問に対しても，順位の開きが小さいことから，正確に回答することができる．

したがって，一対比較行列に意思決定者の意思をより正確に反映させるためには，順位の開きが小さいもの，すなわちハミング距離の小さいものから n-1 個選択し独立要素と定めればよい．

5．おわりに

本報告では，加法形一対比較行列から乗法形一対比較行列に尺度変換を行う意思決定法を提案した．また，一度しか一対比較行列を作成することができないような状況における行列の作成法についても考察した．

参考文献

1) 木下栄蔵，"意思決定入門"，啓学出版，1991
2) T.L.Saaty, "The Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill, 1980
3) 中山弘隆，"多目的意思決定－理論と応用－Ⅰ"，システムと制御，Vol.30，No.7，pp.430-438，1986-07
4) 児玉慎二，須田信英，"システム制御のためのマトリックス理論"，計測自動制御学会，1984
5) 小野寺力男，"グラフ理論の基礎"，森北出版，1971
6) 今井秀樹，"情報数学"，昭晃堂，1982

連絡先：〒903-01 沖縄県中頭群西原町字千原1番地
琉球大学工学部電気・情報工学科
平良直之
TEL. 098-895-2221 （内）3263

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

FB3-2

商品選択支援システムについて

On Purchase Decision Support System

中島　信之　　醍醐　元正　　般若　裕子
Nobuyuki Nakajima　Motomasa Daigo　Yuko Hannya
富山大学 経済学部 経営学科　㈱コスモスネットワーク
Faculty of Economics, Toyama University　Cosmos Network

Abstract: Many purchase decision systems (PDS) are proposed. They have similar structures in common. We show that it is need for constructing a PDS to use correlations between attributes of commodities and influence of purchaser's characters properly.

Keywords: decision making, decision support sysytem, purchse decision

1．はじめに

近ごろ，顧客の商品選択を支援するシステムの開発をよく目にする．時代の要請ということもあろうが，それに応えられるところまで理論や環境が整ってきたという状況も大きい．

商品選択という行為を意思決定という面からみれば，個人の意思決定，それもすぐれて私的色彩の濃いものである．そこで，支援システムを構築するにはこういった点を十分考慮する必要があるだろう．筆者らはすでに，これまで発表された商品選択支援システムをサーベイし，分析を試みてきた（[A-3,11]）．本発表では，これらを足がかりにして，商品選択支援システムを構築するための方法論について考えてみたい．

2．意思決定とその支援

意思決定が学問の対象となったのは1940年前後のことで，近代組織論，近代管理学において始まったとされる．この事実が示すように，主に集団の意思決定が意思決定論の対象であった．集団はその成り立ちによって組織と組織以外の集団とに分けられ，それぞれに応じた意思決定がある．組織の意思決定の例として企業の意思決定があり，国家や自治体の意思決定は組織でない集団の意思決定に分類される（図１）．

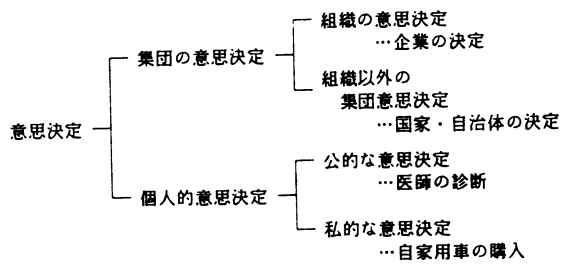


図１．意思決定の分類

意思決定論が個人の意思決定を視野に入れるようになったのは，これよりやや遅れて，1950年代に入ってからであった．Edwards[A-1]が例としてあげているのは，お菓子屋の店先で，25セントを持ちキャンディを買おうかやめようか迷っている１人の子供の決定問題である．この子供には，A：25セント＋キャンディなし，B：15セント＋10セントのキャンディ，の２つの選択肢がある．つまり，財（キャンディ）を購入するか否かで，経済学的な意思決定といえる．そして，個人はいわゆる経済人である．経済人とは，ベンサムに由来するといわれ，(1)完全情報，(2)識別可能性，(3)合理性，という３つの仮定を満たす一種の完全人と定義される．

経済人仮説は経済現象の解明に一定の貢献をしたが，その一方で生身の人間の行動との間の乖離も注目されるところとなった．意思決定の合理性についての Simonら（[A-12,13]）や Tverskyら（[A-8]）等の研究はよく知られるところである．宮川（[A-10]）に整理してまとめられている．

意思決定の合理性についての探究と平行して，意思決定の支援に関する研究，支援システムの開発も行われた．企業のあるいは経営者の意思決定を支援するシステムであるところの「意思決定支援システムＤＳＳ」（広内ら[A-6]など）が知られている．

さて，ついで個人の意思決定について考えてみよう．これも「半ば公的な意思決定」と「より私的な意思決定」の２つに大別される．例えば，医師の診断のように職業人として行う決定は公的な色合いが強く個人的な好みの入る余地は小さい．それに対して，商品の購入のような決定は私的な色彩が濃い．われわれがこの発表で論じようとしている商品選択は，私的な意思決定に分類されるものである．

個人の意思決定の支援が注目されるようになったのは，Jungermann[A-7] によれば，1980年の前後以降のことである．小橋は[A-9] は，個人的な意思決定とその支援に

ついて認知心理学の立場から詳細に論じている．同著の中で，彼は，眼鏡の購入を支援する話を例にあげ，いくつかの支援システムを概観した上で，決定支援の正当化として，『支援されるべき行為をしている人間に，とってかわるのでなく，彼を「助ける」性質のものであること，すなわち，現実の実行の責任とイニシアティブは被支援者の手にあること』『被支援者のおかれた環境の中で「実用的」であること』の２点が重要であると述べている．

３．商品選択支援システム

「商品を選択する」とは，ある種の財（例えばキャンディ）の購入を前提に，具体的にどの物件を購入したらよいか選ぶ作業である．上で例示した「Ａ：財（キャンディ）を購入する vs Ｂ：財を購入しない」とはタイプは違うが，これも一種の意思決定である．この意味で，商品選択支援も一種の意思決定支援である．

また，商品リストの中から顧客の希望にそった物件を見つけてきてこれを提示するということからいえば，商品検索システムでもある．つまり，商品選択支援システムは意思決定支援システムの面と商品検索システムであるという面とを併せ持つ．これからこの両面について考察をおこなう．

まず意思決定としての側面：商品はいくつかの属性を持つ．顧客はそれぞれの属性に対する希望をもつ．個々の物件は，その属性ごとにあるいは希望を満たしあるいは満たさない．商品選択とは，属性ごとの評価値を総合して物件の総合評価値とし，その大きな物件を選ぶという作業であると定義される．多属性意思決定問題として見る限り，その構造はむしろ簡単である．Jungermannは個人の意思決定問題は複雑さと不確定さが不可避と述べた([A-7])が，商品選択は複雑でも不確定でもない．選択がシステムによって支援される必要性は，一般にリスト内の物件数は膨大なものになるという事情による．

商品検索システムとしての側面：顧客の希望に応じて物件を探してくるという点でデータ検索システムと位置づけられる．だが，申告された検索条件に忠実に検索すればよいというわけでないという点で通常の検索システムと異なる．というのは，顧客は購入しようとする商品について十分な知識を持っていなかったり，希望が漠然としたあいまいなものであったり，あるいは意識的にあるいは無意識的にウソの申告をしたりするということがあるからである．

商品選択支援システムの納得感

商品選択支援システムが**支援**システムである所以は，小橋[A-9]が主張するとおり，責任とイニシアティブは被支援者（顧客）にあり，システムはそれを助けるという点にある．そのためには，顧客のイニシアティブが生かせるようにすることと同時に，ユーザが自分で判断しているという実感を持てるようにしておくことも重要である．そういった実感を，例えば中島らは「顧客の満足度」([B-4,5])と呼び，山下は「納得感を与える」と表現をしている([A-14])．

ユーザの負担の軽減

もし理論的に最良の解を見出すことが目的であれば，大きな負担をユーザにかけることになっても，必要となる情報は取り出さねばならない．情報量の方が重要だからである．だが，商品選択支援システムの場合は，ユーザ(顧客)が満足でき，納得できる解を得られればよいので，ユーザの負担を小さくすることが必要十分な情報を得ることよりも大切になる．

さて，ユーザに納得感を与えることでのできる支援システムを，ユーザの負担を最小限に押さえて構築しようとすれば，ユーザや商品などについて十分な知識が欠かせない．そこでわれわれは，これまでに発表された多くの商品選択支援システムをサーベイし，検討をおこなった．その結果，顧客および商品属性について以下のように仮定するのが自然だと考えるに至った．

顧客に関する仮定

①商品知識に関する仮説：顧客は商品についての完全な知識をもっているかもしれないが，もっていないかもしれない．

このことについて，増井らは「意志決定者がその実体をあまり把握していない場合…」あるいは「住宅購入者はあまり広い知識を持っていないので…」と書いており([B-11])，また後藤らは「選択する対象の知識や基準が明確でない場合の意思決定問題…」と書いている([B-14])．

もちろん，その一方で，内藤らの「ユーザの嗜好に合致する適切な検索結果…」([B-13])や，舘らの「（ユーザは）自分の希望と（検索された）データ情報を比較しより近いデータを選択している。」([B-10])のように，ユーザは自分の求めるものをよく知っていると仮定する立場もある．しかし，これは提示された物件が自分の希望と合致しているかどうか判定できるとする仮定である．

よしんばユーザが対象商品について十分な「知識」をもっている場合であっても，ユーザが最適物件を選択できるという保証はない．むしろそうでない可能性の方が大きい．例えば洋服やネクタイなどの洋品雑貨について，気に入る品と似合う品が必ずしも一致しないということからも明らかであろう．これは商品知識の欠如というよりも後で述べる「ユーザ属性と商品属性との干渉」の結果ということができる．この点からも商品選択支援システムのもつ意義は小さくない．

そこで，支援システムは，ユーザは購入しようとする商品について十分な知識を持っていないとの仮定の下で

構成すべきだという結論を得る．

②希望商品イメージとその表現に関する仮定：顧客は自分の求める商品についての漠然としたイメージをもつだけのことが多く，また，たとえ明確なイメージを持っていても，それを適確かつ明示的に表現できないことが多いと考えるべきである．

顧客のイメージをいかにうまく取り出すかは工夫を必要とする．例えば奴久妻ら[B-5] は協調的対話システムの導入によって解決しようとしている．対話を重ねることで，顧客のイメージを修正しながら引き出そうとしている．また，少数の単純化された表現でユーザのイメージを引き出そうという工夫もある．内藤らによる質問ネットワーク（[B-12,13]），野村らの，あいまいな検索条件に対応できるデータ上のあいまい属性の作成([B-2]) などがそうである．例えば，質問ネットワークは，

「出張に便利なホテル」

という希望条件が示されたとき，これをあらかじめ

「宿泊費が安い」and/or「駅から近い」

と解釈することで，ユーザの負担の軽減をはかっている．また，あいまい属性とは

「（車の）広い室内」

が検索条件として与えられたとき，データベース内に，この条件に対応したあいまい属性を作成することで，数値データを知らなくても検索を可能にしている．

③物件の評価・比較に関する仮説：人は個々の商品どうしを比較できるかもしれないし，できないかもしれない．

経済人仮説では財貨や価格などの微小な差異も識別可能と仮定されるが，当然のことながら生身の人間ではこの仮定は成り立たない．

もちろん，大ざっぱに比較することはできるのではあるが，商品選択に関して，問題はデータ物件の数の多さにある．たとえ大ざっぱに比較できても，何十何百という物件リストの中から満足できる物件を見出すのは容易な作業ではない．

そこで，あまり多くない数の候補物件にしぼって選択の範囲を狭めることが支援システムの重要な役割となる．どの程度にしぼるかは商品の種類や状況によって異なるが，もし他との比較がそれほど困難でないようであれば，数件の候補物件を提示して，ユーザの選択に委ねる．ユーザのイニシアティブを重んじるという支援システムの基本からみても望ましい方向であろう．ただ，比較が相当困難とみられることもあり，そういった場合には，ユーザの負担を考慮して，非常に少数(ときにはただ1つ)の最適とみられる物件にしぼって提示すべきだと思われる．

また，システムの構築には，商品の属性それ自体やユーザ属性との相互干渉などが重要な役割を果たす．そこで，以下のように仮定する．

商品データ構造に関する仮定

①データ属性の間の相関に関する仮定：多くの場合，データ属性間には通常相関がある．

例えば，中古車の場合，年式と価格に関して，年式の新しい車は価格は高く，価格の安い車は年式は古くなる．あるいはいい方をかえると，同じ価格でも，年式の新しい車は安く，古い車の場合は高いと評価される．

階層分析法（ＡＨＰ）をはじめとする多くの多属性決定問題では，属性間の相関を，個々の物件（代替案）を見ながら属性値を評価する，というやり方で処理している．例えば，この物件の価格は，年式や装備からみて安いあるいは高い，という風に評価している．

だが，商品選択では，顧客は属性の希望値を検索のための条件として申告するので，個々の物件ごとに他の属性を見ながら評価するといったやり方は採用できない．

そこでつぎのような2つの問題が生じる．第1に，単純に個々の属性の評価値の加重和をもって総合評価値とするのは適当でないという問題，第2に，検索希望条件が他の属性値に連動するという問題である．

最初の点に関して，高萩[B-9]はファジィ積分により，また中島ら([B-4,5]) はファジィ推論により評価の総合化を提案している．増井らはパレート最適法によっている（[B-11]）．内藤らの賃貸マンション検索システムでは，「広さ」を間取り別に設定している（[B-13]）．

第2の問題は，ある属性に対する希望条件が他の属性値と連動して変わり得るので，1つ1つの属性を取り出して条件を設定することが難しいという問題である．中島ら（[B-4,5]）は希望条件を100点満点中の90点にあたる条件として受け取るというやり方で，増井ら([B-11]) は，パレート最適法を適用することで対処している．なお，今後の研究課題であると思われる．

②ユーザと商品との干渉に関する仮定：多くの商品選択では，ユーザ属性が商品属性を規定するという干渉がある．

ユーザ属性と商品属性の干渉の例をあげれば，就職希望者の出身地や性別といったユーザ属性によって就職先の所在地や施設などの商品属性の価値が変動する（前田ら[B-1]），間取りは家族構成によってある程度規定される，などがある．

干渉を意識的に取り扱ったものに，前田らの「就職ガイダンス」([B-1]) や，読み手の属性と本との干渉を考慮した杉本らの「読書相談システム」([B-3]) などがある．下村らの「贈答品検索システム」では，さらに

贈り主－贈り先－商品

といった3重の干渉構造が生じている（[B-8]）．中島らの「中古車購入」([B-4,5]) はユーザと商品の間にほとんど干渉を持たない例である．

商品選択ではユーザと商品間の干渉の存在は必然的なので，きちんとシステムに組み込むことが大切だと考えられる．これも今後の課題だといえる．

属性の重視度

ユーザによって属性間の重視度が変わるという点で干渉に似るが，評価と重視度は異なるので，一応別に考える．舘らは項目（属性）ごとに重視度を入力してもらい，それでファジィ集合の台の幅を決定している（[B-10]）．高萩は重要度を元にファジィ測度を決定し，総合評価を求めている（[B-9]）．

重視度を導入すれば，ユーザの希望にそった物件の検索に役立つのは確かだが，ユーザの入力の負担は増大する．したがって，よりよい物件のためには少々の入力の煩雑さはがまんできるといった商品でなければ，重視度を導入しても意味はない．その場合でも，如何にユーザの負担を軽減するかが重要課題となる．内藤らは賃貸マンションの選択問題で，サンプル物件を例示してその評価を通じて学習によって重視度を決定するやり方を提案している（[B-13]）．高萩は，階層構造の上位レベルの属性についてはユーザが入力し，下位レベルの属性についてはシステムが与えるというやり方で負担の軽減をはかっている（[B-9]）．

4．最後に

商品選択および商品選択支援システムに関する研究は端緒についたばかりで，未だ十分に究めるところまでは至っていない．特性を活かした設計論が必要だと思われる．もっともっと研究の求められる分野であろう．

参 考 文 献

ここで，参考文献を２種類に分ける．[A-*] として本文に関する参考文献を，また,[B-*]として参考にしたシステム例を示す．

[A-1] W. Edwards, The theory of decision making, Psych. Bull., 51, 4, pp.380-417, 1954
[A-2] W. Edwards, Behavioral decision theory, Ann. Rev. Psych., 12, pp.473-498, 1961
[A-3] 般若裕子，中島信之，醍醐元正，商品選択支援システムの分析，第５回ノンエンジニアリングファジイ・ワークショップ講演論文集，pp.60-63，1995
[A-4] P.T.Harker, The art and science of decision making: the analytic hierarchy process, in B.L. Golden et al. Eds., The analytic hierarchy process, Springer-Verlag, 1989
[A-5] C.-L. Hwang, & K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making, Spring-Verlag, 1981
[A-6] 広内哲夫，小坂武，意思決定支援システム，竹内書店新社，1983
[A-7] H. Jungermann, Speculations about decision-theoretic aids for personal decision making, Acta, Psychologica, 45, pp.7-34, 1980
[A-8] D. Kahneman & A.Tversky, Prospective theory: analysis of decision under risk, Econometrica, 47-2, pp.263-291, 1979
[A-9] 小橋康章，決定を支援する，東大出版会，1988
[A-10]宮川公男，意思決定論，丸善，1975
[A-11]中島信之，ファジィ商品検索システム概観，第３回ファジィ学会北信越支部ミニシンポジウム講演論文集，pp.23-26，1994
[A-12]A. Newell & H. A. Simon, Human problem solving, Prentice Hall, 1972
[A-13]Herbert A. Simon, Administrative Behavior, 3rd ed., The Free press, 1975
[A-14]山下利之，「納得感」を与える意思決定支援システムについて，ファジィ学会誌，第７巻，第１号，pp.44-51，1995

[B-1] 前田博，吉田和明，知識ベースを導入した柔軟な意思決定支援システム，第８回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.125-128，1992
[B-2] 野村恭彦，大木直人，小高俊之，横山光男，松本温，ファジィ検索のための平均演算子による曖昧属性の生成，ファジィ学会誌，第４巻，第２号，pp.344-360，1992
[B-3] 杉本重雄，藤田岳久，阪口哲男，田畑孝一，マルチメディア知識ベースとその児童向き読書相談システムへの適用，情報処理，第33巻，第７号，pp.838-845，1992
[B-4] 中島信之，般若裕子，ファジィ推論による総合評価法とその応用，ファジィ学会誌，第５巻，第４号，pp.761-771，1993
[B-5] 醍醐元正，中島信之，般若裕子，条件の自動変更を組込んだ商品購入支援システムの構築，ファジィ学会誌，第７巻，第２号（掲載予定），1995
[B-6] 奴久妻章，山田耕一，原田直樹，石丸恵一，協調的なシステムにおけるた意思決定支援，第９回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.173－176，1993
[B-7] 柴垣ゆかり，國藤進，事例ベース推論に基づくプラン生成システム，第９回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.385-388，1993
[B-8] 下村有子，金田千恵子，ファジィ理論を応用した贈答品検索システム，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.109-110，1994
[B-9] 高萩栄一郎，ファジィ積分によるデータ検索法，第９回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.221-224，1993
[B-10]舘正寿，橋本宏之，加藤恒規，利田いずみ，ファジィを利用した金沢の飲み屋街の検索，日本ファジィ学会北信越支部研究会，1993
[B-11]増井重弘，寺野寿郎，弓野政義，三森節子，ファジィ論理を用いた多目的意思決定支援システム，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.113-132，1994
[B-12]林勲，内藤榮一，若見昇，最急降下法を用いた学習型ファジィ結合演算子の提案，ファジィ学会誌，第５巻，第５号，pp.1132-1141，1993
[B-13]内藤榮一，高木友博，赤堀裕志，若見昇，ユーザの嗜好に適応した学習型ファジィ検索システム，第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.113-116，1994
[B-14]後藤繁生，佐藤敬，ＡＨＰとファジィを用いた対話型スキー場選択支援システム，情処研報，94，pp.61-68，1994

［問い合わせ先］：
中島　信之
〒930 富山市五福3190
富山大学経済学部経営学科
TEL 0764-41-1271(ex.2685)
FAX 0764-33-8744

FB3-3

熱源システムの最適運転計画のためのファジィ意思決定支援

Fuzzy Decision Support for Optimal Operation Scheduling of Heat Sources System

柏木　法仁*　　鳶　敏和*　　加賀　昭和**　　山口　克人**
Norihito Kashiwagi　Toshikazu Tobi　　Akikazu Kaga　Katsuhito Yamaguchi

*ダイダン株式会社　技術研究所
*Technical Research Laboratory, DAI-DAN Co., Ltd.

**大阪大学　工学部
**Faculty of Engineering, Osaka University

Abstract : The tendency evaluating cost, energy consumption and environmental load generated by production activity during the product life cycle is rising as part of grappling with the global environmental problem. Applying this to the operation phase of heat sources system, it can be said that the decision making from the viewpoint of the multiobjective optimization including criterions other than the cost minimum operation will be requested as a factor to decide the operation strategy. In this paper, we propose a method that the importance degree of each criterion in the multiobjective decision making environment composed of two or more criterions is extracted by the interaction with a decision maker and that multiobjective optimal solution of the heat sources system operation scheduling is derived from the acquired preference information. Moreover, we present the results of the multiobjective optimal operation scheduling simulation of a model heat sources system by using the proposed method.

1　はじめに

地球環境問題に対する世界的な関心の高まりにより、建設分野においても、生産活動に伴う費用のみならず、電力や化石燃料などのエネルギー消費、排出物や廃棄物などの環境負荷を、建築物の建設・運用・改修・廃棄というライフサイクルにわたって評価する気運が高まりつつある[1]。この趨勢を冷凍機やボイラなどの各種機器から構成される熱供給設備、すなわち、熱源システムの運用段階にあてはめて考えた場合、その運転戦略を決定づける要因として経済性（システム運用コストの最小化）以外の評価基準も含めた、多目的最適化の観点からの意思決定が求められていると言える。

本研究では、複数の評価基準からなる多目的意思決定環境における個々の評価基準の重要度を意思決定者との対話によって抽出し、獲得した選好情報から熱源システム運転計画の多目的最適解を導出する手法を提案する。また、本提案手法を用いて、運用段階におけるエネルギーコストの最小化を目標とする経済性最適運転、および、一次エネルギー消費量の最小化を目標とする省エネルギー性最適運転を共に考慮した、モデル熱源システムにおける多目的最適運転計画のシミュレーションを実施する。

2　多目的最適化のための意思決定手法

従来の熱源システムでは、一定の品質のエネルギー（冷温水、蒸気など）を最小費用で無駄なく供給することが要求されてきた。これは、経済性という一目的の意思決定環境での問題解決と見なすことができる。しかし、単なる経済性最優先型の運転戦略から省エネルギーや環境保全の視点も含めた運転戦略への移行を考える場合、経済性、省エネルギー性および環境保全性という多目的意思決定環境の中での問題解決の枠組みが必要となる。

このような問題の解決手法として多目的線形計画法[2][3]がある。多目的計画問題では、一般に、評価基準がトレードオフ関係にあることが多いため、客観的な判断材料がない場合の最適点の決定は意思決定者の主観的判断に委ねられることになるが、この作業は、評価基準の重要度に関する情報があれば容易に実施することができる。

我々は、多目的線形計画法として、通約性のない目的関数同士を意思決定者の満足度にスケール変換して総合評価することができるファジィ多目的混合 0-1 計画法を、評価基準の重要度の同定手段として、意思決定者との対話によって選好構造を抽出することができるファジィ構造モデリング[4][5]を用いた多目的意思決定モデルを構築し、熱源システム運転計画への応用を考えた。

3　対話によるメンバーシップ関数の決定

ファジィ目標のみが存在する場合のファジィ多目的混合 0-1 計画問題は、次式のように表現することができる。

$$\begin{array}{ll} \max & \min \mu_i(z_i(\boldsymbol{x})) \\ \text{subject to} & \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \le \boldsymbol{b} \\ & x_j \ge 0,\ x_k \in \{0, 1\} \end{array} \qquad (1)$$

ここで、$z(\boldsymbol{x})$ は目的関数、$\mu(z(\boldsymbol{x}))$ は評価値に対する意思決定者の満足度に関するメンバーシップ関数、x_k は 0-1 変数を表す。

(1)式の問題を解く際に必要となるメンバーシップ関数は、意思決定者との対話によって満足度 1 の点と満足度 0 の点を直接決定すれば容易に定義できる（図 1）。この場合、ファジィ構造モデリングを用いて意思決定者の選好を抽出する必要は全くない。ところが、意思決定者が自身の満足度を定量化できないときはこれらの点が確定しないため、メンバーシップ関数の形状を定義することは不可能となる。

我々が定性的に理解できることは、目的関数の取る値が最適値から離れれば離れる程、満足度が低くなるであろうということ

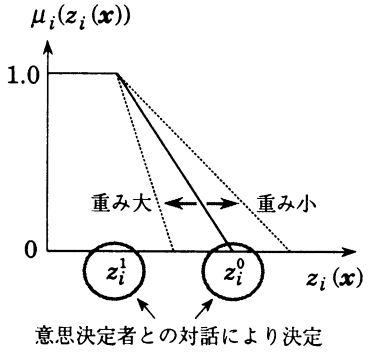


図1　メンバーシップ関数

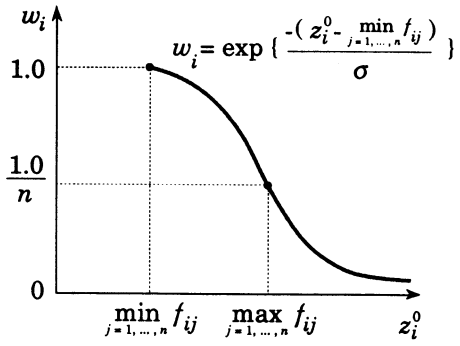


図2　満足度0の点と重要度の関係

と、意思決定者がある評価基準を重要視すればする程、その満足度0の点は満足度1の点に接近するであろうということである。そこで、評価値に対する自身の満足度を定量化できない意思決定者が、評価基準の重要度を考慮したメンバーシップ関数を設定することができるように、以下に述べる2つの仮定を設けた。

(i) 複数の評価基準が重要度に関して相互に無差別であるとき、ある評価基準の満足度を表すメンバーシップ関数の値が1となる点は数理最適解となる最善の評価値であり、0となる点は、意思決定者の満足度に関係なく、他の評価基準を最適化させたときに取り得る値の中で最悪の評価値である。

(ii) ファジィ多目的計画法で用いるメンバーシップ関数は、評価値と意思決定者の満足度との間の関係を規定したものであるが、この関係を決定するために、意思決定者の満足度と評価基準の重要度との関係を規定した関数が別に記述できる。

仮定(i)は、全ての評価基準を公平に評価したり、評価基準の重要度を定量化できない意思決定者が採ると予想される行動パターンを示したものである。一方、仮定(ii)は、ある評価基準に対する意思決定者の満足度0の点と、評価基準の重要度の関係を対応づけた関数が表現できることを意味している。これらの仮定を満足する関数として次の単調減少関数を考える（図2）。但し、原問題は最小化問題とする。

$$w_i = \exp\{-(z_i^0 - z_i^1)/\sigma\} \quad (z_i^0 \geq z_i^1) \tag{2}$$

$$\sum w_i = 1 \tag{3}$$

ここで、w_i は i 番目の評価基準の重要度、z_i^1、z_i^0 はそれぞれ、意思決定者の満足度1、0の点を規定する i 番目の評価基準の評価値を表す。また、σ は関数の広がりを操作する正のパラメータで、意思決定者の選好がこの変数に集約されているとも考えられる。しかしながら、(2)式のみでは評価値と重要度の関係が一意に定まらないので、仮定(i)を利用して σ を消去する。

重要度が無差別な評価基準が n 項目ある場合、i 番目の評価基準の重要度は(3)式から、

$$w_i = 1/n \tag{4}$$

で、そのときの意思決定者の満足度0の点は、他の評価基準 j を最適化した際に取る値 f_{ij} の集合の中で最悪の値とすることから、

$$n = \exp[(\max_j f_{ij} - z_i^1)/\sigma] \tag{5}$$

となる。従って(2)式から σ は消去され次式を得る。

$$z_i^0 = z_i^1 - (\max_j f_{ij} - z_i^1)\log_n w_i \tag{6}$$

4　数値シミュレーション

4.1　モデル熱源システムの構成

前述した多目的意思決定手法を用い、既定の熱負荷曲線からモデル熱源システムの運転計画を立案する数値シミュレーションを実施した。適用したモデル熱源システムの構成および想定した熱負荷曲線をそれぞれ図3、図4に示す。

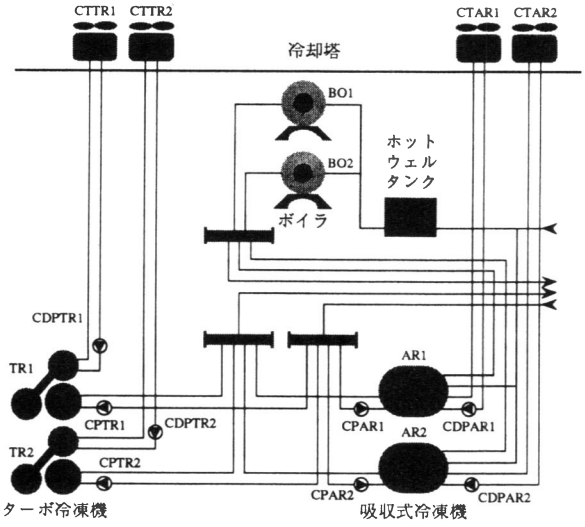
4.2　評価基準の重み付けとメンバーシップ関数の設定

評価基準の重要度の同定に際し、まず、熱源システムの最適運転を達成目標とする場合の評価基準として、経済性（エネルギーコストの最小化）、省エネルギー性（一次エネルギー換算熱量の最小化）、制御性（余剰熱の最小化）の3項目を選定した。そして、仮想の意思決定者に対して「熱源最適運転の観点から、評価基準 S_i は評価基準 S_j よりもどの程度重要と考えるか」という質問を提示し、主観評価に基づいた評価基準間の構造化を実施した。図5は一対比較によって得られたファジィ従属行列とそれを基にグラフ化したファジィ構造モデルである（閾値：$p = 0.65$、ファジィ構造パラメータ：$\lambda = -0.70$）。この事例では、構造モデルは2レベルの階層からなり、経済性と省エネルギー性は上位のレベルに位置している。双方とも制御性との一対比較値が非常に大きく、重要度に関して省エネルギー性よりも経済性に若干の重みを置いていることから経済性に0.6、省エネルギー性に0.4、制御性に0のウェイトを付与し、制御性については評価対象から除外した。従って、(6)式より、経済性と省エネルギー性に対する意思決定者の満足度を表すメンバーシップ関数の形状を規定する値は以下のようになる。

$$\begin{aligned} z^1_{ECO} &= f_{ECO,\,ECO} \\ z^0_{ECO} &= z^1_{ECO} - (f_{ECO,\,ENR} - z^1_{ECO})\log_2 0.6 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} z^1_{ENR} &= f_{ENR,\,ENR} \\ z^0_{ENR} &= z^1_{ENR} - (f_{ENR,\,ECO} - z^1_{ENR})\log_2 0.4 \end{aligned} \tag{8}$$

ここで、*ECO*、*ENR* はそれぞれ経済性、省エネルギー性について最適化することを意味する。また、$f_{ECO,\,ENR}$ は省エネルギー性最適運転時の経済性評価値、$f_{ENR,\,ECO}$ は経済性最適運転時の省エネルギー性評価値を表す。



主要用途	事務所
延床面積	75,000 m^2
階数	地上 25 階、地下 3 階、塔屋 1 階
構造	高層部：鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造 低層部：鉄筋コンクリート造
冷房負荷	0.380 $MJ/h{\cdot}m^2$
暖房負荷	0.293 $MJ/h{\cdot}m^2$

図 3　モデル熱源システムの構成

4.3　計算条件

多目的最適化のための目的関数として、経済性と省エネルギー性を各々定量的に算出するために用いた各種ユーティリティのエネルギー単価および発熱量を表 1 に示す[6]。また、制約条件に関しては、時刻別の熱負荷パターン、機器単体の部分負荷特性、機器間の接続関係、ヒートバランスを表す制約式に加えて、熱源機器がエネルギー効率の良くない低負荷域で運転することを回避するため、負荷率（定格出力に対する実出力の比）が 20% 以下となるような運転は行わないように設定した。

4.4　計算結果と考察

シミュレーションの結果を図 6、7 に示す。図 6 のグラフは主な熱源機器の最適運転パターンの経時変化を運転戦略毎に示したものである。縦軸の入力率とは、定格入力に対する実入力の比を意味する。また、図 7 は、夏期代表日におけるエネルギー消費量と運転コストの総量を運転戦略別に示したものである。

図より、モデル熱源システムにおける経済性最適運転、省エネルギー性最適運転およびファジィ多目的最適運転では各機器の運転パターンに違いがあることがわかる。経済性最適運転では、電

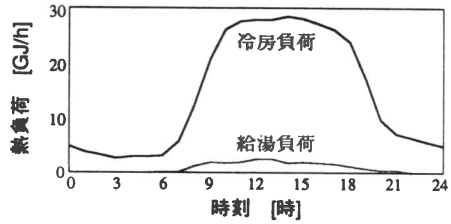


図 4　想定した熱負荷曲線

表 1　ユーティリティの発熱量と単価

ユーティリティ	発熱量	単価
A 重油	8772 $kcal/kg$	38.37 円 $/kg$
都市ガス (13A)	10000 $kcal/Nm^3$	27.92 円 $/Nm^3$
電力	2250 $kcal/kWh$	17.41 円 $/kWh$

力エネルギーは化石燃料に比べて一次エネルギー換算時のエネルギーコストが割高であることから、電力を駆動源とするターボ冷凍機の運用の優先順位は低くなっている。従って、冷房負荷に対して吸収式冷凍機が優先的に運用されることになるが、その駆動源となる蒸気の生成手段としては、一次エネルギー換算で最も安価な都市ガスを駆動源とするガス焚き蒸気ボイラが優先的に運用されている。逆に、省エネルギー性最適運転では、ターボ冷凍機と重油焚き蒸気ボイラが優先的に運用されている。また、ファジィ多目的最適運転の場合は、経済性と省エネルギー性を同時に考慮したことを反映して、ほぼ、両者の中間的な運転特性を示していることが分かる。

以上の結果より、評価基準の重要度の与え方によって熱源システムの最適運転パターンに顕著な違いが現れることから、多目的意思決定環境における意思決定者の運転戦略の選択の仕方は極めて重要であると言える。

5　まとめ

本研究では、意思決定者の選好構造の抽出手法としてファジィ構造モデリング、複数の評価基準を最適化する多目的最適化手法としてファジィ多目的混合 0-1 計画法を利用した熱源システムの最適運転計画モデルを提案した。また、モデル熱源システムを用いた数値シミュレーションにより、多目的計画問題の解決のための意思決定者の運転戦略が熱源システムの運転計画に及ぼす影響を明らかにした。地球環境問題を考えると、熱源システムの運転戦略を決定づける要因としては経済性や省エネルギー性の他に、運転に伴って排出される様々な環境負荷を評価する環境保全性という評価基準が必須であり、今後は、個々の環境負荷を環境保全性の枠組みの中でどのように取り扱うか検討する必要があろう。

S_j \ S_i	経済性	省エネ性	制御性
経済性	0.0	0.4	0.1
省エネ性	0.6	0.0	0.2
制御性	0.9	0.8	0.0

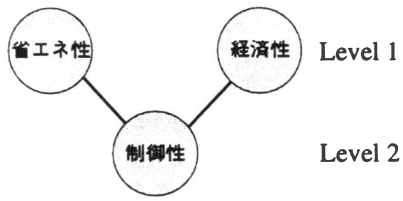


図 5　抽出したファジィ従属行列とファジィ構造モデル

熱源機器	入力率の指標
吸収式冷凍機	蒸気消費量
ターボ冷凍機	電力消費量
重油焚きボイラ	A重油消費量
ガス焚きボイラ	都市ガス消費量

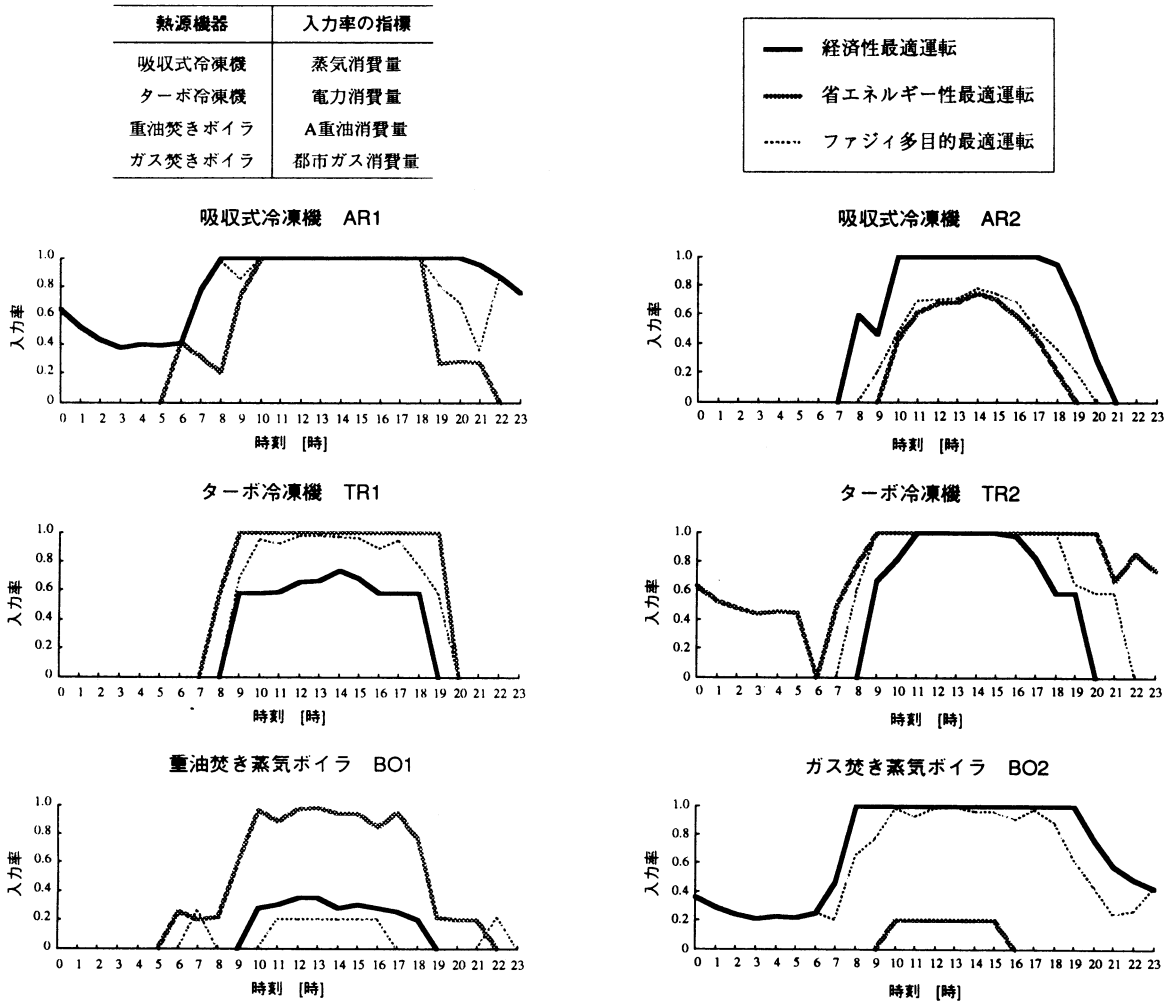


図 6 運転戦略と各熱源機器の最適運転パターン

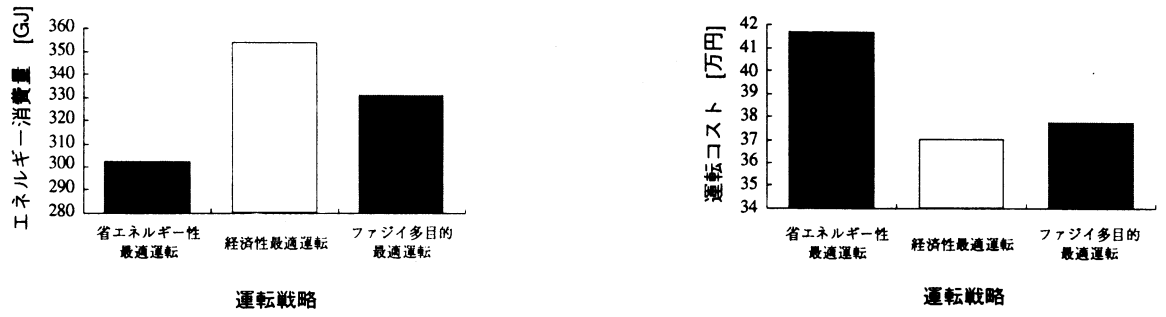


図 7 運転戦略とエネルギー消費量・運転コストの関係

参考文献

[1] 日本建築学会·建築と地球環境特別研究委員会：建築が地球環境に与える影響：日本建築学会(1992)

[2] 志水清孝：多目的と競争の理論：共立出版(1982)

[3] 坂和正敏：線形システムの最適化：森北出版(1984)

[4] 田崎栄一郎：あいまい理論による社会システムの構造化：別冊「数理科学」ファジィ理論への道：サイエンス社、pp. 140-153 (1988)

[5] 椎塚久雄：ファジィ構造モデルとその表現法：応用のためのファジィ理論の基礎：日本ファジィ学会、pp. 74-93 (1993)

[6] 柏木法仁、北峯敏博、加賀昭和、山口克人：意思決定者の選好に基づく熱源システムの多目的最適運転：第 24 回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会、pp. 41-44 (1995)

連絡先

〒354 埼玉県入間郡三芳町北永井 390

ダイダン株式会社 技術研究所

柏木 法仁

TEL. 0492-58-1511 FAX. 0492-58-7601

E-mail : kashi@lab.daidan.co.jp

FB3-4

Choquet 積分による階層的評価モデル　(4)
A Hierarchical Evaluation Model Using Choquet Integral (4)

藤本 勝成
Katsushige FUJIMOTO
東北大学
TOHOKU University

菅野 道夫
Michio SUGENO
東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

室伏 俊明
Toshiaki MUROFUSHI
電気通信大学
The University of Electro-Comunications

Abstract

A subjective evaluation model related to multi attribute object using fuzzy integral has been applied, with good result. However, $2^n - 1$ parameters are generally required for an $n-$attribute object. Accordingly, as the number of attributes increase, not only dose identification of the fuzzy measure become difficult, but the evaluation model obtained becomes quite complex and structure difficult to grasp. This is the reason why hierarchical Choquet integral model is useful . In this paper, we conclude that addtive decomposition is essential for the model using Choquet integral model.

1　はじめに

Fuzzy 積分を用いた，多属性対象に関する階層的主観的評価モデルが提案，応用され良い結果を得ている [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]。これらの研究の目的としては次の 2 つの問題点の打開にあると考えられる。

1．属性の数が増えるに連れてモデルの構造は複雑となり，これを捉えることは非常に困難となる。

2．Fuzzy 積分モデルでは n 属性対象に対して $2^n - 1$ 個のパラメータ（Fuzzy 測度の値）を必要とするため，実用上非常に取扱いにくいモデルとなっている。

本論文では，今一度 Choquet 積分モデル の階層化についてかえりみて，それを行う際，何を考えるべきかということについて考察する。

2　準備

2.1　Fuzzy 測度と Choquet 積分

定義 1 (単調 Fuzzy 測度)
$(X, \mathcal{X})$ を可測空間とするとき $\mu : \mathcal{X} \to [0, \infty)$ が次の条件:
1. $\mu(\emptyset) = 0$,
2. $A \subseteq B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$.

を満たすとき，μ を $\mathcal{X}$ 上の単調 *Fuzzy* 測度という。また，$(X, \mathcal{X}, \mu)$ を単調 *Fuzzy* 測度空間とよぶ。

定義 2 (非単調 Fuzzy 測度)
$(X, \mathcal{X})$ を可測空間とするとき $\mu : \mathcal{X} \to (-\infty, \infty)$ が次の条件:
1. $\mu(\emptyset) = 0$.
を満たすとき，μ を $\mathcal{X}$ 上の非単調 *Fuzzy* 測度という。

定義 3 (Choquet 積分)
可測関数 $f : X \to (-\infty, \infty)$ の *Fuzzy* 測度μに関する $A \in \mathcal{X}$ 上の *Choquet* 積分は次式で定義される。

$$(C)\int_A f d\mu \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \mu_f(r) dr.$$

ただし，

$$\mu_f(r) = \begin{cases} \mu(\{x | f(x) > r\} \cap A) & \text{if } r \geq 0, \\ \mu(\{x | f(x) > r\} \cap A) - \mu(A) & \text{if } r < 0. \end{cases}$$

Fuzzy 測度は通常の測度を特別な場合として含む。μ が通常の測度であるとき，Choquet 積分は Lebesgue 積分に一致する。

2.2　階層化のために

ここでは，全ての属性の集合を X，全てのマクロ属性の集合を Xの有限可測被覆として数学的に議論して

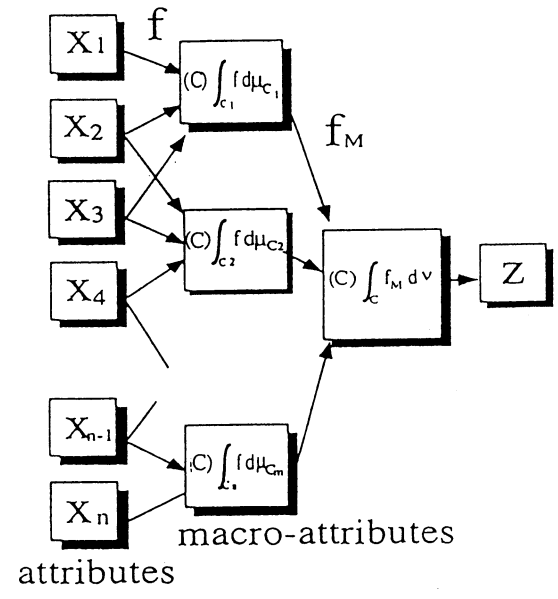


図 1: 階層的 Choquet 積分モデル

いく。つまり，$\mathcal{X}$ は全ての属性の集合族であると解釈できる（図 1）。

定義 4 (半原子元) *[6]*
(μに関する）半原子元とは次の条件を満たす非零集合 $S \in \mathcal{X}$ をいう。

「任意の $A \subseteq S$ が次の *(a),(b)* のいずれか一方を満足する。

$$(a) S \cap B = \emptyset, B \in \mathcal{X} \Rightarrow \mu(A \cup B) = \mu(B),$$

$$(b) S \cap B = \emptyset, B \in \mathcal{X} \Rightarrow \mu(A \cup B) = \mu(S \cup B).」$$

S が半原子元で $A \subset S$が *(b)* を満たすとき，$A \approx S$ とかく。

Choquet 積分モデルにおいては，Sが半原子元であれば，Sに含まれる評価項目の集合はSの外部の評価項目の集合に対して，常に$\emptyset$ の役割をするか（条件 (a)），常に Sの役割をするか（条件 (b)）のどちらかになる。

定義 5 (準原子元)
(μに関する）準原子元とは次の条件を満たす非零集合 $Q \in \mathcal{X}$ をいう。

「任意の $A \subseteq Q$ と $Q \cap B = \emptyset$ なる任意の $B \in \mathcal{X}$に対して$\mu(A \cup B) = \mu(B)$ *or* $\mu(Q \cup B).」$

定義 6 (包除被覆)
Xの有限可測被覆 $\{C_i\}_{i \in \{1,\cdots,n\}}$ がXの（μに関する）包除被覆であるとは，任意の $A \in \mathcal{X}$に対して

$$\mu(A) = \sum_{\substack{J \subseteq \{1,\cdots,n\} \\ J \neq \phi}} (-1)^{|J|+1} \mu(\bigcap_{j \in J} A \cap C_j)$$

を満たすことをいう。

定義 7 (プレ包除被覆)
Xの有限可測被覆 $\{C_i\}_{i \in \{1,\cdots,n\}}$ が以下の条件を満たすとき，Xの（μに関する）プレ包除被覆であるという。

"$\{1,\ldots,n\}$ の分割 $\{I_j\}_{j \in J}$ が存在して以下の条件を満たす。:

(a) $\{\bigcup_{k \in I_j} C_k\}_{j \in J}$ が　*(*μに関する*)*Xの包除被覆である。

(b) 任意の $j \in J$に対して $(\bigcup_{k \in I_j} C_k \setminus \bigcup_{k \in I_j} R_{C_k}) \setminus \bigcap_{k \in I_j} C_k$ は *(*μ に関する*)* 零集合である。

(c) $|I_j| > 1$ なる任意の $j \in J$に対して $A \setminus \bigcup_{i \in I_j} R_{C_i} = B \setminus \bigcup_{i \in I_j} R_{C_i}$, $I_j(A) \neq \emptyset$, $I_j(B) \neq \emptyset$ ならば,

$$\frac{\mu(A) - \mu(A \setminus \bigcup_{i \in I_j(A)} R_{C_i})}{\mu(\bigcup_{i \in I_j(A)} R_{C_i})} = \frac{\mu(B) - \mu(B \setminus \bigcup_{i \in I_j(B)} R_{C_i})}{\mu(\bigcup_{i \in I_j(B)} R_{C_i})}$$

ここで，$I_j(A) \equiv \{i \in \{1,\ldots,n\} | \mu(A) > \mu(A \setminus R_{C_i})\} \cap I_j$. "

つまり，任意の $j \in J$に対して $|I_j| = 1$ なるプレ包除被覆は包除被覆である。

定義 8 (本質的な要素を持つ被覆)
(μに関する）Xの本質的な固有の要素を持つ被覆とは，次の 2 条件を満たす Xの有限可測被覆 $\{C_i\}_{i \in \{1,\cdots,n\}}$をいう。

(a) $R_{C_i} \neq \emptyset, \forall i \in \{1,\ldots,n\}$

(b1) R_{C_i}は *(*μの$\bigcup_{i \in \{1,\ldots,n\}} R_{C_i}$への制限に関して*)* 零集合ではない。

(b2) $\mu(A) < \mu(A \cup R_{C_i})$ *whenever* $A \subseteq C_i \setminus R_{C_i}$, $A \neq \emptyset$ *and* $A \in \mathcal{X}$, $\forall i \in \{1,\ldots,n\}$.

ここで，$R_{C_i} \equiv C_i \setminus \bigcup_{j \in \{1,\ldots,n\} \setminus \{i\}} C_j$.

また，$\{C_i\}_{i \in \{1,\cdots,n\}}$ が条件 *(a)* と以下の *(b)* をみたす時，正の本質的な要素を持つ被覆であるという。

(b) $\mu(A) < \mu(A \cup R_{C_i})$ *whenever* $A \subseteq C_i \setminus R_{C_i}$ *and* $A \in \mathcal{X}$, $\forall i \in \{1,\ldots,n\}$.

可測被覆 Cが本質的な要素を持つ被覆であれば，評価項目の上位階層にある各マクロ属性 C_iに，そのマクロ属性固有の評価項目の集合 R_{C_i}を持っており，(条件 (a)) この P_iは外部に対して何らかの影響力をもっている。(条件 (b)) と考えられる。

ここで可測被覆 Cが本質的な要素を持つ被覆であれば，以下の命題が成り立つ。

命題 1
$C = \{C_i\}_{i \in \{1,\ldots,n\}}$ がプレ包除被覆で $\{I_j\}_{j \in J}$ が定義 8の条件を満たすとき，R_{C_i} は　*(*μ の$\bigcup_{i \in \{1,\ldots,n\}} R_{C_i}$ への制限に関する*)* 半原子元であり，*(*μに関する*)* 準原子元である。

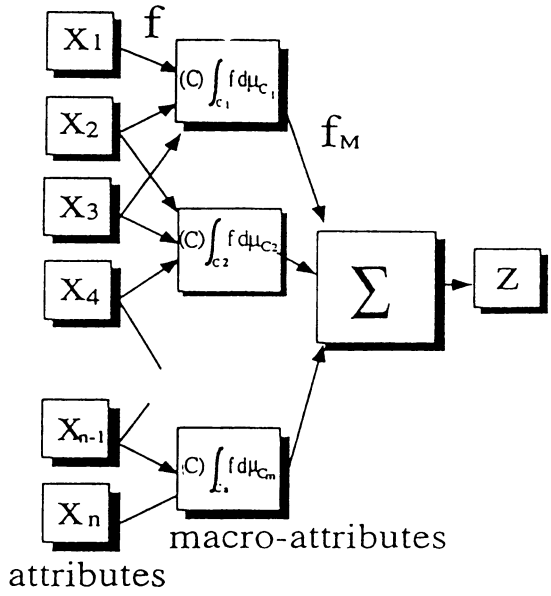


図 2: Choquet 積分モデルの線型結合モデル

3 階層化について考える

始めに，図 2 のような Choquet 積分モデルの線型結合として表されるような階層型のモデルを考えよう。これは，線型モデルで表現できない部分を Choquet 積分モデルによって補助している 或る種の線型モデルであると解釈できる。つまり，基本的には線型モデルの立場を取っている。Choquet 積分モデルというのは Fuzzy 測度の非加法性によって属性間の相互作用（影響力）を表現することができ，線型モデルに比べ高い表現力をもっている。その反面，長所と引き換えに実現不可能に近い多くのパラメータを必要とする。これにより，現実問題としてはきわめて取り扱いにくいモデルとなっている。そのため図 2 のようなモデルは，線型モデルと Choquet 積分モデルの長所をいかし，互いの短所を補い合う中間的なモデルとして有益であると考えられる。では，図 2 に示されるモデルを定式化してみよう。

定義 9 (階層的 Choquet 積分モデル) 有限可測被覆 $\mathcal{C} = \{C_i\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ に対して $\mathcal{X}$ の *subalgebras* $\mathcal{S}_i$ を

$$\mathcal{S}_i \equiv \{C_i \cap A \mid A \in \mathcal{X}\}$$

のように定義する。この $\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_i\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ 上に非単調 *Fuzzy* 測度の n 項組 $\mathcal{M} = \{\mu_{C_i}(\cdot)\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ を与える。このとき $\mathcal{C}$ 上に 関数 $f_{\mathcal{M}}$ を X 上の可測関数 f に対して

$$f_{\mathcal{M}}(C_i) \equiv (C)\int_{C_i} f d\mu_{C_i}$$

のように定義する。このとき，階層的 *Choquet* 積分モデルは入力に $f(x)$，出力に $z = (C)\int_{\mathcal{C}} f_{\mathcal{M}} d\nu$ をもつモデルとして定式化される。（ここで，ν は $2^{\mathcal{C}}$ 上の非単調 *Fuzzy* 測度とする。）

まずは，通常の Choquet 積分モデルが，図 2 に示されるような階層的なモデルに分解され得るための必要十分条件を与える。

定理 1 *[2]*

$\mathcal{C} = \{C_i\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ を X の有限可測被覆とする。

このとき，$\{\mathcal{S}_i\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ 上の非単調 *Fuzzy* 測度の n 項組 $\mathcal{M} = \{\mu_{C_i}\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ と $2^{\mathcal{C}}$ 上の通常の測度 ν が存在して，X 上の任意の可測関数 f に対して

$$(C)\int f d\mu = (C)\int_{\mathcal{C}} f_M d\nu$$

となるための必要十分条件は $\mathcal{C}$ が（μ に関する）包除被覆であることである。

この定理により，図 2 のような階層的なモデルは $\mathcal{C}$ を包除被覆にもつ通常の Choquet 積分モデルと等価であるということがわかる。逆に，通常の Choquet 積分モデルが与えられ $\mathcal{C}$ が包除被覆であれば，図 2 のような階層的なモデルに再構成した方がよりわかりやすいモデルが得られるということがわかる。

では，通常の Choquet 積分モデル（線型モデルも含む）を階層化するとき Choquet 積分モデルの線型結合でない場合も考えてみよう。しかし完全に一般的な場合，これは非常に複雑となる。ここでは，マクロ属性が本質的な要素を含む被覆で μ が単調 Fuzzy 測度であるときのみを考える。

定理 2 *[8]*

$\mathcal{C} = \{C_i\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ を X の有限可測被覆とする。

このとき，$\{\mathcal{S}_i\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ 上の非単調 *Fuzzy* 測度の n 項組 $\mathcal{M} = \{\mu_{C_i}\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ と $2^{\mathcal{C}}$ 上の単調 *Fuzzy* 測度 ν が存在して，X 上の任意の可測関数 f に対して

$$(C)\int f d\mu = (C)\int_{\mathcal{C}} f_M d\nu$$

となるための必要十分条件は $\mathcal{C}$ が（μ に関する）プレ包除被覆であることである。

また，十分条件は本質的な要素を含む被覆であるという仮定なしに成り立つ。

この定理から以下のような結果が得られる。

系 1 $\mathcal{C} = \{C_i\}_{i\in\{1,\cdots,n\}}$ を X の有限可測被覆とする。$\mathcal{C}_S \equiv \{C_j \in \mathcal{C} | C_j$ *is a semi-atom with respect to the restriction of* μ *to* $\bigcup_{i\in\{1,\cdots,n\}} R_{C_i}\}$, $\mathcal{D} \equiv (\bigcup \mathcal{C}_S) \cup (\mathcal{C} \setminus \mathcal{C}_S)$ とするとき，$\{\mathcal{S}_i\}_{i\in\{1,\cdots,m\}}$ $(\mathcal{S}_i \equiv \{A \cap D_i | A \in \mathcal{X}, D_i \in \mathcal{D}\}$, $|\mathcal{D}| = m)$ 上の非単調 *Fuzzy* 測度の m 項組 $\mathcal{M} = \{\mu_{C_i}\}_{i\in\{1,\cdots,m\}}$ と $2^{\mathcal{D}}$ 上の単調 *Fuzzy* 測度 ν が存在して，X 上の任意の可測関数 f に対して

$$(C)\int f d\mu = (C)\int_{\mathcal{D}} f_M d\nu$$

となるための必要十分条件は $\mathcal{D}$ が（μ に関する）包除被覆であることである。

この系により属性に対して予め何らかの前処理（この場合であれば，半原子元の統合）を施してやればChoquet積分モデルの階層化は包除被覆によって特徴付けられることがわかる。つまり，図2に示されるような型の階層モデルについてのみ考えれば十分であることがわかる。

4 考察とまとめ

これまでの一連の研究において，“Choquet積分による階層的評価モデル”に関して議論してきた。その結果，図2に示されるような型の補助的にChoquet積分モデルを用いる階層型の線型モデルが本質的であると思われる。

現実問題に対してフィッティングだけを考えるならば，確かに通常のChoquet積分モデルの方が図2に示されるような階層型のモデルより優れているかもしれない。むしろ，Fuzzy集合·ニューロの手法などを用いた方が，より優れているかもしれない。しかし，我々がFuzzy測度を評価問題に適用しようとしているのはフィッティングと同時に“その構造を定量的に明らかにしたい”という願いからである(定量的という言葉は不適当かもしれないが...)。この点から考えても図2のモデルは(Choquet積分を採用した場合については)妥当なモデルであると考えられる。また，本研究と平行して“モデルの良さ”という観点からの“Fuzzy測度を用いた構造解析”の研究でも図2のような型のモデルが採用されており，よい結果が得られている[9]。更に，この型のモデルに対する取り扱いについての詳細は[2]において議論されている。

参考文献

[1] K.TANAKA and M.SUGENO, A Study on Subjective evaluations of printed color image, Int. J. Approximate Reasoning , 5, 1991, pp213-222.

[2] 室伏俊明, 菅野道夫, 藤本勝成, Choquet積分による評価構造の階層化, 日本行動計量学会第20回大会発表論文抄録集, 1992, pp180-185.

[3] 藤本勝成, 土屋隆史, 室伏俊明, Choquet積分による階層的評価モデル, 第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 1992, pp25-28.

[4] 藤本勝成, 室伏俊明, 菅野道夫, Choquet積分による階層的評価モデル(2), 第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 1993, pp673-676.

[5] 椎塚久雄, 杉山孝男, 階層化ファジィ積分による主観的意思決定法について, 第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 1992, pp33-36.

[6] 室伏俊明, 菅野道夫, Choquet積分システムの階層的分解, 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.4, 1992, pp749-752

[7] 室伏俊明, 荻野充弘, モデルを考慮したファジィ測度の同定, 第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 1993, pp697-670.

[8] K.Fujimoto, On Hierarchical Decomposition of Choquet Integral Model, Ph.D.thesis, Tokyo Institute of Technology, 1995.

[9] S.H.Kwon, A Fuzzy Measure-based Approach to Modeling of Interactive Systems, Ph.D.thesis, Tokyo Institute of Technology, 1995.

問い合わせ先
〒９８０-７７
宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉
東北大学工学部建築学科防災研究室
藤本 勝成
Tel 022-217-7876（ダイヤルイン）
Fax 022-217-7875
Email fujimoto@venus.archi.tohoku.ac.jp

FB4-1

会話を用いた経路決定システム
A Route Decision System with Human and Model Interaction

枡田行央　　鬼沢武久　　岩田満
Yukio Masuda　Takehisa Onisawa　Mitsuru Iwata
筑波大学構造工学系
Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba

Abstract-In this paper, a model, which can often reach an instructed destination and sometimes loses its way, is considered. Instructions are given to the model linguistically. The model considers fuzziness inherent in linguistic terms. If the model understands that the given instructions are not enough to reach the destination, the model asks the instructor the route more precisely. When the model loses its way, the model asks another instructor the route from the lost spot to the (sub) goal. Finally this paper shows the usefulness of the model by some simulation examples.

1．はじめに

コンピュータは、今日の我々の社会にとって無くてはならない、非常に身近な存在となりつつあるが、そのインタフェースは初心者にとってはまだまだとっつきにくいものとなっている。その原因として、コンピュータに指示を与えるためになじみにくいコマンドの入力が必要とされたり、硬直化した入力方法しかできなかったりといった、システムがユーザの慣れをいわば強要していることなどが考えられる。

さて、見知らぬ土地にある目的地までの道順の教示を受けてその目的地に到達できたり、人間のように道に迷ったりするモデル[1]が考えられている。しかしこのモデルでは、教示を与える部分は、指示する行動をマウスで選択するようになっている。そこで本論文では、自然言語と会話形式を使って簡単に教示文を与えられるようにすることで、直感的にわかりやすい入力形態をもった経路決定システムを考える。したがって道に迷ったときも、迷った地点からサブゴールまでの道順を聞くこともできるようになる。教示に含まれる曖昧さの扱いやどのような応答をさせるかについても述べる。

最後に、作成したモデルを用いてシミュレーションを行い、本モデルの有用性を確認する。

2．システムの構成

本システムは大きく三つに分けられる。一つは教示入力部で、ここでは教示者から目的地までの道順の教示が自然言語を使って与えられ、それを解釈する。二つ目は地図作成部で、ここで街の地図を描く。　三つ目は教示実行部で、ここでは教示入力部で与えられた教示をもとにして実際に道を歩くシミュレーションを行う。また、このシミュレーションで道に迷った場合、再び教示入力部で教示が与えられる。

2．1　教示入力部

教示入力部は、最初の出発地点で教示を受ける初期教示入力部と、道に迷ったときにその場所で再教示を受ける再教示入力部から構成される。

2．1．1　初期教示入力部

初期教示入力部は、出発地点から目的地までの道順の教示をすべて自然言語で教示者が与える部分である。教示内容に足りない情報があれば、システムは教示者にその情報を質問する。教示者が教示に用いる自然言語には、「ちょっとだけ進む」、「約ｘＫｍ進む」、「数Ｋｍ進む」、「ずっと行く」や「左に曲がる」、「公園を探す」、「交差点を見つける」等がある。

2．1．2　再教示入力部

再教示入力部は、初期教示入力部で与えられた教示をもとにして教示を実行した結果、教示が実行できなくなった、つまり、道に迷った場合に再び教示を与えてもらう部分である。システムは、自分の地図上の現在地点に来るまでに実行した教示情報と以前にもらった教示者からの教示を照らし合わせ、目的地に着くのに必要な道順を再教示者に質問する。

2．1．3　ファジネスの扱い

本システムでは、教示に用いられる自然言語に含まれる意味についての曖昧さを図１に示すようなファジィ集合を使って表現する。

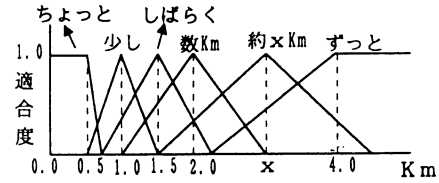


図１　距離を表すファジィ集合

2．1．4　形態素解析

教示者から自然言語で与えられる教示を理解するために、本システムでは形態素解析を行っている。本システムは、あらかじめ教示文で使用される単語を登録した辞書をもっており、それを用いて単語単位の認識を行っている[2]。

表１　辞書の構造

品詞	辞書が持っている情報
助詞、助動詞	その単語が存在することのみ登録
動詞	存在、読み、語尾の活用、 教示実行の際に実際にとる行動の種類
名詞	存在、その名詞と結びつく行動の種類 その名詞が方向を表す単語なら そのファジィ集合の定義
副詞	存在、その副詞と結びつく行動の種類 その名詞が距離の概念を表す単語なら そのファジィ集合の定義

2．1．5　教示の内部表現

システム内では、教示者から与えられた教示内容を、教示実行部での行動の種類の単位毎に解釈して保持している。たとえば、「少し行ってポストのある交差点を右に曲がって下さい」という教示文が与えられた場合を考えると、「少し行く」、「ポストを見つける」、「交差点を探す」、「右に曲がる」のように行動単位毎に順に解釈する。

2．1．6　教示者への働きかけ

本システムは、教示者から効率よく教示内容を引き出すため、教示の内部保持構造を利用している。たとえば、「交差点を曲がって下さい」と与えた場合、辞書に登録されている動詞「曲がる」には「向きを変える」という行動の種類が定義されており、曲がる方向が同時に情報として与えられる必要があることが分かる。それにも関わらず教示者は教示文中で曲がる方向を明示していないので、本システムはこの教示の解釈を完成させるために、どちらの方向に曲がるのかと教示者に尋ねる。

また、再教示入力部において本システムは、以前に与えられた教示と実際に実行できた教示とを比較して、つぎにどこに向かえば良いのかを判断して、教示者に尋ねる。つぎに見つかるはずの建物が見つからないとき、その建物までの道順を尋ねて、それを見つけた後の道順は以前に教えてもらった道順を参考にして進んでいくことができる。

2．2　地図作成部

地図作成部は、街の地図を描く部分である。ポストやレストラン、銀行、交差点、道路等が地図上に描かれる。システムは地図中で現在自分がいる周囲の地図情報のみ受け取ることができる。

2．3　教示実行部

教示実行部は、「右に曲がる」や「約１ｋｍ進む」等の教示と自分の周囲から得た地図情報とを比較して行動を決定する部分である。比較には、２つのファジィ集合の適合度（Degree of Matching:ＤＭ）を使用する。本モデルでは、適合度は以下の式[3]を用いて計算している。

$$DM=\frac{1}{2}\{\sup(\tilde{A}\cap\tilde{B})+\inf(\tilde{A}\cup\tilde{B}^{c})\} \qquad (1)$$

ここで、$\tilde{A}$は与えられた教示の意味を表すファジィ集合であり、$\tilde{B}$はモデルが知覚した距離や方向などを表すファジィ集合である。また、$\tilde{B}^{c}$は$\tilde{B}$の補集合であり、$\cap$と$\cup$はそれぞれ、ファジィ集合の共通集合と和集合である。

適合度は、いくつかの経路の候補に優先度をつけるために用いられる。それらの候補の中でもっとも優先度の高いものが経路として選択される。また、適合度を与えられたしきい値と比較することによって経路を選択する場合もある。

3．　シミュレーション

3．1　シミュレーション例とその結果

3．1．1　シミュレーション例　Ⅰ

出発地点で与えられた教示は、「約０．５Ｋｍ先の交差点を右に曲がって約１Ｋｍ進みなさい。交差点で左に曲がり約０．５Ｋｍ進むと学校がある交差点があるので右に曲がりなさい。ちょっと進むとバス停があり、もうちょっと進むとポストがあります」である。また、出発地点は「出発地点」、目的地は「目的地」で示してある。
本来意図した道順を図２で太線で示す。

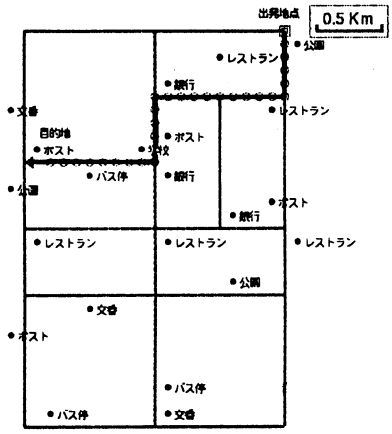


図２　システムが進んだ道順（教示者が意図した道順）

この教示を与えた場合にシステムが進んだ経路を図２で○印で示す。この場合、迷う要素がほとんどないので、意図した道順どおりに進んでいることがわかる。

3．1．2　シミュレーション例　Ⅱ

出発地点での与えた教示は、「約０．５Ｋｍ先の交差点を右に曲がって約１Ｋｍ進みなさい。交差点で左に曲がり約１Ｋｍ進むと学校がある交差点があるので右に曲がりなさい。ちょっと進むとバス停があり、もうちょっと進むとポストがあります」である。意図した道順は例Ｉと同じであるが、教示内容で、交差点を左に曲がった後に進む距離を「約０．５Ｋｍ」でなく、「約１Ｋｍ」と与えている。

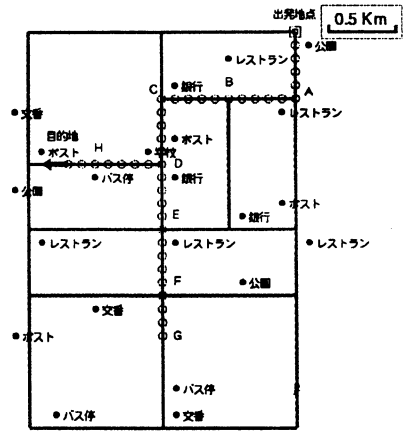


図３　システムが進んだ道順

図３にシステムが進んだ道順を○印で示す。

本シミュレーションでは、学校のある交差点までの距離を教示者は誤って約１Ｋｍと教示しているので、交差点Ｄでは適合度の値がしきい値０．２５を下回り、そのまま通り過ぎる。そして、交差点Ｅ、Ｆを見つけるがいずれも教示の条件を満たしていないので通り過ぎている。そして、距離「約１Ｋｍ」の適合度がしきい値を下回った地点Ｇで、システムは学校までの道順を「学校への行き方を教えてください」ともう一度たずねる。そこで、Ｇ地点での再教示者は「後ろに約１．５Ｋｍです」と指示すると、今度は「約１．５Ｋｍ」という比較的実際の距離と近い値が与えられたので、学校のある交差点Ｄで曲がり、目標地点に到達している。

3．2　考察

このシステムは誤った指示が与えられても、道に迷いそうになったら、道順を聞き返すので最終的に目標地点に到達できる。また、紙面の都合で示すことができなかったが、他のシミュレーション例では、再教示者が最初の教示者とは異なる道順を指示したときでも、目的地に到着していることが確かめられている。これについては当日示す予定である。

4．おわりに

本稿では、ある目的地までの道順が言葉で与えられたとき、目的地に到達できるシステムについて述べた。また、本システムでは道に迷いそうになると再度道順を聞き返してくるので、最終的には目標地点に到達できる。そして、シミュレーションによって本システムの有効性を示した。

道順の教示という極めて限定された場ではあったが、本システムは人間とコンピュータとの会話を用いた一つの例とみることもできる。人間がコンピュータに指示を与えるのに馴染みのある自然言語を使えることは、人間とコンピュータとのやり取りを円滑なものとし、言葉の持つ曖昧性をそのまま活かすことができると思われる。

参考文献

[1]岩田満:経路決定モデルにおける表情表現の試み，Human Interface News and Report, Vol.10, No.1 pp.31-40, 自動計測制御学会 (1995)
[2]伊藤雅俊:日本語処理系学，C MAGAZINE 9,10合併号，pp.22-52, ソフトバンク社 (1995)
[3]M.M.Gupta, Y.Tsukamoto and P.N.Nikiforuk:Truth Qualification and Numerical Truth Values, JACC (1980)

連絡先
〒３０５　茨城県つくば市天王台１－１－１筑波大学工学システム学類／構造工学系　鬼沢研究室
枡田行央
TEL 0298-53-5060 FAX 0298-53-5207
E-mail masuda@kz.tsukuba.ac.jp

FB4-2

あいまいな環境における多目的意思決定
-目的間統合への発見的アプローチ-
Heuristic Approach to Multi-Objective Decision Making Problems in Fuzzy Environment
- An Approach to Aggregation of Interdependent Multi-Objectives-

田崎 栄一郎　　松尾 勝
Eiichiro Tazaki and Masaru Matsuo
桐蔭学園横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control and Systems Engineering
Toin University of Yokohama

Abstract

A multi-objective decision making model based on fuzzy preference relation is presented. A type of nondominance of alternatives is presented whose purpose is the choice of an optimal alternative in uncertainty under imprecise environment. This system is based on the expected utility decision making in which the probabilities and the utilities are expressed as the membership functions of fuzzy sets.

Fuzzy expected utility is calculated on the basis of these probabilities and utilities in each chance node. Next, the truth value of the fuzzy to preference relation is calculated in the decision node.

The relationship among interdependent multi-objectives is determined by introducing a composition of the relational matrix between objectives and alternatives and the weight vector for objectives, where the relational matrix is given by an approximate reasoning with respect to nondominated alternatives and the weight vector is generated by Analytic Hierarchy Process(AHP).

With these results, we can employ some techniques for multi-objective decision making problems in fuzzy environment.

1　はじめに

我々は日常的に様々の決定を下しながら生活している。この決定という行為はある目的を実現する代替案の中から最もふさわしいものを選ぶことだと言える。この中での「最もふさわしい」という判断は、自分の持つ経験や知識や勘を使い、置かれている状況などを考慮して最も望ましい(あるいは最もリスクの少ない結果を導くと思われる選択肢を選ぶことにより行っている。しかし経験や知識や勘という曖昧な判断基準を定量化することは大変難しく、意思決定問題をモデル化するにはいろいろと困難が生じる。そこである評価基準を導入して意思決定者に結果の評価値を設定させてこの問題を吸収し、選択肢間の関係(つまりどちらがふさわしいか)を判断することにする。

この評価基準が単一の場合には単純な期待効用値最大化問題として容易に解を求めることが可能である。しかし評価基準が多数ある場合にはこれらの調整をどのように行うかが重要かつ困難な問題となる。

本論文では、このような曖昧な環境における多目的意思決定を階層化意思決定法(AHP)における一対比較を用いて目的の重要度を求めたのちに、ファジィ推論で求めた各目的の効用に関するメンバーシップ関数と選択肢間の関係を示すマトリクスとの関係方程式を解き、選択肢の総合的優劣度を求めることによって意思決定を行う方法を提案する。

この手法はファジィ化された期待効用値理論とAHPとを相互補間的に組み合わせたものであり、まず各選択肢におけるそれぞれの目的に対する結果と、結果の発生する確率を考える。結果は意思決定者に与える効用を表し、この効用と確率から選択肢のそれぞれの目的に対する期待効用値が求まる。ここで設定するべき効用と確率は、ある程度のゆらぎを持つと考えられるので曖昧性を容認するファジィ集合とする。ファジィ合成によって求められた期待効用値から、各目的の効用と選択肢の関係を示すマトリクスを作成する。

次に意思決定者はAHPの一対比較法を用いて各目的の関係を設定する。これによって意思決定者の考えの整合性と目的間の重視度が求まる。ここで、各目的を統合した場合を考えると、求められた目的間の重視度は目的－選択肢の関係マトリクスに対して意思決定者の選好を示す各選択肢の総合的な優劣度が合成された結果であると考えられる。

そこで選択肢の総合的優劣度を示す未知のベクトルを仮定して関係方程式を作成しその解を求めそれにより得られた総合的優劣度によって最も有効な選択肢を決定するものである。

2　単一目的における意思決定法について [1][3]

多目的意思決定に対する発見的接近の準備のためにここでは単一目的の場合における意思決定について説明する。図1に示した通り選択肢Aではその期待効用値は、$pf_1(A_1)+(1-p)f_1(A_2)$となり、同様に選択肢Bでは$qf_1(B_1)+(1-q)f_1(B_2)$が得られる。

ここで、実際の意思決定問題においては得られる効用とその確率を事前に確定することは非常に困難であり、その内容に

はある程度の曖昧性を持つと考えるのが妥当である。そこで、選択肢にともなう確率と効用のに曖昧性を持たせてこれをファジィ集合とし、確率と効用とをメンバーシップ関数で表すことにする。すなわち

$$\mu(p), \mu(q), \mu_{f1}(A_1), \mu_{f1}(A2), \mu_{f1}(B1), \mu_{f1}(B2)$$

と表現する。したがって各選択肢における期待効用値も当然曖昧になり、メンバーシップ関数で記述されることになる。

よってこのファジィ化された期待効用値を$\mu_A(a)$と$\mu_b(b)$とすると、拡張原理により

$$\mu_A(a) = \bigvee_{pf_q(A1)+(1-p)f_1(A2)=a} (\mu(p) \wedge \mu_{f1}(A1) \wedge \mu_{f1}(A2)) \quad (1)$$

$$\mu_B(b) = \bigvee_{qf_1(B1)+(1-q)f_1(B2)=b} (\mu(q) \wedge \mu_{f1}(B1) \wedge \mu_{f1}(B2)) \quad (2)$$

と表すことができる。

こうして求めた2つの期待効用値には曖昧さがあり、メンバーシップ関数がオーバーラップしている場合、一方の選択肢の方が多少有利であるように見えても、厳密な判断は難しい。そこでこのような2つのメンバーシップ関数のオーバーラップの関係からファジィ推論を行いどちらの選択肢がよりよい選択肢であるかを導きだす。

まず2つのファジィ命題を仮定し、これをX、Yとしてその真理値を$v(X), v(Y)$とする。ここで、2値理論における含意公式

$$P \rightarrow Q = -P \cup Q$$

を拡張して用いると、$X \rightarrow Y$の真理値$v(X \rightarrow Y)$は

$$v(X \rightarrow Y) = v(-X \cup Y) = (1 - v(X)) \vee v(Y) \quad (3)$$

となる。さらにXとYをそれぞれ選択肢AとBの変数aとbに関するファジィ関係とし、そのメンバーシップ関数を$\mu_X(a,b)$、$\mu_Y(a,b)$とする。そこで、ファジィ命題X、Yの真理値を、それぞれ、ファジィ関係のメンバーシップ値として考えると、式(3)は

$$v(X \rightarrow Y) = \bigwedge_{a,b} [(1 - \mu_X(a,b) \vee \mu_Y(a,b)] \quad (4)$$

となる。すなわちaとbのあらゆる組み合わせによる含意の真理値の中で、最も小さいものをファジィ条件命題$X \rightarrow Y$の真理値$v(X \rightarrow Y)$とするのである。

ここで$\mu_X(a,b)$の意味は、選択肢Aが与える期待効用のファジィ集合に変数aが属する度合いと選択肢Bが与える期待効用のファジィ集合に変数bが属する度合いからaとbの関係を表していて

$$\mu_X(a,b) = \mu_A(a) \vee \mu_B(b) \quad (5)$$

で与える。

一方、$\mu_Y(a,b)$は選択肢AとBの選好関係を言語的に表現した場合のメンバーシップ関数で、本論文では2つの言語的選好関係とそれらのメンバーシップ関数を設定する。

$Y1$: 「AはBよりかなりよい」

$$\mu_{Y1}(a,b) = \begin{cases} 1 & a > B\text{のとき} \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (6)$$

$Y2$: 「AはBより幾分よい」

$$\mu_{Y2}(a,b) = \begin{cases} 1 & a \geq (b + 0.2)\text{のとき} \\ 0.5 + 2.5(a-b) & (b+0.2) \geq a \geq (b-0.2) \\ & \text{のとき} \\ 0 & a \leq (b - 0.2)\text{のとき} \end{cases} \quad (7)$$

結局、式(5)は2つの選択肢のメンバーシップ関数のオーバーラップの関係を表しており、その前提から式(6)や(7)で与えられている結論が式(4)のファジィ条件命題によってどれだけの真理値で表されるかということである。そこで式(5)を(4)へ代入すると

$$v(X \rightarrow Y) = \bigwedge_{a,b} [(1 - (\mu_A(a) \wedge \mu_B(b))) \vee \mu_Y(a,b)] \quad (8)$$

となり、$v(X \rightarrow Y)$について式(6)、(7)を用いて計算する。そこで求まった値から結論を導く。

以上のようにして2選択肢の場合の順位付けが行える。そこで一般的にn選択肢の場合にもこの考え方を拡張できる。

3 多目的意思決定と目的間の統合について[1][3]

多目的問題では図2に示す通り、いくつかの目的に対する効用が一つの決定した選択肢から得られる。このような場合、単に評価関数が複数となるのみならず、ある目的に対する改善が他の目的に影響を与えるなど目的間の対立関係や、意思決定者の考えによる目的の優先順位や重視度などが加わるため、単純に期待効用値の大小関係によって選択肢の決定をすることができない。そこで、このような問題において有効な選択肢を決定するために、AHP[2]によって目的間の重視度を取り込み目的－選択肢マトリクスからなる関係方程式を解くことによって選択肢の総合的優劣度を求める手法を提案する。

3.1 目的間の統合

今可能な選択肢を$X_1, X_2, \cdots, X_m$とし、存在する目的を$f_1, f_2, \cdots, f_n$とする。また、目的f_nにおける選択肢X_mの期待効用値を$X_m(f_n)$とする。

まず、意思決定者はAHPで目的間の重視度を設定する。比較すべき要素目的の数をnとすると、意思決定者は$n(n-1)/2$個の一対比較を行うことになる。さらに、この一対比較に用いられる重みの値とその内容は表1の通りであり、反対の関係については重みの値の逆数で表すものとする。この一対比較により求められた値から比較マトリクスを作成し、このマトリクスの最大固有値に対応する固有ベクトルを求め、これを各目的間の重視度とする。

ここで比較行列Aと重視度ベクトルWの間には次のような関係が成り立つことが知られている、

$$A \cdot W = n \cdot W \quad (9)$$

但し$A = [a_{ij}]$　$a_{ij} = \frac{W_i}{W_j}$　$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$

とする。

重視度ベクトルWはAの最大固有値に対する固有ベクトルで与えられる。実際に複雑な状況化の問題ではWを意思決定者の答えから得られた比較行列より求めるため、その整合性をチェックする必要があり、次の指数(Consistency Index, C.I.)が提案されている

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

これは完全に整合性があるとき $C.I = 0$ となり、整合性がないほど大きくなる。求まった指数が $C.I. > 0.1$ であるときは要素間の比較関係が是認できないほどに破綻していることを示しているので、このような場合には意思決定者に対して一対比較の再考を促す必要がある。式 (10) によって一対比較マトリクスの整合性を判断したのち、λ_{max} を求め、それに対応する目的間の重視度 W を求める。次に目的－選択肢マトリクスと目的間の重視度 W から次の関係方程式を作成する。

$$X \circ \alpha = W$$

$$\begin{array}{c} \\ f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} X_1 & X_2 & X_3 & \cdots & X_m \end{array} \\ \begin{pmatrix} X_1(f_1) & X_2(f_1) & X_3(f_1) & \cdots & X_m(f_1) \\ X_1(f_2) & X_2(f_2) & X_3(f_2) & \cdots & X_m(f_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1(f_n) & X_2(f_n) & X_3(f_n) & \cdots & X_m(f_n) \end{pmatrix} \end{array} \circ \begin{pmatrix} \alpha_{x_1} \\ \alpha_{x_2} \\ \alpha_{x_3} \\ \vdots \\ \alpha_{x_m} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} W_{f_1} \\ W_{f_2} \\ \vdots \\ W_{f_n} \end{pmatrix} \tag{11}$$

ここで、αは各目的を統合した場合における各選択肢の優劣度を示す未知のベクトルであり、$\circ$はファジィ合成を含む演算を示すものとする。

この関係方程式 (11) を解き、求まったベクトルα から各選択肢の総合的優劣度を比較することによってもっとも有効な選択肢を決定するものとする。

次に式 (11) における合成$\circ$のいくつかの場合について、例題を用いて説明する。

3.2 例題による説明

始めに$\circ$が通常の代数における演算、すなわち (11) が線形ベクトル方程式となる場合について検証する、ここで具体的に 3 目的 4 選択肢の例で考える。

AHP によって目的間の関係を以下のように設定する。

$$\begin{array}{c} \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} f_1 & f_2 & f_3 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 1/9 \\ 3 & 9 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \tag{12}$$

この一対比較マトリクスから求まる目的間の重視度 W は

$$\lambda_{max} = 3.0, \quad C.I. = 0, \quad W = \begin{pmatrix} 0.23 \\ 0.08 \\ 0.69 \end{pmatrix} \tag{13}$$

となる。目的－選択肢の関係マトリクスと目的間の重視度から得られる関係方程式 $X \circ x = W$ は

$$\begin{array}{c} \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} A & B & C & D \end{array} \\ \begin{pmatrix} 0.8 & 0.4 & 0.9 & 0.7 \\ 0.7 & 0.4 & 0.1 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0.3 \end{pmatrix} \end{array} \circ \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.23 \\ 0.08 \\ 0.69 \end{pmatrix} \tag{14}$$

この方程式はこのままでは解けないので Xに対する最短右側インバース X^{RM} を用いて最短解 x^0を求めることによって解とする。最短解 x^0は次の式によって与えられる。

$$x^0 = X^{RM} W \tag{15}$$

ただし最短右側インバース X^{RM}は、

$$X^{RM} = X^T (X X^T)^{-1} \tag{16}$$

これより

$$x^0 = \begin{array}{c} \\ a \\ b \\ c \\ d \end{array} \begin{pmatrix} 48.36 \\ 30.37 \\ 33.26 \\ 39.00 \end{pmatrix} \tag{17}$$

よって、選択肢の総合順位は $A > D > C > B$となる。この結果は与えられた条件を考慮すると有効な選択であるといえる。

一方 4 目的 2 選択肢の場合のように、目的の数が選択肢の数を上回る場合には同様にして最短左側インバースを用いることにより最短解が求められ選択肢の総合順位を決定できる。

なお合成法 $\circ$ について、いくつかのファジィ合成を適用した結果、同様な妥当な結果が求められているがここでは省略する。

4 結論

多目的問題の解決手法を定量的に評価する方法は未だ開発されておらず、提案した手法の実効性については、具体例に適用してみてその積み重ねによって判断するしか方法がないと考えられる。

ここで提案した方法はファジィ化された期待効用にもとずく発見的意思決定法と AHP を相互補間的に組み合わせたもので、従来の期待効用値理論や階層化意思決定法のみでは対応しきれなかった問題に対しても新たな解決の方向を示す可能性を持つと考える。

特に目的間の重視度から選択肢の総合的優先度を決める上で重要な役割をはたしている式 (11) における合成法 $\circ$ について今後十分に検討し、より妥当なものにすることが必要と考えられる。

参考文献

[1] 徳丸, 田崎 "あいまいな環境における多目的意思決定 - ヒューリスティックなアプローチ -" 第 9 回ファジィシステムシンポジウム論文集 pp.177-180(1993)

[2] T.L.Saaty "Axiomatic Foumdation of the Analitic Hierachy Process" Management Sci vol.32 no.7 pp841-855 (1986)

[3] 吉田, 田崎 "ファジィ意思決定を用いた臨床判断分析" 第 10 回医療情報学連合大会論文集 (1990)

数値	定　　義
1	Equal importance　重要性は同じ (比較が無意味)
3	Moderate importance　やや重要 of one over another　(比較的重要)
5	Essential or strong　かなり重要 importance　(結構重要)
7	Demonstrated importance　明確に重要 (確実に重要)
9	Extreme importance　究極的に重要 (絶対に重要)

(2, 4, 6, 8 は中間の時に用いる)

表1　重要度の設定値とその定義

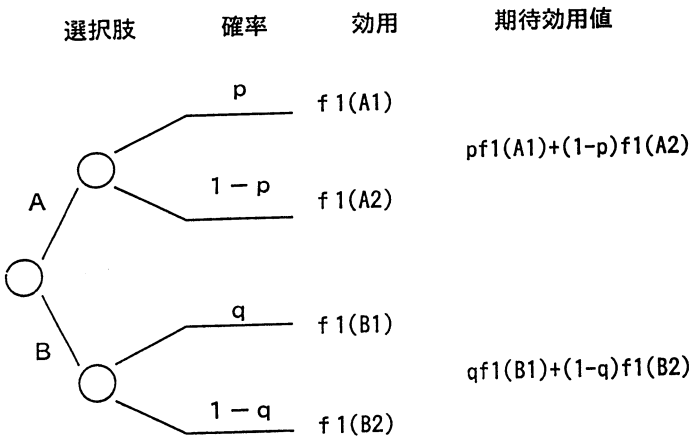


図1 選択肢が2つの決定ツリー

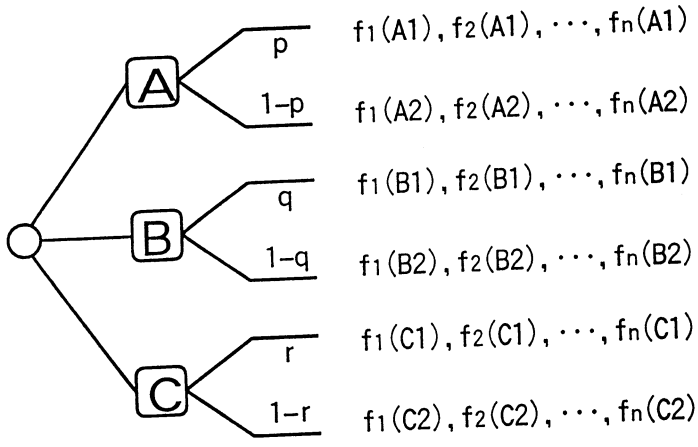


図2　多目的、3選択肢の決定ツリー

問い合わせ先

〒225 横浜市青葉区鉄町1614番地
桐蔭学園横浜大学工学部制御システム工学科
田崎　栄一郎
Tel 045-974-5070
FAX 045-978-1311
E-mail tazaki@toin.ac.jp

FB4-3

ファジィ工学 - LIFEにおける研究の概要

Fuzzy Engineering - Its Progress at LIFE

寺野寿郎 中村和男
Toshiro Terano Kazuo Nakamura

国際ファジィ工学研究所
Laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE)

Abstract - LIFE was established in 1989 and ended in March 1995. During this period, we have made efforts for developing new application fields of fuzzy logic whose realization might be expected after fuzzy control. That is an intelligent information processing system which supports effectively human action and thinking. The core technologies in this system will be the high level intelligent machine which can respond to any demands flexibly and the two-way communication between man and machine by natural language. Fuggy logic opens the prospect of these technologies. In this paper, we show the research results in LIFE.

1．はじめに

LIFEは1989年に設立され1995年３月に終了したが，この６年間ファジィ制御のつぎに来るべきファジィの応用分野開拓に努力してきた．その結果，21世紀の知的情報システムの中心技術としてのファジィのあり方をほぼ確定することができた．その詳細は横浜で行われたFUZZ-IEEE/IFES'95 及び文献[1][2]で報告されているが，ここで簡単に紹介したい．

最近，さまざまな角度から科学技術の見直しが叫ばれているが具体的な方法論がないために掛け声だけで終わっている場合が多い．LIFEの設立目的はマシンをヒューマンフレンドリィにすることである．ヒューマンフレンドリィとはマシンをを人間の代替物にすることではなく人間が難しい問題に直面した時に，その行動や思考を支援することである．ファジィはそれに役立ちそうだという感じはあるが，具体的にはっきりさせるのがLIFEの使命であった．技術の問題には二つの型がある．一つは良構造問題と呼ばれ，数学モデルが作りやすく理論が実際とよく合うような問題である．自然科学や多くの技術問題はこれに属する．これに反して，人間，社会，経済，環境，生物などに関する問題は非常に複雑で数学モデルはほとんど役に立たず，悪構造問題と呼ばれる．人文・社会科学の問題はほとんどこの型であって，定性的で総合的な思考が要求される．人間はそれができるが従来の科学技術は無力である．前者は従来の科学技術で対処できるので，後者の問題に対して人間の思考を支援する新しい方法論をファジィを用いて作り出すのが我々の夢であった．

2．ファジィ工学の特徴

当時コンピューター技術者の大きな夢は人工知能の研究であった．これは論理モデルを悪構造問題の典型である人間の知能問題に導入したという点では高く評価できるが，２値論理にこだわったため現実と食い違い，実用性から程遠いものしかできなかった．ファジィ論理はそれに比べると柔軟で人間のマクロな思考や自然言語のあいまいな意味を表すツールとしてはるかに優れている．ただ，これを２値論理に代わる一つの理論としてみるか，従来の科学思想に対する新しいパラダイムとして考えるかによって応用の仕方も将来の発展性の評価も大きく変わってくる．技術者は多くの場合，新しい理論が出るとそれをツールとして利用してきた．自分の持つ問題にそれを使ってみて望む答えが容易に得られれば良いというのがツールに対する評価である．従ってファジィが一時流行してもニューロやカオス，遺伝アルゴリズムなど別の理論が出ればそちらに関心が移ってしまう．一方，パラダイムとしてみる場合にはファジィの考え方に新味を感じ，その考えに立てばもっといろいろの問題が解けるのではないかと考える．LIFEは後者の立場をとった．ただし，開発の方法は簡単ではない．可能性の限界を探るためにはいろいろな具体的問題にファジィを適用してみる必要がある．しかも，それらはファジィ以外の方法では解けそうもなく，解けた場合には他の多くの問題解決にも利用できるものでなければならない．

そのためにLIFEにおける研究テーマの選択は思いつきや興味本位でなく，ファジィのパラダイムとしての本質を理解した上で社会のニーズや他の技術との比較などを考慮して慎重に行われた．ファジィの特徴が言葉の意味のあいまいさを表現できる点にあることはよく知られているが，その特徴を十分活かした応用は何であるかという議論はあまりされていないように思う．我々はマシンの知能化とマン・マシンのコミュニケーションとに的をしぼってこの問題を考察した．前者にはファジィ制御から高度知的ロボットまでが含まれ，後者にはコンピューターとの対話，知的インターフェース，情報の変換・融合・増幅・圧縮などの問題が含まれる．一言でいえばコンピューターに人間にとって賢明で忠実な友人の役をさせるのにファジィを使おうということである．これが従来のＡＩや自動制御と大きく異なる点は，従来技術がひたすら人間の機能を代替する機械を作ろうとしたのに対して，我々は人間を中心に据えコンピューターがそれを助けるマン・マシン・システムを作ろうとしたことである．前者は人間の存在を考えてないからクリスプな論理に基づいて研究が進められたのも当然であるが，それを実用化する際になって人間無視の情報技術がいかに非現実的なものかが明らかになった．その原因は大部分クリスプ論理にあり，その欠点はファジィ論理を使うことで緩和される．特に人間を助ける程度は過大でも過小でもよくない．それは状況によっても個人によっても変わるので柔軟な対応がどうしても必要なのである．

ここで一般論としてマンとマシンの機能の特徴を分類しておこう．図１はそれぞれの得意・不得意な作業を相対的に示したものである．(I) は人間が機械より優れている機能で論理が役に立たず直感や総合判断が中心となる作業である．(II)は数式やルールできちんと定められた仕事で機械の得意とするところである．(IV) は人間にも機械でもできるのでＯＲ結合にすると信頼性は向上するが，もし，競合するような使い方をすると却って危険である．次に短所は上記以外の領域であるが，これはかならずしも長所の補集合とはならないので注意を要する（図１は簡単のために補集合の形に描いた）．(III-1) 人間の短所であるが，これは常に起こると限らないので面倒だある．(III-2) 機械の短所であるがこれは人間の長所でカバーできる．表１はそれぞれの内容を示す．

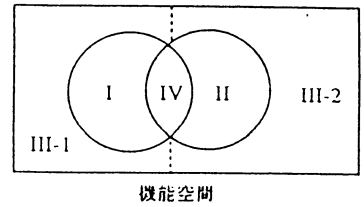


図１ マンとマシンの機能分類

表１　機能例

(I) 人間の得意とする機能
・創造・応用（思惟、推論、臨機応変、発見、類推、計画、定性的論理）
・学習（経験、ノウハウ、知識、反省、熟練、知能向上、常識）
・感性（美的感覚、感情、五感、倫理、意思、主観）
・総合判断（情報融合、マクロ分析、マクロ合成、マクロ評価、情報変換、予知）
・コミュニケーション（言語、非言語）
・フレキシビリティ（多作業、適応性、あいまい情報処理）
(II) 機械が得意とする機能
・論理性（ルール厳守、数量化、透明性、客観）
・正確性（確実、強力、高速、精密、無疲労、単調作業）
・緊急対処（敏速、正確、悪環境下作業）
・情報処理（大量、敏速、記憶、量的処理）
(III-1) 人間が不得意な機能
・緊急時判断（パニック）
・長期予測
・ヒューマンエラー（疲労、忘却、思い込み、不注意、判断ミス、未熟練）
(III-2) 機械が不得意な機能
・故障対応（誤動作、不作動、自律性）
・想定外状況への対応
・多種作業（多目的、複合作業）
・総合判断（予知、予見、多価値、画像理解）
・知識獲得（常識、学習）
(IV) 人間にも機械にもできる機能
・部分的センサー情報（人間と機械の検知は相補的に働く）
・判断や処置（緊急時には人間と機械の判断が相反することがある）

ファジィは(I) の部分をより多く(II)に移すための機械の知能化と，両者を有効に協力させるための知的インターフェースに最も役立つ技術である．また，図１の境界もクリスプではないので柔軟な設計思想が必要である．

３．ファジィ技術の将来展望とLIFEの位置づけ

マン・マシン・システムとして人間支援のレベルを考えるのにラスムセンの人間行動モデル[3] を参考にする．人間は外部から状況に関する情報が入ったとき，ほとんど無意識に行動する熟練ベースの行動と，あらかじめ教えられたルールを選択して動くルールベースの行動，さらに自分の持つ知識を動員して取るべき行動を工夫する知識ベースの行動とに分かれる．図２はマン・マシン・システムとしてのファジィ技術の発達をこれに対応させたもので，人間行動の各レベルをファジィでどのように支援できるかを示す．ファジィの初期の段階では人間が何気無く行っている熟練ベースの行動を言語ルールにしてチップに組みこんだファジィ制御が大きな効果を収めた．LIFEでは最初から第二段階の問題を狙い，前半３年で熟練者が持っているルールを言語表現してファジィ・エキスパートシステム，障害物回避ロボット，画像の認識・検索などに利用することを研究した．

後半では第三段階の知識ベースの仕事をファジィで支援することを目標にした．ここでまず問題になったのは人間とコンピューターの双方向コミュニケーションである．これが人間同士の会話や討論のように自由にできて初めてヒューマン・フレンドリィなシステムと言える．なぜならば，たとえコンピューターの提供する知識が不完全であったり，的外れであってもそれを修正したり補ったりして人間が納得の上でマシンを利用できるからである．LIFEはこのレベルの技術について確実な手がかりを得た．図２の最後の段階は人間とコンピューターが対等に討論しながら知識ベースの行動を支援する総合知能システムの完成である．その実現は数十年先のこととなろうが，ファジィ技術がその中心になることは間違いない．なぜならば，このシステムは単一の方法では達成し難く，情報関連のあらゆる理論や技術を組み合わせて使うことになろう．手法も目的も異なる多くの理論を結合するにはそれぞれの結果をシステム論的・目的論的に意味解釈をして言語表現し，さらに言語ルールで結合するのが合理的である．そしてこれは勿論ファジィの独壇場である．このことはコンピュータと人間との協力でも言える．これを図３に示す．このようにファジィは異種情報の融合や変換に独自の機能を持ち，これが他の理論と大

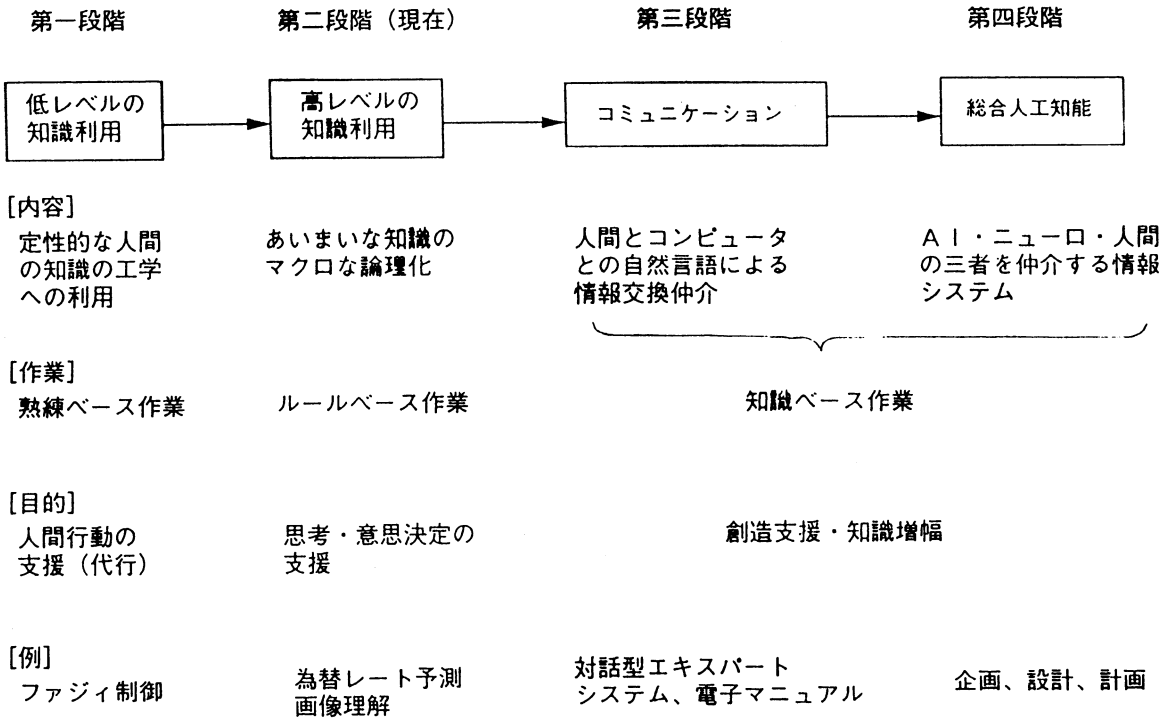


図２　ファジィの発展と支援作業の変遷

きく異なるところである.

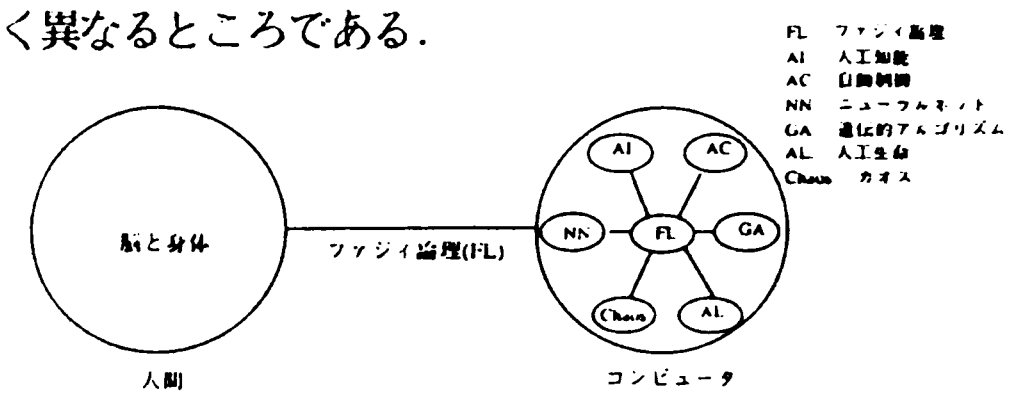


図3 ファジィ論理の役割

4．コミュニケーションとファジィ問題

LIFEは後半で図2の第三段階のテーマに取り組んだが，会話によってコンピューターに人間の意図を理解させるのは非常に難しい．図4は人間同士の会話において発信者の意図を受信者がどうやって理解するのかを示したものである．自然言語は意味があいまいな上，会話では多くの省略が行われるので受信者は想像や推論によって表現の裏にある情報を考えなければならない．これは一面において自然言語の持つ大きな利点にもなっている．すなわち，発信者自身が考えもしなかった解釈が受信者から帰ってくるので新たな発想や工夫が必要になり，創造的結論が得られる可能性が大きい．このような働きを持つメディアはいろいろ考えられる．

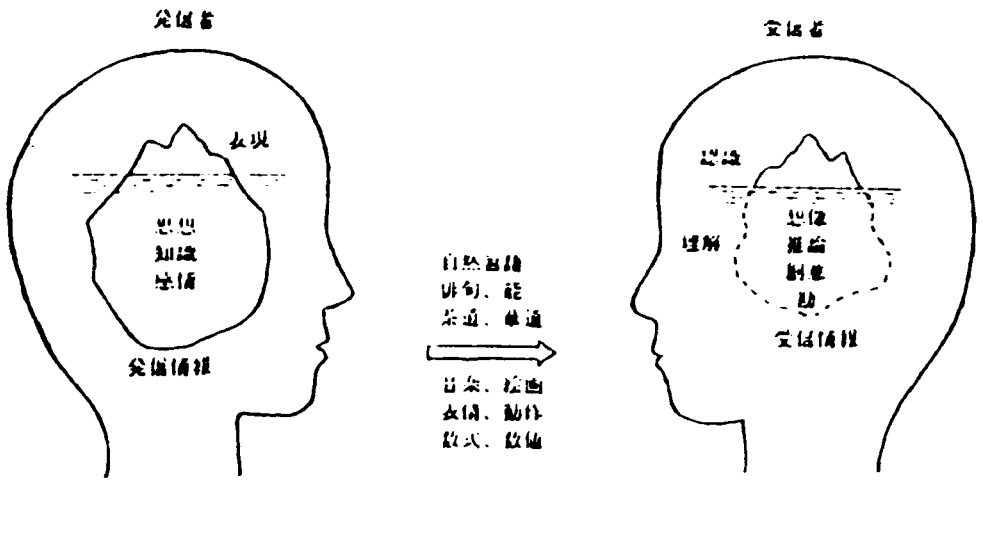


図4あいまいなコミュニケーション

詩歌，画像，表情，身振りなどは勿論，音楽，茶道，華道，能楽など人間の感性に訴えるメディアは皆あいまいさを含んでいる．豊富な情報を有限のメディアで伝えようとすれば，どうしても表現は抽象的なものにならざるを得ないからである．これに反して正確さを重視する科学では情報のメディアは数學，数値などあいまいさを含まないものしか用いない．このことから考えてコミュニケーションにおける情報のメジャーとして従来用いられてきた「正確さ（エントロピー）」だけでは不十分で「内容の豊富さ」を表す尺度を考える必要があると思われる．図5はこの二つの尺度で表した各種情報メディアの分類である．今後，深い内容を持った情報を扱う機会がふえる程，ファジィの重要性が増すであろう．

5．LIFEの研究成果

LIFEの行った研究テーマを表2及び表3に示す．内容の詳細は前に述べたように文献［1］,［2］を参照していただくことにして，ここでは特徴だけを記す．前半3年の研究ではかなり広くファジィ利用の可能性を探り，その例題は人間のルールベース作業支援を中心にした．その代表的なものは外国為替レート予測システムである．為替レートは単なる経済問題ではなく政治問題，心理問題であり，数値情報だけでなくニュースなどの文字情報を扱わなければならない．これは典型的な悪構造問題であり，ファジィ以外の方法では実現困難である．後半3年間では前期の経験を踏まえて人間とコンピューターとのコミュニケーションの問題に焦点を絞り，各種の例題を研究した．

まず，ファジィ・コンピューティングでは自然言語のあいまいさを積極的に利用したシステムの基礎的研究を行った．これは二つのサブプロジェクトからなり，一つは現在のファジィ推論が抱えている問題点，即ち，推論方式選択の困難さ，推論方式自身の不完全さ，言葉の意味のファジィ表現問題などの解消を狙い，チューニング機構を持つ推論ソフトを開発した．もう一つは人間と

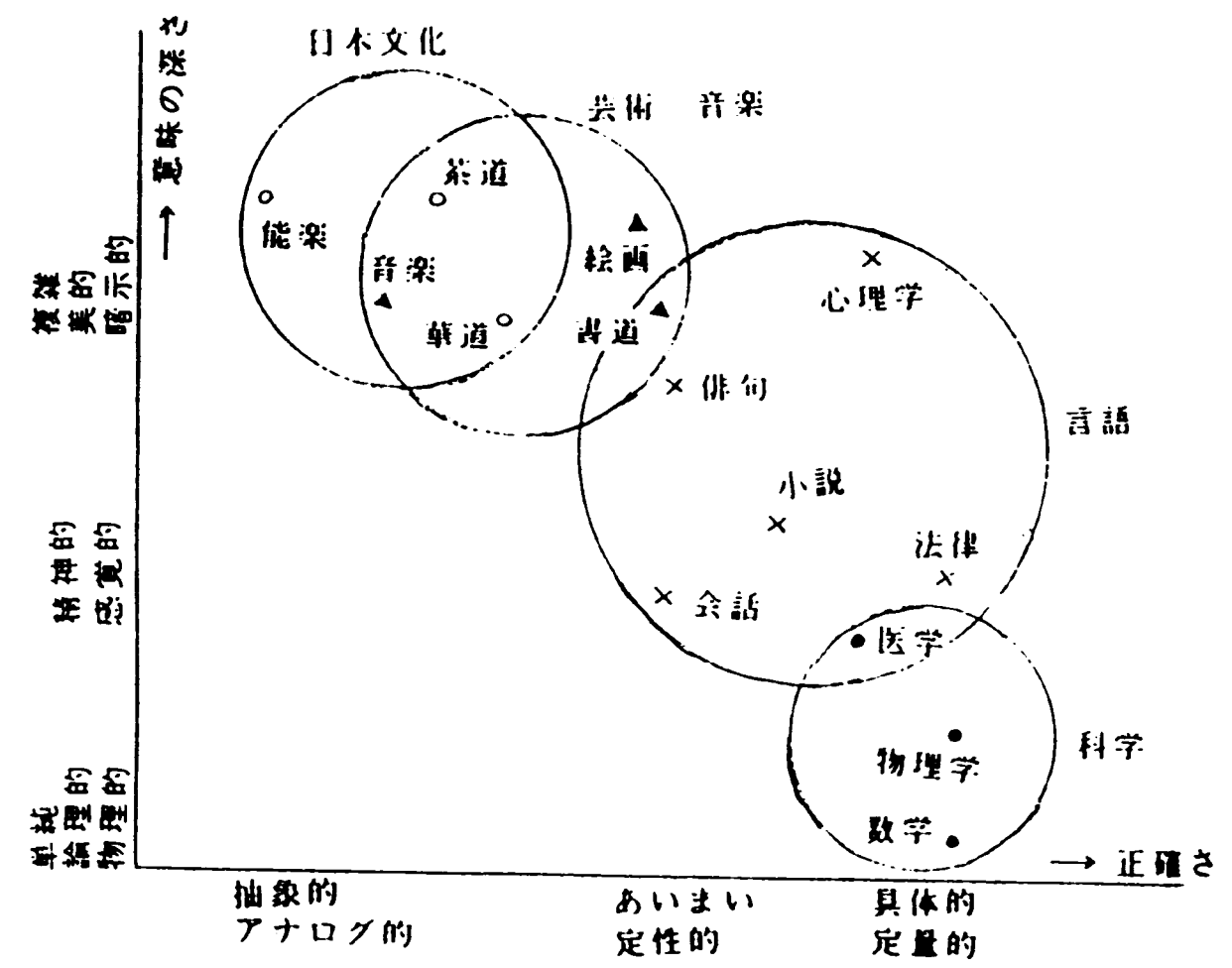


図5 コミュニケーション・メディアと尺度

表2 LIFE 前半の研究テーマ

	略称	プロジェクト名	対象	特徴	要素技術
意思決定支援	DSS	(1)意思決定支援システム	為替売買	・定性モデル ・数量から定性への変換	モデル同定 異種データの融合処理 知識表現／推論 意味理解 評価
	POS	(2)プラント運転支援	発電設備	・深い知識によるモデル化 ・事例の活用	定性推論 事例ベース推論
	PLANT	(3)プロセスのファジィ制御	化学、発酵、環境プロセス	・ファジィモデリングにもとづくマルチモデルコントロール ・多変数制御	予測制御 モデル同定
知能ロボット	COM	(4)言語指示の理解	ホームヘルパーロボット	・言語によるあいまいな指示の理解	言語理解
	IU	(5)視覚情報の理解		・柔軟な画像認識 ・知識によるトップダウン処理	コミュニケーション 画像理解
	ROBOT	(6)知的行動意思決定		・状況への適応 ・マクロ行動意思決定	センサフュージョン 高度自律制御
ファジィコンピューティング	FAM	(7)ファジィ連想記憶システム	自動制御 土木プロセス プラント 画像処理	・知識獲得 ・学習制御 ・連想エキスパートシステム	ファジィニューロ 知識表現・推論 連想記憶 並列ファジィ情報処理
	FES	(8)ファジィエキスパートシステム構築支援ルール	‐	・ファジィプロダクションシステム ・ファジィフレーム ・グラフィックインタフェース	エキスパートシステム
	FCP	(9)ファジィコンピュータ		・ファジィ情報処理 ・高速処理 ・ヒューマンインタフェース	並列処理 オブジェクト指向

表3 LIFE 後半の研究テーマ

大分類	略称	プロジェクト名	対象	特徴	要素技術
人間と機械のコミュニケーション	FC	ファジィ・コンピューティングの研究 ・自然言語のファジィ処理	ファジィ推論のソフトウェア環境，自然言語による対話	現実的ファジィ推論，言語の意味のあいまいさの積極的利用	自然言語によるコンピュータとの対話，事例ベース推論
	IF	知的インタフェースの研究 ・人間と機械との対話による意思決定支援	対話による貸探し，囲碁	双方向コミュニケーション，主観評価モデル	意図推論，ユーザモデル，情報統合，マクロ状況認識
	FAM	ファジィ連想記憶の応用研究 ・ファジィとニューロの融合	表情認識，動作の学習／認識／計画，機器操作の知的ガイド	ファジィ知識の獲得，表現	概念ファジィ集合，ファジィルールの自動獲得，事例ベース推論
機械の知能化	IU	視覚情報（画像）の意味理解の研究 ・画像のファジィ認識 ・検索および画像生成	顔画像の認識・検索，ヒューマンインタフェース，画像理解によるナビゲーションシステム	画像と言語の相互変換，画像情報のもつあいまいさの情報処理	空間認知，大局的認識，言語による3Dモデリング，ファジィ画像情報検索
	ROB	高度知的ロボットの研究 ・人間と複数ロボットとの協調作業	机の配置替え，ヘリコプターの半自律無人制御	マン・マシン協調，動作からの意図理解，知的行動システム，マクロコマンド制御	分散協調システム，意図推論，柔軟な行動計画，センサーフュージョン

コンピューターとの会話をクリスプ，ファジィ，事例の３種類の推論を組み合わせて実行するシステムの開発である．

つぎの知的インターフェースでは対話型のエキスパート・システムを具体的な例題について開発した．一般にユーザーは漠然とした目的を持っているがデータを知らず，また，多目的問題なので意思決定ができずにいる．コンピューターはデータはあるが，ユーザーからクリスプな形の質問がないと答えられない．この時，両者が自然言語による対話を通して最終意思決定に到達できるようなシステムを開発するのが本研究の目的である．これはユーザー・モデルによる意図推論，対話管理，ファジィ・データベースなどから成る．また，これとは別に人間のマクロ判断のファジィモデルとして囲碁における序盤の形勢評価の問題を委託研究によって行った．

三番目はファジィ連想記憶の応用でニューロとファジィの組合わせである．即ち，言語表現の困難な知識を学習によって獲得することを目的とする．例題としてスポーツにおける人間の動作を動画で表してそれを言語表現に置き替えたり，その逆を行ったりする．別の例では人間の顔表情から喜怒哀楽を判定したり，また，感情を指定して顔図形を創造したりもする．

つぎの画像理解のプロジェクトでは画像を一つの情報メディアと見成して，画像の内容を言語で表現したり，また，言語指令によって画像を変形する研究を行った．これは広範な応用を持つもので，その基礎には異種情報の融合や，目的に応じた情報の一部の増幅・要約・フィルタリングなどができる．さらにＣＡＤ・ＣＧ・ＶＲなどへの感性工学の導入なども可能になる．ここでの具体例としては画像データベースの情報検索，言語知識を利用した物体認識，音声ナビゲーション・システム（オムロンへの委託），言語指示のよる物体の３Ｄモデルの生成などを研究した．

五番目は高度知的ロボットの研究で，ここでは人間とロボットが共生する場合の問題を考察した．即ち，一人の人間がある行動をとると，その周囲に分散していた複数のロボットは特別の指令がなくとも，人間の行動を観察してその意図を推察し，各自の取るべき行動を自律的にきめて人間に協力する．例題としては部屋のなかに乱雑におかれた椅子と机を会議用，あるいは講義用に配置する仕事を考えた．ロボットとしては４台のマイクロマウスがSUN ワークステーションによってそれぞれ自律的に行動する．状況認識は天井に設けた CCDカメラにより行う．人間の役は同形のリモコンロボットが果たす．これによって非言語情報によるマン・マシン・コミュニケーションが実験された．その他，東工大への委託研究によって音声でリモートコントロールする知的無人ヘリコプターを開発している．

以上の例題から分かるように，人間とのコミュニケーションにはあいまいな情報を理解するための高度の知性とある程度の感性とが必要であり，コンピューターにそれを持たせるにはファジィ技術が不可欠である．

６．むすび

LIFEが６年間で得た成果は目に見える形では上記の五つのプロジェクトの報告となって示されている．これらはいずれも例題であって21世紀の情報システムの基礎となる要素技術として開発された．これを利用して多くの類似の問題が解決できると思う．さらに強調したいのは目に見えないノウハウに関して大きな成果を得たとである．特にファジィを新しいパラダイムの出現と受け止め，情報の主観性・大局性・柔軟性に着目した取扱いを積極的に進めたことで，他の技術には見られないファジィの特徴が明らかになった．これはユーザーの存在を忘れてマシンの機能向上だけに熱中してきた従来の技術の欠陥を正し，人間を中心に置いた新しいシステムの構成を可能にした．これは一種の革命であり，その意義は大きい．

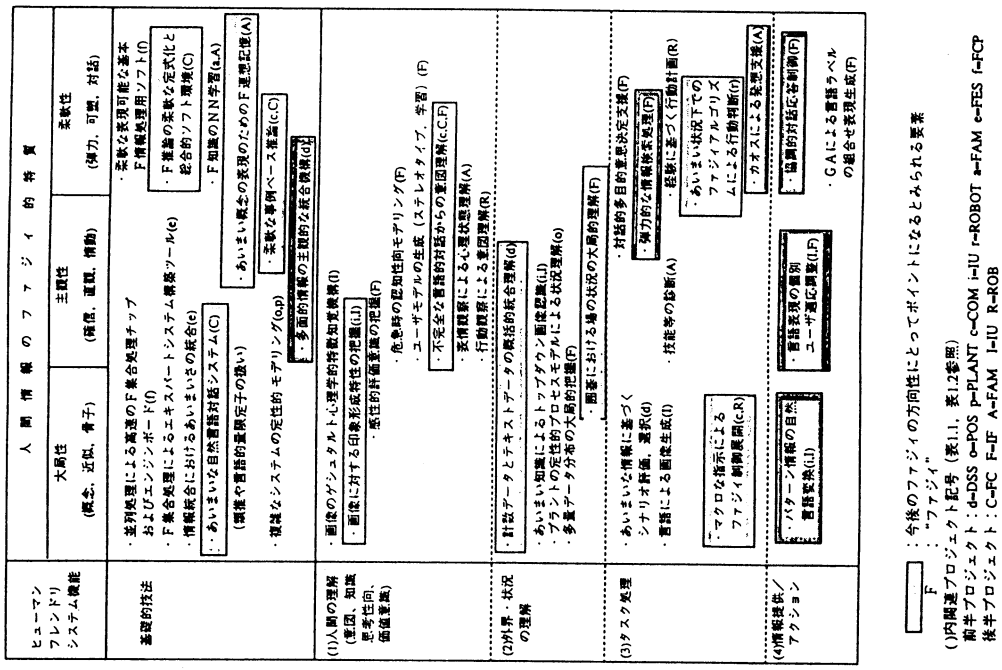
参考文献

[1] 国際ファジィ工学研究所編：ファジィ技術の先端的応用，日刊工業新聞社，

[2] 同上：ファジィ思考による知的情報処理，コンピュータ・エイジ社，

[3] J. ラスムセン(海保ほか訳)：インターフェースの認知工学－人と機械の知的かかわりの科学，啓学社，1990

連絡先
〒168 東京都杉並区永福
寺野寿郎



FC1-1

マルチメディアに対応したファジィコミュニケーションシステムの提案

On Multi Media Fuzzy Communication System

中川 友紀子, 廣田 薫
Y.NAKAGAWA, K.HIROTA
東京工業大学大学院 総合理工学研究科システム科学専攻
Department of Systems Science, Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology
Tokyo Institute of Technology

abstract

The fundamentals of a user friendly fuzzy communication system for multimedia computer system are presented.

By comparing the humans' communication and the human-(traditional) computer system's communication, the advantages and the problems are discussed first. Considering these points, it is concluded that the communication system for multimedia computer system needs to have a flexible knowledge about human.

keywords: knowledge, user friendly communication, multimedia cumputer system

1 はじめに

近年、各種記述方式の発達に伴い、様々なメディアに対応した計算機が出現している。しかし、マルチメディアにある程度まで対応した出力方法はあっても、マルチメディアの特性を十分に反映した入力に関する研究は不十分であるといえよう。なぜなら、入力された命令の解釈方法は各メディアによって異なり、また複数の入力からの命令を統合、あるいは一意的に決定する方法が、未だ確立されていないからである。本稿では、従来の計算機システムと人間のコミュニケーションモデルと、一対一の人間同士のコミュニケーションモデルとを比較し、それぞれの特徴をとらえて、マルチメディアに対応した計算機システムと人間のヒューマンフレンドリなコミュニケーションシステムの基本概念を提案する。

2 マルチメディアの取り扱いの概略

マルチメディアを扱える従来のコンピュータシステムと人間（ユーザ）の間のコミュニケーションモデル、及びマルチメディアを自在に扱うことができる人間同士のコミュニケーションモデルの両者を比較してみよう。

2.1 従来のコンピュータシステムと人間のコミュニケーションモデル

計算機システムとユーザ(人間)との情報の交換においては、ユーザに計算機の仕組みにあうような入出力を行うことが要求されていた。ユーザと計算機システムとのコミュニケーションモデルを、図1に示し、そこにおける特徴と問題点を列挙する。

1. 計算機で扱う情報は、基本的には論理的に整合性のある完全情報でなければならない。
2. 基本的には、人工言語による論理的に 100 %正確なキー情報を入力することが想定されている。
3. 計算機にユーザの意図を十分に理解させるための知識を持たせる努力があまり行われていなかった。
4. 情報の符号化、複合化には、符号理論をはじめとする数学モデルが使用されている。
5. ユーザは、計算機に関するある程度正確な用途や使用方法を知っていなければならない

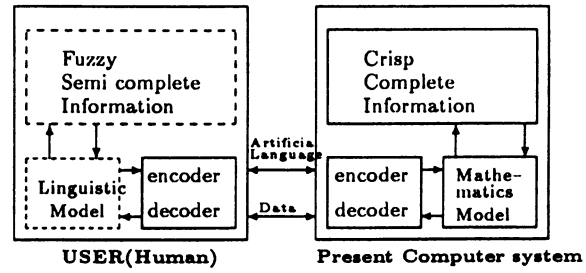


図 1: Traditional Communication Model between Human and Computer

2.2 人間同士のコミュニケーションモデル

次にメディアを自在に解釈する能力を有する人間同士のコミュニケーションについて考察する。まず、人間同士の一対一のコミュニケーションにおいては、情報のやりとりは、お互いが理解できる言語によって行われているという事実に注目しよう。ここで、送り手も、受け手も、五感には個人差があり、情報を伝えるための自然言語の解釈や使い方にも個人差があることに注意する必要がある。図2に示した人間同士のコミュニケーションモデルは、以下のような特徴を持っている。

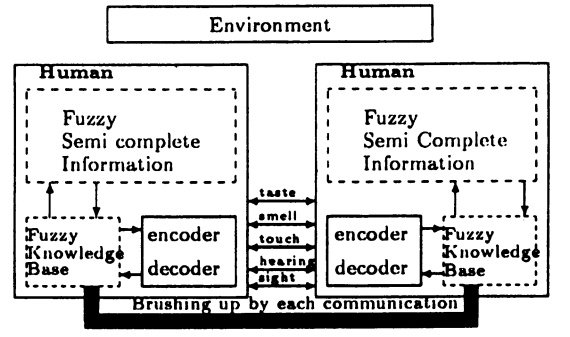


図 2: Human communication model

1. 人間が扱う情報は、ある程度整合性のとれたファジィ準完全情報である。
   人間は、必ずしも常に論理的に矛盾のない情報を交換しているわけではない。しかし、全くでたらめな情報ではもちろん理解できない。すなわち、要旨がある程度正しく伝われば、場合によっては詳細はぼけていてもかまわないという意味で、いわゆるファジィな情報を扱っている。
2. 自然言語による複合的なやりとりが想定されている。また、必ずしも情報を 100 %正確に表現する必要はない。

3. お互いが意図を十分に理解できる知識が存在する。
4. 情報の符号化、複合化には、知識を用いた言語モデルが使用されている。
5. 人間は、コミュニケーションする度に相手についての知識を更新する。

2.3 マルチメディアに対応したコンピュータシステムと人間のコミュニケーションモデル

マルチメディアに対応した計算機システムは、人間が持つ五感に対応した入出力装置を持つことが可能であるものとする。

マルチメディアに対応するそれぞれの情報は、文字、画像、音声などの様々な表現形態を持っている。それぞれの情報は、計算機内部の表現形態が同じであっても、人間の表現形態が違うため、解釈に適したマッチング方法が異なって画一的に扱うことができない。

そこで、入出力の符号化復号化に、人間の知識を反映する知識ベースを持つ知識処理システムを利用して、複数のメディアによる入出力を統合するシステムを図3に提案する。

マルチメディアに対応したコミュニケーションシステムは、以下のような特徴を持つことによって実現可能であると考えられる。

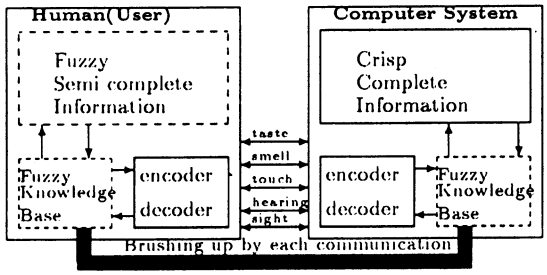


図 3: multimedia computer system and human

1. 計算機が扱う情報は、論理的整合性のとれた完全情報である。
   計算機は、計算機の構造上、取り扱う情報の論理的整合性がとれないと、長所である計算の速さや正確さを発揮できない。
2. マルチメディアによる複合的な入出力が想定されている。
   人間が五感によって取り扱う情報を統合できることに着目して、コミュニケーションシステムでは、複数のメディアを統合して情報を取り扱うことが望ましい。
3. 計算機システムは、ユーザの意図を反映できる知識ベースを持つ。
   計算機システムの取り扱う情報がクリスプ完全情報であり、人間の取り扱う情報がファジィ準完全情報であるならば、コミュニケーションシステムでは、クリスプ完全情報をも取り扱えるファジィ知識を持つことによって、ユーザフレンドリなコミュニケーションが期待できる。
4. 情報の符号化、復号化には知識を利用した言語/数学融合モデルを使用する。
   ここでは、人間が用いている言語モデルだけでなく、数学モデルも情報によって使い分ける。両者をうまく使い分けることによって、計算機の持つ長所と、人間の持つ長所をうまく融合できる。
5. コミュニケーションが行われるたびに、お互いの知識が更新される。
   コミュニケーションが行われる度に、人間は計算機に関する知識を更新していき、計算機もユーザに関する情報を学習していく。学習がある程度すすめば、ユーザにとって使いやすいコミュニケーションシステムが形成される。

3 知識の枠組み

これまで述べてきたように、従来の計算機と人間とのコミュニケーションでは、計算機システムの長所を引き出すために人間が譲歩する形を取ってきた。

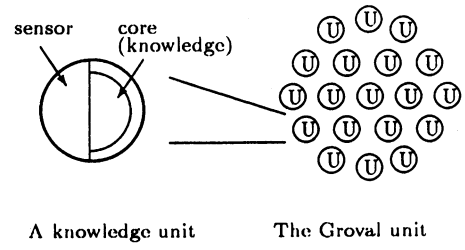


図 4: A knowledge unit and The Grobal unit

人間にとって使いやすい計算機システムを実現するためには、図3に示されるように、計算機側で人間に関する知識を持たなくてはならない。ここでは、そのような知識について述べる。

従来の計算機における知識ベースシステムは、限られた状況を想定したものが多い。なぜならば、知識は状況によって異なった意味を持っているからである。

しかし、固定された知識は、柔軟なコミュニケーションにおける知識全体にとってみれば、一部分でしかない。そこで、新しい知識の枠組みを提案する。

知識の構造は単純であればあるほど良い [1] とされている。また、知識と意識は引き離すことはできないと考える。

そこで、図4に示すような知識と意識を一体型としたものを一つのユニットとする。ユニットの基本機能は、意識は認識を司り、知識は核の部分となって意識がそれぞれ認識したものを同一のものと統合することである。ユニットは知らない情報に直面したときには、新しいユニットを作成する。さらに、似たユニット同士は近い距離に存在する。

このようにユニットが情報を取り込むたびに、知識が追補されていく。また、ユニットは一つが一つの情報に当たるので、相当数のユニットが集合体となって一連の知識を構成する。これをグローバルユニットと呼ぶ。

グローバルユニットは、ユニットとほぼ同じ構造であるので、核に近付くほど深層知識となり、情報を取り出すときに参照されにくくなる。

このような知識構造をもつ知識ベースシステムを実現することができれば、柔軟なコミュニケーションに対応した知識ベースが作成できると考えられる。

4 おわりに

マルチメディアに対応するファジィコミュニケーションのためのコミュニケーションモデルの基本と、これを実現するための知識ベースの基礎を述べた。

これらは発展途上の研究であり、また計算機の構造における問題も山積されている。今後は、それらの問題点の解決に向けて、更なる研究を展開する必要がある。

参考文献

[1] 橋田 浩一, 知のエンジニアリング–複雑性の地平–, ジャストシステム,1994

連絡先

東京工業大学大学院 総合理工学研究科
システム科学専攻システムマネジメント講座
中川 友紀子
〒 226 横浜市緑区長津田町 4259
Tel.045(924)5682, Fax.045(924)5676
E-mail:yuki@hrt.sys.titech.ac.jp

FC1-2

インタフェースと人間の作業能率との関係について

Relationship between Human Interface and Task Performance

孫　永璿　　鬼沢武久

Youngsun Sohn　Takehisa Onisawa

筑波大学工学研究科

Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba

Abstract - It is necessary to design a human interface that is adaptable to users level, aptitude etc. To this end a relationship between human interface and task performance must be analyzed. In this paper task experiments are performed using 64 kinds of interfaces. Task performance is inferred by time required and task completeness. Users are classified into some groups according to the task performance. The relationship between human interface and task performance in each classified group is discussed.

1. はじめに

昔は人間は、自分にとって使いやすい道具を作って、使っていた。しかし、技術が発達し、高機能な機械が開発され、その機械を使うことによって人間は楽に、容易に作業を行うことができるようになった。しかしその代わり、人間は機械の一部分として仕事をしなければならなくなり、人間ー機械の関係は、人間が機械に合わせて仕事を行うという形態が主になった。しかし作業によっては、機械が人間に適応して変わることによって、人間にかかる負担を軽減する必要性を考えなくてはならない。しかし、機械を使う人間は千差万別であり、初心者レベルから熟練者レベルまでおり、また性格もいろいろ異なっている[1][2]。したがって、作業条件、ユーザの適性、レベルなどによって変化し、個々のユーザに適応したインタフェースが提供できるシステムがあれば、ユーザにかかる負荷も軽減され、作業能率も上がることが予想される[3]。

そこで本論文では、個々のユーザに適応したインタフェースを提供するシステムを前提として、そのシステムを構築するための前段階として、インタフェースと作業能率との関係を調べることにする。そのため、ユーザがコンピュータを使って複数の作業を行う場合を１つの例として考え、作業実験を行って得られたデータを解析することによって得られた知見について述べる。

2. 作業実験

2.1 作業内容

ここでは図１に示す画面を見ながら、ユーザが複数（三つ）の作業を同時に行う作業を考える。第一の作業は、図１の画面右下に表示される複数の色が配置された「問題」（1）と同じように、画面左下の「答案」（2）上に、画面下中央の「パレット」（3）から色を選択し、配置するという作業である。第二、第三の作業は、時間によって変動がある動的な作業である。図１の画面中央上にダイヤル（4）、（5）が表示される。このダイヤルは四つの領域に分かれている。中央の緑色領域では針がランダムに左右に動く。針が一度、緑色の隣にある黄色の領域に入ると、針は左の領域では左の向きに、右の領域では右の向きにさらに動く。黄色領域の隣にピンクの領域がある。ピンク領域の針の動きは黄色の領域と同じである。ピンクの隣にある赤の領域に針が入ったら、作業終了となる。針が赤領域に入らないように図１のダイヤルの下にあるレバー（6）、（7）を各々操作する。

2.2 被験者実験

この実験で準備するインタフェースによっては、針が黄色からピンク色に移動する時、警告音がある場合もあり、また、「問題」をみて「答案」に色を配置する時、まちがえた場合に「X」表示が出る場合もある。警告音、X表示の有無、作業する部分（問題、解答部分、ダイヤル）の大きさ、配置の良し悪しなどが、作業能率にどういった影響力があるかを調べるために、①色の区別（しやすい、難しい）、②警告音（有、無）、③問題、解答部分の大きさ（大きい、小さい）、④配置（正常、非正常）、⑤X表示（有、無）、⑥ダイヤルの大きさ（大きい、小さい）の６つの要素をそれぞれ変えた、計６４種類のインタフェースを用意し、被験者実験を行う。実験は一人が３２種類のインタフェースを各一回ずつ用いて、３２回の実験を行う。使用するインタフェースの順番はランダムに決める。なお、作業内容を理解してもらうために、実験前に、標準インタフェースを用いて一人につき５回の練習を行う。各インタフェースを使って実験が終わった後、アンケート調査を行う。そして３２回の実験が終わった後、総合的なアンケート調査を行う。

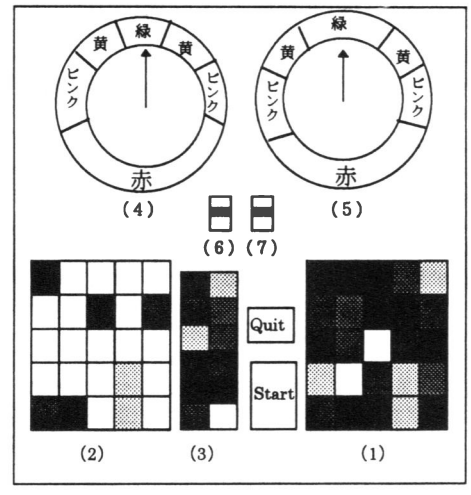


図１　作業画面

2.3 実験結果

被験者数は７８人であり、その内訳は社会人６人、大学生７２人であり、ほとんどが男性である。マウス使用経験は様々である。実験で得られたデータは、所要時間、完成度、アンケート結果である。

○作業能率

ここでは、所要時間、完成度から作業能率を求めることにする。そのため次の５つのルールを考える。

①完成度が高く、所要時間が短い/普通であれば、能率は高い。
②完成度が高く、所要時間が長ければ、能率は中程度。
③完成度が普通、所要時間が短い/普通であれば、能率は中程度。
④完成度が普通、所要時間が短ければ、能率は低い。
⑤完成度が低ければ、能率は低い。

上記のルールとmin-maxのファジィ推論[4]を使って各被験者の能率を推論する。本稿では、能率が高いと推論された被験者を「熟練者」、能率が中程度になると推論された被験者を「中級者」、能率が低いと推論された被験者を「初心者」と定義する。推論した結果をみると、図2のようになる。

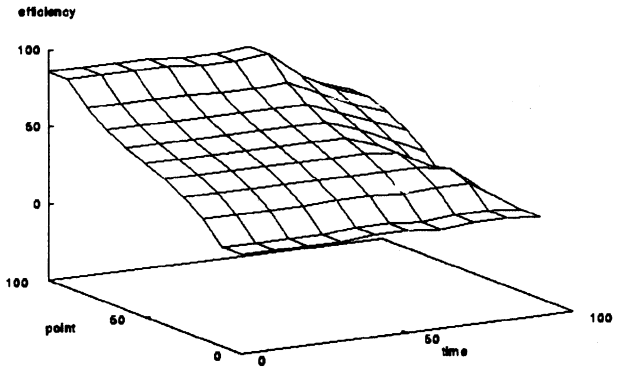


図2　推論結果

3. 考察

被験者実験の結果得られたデータ、および推論された結果をもとにして、図3に示すような図を作成した。これは、ある被験者の32回行った実験のデータをプロットしたものである。そのうち最初の5回目までのデータについてまとめたものが図3の○で囲った部分である。この、5回目までのデータと6回目以降32回までのデータが、初心者、中級者、熟練者のレベルのどのレベルに入るかによって、各被験者は、①始めから終わりまで初心者レベル（図3に示した被験者はこれに相当）、②始めは初心者レベルだが、作業実験を繰り返すことによって作業能率が向上し、中級者レベルになる、③始めから終わりまで中級者レベルだが、作業実験を繰り返すことによって作業能率が向上する、④始めは中級者レベルだが、作業実験を繰り返すことによって作業能率が向上し、熟練者レベルになる、⑤始めから終わりまで熟練者レベル、の5つのグループに大まかに分けられる。5つの大まかなグループに分かれた中で、①のグループに入った被験者達は、インタフェースの種類とあまり関係なく低い作業能率を示し、⑤のグループに入った被験者達は、インタフェースの種類とあまり関係なく高い作業能率を示していることがわかった。また①と⑤のグループに入った被験者達の実験回数による作業能率の変化をみてみると、図4に示すように、①のグループでは作業能率の低いレベルで振動しており、⑤のグループでは作業能率の高いレベルで振動している。②～④のグループでは、振動しながらも作業回数が増えるにつれて作業能率は上昇している。

以上のことから、①と⑤のグループに入ると推測されるユーザに対しては標準装備あるいは、ユーザによって評価の高いインタフェースを提供すればよいことが予想される。しかし、①のグループに入ると推測されるユーザの作業能率を高めるためには、ここで考慮したインタフェース以外に作業を支援する要素を備えたインタフェースが必要となろう。

②～④のグループに入ると推測される被験者については分析中であるが図4に示したように、「学習」と思われる要素が含まれており、この要素を考慮しなければならないであろう。

4. おわりに

本稿では、個々のユーザに適応したインタフェースを提供するシステムを前提として、そのシステムを構築するための前段階として、インタフェースと作業能率との関係を調べるためにコンピュータを使った実験について述べた。そして、作業に要した時間と完成度から推測された被験者の作業能率をもとに、被験者を大まかに5つのグループに分けて、そのうち、「始めから終わりまで初心者レベル」のグループ、「始めから終わりまで熟練者レベル」のグループのそれぞれに入る被験者は、作業能率がインタフェースの種類にあまり関係していないことがわかった。

今後、今回は明確にできなかったグループについての分析をすすめることが重要な課題となる。特に、これらのグループに入ると推測されるユーザはいろいろな特性を示すと考えられるので、インタフェースの設計においては重要な位置を占めると思われる。

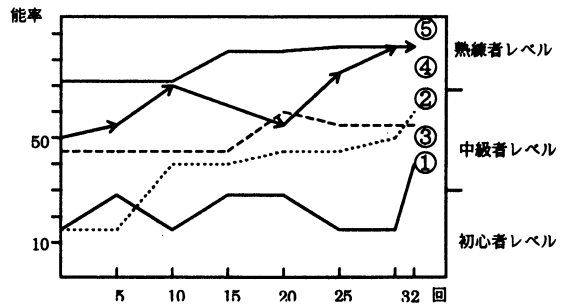


図3　5つのグループの被験者実験回数による作業能率の変化

	10	20	30秒
10	1,9,10,13,14,16,	17,24,27	
20	2,23,26	11	
30	3,6,7,12,15,20,21,28,29	5,18	
40点	4	32	

図4　ある被験者の各インタフェースを使ったときの所要時間、完成度

参考文献

[1] 田村　博編、“ヒューマンインタフェース”、コロナ社、pp.1－32、1987

[2] 小松原明哲、“対話型システムの認知人間工学設計”、技報堂出版、pp.29－78、1992

[3] 鬼沢武久、大森拓哉、孫　永瑞、ユーザレベルを考慮したヒューマン・インタフェースの一研究、“第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集”、pp.487－488、1994

[4] D.Dubois and H Prade, Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, Accademic Press. New York, 1980.

連絡先

〒305　茨城県つくば市天王台1丁目1－1－1
筑波大学工学システム学類/構造工学系
鬼沢研究室　孫　永瑞
TEL：0298－53－5060　FAX：0298－53－5207
E-mail：sohn@kz.tsukuba.ac.jp

FC1-3

ある種のファジィ制御における1/fゆらぎについて
On 1/f-fluctuations in a Certain Fuzzy Control

蔵本俊男 大西真一 河口至商
Toshio Kuramoto Shin-ichi Ohnishi Michiaki Kawaguchi

北海学園大学工学部
Faculty of Engineering,Hokkai-Gakuen University

Abstract- Some control techniques aim at the elevation of human interface and comfortableness. For this purpose,there exist some control techniques with $1/f$-fluctuations and a fuzzy control. In this paper, we simulate a model of simple control using a computer and discuss the question concerning with the pursuit of $1/f$-fluctuations generated by the fuzzy control.

1. はじめに

近年「1/f ゆらぎ」が、リラクセーションを目的とした家電製品等の分野で注目を集めている[1]。$1/f$ゆらぎとは，パワースペクトルの周波数依存性が$1/f$に比例するゆらぎのことで，自然現象に多く存在していることが確かめられている[3]。一方ファジィ制御は，“あいまい”な量を扱うことのできる制御法で，従来の制御法と比較してシステム効率や使用感の向上に貢献している。

倒立振子は，手のひらに乗せた棒を立たせることに似ている。このシステムは非常に不安定で，振子を立たせようとしても，常に左右にゆらいでしまう。また，倒立振子と原理的に近い人間の片足立ちで，体のゆれのパワースペクトルが$1/f$であり[5]，このことから振子のゆらぎが$1/f$になる可能性がある。

以上のことから，コンピュータシュミレーションを中心にファジィ制御による倒立振子の挙動と$1/f$ゆらぎの関係を研究した。

2. $1/f$ゆらぎについて

周波数fとそれが持つ変動の２乗平均を表す$S_v(f)$の両対数グラフは「スペクトル密度」または「パワースペクトル」と呼ばれるものである。このグラフの傾きが時間内におけるゆらぎの相関を表す目安であり，傾きの大きさによる分類では代表的なものに次の３つがある。

まずホワイト・ノイズと呼ばれるものは，もっともランダムな場合で，隣り合う変動の時系列の間にはまったく相関がなく，完全にでたらめに変動する場合である。パワースペクトルは横軸に平行であり，変動にすべての周波数成分が等量含まれていることを特徴とし，グラフの傾きは$1/f^0$である。

次にブラウン運動(Brownian motion)，あるいはrandom walkと呼ばれるものは，隣り合う変動それ自身はランダムであるが，ひとつ前の値を起点としたランダムな変動であり，言い換えれば，過去の状態に強く依存するのが特徴である。パワースペクトルはきわめて急峻で，その傾きは$1/f^2$に比例している。

３つめは以上の２つの中間に位置するのもで，パワースペクトルの傾きが$1/f$に比例していることから，$1/f$ゆらぎと呼ばれる。この変動の相関はブラウン運動よりは弱いが，ホワイト・ノイズよりは強く，適度な継続性と意外性を合わせ持つゆらぎといえる。

このような$1/f$ゆらぎは，自然界に多く存在することが知られており，自然風の風速や，潮騒の音響パワーが$1/f$ゆらぎをしていることが確かめられている[1][3]。

3. 倒立振子について

倒立振子のシステム全体の概念図を図1に示す。振子の一端は台車に固定されているポテンションメータの軸につけられており、自由に回転することができる。台車はレール上にあり、アクチュエータによって駆動するベルトによって左右に移動できる。ベルトのプーリにもポテンションメータが接続されており、台車の位置を知ることができる。アクチュエータはドライバ（パワーアンプ）によって駆動される。ドライバに与える指令電圧によってアクチュエータを制御することができる。

この倒立振子のモデルをファジィを使って制御するのだが、そのために必要なノウハウはいたって直観的で判りやすい。それは、「振子が右（左）に倒れたら、台車を右（左）に動かす」といったものである。これをθを振子の鉛直軸からの角度、rを台車の変位として、If～thenで表わすと

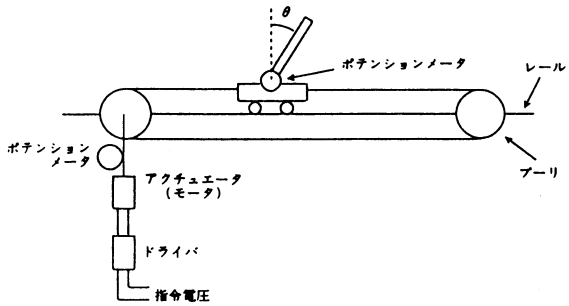


図 1: 倒立振子の構成

If θ is positive then r is positive.

となる。しかし、振子はダイナミクスを持っているため、振子の倒れる速度まで考慮する必要がある。そうして考えられた全ての制御規則を表1に示す。

表 1: 制御規則

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

4. 制御結果

制御変数は角度θと角速度$\dot{\theta}$の２変数、操作量は指令電圧uとし、制御規則は表1に従うものとする。各メンバシップ関数の形状は一般的な三角型を採用する。ただし、前件部のNB,PBについてのみ台形型とする。

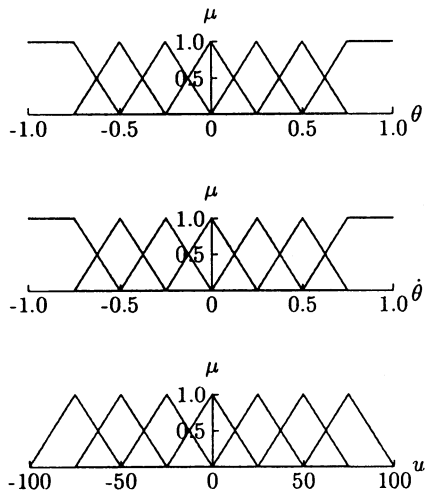


図 2:メンバシップ関数

制御結果から角速度のデータについて、フーリエ変換を行い、その周波数特性を調べる。以上のことを踏まえてコンピュータによるシミュレーションを行った結果を図3に示す。

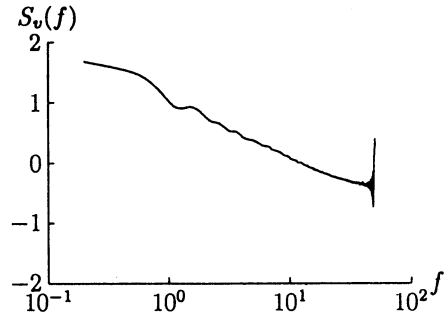


図 3: 角速度のパワースペクトル

参考文献

[1] 安久正紘, 大口國臣, “人に快適感を与える$1/f$ゆらぎとその家電への応用”, 電気学会誌, Vol.113, No.1, pp27-33, 1993

[2] 川路茂保, 松永信智, “ファジィ制御の理論と倒立振子への応用”, インターフェイス, 共立出版, Vol.19, No.9, pp.137-153, 1993

[3] 佐治晴夫, “$1/f$ゆらぎとその応用”, システム／制御／情報, Vol.37, No.12, pp.689-695, 1993

[4] 菅野道夫, “ファジィ制御”, 日刊工業新聞社, 1988

[5] 武者利光, “ゆらぎの世界”, 講談社, 1980

[6] 村上周太, “ファジィ制御”, 日刊工業新聞社, 1993

[7] 蔵本俊男, 大西真一, 河口至商, “ファジィ制御と$1/f$ゆらぎについて”, 電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集, 1994

[8] 蔵本俊男, 池田雅俊, 大西真一, 河口至商, “ファジィ制御による倒立振子の挙動と$1/f$ゆらぎの関連性について”, 北海学園大学工学部研究報告, No.22, pp.293-303, 1995

連絡先

〒064 札幌市中央区南２６条１１丁目
北海学園大学工学部
蔵本俊男
ＴＥＬ：011-841-1161（内線775）
E-mail：kuramoto @eli.hokkai-s-u.ac.jp

FC2-1

フレーム理論の精神科診断への応用
An Application of Frame Oriented Theory to Psychiatric Diagnosis

○吉田　香,　白浜　成希,　矢鳴　虎夫
○Kaori YOSHIDA, Naruki SHIRAHAMA and Torao YANARU

九州工業大学　工学部　電気工学科
Kyushu Institute of Technology

Abstract - Recently, there have been many discussions about more convenient and human friendly facilities. Developments of these facilities are well supported in several engineering fields like artificial intelligence and cognitive science. We have to set up some mechanisms which treat subjective information to materialize human friendly facilities. In this paper, we introduce Frame Oriented Theory as a new theory for subjective information.

Besides, we show an application of the theory to decision processing and evaluation of psychiatric diagnosis. We constructed a psychiatric diagnostic frame using a matrix, and consider how a patient may be diagnosed by several simulated psychiatrists who have individual subjectivity.

It remains many things unstudied in theoretical consideration, but the theory is applicable to several kinds of scientific fields besides this kind of medical ones.

1．はじめに

わたしたちが持っている知識は，実におびただしい数にのぼり，そのすべてを別々に記憶しておくためには膨大な記憶容量が必要である[1]．このような記憶容量はいくらあっても足りないだろうと考えられるが，もし仮にこのような記憶容量が可能であるとしても，その知識をたどるのに膨大な検索・照合の手順を経なければならない．わたしたちが持っている知識を，どのようにコンピュータの内部に表現し，どのように推論して問題を解決していくのかが現在の知識処理の大きなテーマである．

一般に，わたしたちが「概念」として持っている知識というものは，抽象－具体関係によって統括された階層的かつ論理的な構造を持つのではなく，互いに類似性を持ちその類似性によって結び合わされた複雑な構造を持っていると考えられる．関連する知識要素は，互いに弾性的な制約で結び合わされており，外部から入力される情報は，制約で張り巡らされた知識体系全体が作用して処理される．わたしたちの知識というものは，データベースのように様々な知識要素が整然と格納されているわけではなく，知識の結び合わせの媒体となる曖昧さが存在する．この曖昧さに注目してフレーム理論を紹介する．

2．フレーム理論

一般に，与えられた１組の事象が類似しているか否かを判定できるような性質を備えたものをフレームとする．フレームとは，任意の属性項目の集合であり，フレームアイテムはその要素である．

ある事象を属性ごとに分類する際，属性項目にどの程度あてはまるかを考慮し，全くあてはまらない場合を０，完全にあてはまる場合を１とすると，その事象は０から１の実数値によって表現することができる．従って，このフレームに基づいてある事象の様相をパターンとして表すことができる．ここでは，パターンの要素は実数値としているが，実際はファジィ数や手続きなどでも良い．

これらのパターンの集合が与えられたとき，ある数学的な空間（ここではｎ次元ユークリッド空間を想定している）を定義して，それぞれのパターンがこの空間中の点に対応して表現できるものと考える．この空間は，パターン相互間の類似性の程度に対応した相対位置関係を保っている．

ところで，類似性の統合操作をおこなう際に，プリミティブなもの同士の類似性に関するある基準が完成すれば，任意なものに対する１つの判定基準が確立する．そこで，上記のようなフレームに基づいて，複数の基礎パターンを考える．これら基礎パターン同士の関係に依存して，任意パ

ターンのベクトル化をおこなう．パターン自体に曖昧さが含まれているため，導出されたベクトルはある程度のvariationを含んでいる．これらの概念図を図１に示す．

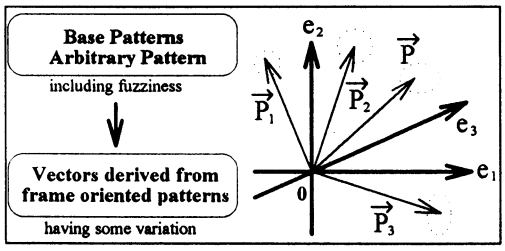


図１：パターンから導出されたベクトル[2]

３．精神科診断への応用

病気に対する診断というものは，主として診断を行う医師の主観が加味されるもので，その医師の主観が診断結果に大きな影響を及ぼすことがある．特に精神科診断においては，「いかにも○○らしい」という感情によってなされる診断にもそれなりに重要な意義があることは否定できない．精神医学的診断は，このような直感的な「感情による診断」と精神病理学・身体医学一般等の「理性による診断」とが統合されることによってなされることになる．

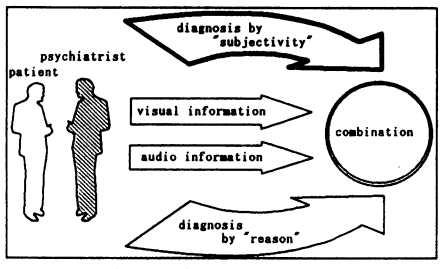


図２：精神医学的診断への応用[2]

現在，精神病の診断においては，ＤＳＭ-Ⅲ-Ｒが広く用いられており[3]，実際には本研究で紹介するような手順では診断はおこなわれていないが，ここではフレーム理論の応用の一例として擬似精神科医による診断のシミュレーションを紹介する．今回の計算機シミュレーションでは，(1)どの診断項目からみていくか(2)ある項目の評価による他の項目への影響（項目評価の相乗作用）を考慮に入れていない．以上のようなシステムのもとに，精神科診断における問診の診断フレームを作成し，各々の主観を持った擬似精神科医による診断の計算機シミュレーション実験を行った．また，各擬似精神科医の主観は，各診断項目に対する重みを変化させることによって表現した．

４．おわりに

本研究で紹介したフレーム理論は，観測するためのベクトル空間が１つしか定義されていない．実際には，このような空間が複数個存在し，各々の空間間の変換関数が定義できると考えられる．今後さらなる研究を重ね，空間間の変換や新しい概念の予測・創造まで発展させたいと考えている．

また，フレーム理論の応用の一例として，精神科診断への応用を紹介した．今回の計算機シミュレーション実験では，まず診断フレームを作成し，基礎パターンとして精神科における主要疾患を準備した．また，各診断項目に対する重みによって擬似精神科医の主観を表現し，ある患者の診断結果がどのように変化するのかを調べた．その結果，医師の主観によって診断結果が微妙に変化することがわかった．しかし，どのような診断ウェイトを用いれば最適な診断結果が得られるのかはまだわかっていない．また，診断項目の選定にも改良の余地が残されている．

参考文献

[1] 大村彰道：訳，GRロフタス，EFロフタス：著，人間の記憶，東京大学出版会(1980)

[2] Kaori YOSHIDA and Torao YANARU, An application of Frame Oriented Theory to decision processing and evaluation of medical diagnosis, Proceeding of FUZZ-IEEE/IFES'95 (1995)

[3] 高橋三郎，花田耕一，藤縄昭：訳，ＤＳＭ-Ⅲ-Ｒ精神障害の分類と診断の手引第２版，医学書院(1982)

問い合わせ先

〒804　北九州市戸畑区仙水1-1
九州工業大学工学部電気工学科情報工学教室
吉田　香
Phone & Fax ： +81-93-884-3245
E-mail ： kaori@humanl.comp.kyutech.ac.jp

FC2-2

組合せファジィハフ変換とその医用画像処理への応用

Combinatorial Fuzzy Hough Transform and Its Application to Medical Image Processing

平川 克己[*1] Katsumi HIRAKAWA
山川 烈[*2] Takeshi YAMAKAWA
内野 英治[*2] Eiji UCHINO
松山 敏剛[*3] Toshitaka MATSUYAMA
渡辺 寿美子[*4] Sumiko WATANABE
野上ナオエ[*4] Naoe NOGAMI

*1 オリンパス光学工業(株) Olympus Optical Co., Ltd.
*2 九州工業大学情報工学部 Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology
*3 九州大学医学部附属統合教育研究実習センター Center for Research and Practice in Medical Education, Faculty of Medicine, Kyushu University
*4 原三信病院 Harasanshin Hospital

Abstract– Hough transform is an effective method for a line detection in a noisy digital image. However, the conventioal Hough transform is not necessarily good enough for images under heavy noise. This paper describes a combinatorial fuzzy Hough transform, which enables a detection of a blurred line and also its segment in a very noisy image. It is then extended in order that it can further detect a noisy circle. The effectiveness of the present method has been confirmed by applying it to the real microphotograph for cytodiagnosis. It could detect the nuclei in the cell cluster in a noisy medical image.

1. はじめに

人工物体画像や自然物体画像から直線や円などの基本図形を抽出することは重要な研究テーマである. 例えば, 医療分野における細胞診等においては, 顕微鏡画像から細胞核を検出しその半径, 面積, 核間距離などを求める必要がある.

画像からの基本図形の検出に関しては, 今までハフ変換や組合せハフ変換およびその各種の改良型 [1][2][3] が提案されている. しかし, 一般に医用画像などでは, ノイズ等により対象の輪郭がかなりぼやけてしまうため, 従来の手法ではこれら基本図形の検出は困難である.

そこで, 本報告ではノイズの多いかなりぼやけた画像からでも, 直線が検出可能な組合せファジィハフ変換を提案する. 本手法は D. Ben-Tzvi らによる Combinatorial Hough Transform[4] を基本とし, ファジィ概念の導入に加え, ぼやけた画像から直線だけでなく有界な線分や円の検出をも十分可能にするものである.

また, 円の検出に関しては現在までに多くのアルゴリズムが提案されている. しかし, ノイズやエッジの途切れに弱い, 検出に多大な時間を要するなどの欠点がある. そこで本報告では, より効率的な円の検出アルゴリズムについても同時に議論する. 本手法の正当性は各種シミュレーション実験により確認された. また, 本手法を細胞診に用いる顕微鏡画像に適用し, 本手法の有効性を確認した.

2. 組合せファジィハフ変換

本章では, ぼやけた直線や円の検出を可能にする新たな組合せファジィハフ変換 (Combinatorial Fuzzy Hough Transform; CFHT) について述べる.

2.1 CFHT による直線の検出

ハフ変換では, 図 1 に示す各黒画素 (x_0, y_0) を通るすべての直線を垂角 θ と, 原点からの距離 ρ を用いて正弦曲線 (ハフ曲線)

$$\rho = x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta \quad (0° \leq \theta < 180°) \qquad (1)$$

で表す. 図 2 に黒画素 1 ～ 4 に対するハフ曲線を示す. 黒画素 1 ～ 3 に対するハフ曲線が一点で交わり, 黒画素 1 ～ 3 を通る直線の存在がわかる. ハフ変換における直線の検出はこの交点を $\theta - \rho$ 空間で見つけることにある. 交点の検出は次のように行なわれる. まず $\theta - \rho$ 空間を細かいメッシュに分割し, ハフ曲線の通るメッシュに +1 を与える (これを投票と言う). すべての投票が終った後, 投票数がある閾値を越えた点 (θ_0, ρ_0) に対する直線が検出される.

CFHT では, ハフ曲線自体への投票に替え, 次のよう

に投票を行なう. まず, 画像平面を走査して黒画素のリストを作り, それを用いて2つの黒画素のペアを作成する. その後, これらのペアとなった2つの黒画素を通る直線におけるパラメータの対 (θ, ρ) に対して投票を行なう. また, この投票ではぼやけた直線 l'(図1参照) をも検出できるように次のように行なう. すなわち, 図3のようにペアとして選択された2点 P_1, P_2 に対し, それぞれを中心とした半径 R(pixel) 内に存在する黒画素をグループ P_1, グループ P_2 とする. その後, それぞれのグループに属する黒画素へ, その帰属度 (メンバーシップ値) を

$$m(r) = \exp(-r^2/s^2) \qquad (2)$$

のように与える. ここで, r は中心点 (P_1 または P_2) から周囲の黒画素までの距離, s は定数である. すなわち, P_1 または P_2 に近いほどメンバーシップ値を大きく, 離れるほどメンバーシップ値を小さくする. この2点 P_1, P_2 を通る直線の投票には, これら周辺の画素の影響を反映すべく, 以下のように投票値を決める.

$$\text{投票値} = \sum_{\substack{\text{グループ}P_1 \\ \text{グループ}P_2}} [\text{黒画素のメンバーシップ値}] \qquad (3)$$

従来のハフ変換 (HT) や組合せハフ変換 (CHT) では投票値が単に1であったのに対し, CFHT の投票は1つのペアにつき, このように投票値に周囲の黒画素のメンバーシップ値が反映されており, 黒画素が集中している部分での直線検出に効果を発揮する. 全黒画素に対して投票を行なった後, 投票数が閾値 T_l より大きい場合に直線として検出する.

さて, ペアの作成を画像全体で行なうとその数は莫大なものとなる. そこで図4において, 例えば黒画素 P_1 は, P_1 を中心とする網掛けの部分のペア作成領域内の黒画素とのみペアとする.

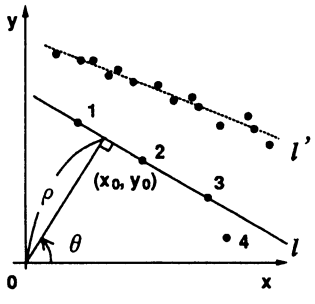


図1 $x-y$ 平面の直線とそれを特定するパラメータ θ と ρ

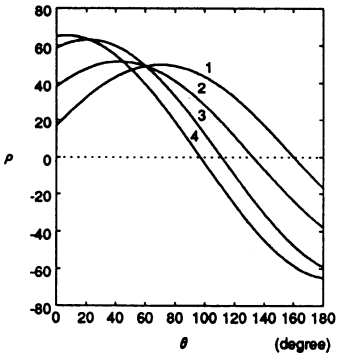


図2 ハフ曲線

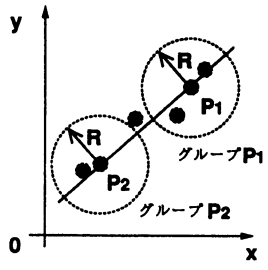


図3 CFHT

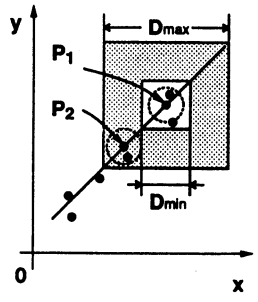


図4 画素ペアの作成領域

2.2 CFHT による線分の端点検出

ハフ変換では直線の検出はできるが, 線分の端点 (始点, 終点) の検出はできない. そこで, 筆者らは変換と同時に線分の始点と終点の検出が可能である, 効率的なアルゴリズムも同時に提案する. 以下がそのアルゴリズムである.

ペアとなった要素のうち y 座標が大きい方を P_1, 小さい方を P_2 とし, それらの画素を通る直線を L とする. パラメータは直線によって固有であり, また, ペアは y 座標の大きい黒画素から順に作成される. したがって, L に最初に投票するペアの要素で, y 座標が大きい P_1 の座標が始点の座標である. CFHT で投票を行なうと共に, L の始点として P_1 の座標を記憶する. ペアの要素のうち P_2 の座標を L の終点として, ペアが作成されるごとに記憶する. この処理により始点と終点が求まる.

また, 直線の連続性については次のように調べる. すなわち, 直線 L 上にある黒画素が閾値 D_{max} より離れている時直線 L が切れていると判断する. 直線 L の不連続性が判断された後, その時点までの L に対する投票数が閾値より大きい時にそれまでの区間を線分として検出する. その後, 投票数および始点と終点の座標をクリアし, 後続の黒画素に対して同様のことを行なう. これにより同一直線上にある複数の線分を区別して検出できるようになる.

2.3 CFHT による円の検出

ハフ変換を中心 (a,b), 半径 r の円を表す 3 個のパラメータに拡張すると円の検出が可能になる. HT は図 5 に示すように, 各黒画素 (x,y) を通るあらゆる円に対し, 3 次元パラメータ空間 (a,b,r) の個々の円を表す要素に 1 票づつを入れる. すべての画素に対して投票を行なった後, 閾値 T_s より多い投票数を得た点 (a,b,r) を円として検出する.

しかし, この手法ではパラメータ空間用の膨大なメモリが必要となり, また計算にも多大の時間を要する. そこで, 本手法では, 円の各点の法線が円の中心で交わる性質を利用し, この法線の決定に 2.2 節で述べた線分検出用の CFHT を適用する.

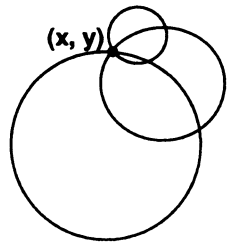
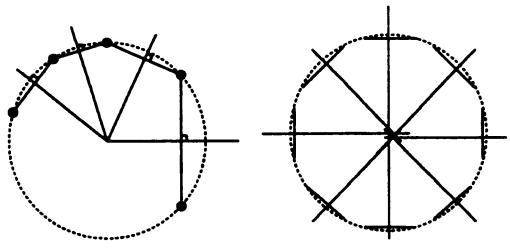


図 5 HT による円検出



(a) (b)

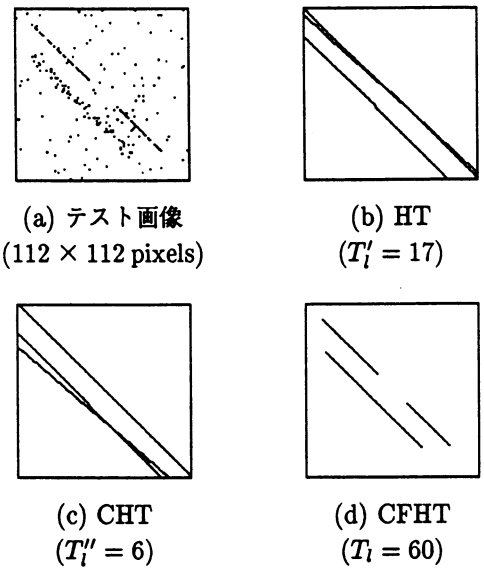
図 6 CFHT による円検出 (a) 法線と中心の関係 ; (b) 限定された法線からの円の中心候補の決定

具体的には, 円上の 2 つの黒画素を端点とする線分を CFHT で求め, その垂直 2 等分線を円の法線とする (図 6(a) 参照). これら法線の交点が円の中心座標の候補となる. 画像上の全ての黒画素のペアに対し, その垂直 2 等分線 (法線) を全て求めるのは非効率的である. そこで, 例えば図 6(b) に示すように法線の角度が 0°, 45°, 90°, 135° の線分のみに限定して考える. ただし, 実際の法線は図 6(b) のように標本化誤差と円の変形により 1 点で交わらないことが多い. これらの法線の交点全てを円の中心候補とする. 全ての中心候補から一定距離の黒画素の度数分布を調べ, その度数が閾値 T_c を越えた時, この度数を得た円 (a,b,r) を検出する. そして, 半径 $r \pm 1$ (pixel) 上の全ての黒画素に対し, 最小 2 乗法によりパラメータ (a,b,r) を最終的に決定する.

3. 実験結果

3.1 線分の検出

まず, 線分の検出実験を行なった. 実験に用いたテスト画像を図 7(a) に示す. 画像は 112 × 112 (pixel) の大きさで, 人工的に発生させた 2 値画像である. 画像中には同一直線上にある 2 本の線分と 1 本のぼやけた線分が観測される.



(a) テスト画像 (112 × 112 pixels)
(b) HT ($T_l' = 17$)
(c) CHT ($T_l'' = 6$)
(d) CFHT ($T_l = 60$)

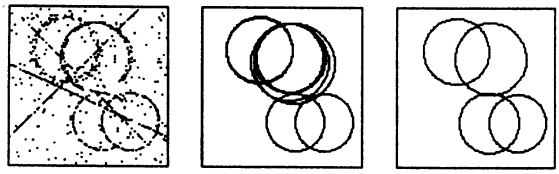
図 7 人工画像からの直線の検出

それぞれの手法における検出結果を図 7(b) ~ (d) に示す. HT と CHT では本来存在しない偽直線を抽出している. これに対し CFHT ($D_{min}=10$ (pixel), $D_{max}=30$ (pixel), $R=3$ (pixel), $s=2$ (pixel)) では, 2 本の線分

と1本のぼやけた線分が完全に検出されている. さらにCFHTでは線分の始点, 終点とも正確に求まっているのがわかる.

3.2 円の検出

図8(a) に示した人工画像に対して円の検出実験を行なった. 画像のサイズは 112 × 112 (pixel) の2値画像である. ごま塩雑音と3本の直線, および4個の円が観測される. 垂線の決定に用いる線分は法線の角度が 0°, 45°, 90°, 135° のものに限定し, その検出結果を図8(b), (c) に示す. HTでは1つの円を複数個の円として検出している. それに対し, 本手法のCFHT ($D_{min}=4$ (pixel), $D_{max}=16$ (pixel), $R=3$ (pixel), $T_l=20$, $s=2$(pixel)) ではノイズやぼやけにもかかわらず4つの円を完全に検出しているのがわかる.

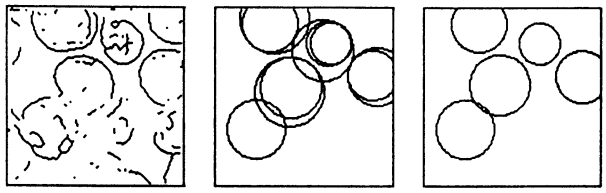


(a) テスト画像　(b) HT ($T_s=42$)　(c) CFHT ($T_c=70$)

図8 人工画像 (112 × 112 pixels) からの円の検出

3.3 細胞核の検出

次に, 医療分野への応用として, 図9(a) に示す実際の顕微鏡画像へ本手法を適用し, 細胞核の検出を行なう. この画像は256階調の濃淡画像から局所平均フィルタによるノイズ除去, ソーベルフィルタによるエッジ強調と2値化によって得られたものである.



(a) 実画像　(b) HT ($T_s=34$)　(c) CFHT ($T_c=55$)

図9 顕微鏡画像 (128 × 128 pixels) からの細胞核の検出

検出結果を図9(b), (c) に示す. HTではノイズやぼやけのために1個の細胞核を多数の細胞核として誤検出している. これに対し本手法では, 細胞核の検出がほぼ完全に行なわれており, またその位置や大きさなどについても十分な結果が得られている. 本手法では, 画像中の全細胞核数, 細胞核の半径や面積, 核間距離なども同時に求めることができる.

4. おわりに

本報告では, 組合せハフ変換における投票をファジィ化することにより, ノイズの多い非常にぼやけた画像からでも直線の検出が有効に行なえる新たな組合せファジィハフ変換を提案した. また, 有界な線分の端点 (始点, 終点) 検出についても考察した. さらに, 組合せファジィハフ変換を拡張し, ぼやけた円の検出も可能にした.

本手法を実際の顕微鏡画像へ適用したところ, 将来の細胞診自動化への期待が持てる良好な結果が得られた.

参考文献

[1] 松山隆司, 奥水大和: "Hough 変換とパターンマッチング," 情報処理, Vol.30, No.9, pp.1035-1046, 1989.

[2] 奥水大和: "Hough 変換に関する最近の研究動向 (2)," 信学技報, PRU91-15, pp.25-32, 1991.

[3] J. Illingworh, J. Kittler: "A Survey of the Hough Transform," Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol.44, pp.87-116, 1988.

[4] D. Ben-Tzvi, M.B. Sandler: "A Combinatorial Hough Transform," Pattern Recognition Letters, Vol.11, pp.167-174, 1990.

[問い合わせ先]
〒820 福岡県飯塚市川津 680-4
九州工業大学情報工学部制御システム工学科
山川 烈
Phone: 0948-29-7712
Fax: 0948-29-7742
E-mail: yamakawa@ces.kyutech.ac.jp

FC2-3

顔の表情の評価について
On Evaluation of Facial Expressions

鬼沢 武久　北崎 幸子　岩田 満　杢屋 銑一
Onisawa Takehisa　Kitazaki Sachiko　Iwata Mitsuru　Mokuya Senichi

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

Abstract
This paper mentions relations between facial expressions and evaluation of emotions. Two models are constructed based on results of questionnaires about facial expressions and evaluation of emotions. One is to evaluate emotions given facial expressions. The other is to express faces using evaluation of emotions. Two models are compared with neural networks model.

1．はじめに
人間同士が会話する場合、人は会話の内容だけでなく相手の声の調子や表情なども情報として取り込み、スムーズな会話を行っている。これらの情報はverbal（言葉の）情報とnon-verbal（言葉以外の）情報と呼ばれている[1]。さて、人間とコンピュータとのコミュニケーションについて考えてみると、今まではコンピュータ側が一方的に出してきたメッセージをユーザー側が理解しようと努力するという、一方向のコミュニケーションが主であった。お互いに理解し合うためには両者が歩み寄る、つまり相方向のコミュニケーションを実現することが必要である。

そこで本研究では、人間とコンピュータとが会話するにも、non-verbal情報も取り入れることが必要であるとの観点にたって、その第一歩として、non-verbal情報の1つである「表情」に注目し、表情による感情表現（感情伝達）について考えていく。表情と感情との関係を探る表情評価モデルに関する研究は、ニューラルネットやファジィ測度、ファジィ積分を用いて行われている[2]～[5]。さらに心理学的分野からのアプローチもある[6]。しかしこれらの研究はある表情から1つの感情を推論する、あるいはある1つの感情を基に表情を作り出す、と言った1対1関係のモデルが多く、人間のように複数の感情が同時に喚起されるようなモデルはまだ少ない。また、感情を基に作り出した表情を人間が見て、納得のいく表情になっているかの検討も少ないように思われる。

本研究では、アンケート調査の結果得られたデータをもとにして、ある表情から1つあるいは複数の感情を推測するようなモデル、および、ある感情を基に表情を作成するモデルをファジィ測度、ファジィ積分を用いて作成する。そして作成された表情、推測された表情について検討する。

2．ファジィ積分
2.1 ファジィ測度
Kを有限個の要素からなる集合とし、P(K)をKのべき集合とする。このとき、ファジィ測度は次の三つの性質

$$g(\phi)=0 \qquad (1)$$

$$g(K)=1 \qquad (2)$$

$$E\subset F\subset K \Rightarrow g(E)\leqq g(F) \qquad (3)$$

をもつ集合関数 $g:P(K)\rightarrow[0,1]$ として定義される[7]。ただし、$|\phi|$ は空集合である。式(3)は単調性とよばれる性質である。

2.2 Choquet積分
本研究では、ファジィ積分としてChoquet積分[7]を採用する。関数 $f:K\rightarrow[0,1]$ のChoquet積分は、次式で定義される。

$$(c)\int f(k)dg=\int_0^1 g(\{k|f(k)>h\})dh \qquad (4)$$

$1_{S_i}(k)$を集合Siの定義関数として、関数fが

$$f(k)=\sum_{i=1}^{n}(h_i-h_{i-1})1_{S_i}(k) \qquad (5)$$

$(0=h_0\leqq h_1\leqq\cdots\leqq h_n, S_1\supset S_2\supset\cdots\supset S_n)$ のような単関数で表されているとすると、このfのChoquet積分は、

$$(c)\int f(k)dg=\sum_{i=1}^{n}(h_i-h_{i-1})g(S_i) \qquad (6)$$

で定義される[7]。

3．アンケート調査
感情と表情の間の関係をモデル化するために、図1に示すように、216種類の表情を描いたカードと図2のアンケート用紙を用いて、顔の感情表現に関するアンケート調査を行う。このアンケート調査は、カードに描かれた表情と標準の表情とを被験者に比べてもらい、その表情がどんな感情を表わしていると思うかを記入してもらうものである。ここでは6つの純粋感情［喜び、悲しみ、驚き、怒り、恐れ、嫌悪］を用い、各感情を1～5の5段階で評価する。とても強く感じる場合は5、全く感じられない場合は1と評価する。また表情が不自然だと感じた場合は不自然のところを丸で囲んでもらう。なお標準とする表情とその他の表情を比べる際、前に見た表情の影響が残らないよう単語カードのようなものに顔の絵を描いて、1度に1つの表情しか見えないようにし、さらに、同じ表情をアンケートの前半と後半に計8組ほど入れて、前半での評価と後半での評価が大きく違っているデータは使わないなどの工夫をして、データを採る。

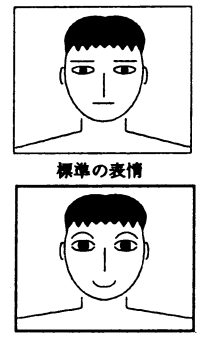


図1　標準の表情と比較する表情

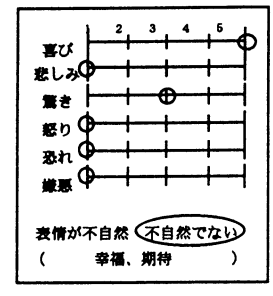


図2　アンケート用紙

このアンケートの結果、216種類の表情について、27人分（延べ83人）のデータが得られ、次節で述べるファジィ測度の同定に用いる。

4．実験と結果

顔の表情情報としては、目の大きさ、目の形、眉の傾き、眉の形、口の大きさ、口の形の6種類を考える。6つの表情情報は、図3　のように眉は3点（眉の両端の座標とその中間点での眉の座標）、目、口はそれぞれ4点（両端の座標とその中間点での上まぶた（上唇）と下まぶた（下唇）の座標）から、それぞれ計算している。

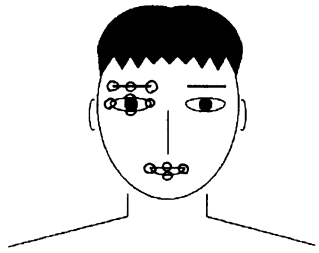


図3　表情情報抽出点

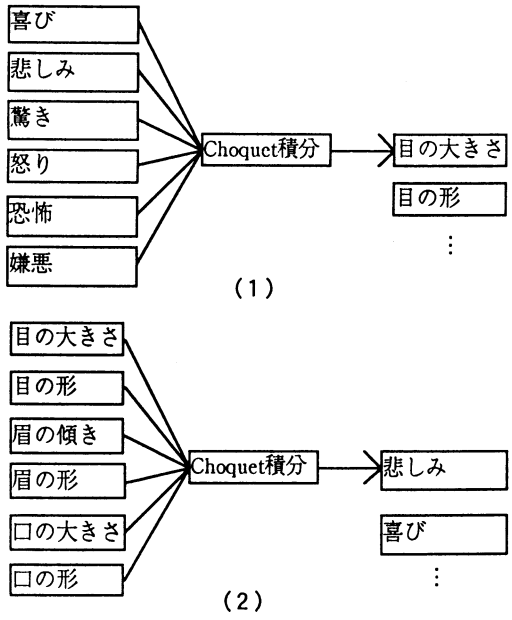


図4　感情と表情との間の関係のモデル

人間の顔の表情と感情の間の関係をファジィ測度、Choquet積分でモデル化するために、図4のようにモデルを考える。アンケートの顔の表情と感情の評価結果から、図4のモデルのファジィ測度を求めることによって、感情から表情を生成する、表情から感情を推測することになる。

本研究では、アンケート用紙に記入されたそれぞれの感情の1～5の数字を［0.0，1.0］の数値に変換し、評価された6つの表情情報を［0.0，1.0］の数値に置き換えている。そして、図4(1)、図4(2)のそれぞれの場合において、ファジィ測度を同定する。なお、同定法は文献[8]による。

6つの感情の評価を[0,1]で入力すると、同定されたファジィ測度とChoquet積分から顔の6つの表情情報が[0,1]で出力され、顔の表情が表示される。また逆に、顔の6つの表情情報の評価を[0,1]で入力すると、同様に、同定されたファジィ測度とChoquet積分から6つの感情の評価が[0,1]で出力される。どれか1つの感情の評価だけが1.0で、残りの感情の評価が0.0の場合について、図4(1)のモデルから作成された顔の表情を図5に示す。また、作成された顔の表情について、図4(2)のモデルで推測した感情評価も図5に示す。

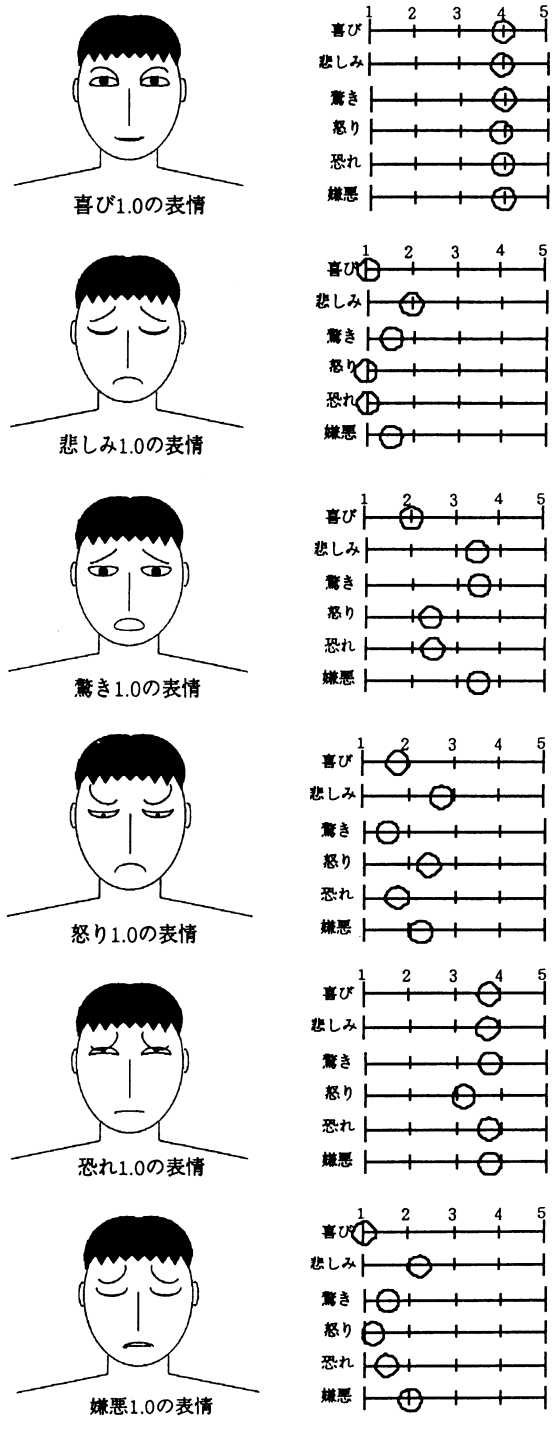


図5　どれか1つの感情を1.0と入力して得られた表情とその表情を入力して得られた感情の評価値

5．考察

同定されたファジィ測度を用いて作成した顔の表情については、図5の中には不自然と思われる表情になっているものがある。例えば「喜び」について言えば、口を大きく開けて、「笑う」表情を強調するようにしたほうが良いと思われる。「驚き」に関しては、やはり口を大きく開け、目を見開く表情のほうが望ましい。一方、「悲しみ」「怒り」の表情については、自然な表情になっていると思われる。

次に感情評価に関しては、図5を見ると、顔の表情モデルほどうまく働いていないことがわかる。表情自体が誤って認識されること、個人の感覚の違いが、顔の表情モデルと比べると大きく影響を受けているからではないかと思われる。

R．Plutchikの説では、「心配」は6つの基本感情の1つである「恐れ」の覚醒度の低い状態とされている[9]。しかし被験者の中には、この「恐れ」を「恐怖」と解釈し、「恐れはあまり感じない」と答えているにもかかわらず、「心配そうな表情」と記入している被験者もいることを考えると、6つの感情の解釈の不徹底さがモデルの善し悪しに影響を与えていることも考えられる。

この2つのモデルを人間とコンピュータとのコミュニケーションに応用するためには、ファジィ測度を調節することが必要となろう。

6．おわりに

ファジィ積分による結果と比較するため、ニューラルネットワークによる同定結果[10]を図6に示す。このニューラルネットは6つの表情情報を入力とし、6つの感情のうちの1つだけを出力するネットワークを6つ組み合わせたものである。このうち、感情情報から表情を作成するネットワークには、中間層が2層で中間のノード数が100、100のネットワークを用いた。表情から感情を推論するネットワークには、誤差が最小のものを組み合わせたネットワークを用いた。ファジィ積分の場合と同様、どれか1つの感情の評価だけが1.0で、残りの感情の評価が0.0の場合について作成された顔の表情と、作成された顔の表情について推測した感情評価もその横に示す。

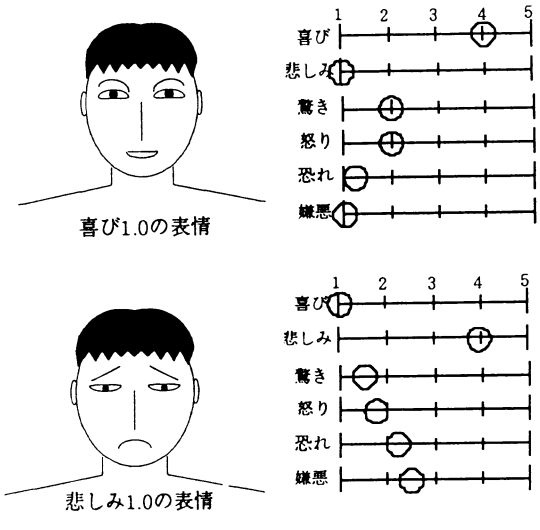


図6　どれか1つの感情を1.0と入力して得られた表情とその表情を入力して得られた感情の評価値

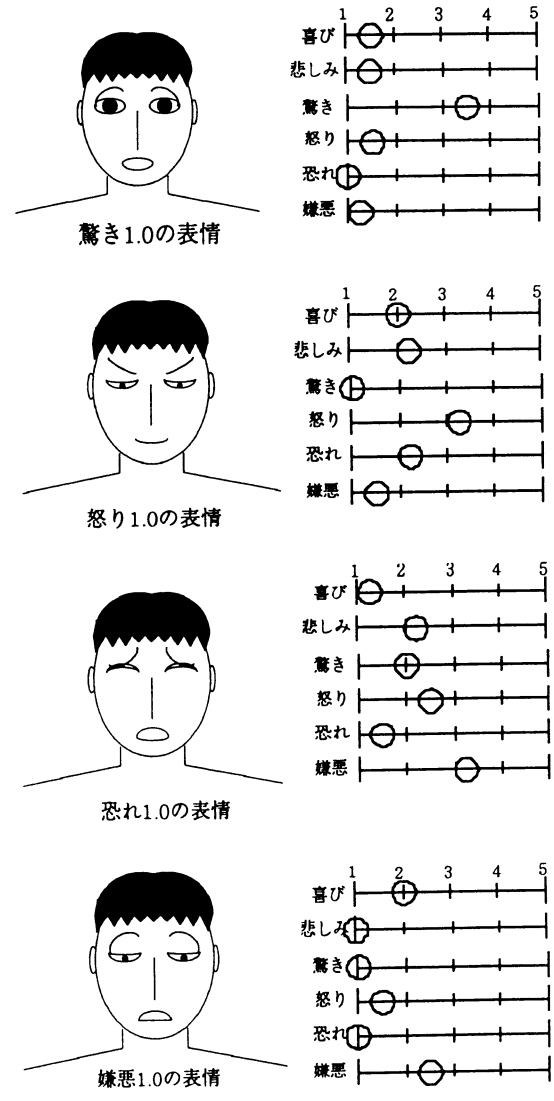


図6　どれか1つの感情を1.0と入力して得られた表情とその表情を入力して得られた感情の評価値（続き）

表情を作成する点に関しては、ファジィ測度、ファジィ積分を用いたモデルと同様、自然と思える表情と不自然と思える表情が得られていることがわかる。例えば「喜び」の表情は、図5と比べると自然に思えるが、まだ「喜び」の度合が小さいと思われる。「怒り」の表情はどちらかというと「意地の悪そうな」表情になっている。一方、「喜び」は自然な表情になっていると思われる。

感情を推測する点に関しては、「喜び」「悲しみ」「驚き」の推測はニューラルネットワークのモデルにおいて良い結果を出している。他の3つの感情に関しても、ファジィ測度、ファジィ積分を用いたモデルと比較すると良い結果を出している。しかし調節が必要である。

ニューラルネットワークによるモデルを人間とコンピュータとのコミュニケーションに応用するためにも、重みを調節することが必要となろう。

今後、この研究結果を人間とコンピュータとのコミュニケーションモデルに応用していくためには、表示される顔の表情、推測される感情がユーザーに納得のいくものでなければならない。そのためには同定されたファジィ測度を調節して、納得の

いく顔の表情、感情についての推測結果が得られるようにしなくてはならない。その意味では、ニューラルネットワークの場合と比べて、ファジィ測度、ファジィ積分の場合のほうが、内部状態がわかりやすいため調節しやすいのではないかと思われる。

参考文献

[1] 黒川隆夫：ノンバーバルインターフェース, オーム社 (1994)

[2] 泉谷和昭、三上達也、井上和夫：Fuzzy積分を用いた顔グラフの表情評価モデル, システムと制御, Vol.28, No. 10, pp.590～596 (1984)

[3] 小林宏、原文雄：ニューラルネットによる人の基本表情認識, 計測自動制御学会論文集, Vol .29, No.1, pp.112～118 (1993)

[4] 原文雄：人工感情－生成のモデルと表出－, 数理科学, No.373, pp52～58, サイエンス社 (JULY 1994)

[5] 佐藤友彦、牛田博英、山口亨：カオス的想起に基づく表情モデルの構築, 第4回インテリジェントシステムシンポジウム論文集, pp.83～88 (1994)

[6] 山田寛：顔面表情認識の心理学モデル, 計測と制御, Vol .33, No .12, pp.1063～1069 (1994)

[7] 日本ファジィ学会編：講座ファジィ3 ファジィ測度, (1993)

[8] 森勉、室伏俊明：ファジィ測度Choquet積分を用いた評価モデルの解析, 第5回ファジィシンポジウム講演論文集, pp.207～212, (1989)

[9] 伊藤正男、梅本守、山鳥重、小野武年、徃住彰文、池田謙一：認知科学6 情動, p.11～14, 岩波書店 (1994)

[10] 北崎幸子、岩田満、鬼沢武久：顔の表情モデル, 第５回ノンエンジニアリング・ファジィワークショップ講演論文集, (1995)

連絡先

〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1
筑波大学工学システム学類／構造工学系
鬼沢 武久
TEL 0298-53-5060 FAX 0298-53-5207
E-mail onisawa@kz.tsukuba.ac.jp.

FC2-4

知的障害者の運動パフォーマンス向上支援のための ファジィ評価手法について

Fuzzy Evaluation Method Supporting to improve Physical Performance of Mental Disoreders

杉本光公
Mitsukimi Sugimoto

筑波大学大学院体育科学研究科
Doctral program in Health and Sport Sciences
University of Tsukuba

安信誠二
Seiji Yasunobu

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

abstract

As the physical performance is very complex, there are the factor which improve the physical performance, such as physically,mentally,technically. The relation of each factor make the problems be complex because of the fuzziness of human movement. We try to apply the probability linear regression for the mental disoreders , and to show the probability of improvement the physical performance.

1. はじめに

運動パフォーマンスは非常に複雑なので，運動パフォーマンスを向上させるために必要な要因には，体力的な要素，精神的な要素，技術的な要素など様々な要因が関係している．これらの要因は複雑に絡み合い，また人間に本来的に有する運動の曖昧性とも重なって，問題をより複雑なものとしている．従来このような複雑な問題を取り扱う方法としては，統計的手法が多く用いられて来た．しかし，知的障害者の運動パフォーマンスを評価する問題においては，正規性が崩れている場合や標本の分散があまりに大きい場合など統計的手法を用いることが困難である．このような場合，可能性線形回帰分析を用いた方法が提案されている．

そこで，本研究では，知的障害者の運動パフォーマンスの向上の可能性を，可能性回帰分析を用いて定量化することを目的とする．

2. 方法

2.1モデル

モデルは可能性線形システムとする．すなわち

$$Y_j = A_1 x_{j1} + \cdots + A_n x_{jn} \qquad (1)$$

ここで，ファジィ係数Aiを以下の図1とし，
Ai =(α i,ci)で表す．

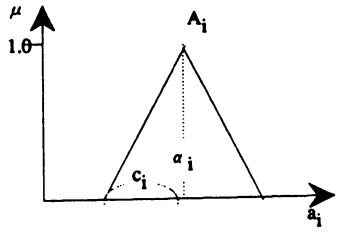


図1 Aiのメンバーシップ関数

このときYjは拡張原理から

$$Y_j = (\mathbf{a}x_j, c|x_j|) \qquad (2)$$

ここで，$\mathbf{a} = (a_1, \cdots, a_n)$，$c = (c1, \cdots, cn)$，$x_j = (x_{j1}, \cdots, x_{jn})^t$，

$|x_j| = (|x_{j1}|, \cdots, |x_{jn}|)^t$である．

ファジィ係数Ai =(α i,ci)を求める問題は，次の線形計画問題に帰着できる．

$$\left.\begin{aligned} &\min \sum_{j=1}^{m} c|x_j| = J(\mathbf{c}) \\ &subject\ to\ y_j \le ax_j + c|x_j| \quad (j = 1, \cdots m) \\ &\qquad yj \ge ax_j - c|x_j| \quad c \ge 0 \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

そこで，上記の線形計画問題を用いて知的障害者の運動パフォーマンスの向上の可能性を検討する．

2.2被験者

被験者は，知的障害の養護施設Tの精神薄弱者男性10名である．被験者の基礎データを表1に示した

表1:被験者の基礎データ

項目	平均値±SD
年齢(才)	31.1±9.00
身長(cm)	159.3±6.77
体重(Kg)	55.9±6.82
IQ	37.1±9.69

2.3測定項目と測定回数

測定項目は握力，背筋力，閉眼片足立ち，ソフトボール投げであった．測定回数は3回を1セットとし，6か月間に十分な間隔をおいて3セット計9回行った．

3. 結果

分析は各セットごとの平均値を用いた．各セットごとの項目別の測定値を表2に示した．

表2:測定項目別の測定値

yi		Sub.1	Sub.2	Sub.3	Sub.4	Sub.5	Sub.6	Sub.7	Sub.8	Sub.9	Sub.10
Closed-eyes foot-balance	Set1	3.0	4.0	2.0	1.7	2.3	6.0	2.0	2.3	0.0	0.0
	Set2	2.7	2.0	2.3	1.7	1.0	7.0	1.0	5.7	0.0	0.0
	Set3	5.0	2.3	2.0	0.3	2.0	3.7	1.0	8.7	0.0	0.0
Grip strength(R)	Set1	41.83	43.17	40.67	23.67	27.83	18.33	27.00	36.17	5.33	4.17
	Set2	43.00	42.17	36.50	22.33	30.50	23.50	27.67	34.83	6.67	4.33
	Set3	39.83	34.83	40.33	23.83	31.83	25.33	29.50	36.17	5.67	3.17
Grip strength(L)	Set1	35.5	40.2	38.3	21.3	27.0	21.0	21.3	40.7	5.7	4.0
	Set2	38.5	40.0	34.7	20.8	37.2	22.3	28.2	39.5	5.0	5.3
	Set3	37.8	37.0	34.5	21.2	32.7	26.7	25.0	39.3	5.7	3.0
Back strength	Set1	110.3	71.3	79.0	70.7	64.3	47.0	51.0	96.7	0.0	0.0
	Set2	113.7	110.0	73.0	62.3	60.3	55.3	64.0	96.0	2.7	0.7
	Set3	116.3	121.7	71.0	66.3	91.7	50.0	56.7	101.7	0.3	1.0
Softball throw	Set1	44.7	35.0	11.8	17.8	14.8	11.2	12.2	27.7	1.2	4.2
	Set2	43.8	36.0	9.7	15.0	17.0	11.7	11.2	26.8	1.3	1.1
	Set3	48.3	36.5	12.2	17.9	17.5	11.5	8.7	29.8	1.2	1.7
Sit-ups	Set1	20.0	19.0	6.0	0.0	14.0	0.0	9.0	17.0	10.0	2.0
	Set2	14.0	16.0	11.0	5.0	12.0	0.0	2.0	14.0	9.0	3.0
	Set3	20.0	17.0	7.0	7.0	14.0	0.0	8.0	15.0	4.0	2.0
Shuttle Run	Set1	11.30	11.83	17.33	15.50	14.37	14.10	15.90	13.90	39.27	47.67
	Set2	10.73	11.83	18.47	16.80	13.43	13.50	15.63	14.97	54.33	34.47
	Set3	10.80	11.50	19.60	16.23	15.50	15.00	15.43	14.40	49.33	42.50

この3回の測定値から，可能性線形システムを利用し，各被験者の運動能力の向上の可能性を検討する．これらの測定値は，図2~図4に示した．実際のモデルは説明変量に測定回数(x)，従属変量に各測定項目を用い(4)式とした．

$$Yi = A0 + Aixi \qquad (4)$$

このとき，(3)式の線形計画問題を解いて，(5)~(11)の式が得られた．ここで，Y1は閉眼片足立ち，Y2は右の握力，Y3は左の握力，Y4は背筋力，Y5はソフトボール投げ，Y6は腹筋，Y7はシャトルランである．

$$Y1 = (3.0, 1.67) + (0.50, 0.84)X1 \quad (5)$$
$$Y2 = (23.67, 19.0) + (0.0, 0.5)X2 \quad (6)$$
$$Y3 = (22.33, 17.83) + (0.0, 0.5)X3 \quad (7)$$
$$Y4 = (75.08, 29.58) + (3.58, 2.08)X5 \quad (8)$$
$$Y5 = (22.10, 20.80) + (0.85, 0.94)X6 \quad (9)$$
$$Y6 = (10.0, 10.0) + (0.0, 0.0)X6 \quad (10)$$
$$Y7 = (26.44, 14.57) + (3.04, 3.61)X6 \quad (11)$$

3..1可能性の検討

(5)~(11)を用いて，第4セットを行った時の測定値の可能性を検討する．4セット目と行った場合の可能性線形モデルからのファジィ出力Y1~Y7を表3に示した．また表3派Y1~Y7の最大取り得る値も示した．これらは，各項目の到達の可能性を表しているといえる．これらは，これまで客観的に評価することが困難であった知的障害者の運動パフォーマンス向上を支援するための良い目安となりえるといえる．

表3 測定値の推定

	ファジィ数	最大値
Y1	(5,5.03)	10.03
Y2	(23.67,21)	44.67
Y3	(22.33,19.83)	42.16
Y4	(89.4,37.82)	127.22
Y5	(25.5,24.56)	50.06
Y6	(10,10)	20
Y7	(38.6,29.01)	67.61

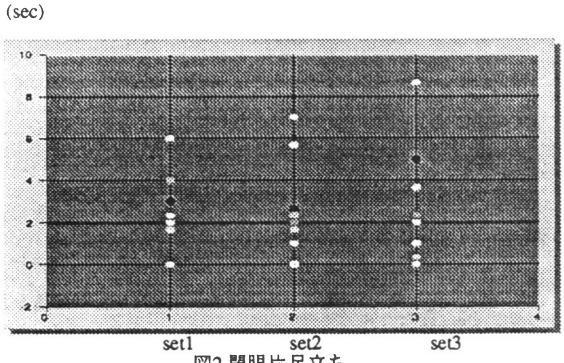


図2 閉眼片足立ち

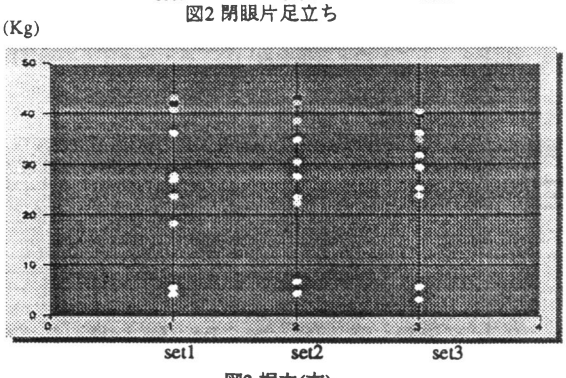


図3 握力(右)

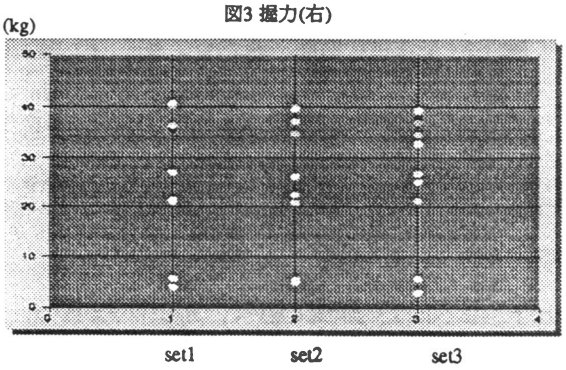


図4 握力(左)

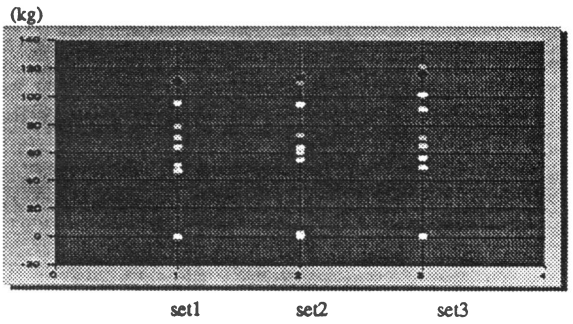


図5背筋力

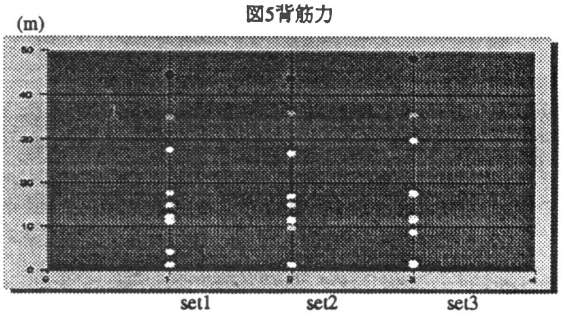


図6 ソフトボール投げ

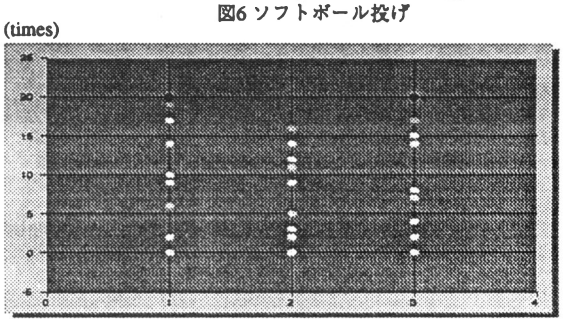


図7 腹筋

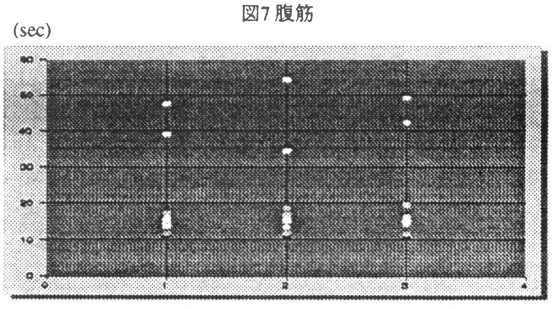


図8 シャトルラン

4. おわりに

本研究では，知的障害者のデータのばらつきを考慮した，運動パフォーマンスの向上支援のためのファジィ評価法を検討した．この結果，可能性線形モデルを用いて，運動パフォーマンスの向上の可能性を示すことによって，向上支援に有効であることが示された．

参考文献

[1]田中英夫:ファジィもでリングとその応用，朝倉書店，東京，1990.
千住鎮雄:線形計画法，共立出版株式会社，東京，1967.

[連絡先]
つくば市天王台1-1-1
筑波大学体育科学研究科
杉本光公
e-mail:sugimoto@taiiku.tsukuba.ac.jp

FC3-1

ファジィ理論によるカレンダー画像からの感性情報抽出

Extracting "*kansei*" Information of Calender Portrait by Fuzzy Theory

大坪英昭 Hideaki Ohtsubo　亀井且有 Katsuari Kemai　井上和夫 Kazuo Inoue

立命館大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

Abstract— This report deals with a sense of the seasons expressed on calender. That is one of the extremely shallow human *kansei*. Human being feels a sense of the seasons from limitted visual information : symbol information and color information. In this report, we construct a system which extracts *kansei* information of a sense of the seasons from calender based on the two kinds of visual information. Furthermore, we apply fuzzy theory to the extraction of *kansei* because the human *kansei* contains vagueness in itself.

1. はじめに

我々の身の回りには，情報処理機能をもつシステムや器具であふれている．誰もがこれらのコンピュータの「有能さ」を享受すると同時に，その「無神経さ」を印象づけられる．これらの原因の根本はコンピュータが扱う情報を記号情報に限定してシステムを構築し，人間が利用する「感性情報」がシステムに欠落したためである．そこで，わずかでも人間の感性を計算機での処理の対象とし，それを定量化することができれば，真に人間に協調したシステムが創造できる[1]．

このような背景のもとで，計算機による感性情報の抽出を行う．特に，本報告では，人間の感性の一つである「季節感」という極めて浅い感性を取り上げ，対象としては忠実にその季節感を意識・表現しているカレンダーに限定したものとする．人間はカレンダーを見てその視覚情報からある感性（季節感）を抱く．しかし，その視覚情報というのはごく限られた情報であり，カレンダーに存在している構成要素（シンボル情報）とそれらの配色（色情報）だけである．つまり，人間はこのシンボル情報と色情報という2つの情報からある季節感を抱く，ということが分かる．

本報告では，シンボル情報と色情報の2つの情報をもとにして，計算機が人間と同じ季節感の判断・応答をするシステムの構築を目的とする．なお，計算機による画像認識過程は行わず，人間が直接2つの情報を与えるものとする．また，人間の感性はあいまいな性質をもっているので，このあいまいさに対してファジィ理論を用いる．

本報告では，カレンダー画像から筆者個人の感性をもとに感性情報を抽出し，人間と同じ応答をするシステムの構築を試みる．

2. システム構築とその手順

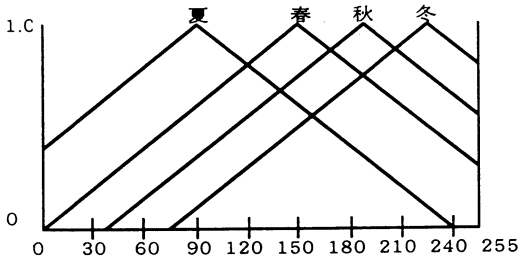
2. 1 構成要素の抽出

本報告は，人間の感性の一つである「季節感」を取り上げ，対象としてカレンダーを使用する．収集した60枚のカレンダーを“サンプルカレンダー”としてシステム構築段階で使用する．　最初に，この60枚のサンプルカレンダーに含まれている構成要素（シンボル情報）の全てを抽出する．抽出された構成要素を以下に示す．

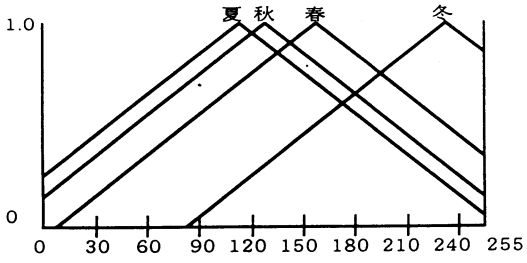
［構成要素］
・空
・山
・木—幹（枝）
　—花
　—実
　—葉
・陸（地）
・水（海，川，湖，池）
・古風な建物（寺，神社など）
・花を伴う植物

2．4　季節の推論

2.3節で設定されたメンバーシップ関数をもとにして，カレンダーの表現する季節を推論する．ここでは，具体例を挙げて季節が推論されるプロセスを説明する．例えば，あるカレンダーにおける空の色値が，L=210，S=150の場合，Fig.4 に示す空のメンバーシップ関数より，春については，“0.84”と“0.76”という2つの値が得られる．そして，それらの平均値

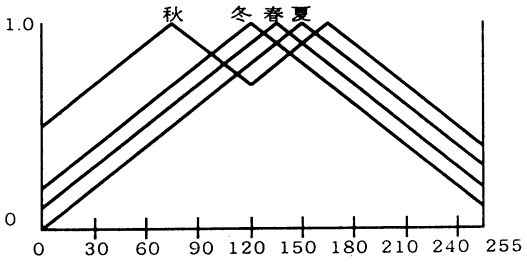


(a) Rのメンバーシップ関数

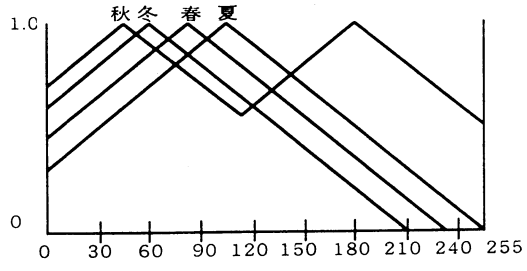


(b) Gのメンバーシップ関数

Fig.2　陸（地）の色値 (R,G) のメンバーシップ関数

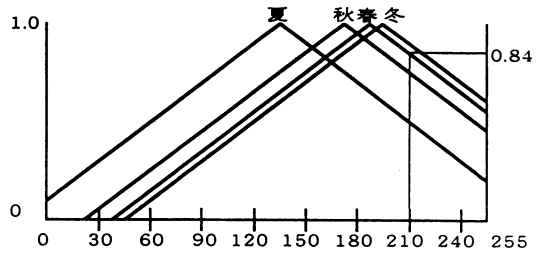


(a) Lのメンバーシップ関数

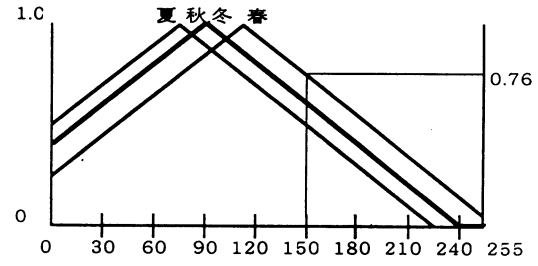


(b) Sのメンバーシップ関数

Fig.3　水の色値 (L,S) のメンバーシップ関数



(a) Lのメンバーシップ関数



(b) Sのメンバーシップ関数

Fig.4　空の色値 (L,S) のメンバーシップ関数

の“0.80”がそのカレンダーにおける空の春らしさと考える．夏，秋，冬についても同様に Fig.4 のメンバーシップ関数からそれぞれの各季節らしさを求めることができる．さらに，構成要素“空”だけでなく，“山”や“海”，“陸”の全ての構成要素に対して春，夏，秋，冬の各季節らしさを求める．最後に，各季節ごとに得られたメンバーシップ値の平均を計算し，それら平均値の最大をとる季節がそのカレンダーの表現している季節と推論する．

3．実験

システム構築段階で使用したサンプルカレンダーを用いて実験を行う．60枚のサンプルカレンダーの中から，強く季節感の感じられるものを各季節ごとに5枚ずつ選び出し，計20枚のカレンダーに対して実験を行った．また，サンプルカレンダーの中から，季節感の感じられないものを5枚選び出し，それに対しても実験を行った．

さらに，サンプルカレンダー以外のカレンダー10枚を用いて実験を行った．

4．実験結果及び検討

4．1　実験結果

各々のカレンダー中に含まれる前記の構成要素において，筆者個人が観察して直感的に季節感の感じられたものに対し，その季節感を与えていく．与える季節感とは次の形式のものとする．

グレード(0.0～1.0)＋季節（春，夏，秋，冬）

例：0.5春；0.8秋．

全てのサンプルカレンダーにおいて季節感の感じられる構成要素に対してその季節感を与えていく．

2．2　色値の測定

スキャナーでカレンダー画像を取り込み季節感を与えられた全ての構成要素のRGB値とHLS値とを計測する．

RGB値は輝度と呼ばれ，画像の色を基本3原色（赤—R，緑—G，青—B）に分解したものである．それぞれ0から255までの数値により定量化されたものである．

HLS値のHは色相を示し，色合いの種類を表し色知覚の性質を特徴づけるものである．Fig.1に示すように色合いの違いを角度により表現し，0から360までの値をとる．　Lは明度を示し，色の明るさを表す尺度であり，0から255までの値をとる．つまり，明度値が大きいほど光を反射する率が高く明るい色となり，白は明度値が最も大きい色である．逆に，明度値が小さいほど光を反射する率が低く暗い色となり，黒は明度値が最も小さい色である．Sは彩度を示し，色の鮮やかさを表す尺度であり，0から255までの値をとる．つまり，彩度値が大きいと色味が増し，逆に彩度が小さくなると色味が失われる．そして彩度値が0をとるとき，無彩色（黒色，灰色，白色）と呼ばれ色味がなくなる[2)(3)]．

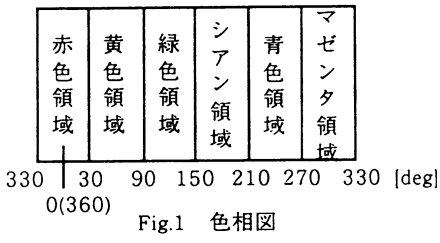


Fig.1　色相図

2．3　メンバーシップ関数作成

各構成要素ごとに測定されたRGB値とHLS値，及び筆者の主観値にもとづいて，横軸に色値(0～255 or 0～360)，縦軸にグレード(0.0～1.0)をとるメンバーシップ関数を作成する．このとき各構成要素ごとに，それぞれ6つの色値(R,G,B,H,L,S)によるメンバーシップ関数を設定する．それぞれのメンバーシップ関数におけるファジィ変数は，春，夏，秋，冬の4つである．

ここで，各構成要素ごとに対して，RGBの3値かHLSの3値どちらの方がより季節感と密接に関係しているかを調べ，どちらの3値を採用するかを決定する．その具体的方法は以下の通りである．ある構成要素の色値に対して実際に筆者が与えた主観値と設定したメンバーシップ関数にその色値を適用して導出されたメンバーシップ値との誤差二乗和を算出する．この計算を全てのカレンダーに対して行う．得られた3つの色値の各誤差二乗和の合計の小さい方の3値が，その構成要素においてより季節感と関係しているといえる．そこで，その3値をその構成要素に対する色値として選択する．さらに精巧なシステム構築のために，その選択された3つの色値のなかでも誤差二乗和のより小さいもの2つをその構成要素に対する最終的な色値として決定した（Table 1 参照）．

構成要素ごとに決定された2つの色値をTable 2 に示す．また，構成要素によっては，その要素のもつ色情報ではなく，その構成要素の有無が直接季節感に関わってくるものもあり，それも合わせて示す．またFig.2，Fig.3に設定されたメンバーシップ関数の一例を示す．

Table 1　構成要素“水”の色値決定

図番と筆者の感性	測定色値	メンバーシップ関数から導出された値	誤差二乗	誤差二乗和
Fig.5（後出）	R=90	1.0夏	0	0
	G=150	1.0夏	0	
	B=180	1.0夏	0	
1.0夏	H=210	0.95夏	0.0025	0.0125
	L=150	1.0夏	0	
	S=120	0.9夏	0.01	
Fig.6（後出）	R=100	1.0冬	0	0
	G=110	1.0冬	0	
	B=140	1.0冬	0	
1.0冬	H=230	0.95冬	0.0025	0.0074
	L=120	1.0冬	0	
	S=50	0.93冬	0.0049	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
各誤差二乗和合計：RGB合計=1.4478，(HLS合計=0.3980)				
H=0.215，(L=0.0805)，(S=0.1025)				

Table 2　構成要素の決定色値

構成要素	色値						有無
	R	G	B	H	L	S	
空					○	○	
山		○	○				
木　—幹（枝）	○		○				
—花							○
—実							○
—葉	○	○					○
陸（地）	○	○					
水					○	○	
古風な建物（寺，神社）							○
花を伴う植物		○	○				

季節感のあるサンプルカレンダー20枚に対する実験結果は，計算機の応答と人間の応答との一致率が75%であった．ただし，季節感のないサンプルカレンダー5枚に対する一致率は0%であった．季節ごとの一致率を Table 3 に示す．一例として，Fig.5に対する実験結果をTable4に示す．

サンプルカレンダー以外のカレンダーへ適用した実験結果の一致率は70%となった．

Table 3　季節ごとの一致率

春のカレンダーの一致率	40%
夏のカレンダーの一致率	60%
秋のカレンダーの一致率	100%
冬のカレンダーの一致率	100%
季節感のない カレンダーの一致率	0%

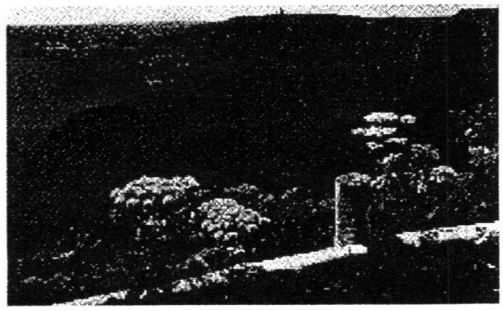


Fig.5　夏のカレンダーの一例

Table 4　夏のカレンダー(Fig.5) の実験結果

メンバーシップ値の平均値	
春—0.79	夏—0.86
秋—0.72	冬—0.57
最大値：0.86	季節：夏
総合評価：かなり夏らしい絵	

4．2　検討

実験結果より秋，冬のカレンダーに関しては高い一致率が得られている．その原因として，秋は紅葉，冬は雪という特徴的なシンボルがあるためと考えられる．その点，春，夏には特徴的なシンボルがないために季節の判別が難しいと考えられる．

次に，季節感のないカレンダーによる一致率が0%となった原因についてであるが，本システムでは各季節のメンバーシップ値の最大値が0.5未満のとき“この絵から季節感は感じられない”と解答するよう設定を行った．それに対して実験結果をみると，最終的なメンバーシップ値の最大値が0.8以上になっているものがほとんどであり，そのため何らかの季節感があると推論されている．以上の点からメンバーシップ関数のチューニング不足が原因の一つとして挙げられる．また0.5未満という設定がはたして適当であるかどうかという問題もあり，メンバーシップ関数のチューニングと合わせて今後検討する必要がある．

さらに，カレンダー画像における問題点として，影の濃い領域や，光が反射している領域に対する扱いがあげられる．そのような領域については彩度値が極度に小さくなったり，明度値が極度に大きくなったり本来の色値から値がかなりずれてくる．（本報告では，そのような領域はできるだけ避けるようにした．）そのような領域の扱いをどのようにするかについても検討していく必要がある．

5．おわりに

本報告では，カレンダー画像から，筆者個人の感性をもとに感性情報を抽出し，人間と同じ応答をするシステムの構築を試みた．

季節感のあるカレンダーに関しては本システムは有効であったが，季節感のないカレンダーに関しては良好な結果が得られなかった．その原因として，筆者個人の季節感をもとに設定したメンバーシップ関数のチューニング不足などが考えられる．

今後，メンバーシップ関数のチューニング，カレンダー画像における影と光の領域に関する問題点などについて検討する必要がある．また，カレンダー以外の画像に関しても，同様に良好な結果が得ることができるかを検証することが課題である．

さらに，このシステムに様々な感性を盛り込むことにより，人間特有の知的情報処理過程を実現させ，真に人間と同じ応答をするモデル（人工感性）の構築を目指したい．

参考文献

1)佐藤宏介：“感性情報科学の最新動向と感性画像データベース”，インテリジェントFA　研究分科会第51回研究例会資料，No.93-4, pp.1-9 (1993)

2)松尾健一，梅田三千雄：“濃淡及び色情報による情景画像からの文字列抽出”，電子情報　通信学会論文誌，PRU92-121, pp.25-32 (1992)

3)武井邦彦：“色彩と人間”，時事通信社刊 (1986)

連絡先

〒525　滋賀県草津市野路町1916
立命館大学理工学研究科情報システム学専攻
井上・亀井研究室　M1　　大坪　英昭
TEL：0775-66-1111（内線：8864）　FAX：0775-61-2669
e-mail:ootsubo@spice.cs.ritsumei.ac.jp

FC3-2

ファジイフィルタを用いた生体信号の処理

Analysis of Biological Signal by Fuzzy Filtering

江原義郎* Yoshiro Ehara
市川銀一郎* Ginichiro Ichikawa
向殿政男** Masao Mukaidono

*順天堂大学医学部 Juntendo University
**明治大学理工学部 Meiji University

Abstract- A fuzzy filter is proposed intending to remove an additive noise from a biological signal. Although various kinds of sophisticated methods have been widely used in the field of biological signal processing, few of them could obtain satisfactory results. Because the statistical difference between the signal and noise characteristics is not clearly identified in actual biological data. In this paper, we introduce a digital filter with fuzzy transfer function based on fuzzy rules, which were determined by using the power spectrum of ensemble and alternative ensemble averaging of biological data. This filter was applied for the analysis of Acoustically Evoked Potentials and Evoked Otoacoustic Emissions. The signal to noise ratio of fuzzy-filtered waveforms was improved significantly compared with unfiltered one.

1 はじめに

生体信号処理における雑音の除去は、最も重要なテーマの1つであり、これまでにさまざまな手法が開発されてきた。しかし数学的に高度な手法を用いても、必ずしも期待された結果が得られる訳ではない。これは処理法の前提条件となる幾つかの仮定が、現実の生体データでは満たされないことが一因である。そこで我々は、あいまいな特性をもった生体データにも適応できるファジィフィルタを開発し、聴性誘発反応、誘発耳音響放射の処理を行った。

2 分析法

聴性誘発反応（Auditory Evoked Potential ：ＡＥＰと略す）、誘発耳音響放射（Evoked Otoacoustic Emission ：ＥＯＡＥと略す）ともに通常、加算平均によって認められる反応である。まず観測波形を次式で表わす。

$$x_q(m) = s_q(m) + n_q(m) \quad (1)$$

ｓは信号成分（反応）、ｎは雑音成分（ＡＥＰでは背景電位変動、ＥＯＡＥでは背景音圧変動）である。
ｑは音刺激の番号（q=1, 2, ･･･, Q ）、ｍは各刺激時点からのサンプル番号（m=0, 1, ･･･, M-1）である。

この波形を刺激回数分加算平均した波形を$x^{AV}(m)$、加減算平均した波形（加算、減算の交互くり返し）を$x^{AL}(m)$とする。

ファジィフィルタはこの$x^{AV}(m)$と$x^{AL}(m)$のパワースペクトル$XP^{AV}(k)$, $XP^{AL}(k)$ をもとに設計した（パワースペクトルは平滑化を行った）。なお、ｋは周波数領域でのサンプル番号である。ファジィフィルタの出力波形を

$$x^F(m) = \mathfrak{F}^{-1}\{X^{AV}(k) \cdot H(k)\} \quad (2)$$

で表わす。 $\mathfrak{F}^{-1}$はフーリエ逆変換、$X^{AV}(k)$は$x^{AV}(m)$のフーリエ変換である。H(k)はファジィフィルタの重み関数で、$0 \leq H(k) \leq 1$とする。

さて、H(k)は次のようなファジィルールに基づいて決めていく（高さ法）。

各ｋについてまず

$$U(k) = XP^{AL}(k) / XP^{AV}(k) \quad (3)$$

$$D(k) = XP^{AV}(k) - XP^{AL}(k) \quad (4)$$

｛ただし、D(k)＜0のときは強制的にD(k)=0とする｝を求める。U(k)の値が0に近いほど、その周波数については雑音成分が小さいことになる。D(k)はスペクトルピーク成分の強調に用いる。

U(k)に基づく前件部のファジィ集合はＡｉ（i=1：雑音がほとんど無い、i=2：雑音が多少ある、i=3：雑音が多い）とし、各Ａｉに対応する後件部のファジイ集合は、フィルタの通過の程度であり、$1 \geq v_1 > v_2 > v_3 \geq 0$の条件で、それぞれ代表点$v_i$を定めた。ファジィフィルタの重み関数H(k)は、U(k)に対する各Ａｉのメンバーシップ関数$w_i(k)$とv_iから次式で求めた。

$$U(k) = \Sigma w_i(k) \cdot v_i \ / \ \Sigma w_i(k) \quad (5)$$

ここで、D(k)がある一定以上のエネルギーをもつピーク成分（とその近傍）の場合には、$w_1(k)$をより大きな値とする処理を行っている。 さて、前件部のS1、S2（図１）と代表値v_1、v_2、v_3は、
$\Sigma |X^{AL}(k) \cdot H(k)|^2 / \Sigma |X^{AV}(k) \cdot H(k)|^2$ が最小となるよう（分母が極端に小さくならない範囲で）、繰り返し計算を行って最終値を定めた。

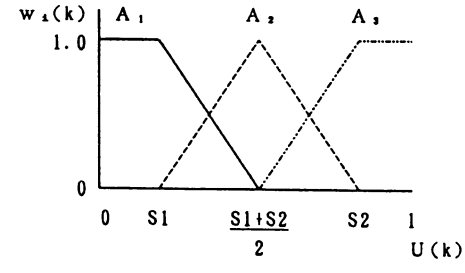


図１ U(k)のメンバーシップ関数

3　結果

【聴性誘発反応】

聴力正常な成人に８０dBnHLのクリックを１００回与えた場合の分析結果である（**図２**）。１－３０００Hzのアナログフィルタ通過後、１０KHzでＡＤ変換し、全て著者の開発したプログラムでコンピュータ処理を行った（VAX 4000/600、DEC社製）。（ａ）はファジィフィルタなし３００回加算波形である。（ｂ）はファジィフィルタ出力波形で、ＡＢＲ（聴性脳幹反応）、ＭＬＲ（聴性中間反応）をそれぞれ別々にフィルタリングし、１０msecで接続したものである。なおファイジイフィルタを通す前に、ＡＢＲでは８０Hz以下の成分を、ＭＬＲでは５００Hz以上を非巡回型ディジタルフィルタでカットした。ファジィフィルタの重み関数を決めるパラメータの最終値は、ＡＢＲ用のフィルタで S1=0.07、S2=0.44、V_1=1.0、V_2=0.7、V_3=0.05　ＭＬＲフィルタで S1=0.11、S2=0.46、V_1=1.0、V_2=0.6、V_3=0.05であった。

ファジィフィルタを用いることによって雑音成分の除去された、より明瞭な反応を検出することができた。

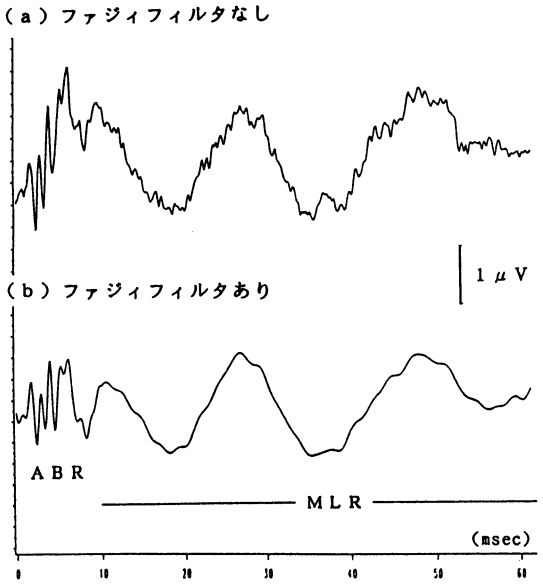


図２　聴性誘発反応（ABR, MLR）の処理結果

【誘発耳音響放射】

聴力正常な成人に、１．５KHz、３５dBSPLのトーンバースト（1-1-1msec）を２００回与えた場合の分析結果である（睡眠時検査　**図３**）。５００－４０００Hzのアナログフィルタ通過後、１０KHzでＡＤ変換、コンピュータ処理した。（ａ）はファイジイフィルタなし２００回加算波形（外耳道内音圧変動）である。スケールアウトの部分はＥＤＲ（Eardrum Response）である。７msec程度から出現するＥＯＡＥは、呼吸音による影響で不明瞭である。（ｂ）はファジィフィルタ出力波形である。フィルタリングはＥＯＡＥの出現する７msec以降を対象とし、７－１９．７msec（区間１）と１９．７－３２．４msec（区間２）を別々に処理した後で接続したものである。

パラメータの最終値は、区間１で　S1=0.18、S2=0.6、V_1=1.0、V_2=0.5、V_3=0.05　区間２で S1=0.1、S2=0.5、V_1=1.0、V_2=0.4、V_3=0.05であった。

ファイジイフィルタを用いることにより、背景雑音および呼吸音による変動成分の除去された明瞭な反応を検出することができた。

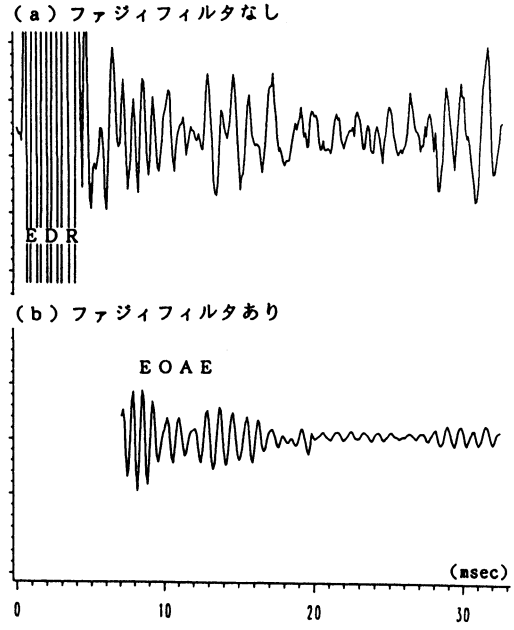


図３　耳音響放射の処理結果

4　まとめ

今回のファジィフィルタは単純なルールに基づくものであるが、従来の加算法のみでは除去不可能であった雑音を取り除き、明瞭な反応を検出することができた。このフィルタは入力されるデータ（信号＋雑音）に適応して、フィルタの重み関数をファジィルールで決めていくものであり、信号や雑音の特性が前もってわからない生体信号処理には適したものと思われる。今後、ルールの改良と時変型フィルタへの拡張を検討していきたい。

文献（ファジィフィルタの例として）

[1] 高島広篤, 田口　亮, 村田　裕: "ファジィ制御則を用いたエッジ保存型平滑化フィルタの構成", 信学技報, DSP92, pp. 17-23, 1993

[2] 荒川　薫, 穴倉健一, 野間貴司: "ファジィルールに基づくメディアンフィルタとその画像処理への応用", 信学技報, DSP94, pp. 23-28, 1994

連絡先

〒113　東京都文京区本郷２－１－１
順天堂大学医学部中央電算機室研究部門
江原　義郎
TEL 03-5802-1121

FC3-3

感情推察の一モデル

An Inference Model of Human Emotions

千葉大輔　　鬼沢武久
Daisuke Chiba　　Takehisa Onisawa

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

Abstract: This paper applies the fuzzy reasoning to infer emotions and behavior under a situation in which a person is waiting for a friend or an acquaintance at some place. Justification of the proposed inference model is shown by some simulation examples.

1　はじめに

計算機は問題解析において人間より優れている点を多く持っているが、他人の感情を推察するという人間には比較的容易なことが計算機では困難である。なぜなら他の問題と違って、人間の感情には明確な法則がないからである。心理学・行動学などにおいても人間の心のメカニズムは完全に解明されていないこともあり[1]、人間の心のすべてのメカニズムを考えて感情の推移を処理しようとするのは非常に困難である。

本論文では、人間が普段からなにげなく行っている、状況から他人の感情・行動を推察することに着目する。人間は誰でもある状況から自分の経験的な知識によって、他人の感情の推移やとる行動をある程度予測できる。しかも、この経験的知識によるルールは多少の状況の変化に対応できる。これは人間の知的判断にあいまいさが含まれているためである。もしそのルールが厳密なものであれば、特定の状況と特定の感情・行動を結びつけるだけで、少しでも違う状況に出くわしたら全く応用が利かないはずである。人間は思考にあいまいさを持たせることによって幅を持たせ、様々な状況に対応できる。本論文では、「ある待ち合わせ場所で人を待つ」という限られた状況で他人の感情を人間のように推察するモデルを作成する。

2　モデルの構成要素

本モデルでは「ある待ち合わせ場所で人を待つ」という状況で、人を待つときの感情と行動を時間を追って推察していく。本モデルは感情推察部、行動推察部、結果表示部とから構成される。以下で、それぞれの構成要素について簡単に説明する。

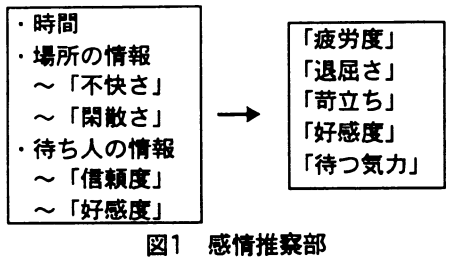


図1　感情推察部

●感情推察部

ここで行われるのは図1に示すように、モデルに入力される情報である「時間」「場所の情報」「待ち人の情報」から、感情を表すパラメーターである「退屈さ」「疲労度」「苛立ち」「待つ気力」「好感度」への変換である。だが、これらのパラメータの関係を明確な関数によって記述するのは困難である。ここでは両者の関係をif～then形式のルールで表現し、ファジイ推論を用いて推察するという方法を用いる。例えば、

・待ち時間が非常に短ければ、疲労度は低い。
・待ち時間が短く、場所の不快さが低ければ、疲労度は低い。
・待ち時間が長く、場所の不快さが高ければ、疲労度は高い。
・待ち時間が非常に長ければ、疲労度は高い。

というルールを与え、これに含まれる「時間が短い」などのファジイ集合を図2のようなメンバーシップ関数で表す。

これらを用いてファジイ推論を行う。前件部の合成演算には全ての条件が反映されるという性質を考え、sup･product合成[2]を用いることにする。各ルールの推論結果を頭切りされた結果部のメンバーシップ関数の面積で重みづけして平均を取ったものをこのルールの推論結果、すなわち上の例では推察された疲労の値となる。

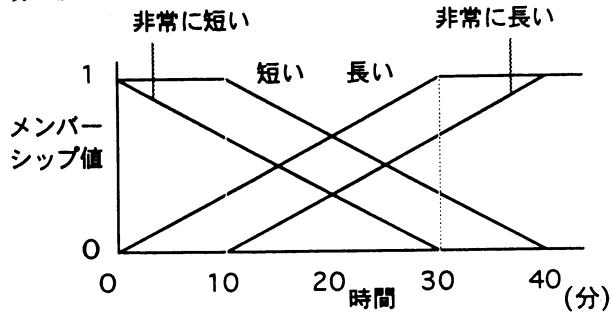


図2　時間の長さのファジイ集合

●行動推察部

ここでは実際にどういう行動をとるかの決定を行う。まず、感情推察部と同じように、感情と行動の関係を、

・少し退屈で、少し苛立っていると、よくキョロキョロする。
・少し疲れ、非常に退屈であると、よくあくびをする。

といったルールで示す。次に、以下の手順によってとるべき行動を推論する。

①ルールの前件部の全ての条件が反映されるようにsup・product合成によってルールの前件部の適合度αを求める。ここで適合度の値が極めて低いときは行動は無条件に行われない。

②各行動ごとに定められた起こしやすさを表すパラメーターx

を適合度にかける。このｘはその行動が一般的に頻繁に行われる行動であるかの度合いで０＜ｘ≦１の値をとる。αｘをこの行動の喚起されやすさとする。

行動の喚起されやすさからその行動が喚起するかどうかの決定については、このモデルで取り扱っている要素以外にも様々な要因が絡んでくるため[3]、一意的に決定することは不可能である。そこで、

③行動の喚起されやすさ（０＜αｘ≦１）をしきい値としてランダムな要素を用いて行動の喚起を決定することにする。すなわち０から１の値をとる乱数を発生させ、αｘがそれより大きければ行動は喚起される。

④以上を全てのルールに対して行う。

⑤複数の行動が同時に喚起されたときには、同時に起こりうる行動であれば両方を行い、そうでなければルールの適応度の高い方を採用する。

⑥「煙草に火をつける」→「煙草を吸う」といった行動の展開はあらかじめ考慮する。また一定の行動の持続もルールによって制御する。

●結果表示部

これらの推察結果を画面上わかりやすく表現するのが結果表示部である。推察は３０秒ごとに行う。行動は自然言語にイラストを添えて表現し、行動によって表しにくい「好感度」の値は絵グラフで表現する。

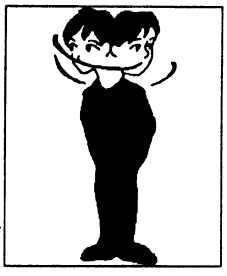
3　シミュレーション例

シミュレーションの結果は数人に見せて評価してもらうことにする。そこでまずシミュレーションを見てもらう人の時間に関するファジイ集合のメンバーシップ関数を定める。次に状況を考え、時間以外の情報を与える。これらの条件でシミュレーションを始める。シュミレーションは待ち合わせ開始から始まり、３０秒ごとに推察を行い行動を決定する。「立ち去る」という行動が起きることによってシミュレーションは終了する。最後にシミュレーション結果を見て共感できるかできないかを判断してもらい、全く共感できないから、とても共感できるまでの５段階で評価を記入させ、それをモデルの評価値とする。

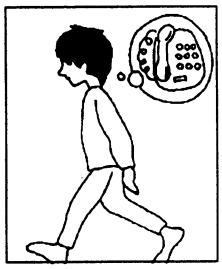
以下に与えた状況の一例とそのシュミレート結果を示す。ただし、本来はリアルタイムで表示されていくのだが、ここでは一部のグラフィックをピックアップするにとどめた。また、絵グラフについても省略した。

状況例　場所　：不快～普通、閑散～低い
　　待ち人：信頼度～非常に低い、好感度～高い
　～「街の駅前で、会いたいけどおそらく来ないと思われる人を待つ」といった感じのケース。

＊待ち始めました
＊キョロキョロした
＊
＊
＊
＊
＊
＊
＊
＊
＊約5分経ちました・・・
＊
＊キョロキョロした
＊
＊



＊
＊ため息をついた
　（すこし疲れてきた）
＊
＊あくびをした
＊電話をかけにいった
＊約10分経ちました・・・
　電話をかけたが、
　連絡がつかなかった
　（すこし退屈になってきた）
＊
＊
＊キョロキョロした
＊（すこし苛立ってきた）
＊首をまわした
＊
＊
＊煙草に火をつけた
＊壁にもたれた
＊約15分経ちました・・・
＊
＊ため息をついた
＊
＊腕時計を見た
＊
＊あくびをした
　（かなり苛立ってきた）
＊煙草をもみ消した
＊あきらめて立ち去った!!
　（約20分待ちました）







モデルの表価値＝３．６

4　おわりに

「ある限られた状況の中で、人間のように経験的なルールから感情や行動を推察する」という本モデルで意図していたことは、推察が予想通りにうまく行われていた点、客観的な評価値が３．８だった点から、ある程度は達成できたと思われる。しかし、ファジイ集合は人によって違うように解釈され、ルールの定義についても、人によっては差があることから、時間のファジイ集合を変化させただけでは完全には共感できないという評価者もいた。しかし、現実問題として人間も完全に他人の感情を推察できるわけではなく、その原因は個々の持っているファジイ集合とルールの差が大きいことであろうことをを考えると、人間に近いモデルとも言えるだろう。

本モデルは「待ち合わせ」という特殊な状況でのモデルではあるが、他の状況を考えたときにも有効であると考えられる。

参考文献

[1]「岩波講座・認知科学６・情動」　伊藤正男他　岩波書店　(1992)

[2]「ファジイ工学入門」　本多中二、大里有生　海文堂　(1989)

[3]「行動学入門」　D.O.ヘッブ　紀伊国屋書店　(1972)

[問い合わせ先]
〒305　つくば市天王台 1-1-1
筑波大学　構造工学系　鬼沢研究室
千葉　大輔
TEL 0298-53-5060
FAX 0298-53-5207
e-mail dchiba@kz.tsukuba.ac.jp

FC4-1

瀰漫性肝疾患ＣＴ像のフラクタル解析
Fractal analysis of diffuse liver diseases on CT

濱田辰巳 Tatsumi Hamada
上田 傑 Suguru Ueda
澄田 貢 Mitsugu Sumita

近畿大学医学部
Kinki University School of Medicine

Abstract-Fractal theory is an effective method to describe quantitatively the complicated shape in nature. We applied the fractal theory to medical images. We utilized scale conversion method to obtain fractal dimensions. Regions of interest were set on the right lobe of the liver on CT and the images were converted to digital data with pixels of 256x256 and densities of 6 bits. The scale was converted from 1x1 to 168x168 with 9 steps and the surface areas of the density profile were counted for each scale. The numbers were plotted against doubly logarithmic scale and a straight line was drawn by least square fits of data points. The fractal dimension was obtained from the slope of the line. As a result, the CT images of the liver showed fractality. Fractal dimensions were thought to be applicable for the quantitative evaluation of the CT images of the diffuse liver diseases.

1 はじめに

自然界には特長的な大きさを持たない様々な複雑な形やパターンが存在する．これらをシミュレートするための一つの数学的理想化としてフラクタルの概念がMandelbrotによって提案された[1]．ハウスドルフ次元が位相次元より高いものをフラクタルとよんでいるが[2]，非整数値を取り，これを以下フラクタル次元と呼ぶ．自然界の各種の現象の中にこのようなフラクタル性が認められている．瀰漫性肝疾患のＣＴ診断は肝の形態，ＣＴ値，脾臓や脈管の状態などによって行われるが，肝実質の濃度分布のパターンも参考にされる．後者は特に曖昧な所見であり，感覚的に判断されているのが実状である．肝実質の濃度分布がフラクタル構造を持つならば，フラクタル次元の解析がこのパターン分類に役立つ可能性がある．観察対象の位相次元が２次元であることから，２次元でのフラクタル性を調べ，解析したので報告する．

2 方法

１０mm厚で撮影された上腹部Ｘ線ＣＴ画像上で，肝右葉の実質の一部に関心領域を定め，ＣＣＤカメラを用いて画素数２５６ｘ２５６，濃度域６bit にてデータを取り込み，スケール変換法すなわち画素を順次粗視化することによってフラクタル次元を求めた．

濃度１の画素を１ｘ１ｘ１の立方体と考えると，濃度Ｄの画素は１ｘ１ｘ１の立方体をＤ個重ねた状態に相当する．画素毎に濃度に応じてこの立方体を重ねてゆくと複雑な高低差を生じ，関心領域の表面に複雑な起伏を形成することになる．この濃度プロファイルの複雑さは表面積の増大として評価することができる．画素を順次粗視化しつつ，表面積を各々のサイズでカバーした個数として計数し，画素サイズを横軸に，個数を縦軸に両対数スケールでプロットし，さらに最小自乗法にて直線近似し，その直線の勾配を調べた．この勾配の絶対値がフラクタル次元である．スケール変換は最小単位の１ｘ１から最大単位の１６８ｘ１６８までの１６段階で行った[3]（Fig.1）．

3 対象

２３歳女性の肝硬変例，９年の経過の間に慢性肝炎から肝硬変に至った６６歳男性例，２５歳女性の脂肪肝例について撮影されたＣＴ画像を測定した．

4 結果

Fig.1に肝硬変に進行した６６歳男性（K9407）の実測データを示す．全体として良い直線性を示しているが，さらに，中央部の最も広い範囲の直線部

分とその両端の直線部分に分けることができた．スケールの大きい方から小さい方へそれぞれセグメント１，セグメント２，セグメント３とした．４例について，一本に直線近似した場合の勾配およびセグメントに分割した場合の各セグメントの勾配をｐ値と共にTable1に示す．ここで，K8510とK9407は同一症例の９年間の経過である．

５　考察

フラクタル次元の定義の仕方として次の５つが挙げられている[4].

（１）粗視化の度合いを変える方法
（２）測度の関係より求める方法
（３）相関関数より求める方法
（４）分布関数より求める方法
（５）スペクトルより求める方法

ここでは２次元における（１）粗視化の度合いを変える方法を用いたことになる．得られた次元は2.1から2.4の間にあり，ＣＴにおける肝の濃度分布はフラクタル性を持つと言える．ここでは肝硬変において次元の減少が見られる．しかし，脂肪肝も相対的に低い次元を示している．前回報告したように[3]，スキャン条件により次元が変化することから，同一条件での症例を増やして検討する必要がある．また，均一な水ファントムでは一本の直線で良い近似が得られたが，肝では３つのセグメントに分けることもできた．スケールの大きいほうから小さいほうへ次元が減少する傾向が見られた．フラクタル次元が定義できる大きさの範囲には上限と下限がある[4]ことから，肝の構造がある範囲で次元の変化を来たしている可能性がある．フラクタル次元の値のみならず，同一固体での次元の変動についても検討を要する点である．以上の点についてさらに検討を加えたい．

参考文献

[1]Mandelbrot, BB: The Fractal Geometry of Nature . Freeman, San Francisco, 1982
[2]山口昌哉：カオスとフラクタル，講談社，p149，１９９４
[3]澄田貴，他：フラクタル次元による画像の記述．バイオメディカル・ファジィ・システム学会第７回年次大会講演論文集．９０-９１，１９９４
[4]高安秀樹：フラクタル．朝倉書店p14-25, 1993

連絡先
５８９大阪狭山市大野東３７７－２
近畿大学医学部放射線医学教室
濱田辰巳
TEL 0723-66-0221 (EXT 3132)
FAX 0723-68-2388

Fig.1

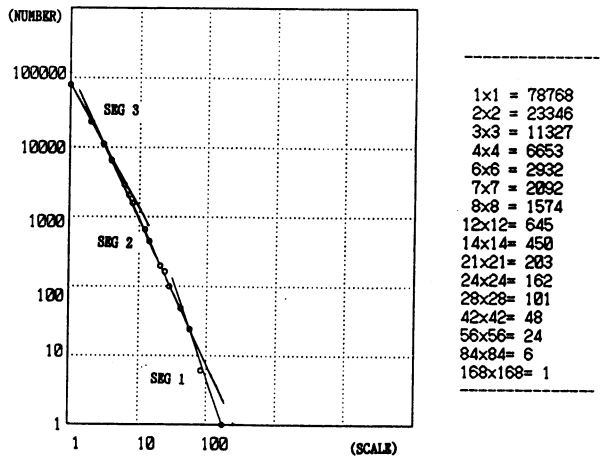


Table 1

Materials	Total	Segment 1	Segment 2	Segment 3
K8510 (CH*1)	-2.3495 (p<0.0001)	-2.9849 (p=0.0678)	-2.2930 (p<0.0001)	-2.1789 (p=0.0735)
K9407 (LZ*2)	-2.1745 (p<0.0001)	-2.8596 (p=0.0487)	-2.1112 (p<0.0001)	-1.7641 (p=0.0028)
SATOKO (LZ)	-2.2349 (p<0.0001)	-2.4164 (p<0.0001)	-2.4164 (p<0.0001)	-1.7371 (p<0.0001)
MIYOKO (FL*3)	-2.1855 (p<0.0001)	-2.6882 (p=0.1283)	-2.1820 (p<0.0001)	-1.8439 (p<0.0001)

CH*1=Chronic hepatitis　LZ*2=Liver cirrhosis　FL*3=Fatty liver

FC4-2

外科術後感染症のファジィ診断システム

Diagnostic fuzzy system of surgical site infection

坂口 聡[1)] 有田清三郎[2)] 谷村 弘[1)] 馬庭芳朗[1)] 堀 義巳[3)]
Satoru Sakaguchi[1)] Seizaburo Arita[2)] Hiroshi Tanimura[1)] Yoshio Maniwa[1)] Yoshimi Hori[3)]

1)和歌山県立医科大学 2)関西医科大学 3)川崎医療福祉大学
Wakayama Medical School Kansai Medical School Kawasaki Univ. of Medical Welfare

Abstract Surgical site infection is related to dysfunction of host defense mechanisms, operative stress and postoperative use of antibiotics. It is important that we should synthetically evaluate postoperative physical findings, blood examination and diagnosis of images. Otherwise this daiagnosis and the selection of antibiotics for therapy depended on the surgeon in charge.

In this study, we applied fuzzy theory for the purpose of diagnosing surgical site infection and selecting appropriate antibiotics.

1. はじめに

術後感染症とは外科医にとって患者の予後に影響する重要な因子であり、これを早期に診断し的確な抗菌化学療法を選択することは重要な課題である。歴史的には、手術の創部感染を中心に議論されてきたが、現在は表皮切開部の感染、深部軟組織の感染、臓器の感染と大きく3つのカテゴリーに分類されている。これらの感染症の発症に関与する因子は、細菌因子、環境因子(手術時間や出血量)、生体側因子(糖尿病や免疫不全などの宿主の防御機構)の3つであり、これらが相互作用することにより感染が発症すると考えられている。特に、細菌の存在する部位を扱う準無菌手術が大部分を占める消化器外科領域においては、術後感染症の予防を目的として抗菌薬を投与することは広く受け入れられている。しかし、その投与に関するガイドラインはなく、主治医の総合判断に任されているのが現状である。

本研究では、胃癌手術症例をretrospectiveに解析し、ファジィ推論を用いて術後感染予防を目的とした抗菌薬の新しい効果判定基準の設定を試みた。

2. 対象と方法

和歌山県立医科大学消化器外科における1992年1月より1994年9月の期間での胃癌手術症例（胃部分切除術、胃全摘術）162例を対象とし、術後感染症（創部感染、腹部膿瘍、術後腸炎）の有無と術前情報および術中情報、術後情報を重ね合せ、ファジィ推論をもちいて術後感染症の診断ロジックを構成した。

1)術前検討項目

a. 糖尿病の有無

b. 肝硬変の有無

c. 栄養免疫指数（小野寺のPNI）

2)術中検討項目

a. 術式

b. 手術時間

c. 術中出血量

d. 合併切除臓器

（脾臓、膵体尾部、肝臓、無）

e. リンパ節郭清（D1, D2, D3以上）

f. 輸血の有無

3)術後検討項目

a. 白血球数

b. 熱型

術後3日目より7日目にかけての体温の変化（1日4ポイント）を5型に分類した。

typeA: 術後3日目以降は37度以上になることは1回以下である。

typeB: 術後3日目以降は37度前後の発熱が持続しているが37.8度以下である。

typeC: 術後3日目以降も37度以上の発熱があり、時に37.8度以上も記録する。

typeD: 術後3日目以降に37.8度以上がの発熱が1日以上持続する。

typeE: 術後3日目以降は37度以下であるが1日1回37.8度をこえる発熱がある。

c. 白血球分画

桿状核白血球: stab

分葉核白血球: seg

リンパ球: lymph

d. CRP

e. 白血球分画の動き（ベクトル）

3. 考察

術後感染症にたいして熱型や白血球数などの従来の指標に、より敏感である白血球分画の動きと状態を加えてその有無を早期に判定する新しいシステムを構成した〈図1〉。このシステムにより抗菌薬の中止や変更を主治医の主観のみでなく客観的裏付けをあたえることが可能となった。白血球分画において感染が起こった場合に核の左方移動をおこすことは周知の事実である。今回、術後4日目の桿状核白血球、分葉核白血球とリンパ球の各々またはその組み合わせと術後1日目から4日目のこれらのベクトル、CRPの絶対値、熱型を入力項目とした〈図2〉。これらの項目は非線形ダイナミックスを構成していると考えられるため、ファジィ理論を用いて診断ロジックを構成した〈図3〉。

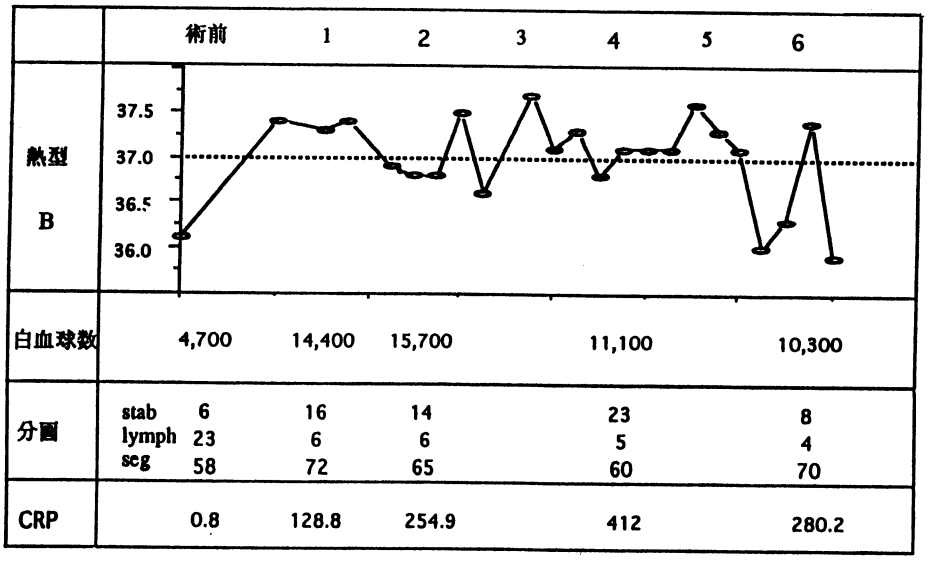


図1　術後感染症の典型例

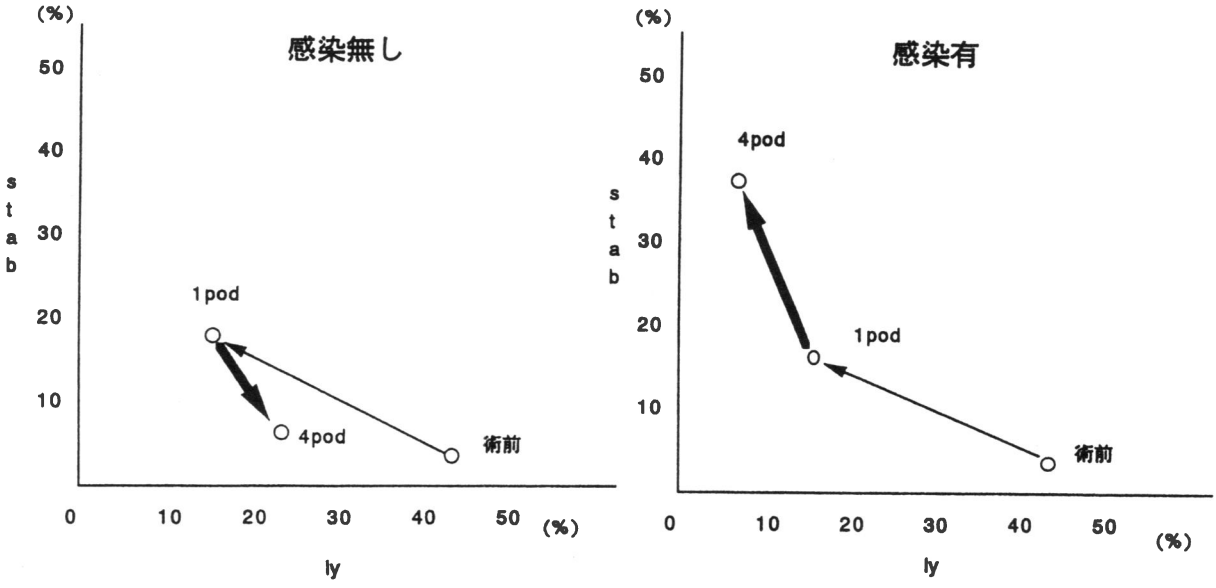
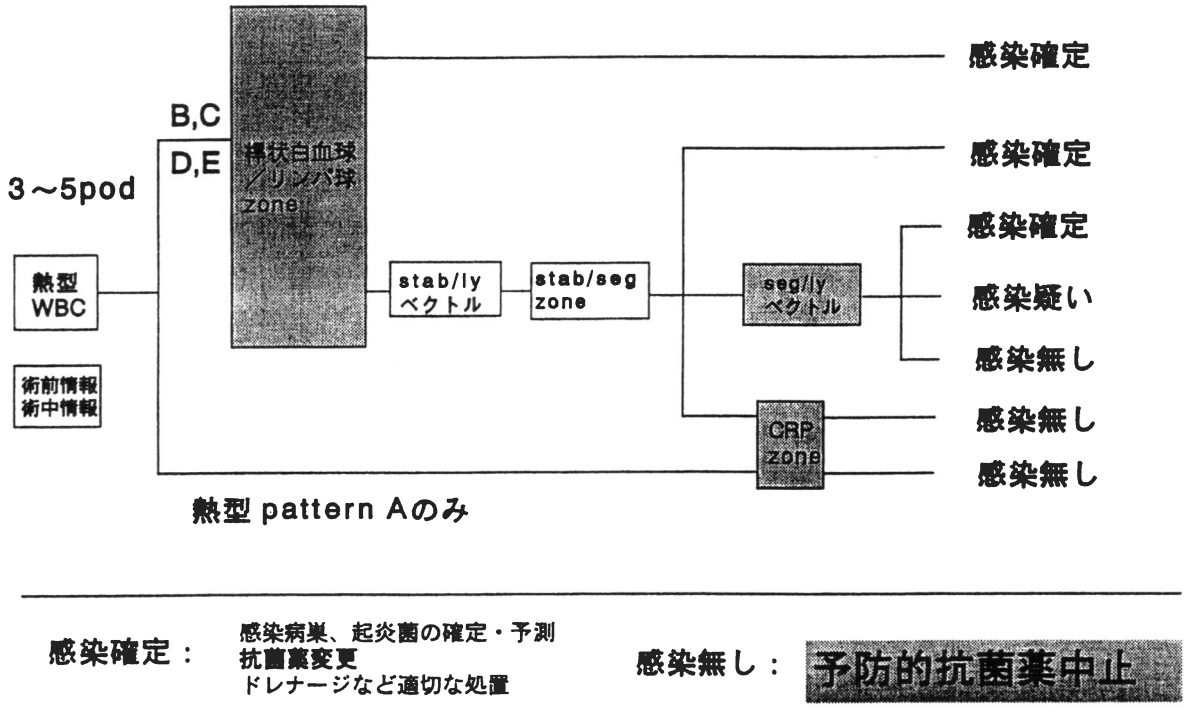


図2　stab/lyベクトルの時系列変化



感染確定：　感染病巣、起炎菌の確定・予測
抗菌薬変更
ドレナージなど適切な処置

感染無し：　予防的抗菌薬中止

図3　術後感染症の早期ファジィ診断ロジック

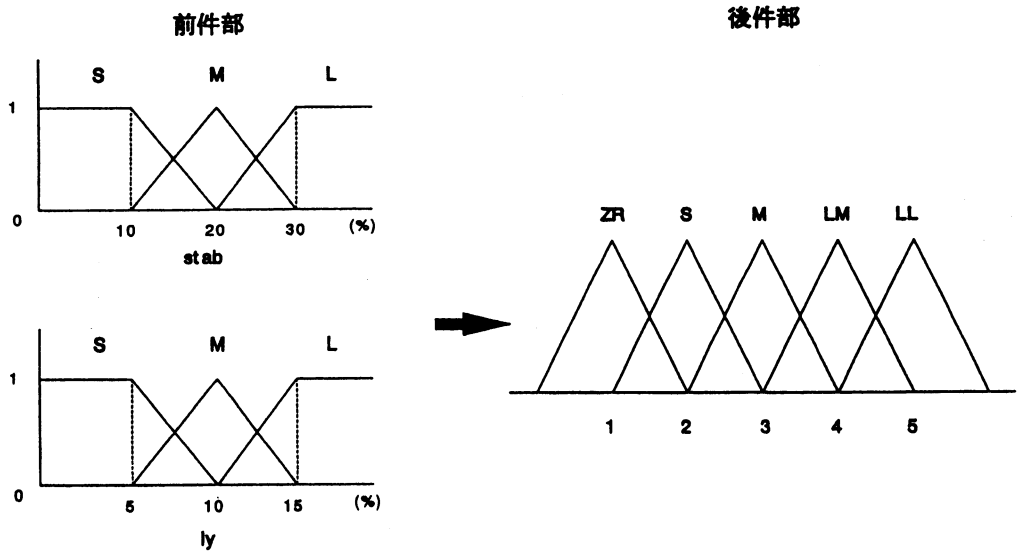


図4　ファジィルールによるstab/ly zoneの出力

結果（後件部）を感染有、感染疑い、感染無しの3通りと仮定し、入力項目（前件部）を桿状核白血球とリンパ球の２項目とすると、感染症診断ロジックでのファジィルールは

Rule1: IF stab is Large and lymph is Small
　　THEN 感染有
Rule2: IF stab is Medium and lymph is Medium
　　THEN 感染疑い
Rule3: IF stab is Small and lymph is Large
　　THEN 感染無し　　etc.

ように9通り作製できる〈図４〉。最終診断結果はこれらを重ね合せることにより得られ、ファジィ診断結果はエキスパートの診断に近いものになっていると考えられる。また、現在、白血球分画の桿状核白血球と分葉核白血球は自動計測機では好中球として表示され、その判別は検査技師の測定に依存し施設間に5-10％の誤差が報告されているが、この方法ではその誤差も除去されると思われる。

さらに、今回の診断ロジックは圧痛などの臨床所見の情報が欠如しているため、prospective studyではそれらの情報を追加し、また、多くの施設からのデータを照合することにより施設間での隔差のないことを示し、その信頼性を高めたい。

参考文献

1. Jonathan L. Meakins, M.D., Ph.D.: Guidelines for Prevention of Surgical Site Infection、 SURGICAL INFECTION, 10, 127～138, 1994.
2. 有田清三郎：ファジィ理論を用いた超音波画像による癌診断システムの開発、日本ファジィ学会誌, 3(3), 527～539, 1991.
3. 横山隆、児玉節、竹末芳生、宮本勝也、檜山英三、村上義昭、山東敬弘、立本直邦：術後感染を防ぐために術前に何を行っておくべきか、消化器外科, 17, 19～25, 1994.

連絡先
〒640　和歌山市七番丁27
和歌山県立医科大学消化器外科
坂口聡
TEL 0734-26-8278, FAX 0734-26-8346

FC4-3

ロジスティック曲線によるヒトの発育過程の分析

Analysis of the human growth using logistic curve

北條暉幸
Teruyuki Hojo
産業医科大学・第1解剖学
University of Occupational and Environmental Health,
Med. Sch. Department of Anatomy and Anthropology

Abstract: Human growth in the stature is analysed using logistic curve. The human growth is caused by the increase of the cell. The cell of the body divides into two new cells, but the death of the cells occurs. The growth curves of the stature of Japanese males in 1970 and 1988 show S-shapes. The periods of the great increase of the stature are at 3 and 16, a period of slowness is at 10 years of age. The curves of the growth run almost horizontally along the asymptote after the full growth. The logistic curve N(t)=CKexp(rt)/[Cexp(rt)+1] according to the stature in 1970 (K = 175cm) shows almost the same pattern like the growth curves obtained by measurement.

著　言

日本だけでなく、世界各国で毎年、学童、生徒、学生の身長、体重、胸囲、坐高などの発育のデータが発表されている。しかもこれらについては世界的にも膨大なデータがあり、これは如何に人々の関心が高いかを示していると考えられる。特に子どもの成長についての親の関心については、言うまでもないことであろう。子ども自身、自分が成人になったときの身長、体重などについての関心もある。子どもの時から、成人したときの身長が推測できるであろうか。

成長の現象は一口で言えば細胞の増殖である。これをどのように数量化するかが成長現象の表現になるわけである。ヒトの発育は身体各部の細胞の増殖、発育を意味し、細胞の増加と考えられる。従って、筆者は日本人の成長について考察し、その現象は、従来報告された単位体積あたりの大腸菌個体数や酵母菌の個体数の増加の研究結果あるいはゾウリ虫やキイロショウジョウバエなどの個体数の増殖曲線（山口、１９９３）とよく似た現象になるのではないかと予測し、成長曲線はロジスティック曲線に近くなるのではないかと考え、身長、体重について検討しているので（北條、１９９５）、今回、日本人の身長の成長について、ロジスティック曲線への近似を考え、さらに年代をさかのぼって検討したので発表したい。

結　果　と　討　論

これらののデータを、ロジスティック曲線を用いて分析するにはＮ（ｔ）＝ＣＫｅｘｐ（ｒｔ）/[Ｃｅｘｐ（ｒｔ）＋１]を用いた（山口、１９８６）。この式でｔは時間を表すがここでは年を示している。このとき、Ｎ（ｔ）は成長続行中のある年における人体中の細胞の数を意味するが、ここでは身長を意味するする細胞の数を表すと考えることが出来よう。さて、ｔを無限に大きくすればＮ（ｔ）は極限値としてのＫに限りなく近ずく。このＫが漸近線である。なお、Ｎ（ｔ）において、ｔの係数としてのｒ、およびＣは基になるデータの特定の２年を選んで求めることが出来る。本研究では、身長では５歳と１３歳を基準に選んでいるが、他の適当な２年を選ぶこともできる。

身長についてみると１９７０年の予測値は１９歳の値が１６６．６ｃｍであるが、これらのデータを基に、Ｋ＝１７５ｃｍとしてロジスティック曲線を当てはめると、その曲線の１９歳の値は１６６．６ｃｍで十分満足することができるが、厚生省発表データ１９８８年では、１９歳の値１７０．３ｃｍ（Table 1 およびFigure 1）となって、１９７０年からの推定値には合わない。同一民族であっても、この１８年間に１９歳で約４ｃｍも増加しているからである。しかし、１９４４年のデータによれば、１９歳の値は、１６４．５ｃｍとなり、２ｃｍの差を示す。今回このようにロジスティック曲線を用いることによって１９７０年における身長発育の近似的推定がＫ＝１７５ｃｍによって可能であることを示しているが、１９４４年および１９８８年では、若干離れた値を示したので、それはＫの値の選び方によるのではないかと考え、Ｋの値の選び方について今後検討したいと考える。ロジスティック曲線はＳ状を描くが比較的滑らかであって、これを実測値と比較すると、今回示したように身長の場合は差は少なく、このことから、ロジスティック曲線による予測は身長において可能であり、この推測について今後の課題としたい。

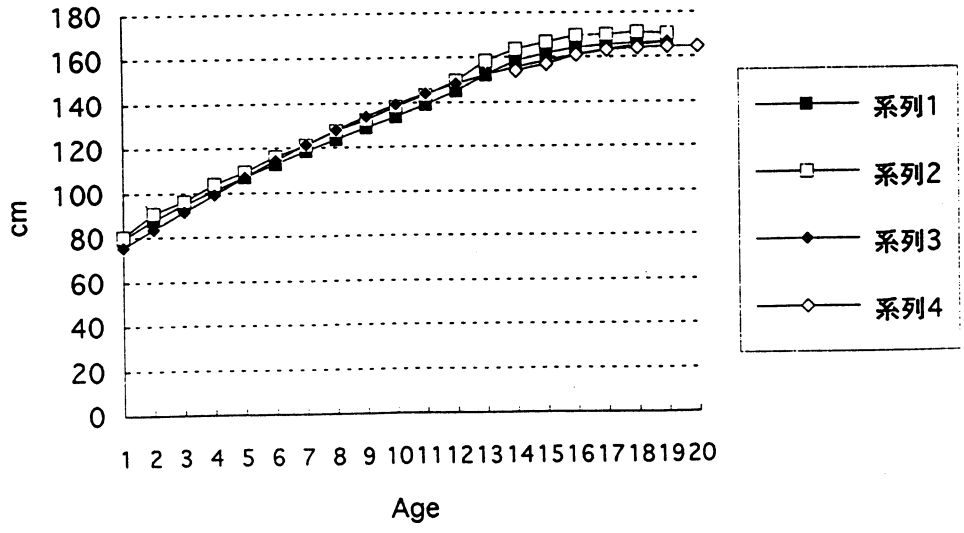
引　用　文　献

厚生省、1988、年次別・年齢別・性別平均体位、（東京天文台、理科年表、pp.914、丸善、1992）
西　成甫、1952、日本人標準体格調査報告（１９４４年データ）、解剖学雑誌、27、53-63.
曽田長宗、1961、１０年後のわが国民の体位の予測について、民族衛生27、522、（福田邦三編、日本人の体力、杏林書店、東京、pp. 35-39. 1968.から引用）
山口昌哉、カオスとフラクタル。ブルーバックス、講談社、pp. 49-86. 1993.

Table 1. Means of stature of Japanese males: (1) Values in 1970 estimated by Soda (1961), (2) Values in 1988 reported by Ministry of Public Welfare, (3) Logistically estimated means [N (t)] from those in 1970 using K=175cm, (4) Values in 1944 reported by S. Nishi (1952).
Note: Logistic equation: N (t) = CKexp(rt)/[Cexp(rt)+1]
K=175cm, t=age; C=0.365 and r=0.1813 are calculated from values in 1970 at ages of 5 and 13.

t	(1)	(2)	(3)	(4)
1	79.4	80.1	75.6	
2	87.6	90.7	83.5	
3	94.8	96.3	91.4	
4	101.1	103.9	99.3	
5	107	109.3	107	
6	112.7	116.1	114.3	
7	118.4	121	121.3	
8	123.6	127.5	127.8	
9	128.8	132.3	133.8	
10	133.5	138.2	139.2	
11	139	143.4	144.1	
12	145.2	149.7	148.5	
13	152.3	158.3	152.3	
14	158.4	163.5	155.6	154.1
15	161.9	166.7	158.5	157
16	164	169.7	161.1	160.9
17	165.4	170	163.2	163.1
18	166.2	171	165.1	163.9
19	166.6	170.3	166.6	164.5
20				164.6

Figure 1. Comparing of the logistic curve with the growth curves with using the data in Table 1.



連絡先　北條暉幸　〒807 北九州市八幡西区医生ケ丘１－１　産業医科大学第１解剖学教室
TEL 093-691-7232:FAX 093-691-8544 ; E-mail hojo@rose.med.uoeh-u.ac.jp

FC4-4

東洋医学における基本理念の数理モデル化に関する基礎研究

A Mathematical Modeling for the principle on Oriental Medicine

○東原 正和　　矢鳴 虎夫
Masakazu Higashibaru　　Torao Yanaru

九州工業大学 工学部 電気工学科
Department of Electric Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract— The fundamental remedy on Oriental Medicine is generally based on the qualitatively or practically systematized principle constructed by the theory for Yin and Yang, Gogyo(Five Elements)theory and Hosha Theory. This paper proposes a mathematical model introducing these qualitative theories into the linear system based on derivative equation.

1 はじめに

近年、東洋医学へ関心が高まっている。なんとなく体の具合が悪いが西洋医学でははっきりした診断が下されない時、漢方薬や鍼灸による治療を試してみることが多いのではなかろうか。しかしその治療や診断は西洋医学のそれとは同じ医学とは思えない程の違いがあるのである。それはそれぞれの医学が全く異なる文化や思想を土台にして発展してきたためである。

現在の西洋医学の信憑性を疑うものは少ない。これはその成果によるものも大きいのだが、現在の文化先進国が西洋文化を土台に成り立っており、理解しやすいためであるともいえよう。それに対し東洋医学は西洋文化からみると非常に理解しがたいところが多い。

しかしその理解しがたい東洋医学によって、西洋医学では治療しきれない患者が治療されているのも事実である。現在では西洋医学をも東洋医学的アプローチが進んでいる様である。

また、東洋医学へのアプローチを行なっているのは西洋医学界だけではない。あまり知られていないが、工学分野からも診断支援ソフトや治療器具の開発などの形で行なわれている。

東洋医学の基本理念は、その分野において、ミクロからマクロまでも包括しかつ汎用的な理論に基づき体系づけられている。その理論を工学的な視点から見ることにより、それが非常にシステマティックであることに注目した。この意味でその基本理念の数理モデルを構築することによって工学的な東洋医学へのアプローチを試みようとするものである。また、医学への応用並びに妥当性も検討してみたい。

2 東洋医学の基礎理念について

本研究では東洋医学で最も重要と思われる五行と陰陽論に注目する。東洋医学はこれら二つの理論に支えられているといっても言い過ぎではなく、これを解析することで東洋医学では何をどう行なっているのかがわかるようになる。

2.1 陰陽論

陰陽は常に相反する相対概念である。これは絶対的なものではなく、見方によって陽に分類されたり、陰に分類されたりする。（表1参照）例えば一方がもう一方に対して動的・能動的・積極的であれば陽とし、静的・受動的・消極的である方を陰とするのである。又これは相対的なものであるため、一方に分類されるからといってもう一方の要素を持たないかというとそうではない。例えば男女でいうと男が陽、女は陰に分類されるが、陽である男でも上方にある頭は陽であり、下方である足は陰なのである。つまり陽のなかに陰が存在するのである。

表 1: 陰陽分類表（一部）

陽	陰
動的	静的
能動的	受動的
積極的	消極的
男	女
上	下

東洋医学における陰陽論とはあらゆる状態を大きく二つに特徴づけるものである。これは患者の状態を表す五行の五原素（詳しくは2.2章参照）にもそれぞれあてはめられ、陰にも陽にも傾くことなくバランスのとれた状態がよしとされる。

2.2 五行

五行とは『木』『火』『土』『金』『水』に象徴される五原素の作用に関する理論である。五行説ではあらゆる存在一般をこの五つの範疇に包含されているとしている。東洋医学ではこの五原素を相関があると思われる人間の臓器（西洋医学でいう臓器とは異なる）や状態に対比した五蔵の色体表（表2）に用いている。これは病状の診断や治療に使用される。

表 2: 五臓の色体表（一部）

五蔵	肝	心	脾	肺	腎	脾蔵は三焦に属す
五腑	胆	小腸	胃	大腸	膀胱	三焦を加えて六腑
五行	木性	火性	土性	金性	土性	五行の所属
五主	筋肉	血脈	肌肉	皮膚	骨	五臓の栄養補充
五色	青	赤	黄	白	黒	色の所属（皮膚色）
五悪	風	熱	湿	燥	寒	五臓の嫌う外気

これら五行の五原素にそれぞれ 2.1章で述べた陰陽論が用いられる。ある原素が動的になる、つまり陽に傾く時これを東洋医学では『実する』といい、逆に静的になる、つまり陰に傾く時『虚する』という。例えば『五臓の肝が実する』ということは、肝にあたる木が動的になっていることになる。

また五行にはおおきな二つの法則がある。これを相生相剋関係（図 1）という。これは五原素各々が相互に及ぼす影響についての法則である。

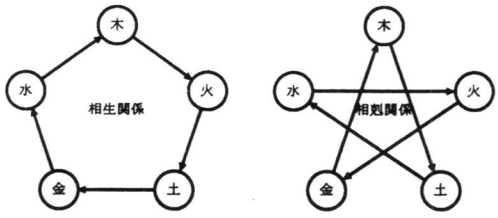


図 1: 五行における相生・相剋

相生関係とはプラスの関係である。例えばある原素が動的になると矢印の先の原素が同様に動的になる。

相剋関係とはマイナスの関係であり、ある原素が動的になると相生関係とは逆に矢印の先の原素が静的になる。

このように五行はそれぞれがそれぞれに影響を及ぼしているのであり、例えば土が動的になり過ぎれば木がこれを抑制しようとするのである。つまり、五原素それぞれが均衡を保つ時健康であるとし、均衡が崩れ五臓に過不足が生じた時に疾病であるとするのである。（図 2 参照）

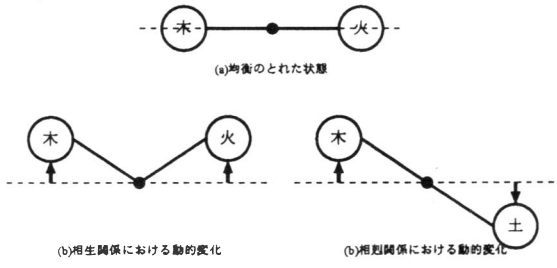


図 2: 相生・相剋による五行の変化

2.3 治療の考え方

前述した五行（2.2）及び陰陽論（2.1）を用いて人間の健康状態が診断され、治療されていく。つまりは現在の健康状態は五行の陰陽の状態として医者にとらえられ、病状の進行は五行の理論の上で展開されゆくのである。またそれによる五原素の陰陽変化を医者は時間変化まで含めてとらえ、バランスの崩れを修正するように治療にあたるのである。この時、五原素を陽に傾かせる治療を『補する』といい、陰に傾かせる治療を『瀉する』という。

この様な治療に当たり、東洋医学ではまた幾つかの基本理念を提示している。これが『補瀉原則』であり『六十九難』、『七十五難』、『七十七難』などがある。以下、本間 詳白著『鍼灸補瀉要穴之図 説明書附取穴論』[1] を参考にその方法を述べる。

『六十九難』— ある原素が虚した場合は相生関係の一つ前に当たる原素を補し（図 3(a)）、実した場合は同関係の一つ後の原素を瀉する（図 3(b)）というものである。これには順序があり、補が先になる。また他の原素によって生じた実虚でなければ、自原素を治療する（図 3(c)）。

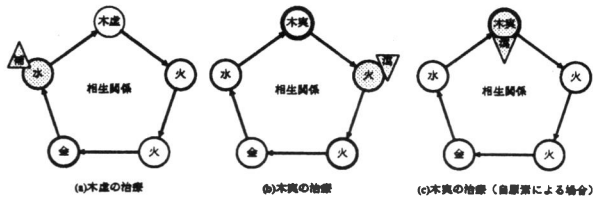


図 3: 『六十九難』

『七十五難』— これは六十九難を一般法則とすると特別な法則らしい。表 2 にもあるように、五行は方位にも関係づけられている。例としてあげられている『東方実し、西方虚せば南方を瀉し、北方を補う』というのもこれによって『木実金虚ならば火瀉水補せよ』理解できる。六十九難の方法との違いは木実にたいし火瀉を行なう所は同じなのだが、金虚にたいし土補とせず水補とするところである。これによって相剋関係より火を抑え、それにより金虚を実し木実を抑制しようとするのである。（図 4参照）

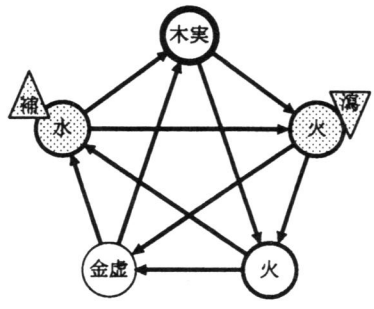


図 4: 『七十五難』

2.4 診断及び治療に関して

東洋医学における診断や治療は西洋医学のそれとおおきく異なる。西洋医学において病状の診断には血液検査などの科学的・分析的な方法が用いられる。これに対し東洋医学では医者の感覚や経験に基づき診断をくだし、治療に当たるのである。このことから基本理念の解析はある程度できてもそれらの応用や妥当性を検討するのは難しい。

そこで東洋医学の理学療法の一つである『良導絡自律神経調整療法』に注目してみた。これは皮膚の電気抵抗をノイロメーターという装置を用い測定することによって交感神経の興奮性を調べ、この興奮状態を健康時の興奮状態へ導く治療法である。測定結果がはっきりと数値でしめされるため、理論の解析や応用・妥当性の検討に役立つものと思われる。馬淵 通夫著『綜合医学への道』[3] に『良導絡自律神経調整療法』の記述がある。

ノイロメーターによる測定値は専用のカルテに記載される。この数値はそのカルテによって変換され他の数値と比較出来るようになっている。数値そのものをいえば、各数値が 40 から 60 の間に入れば健康であるとみなさる。60 より大きくなればその良導絡に該当する器官に負担はかかっているが何とかやりくり出来ている状態、40 より小さい場合はやりくりできなくなっている

状態とみる様である。また年齢等他の条件によってはこれらの数値が40から60の間に入らず落ち着くこともある。極端な例でいえば死者において測定値はすべて0をしめす。

この『良導絡自律神経調整療法』と東洋医学との関係であるが、良導絡と経絡[1]は同じものではないかとみられている。よってノイロメーターで測定された数値は各臓器、つまり五行の状態を示していると考えられるのである。

3 数理モデルの構築

3.1 数理モデルの仮定

東洋医学では五行の各原素のバランスの崩れを改善すればよい。これは五行をひとつのシステムとしてとらえた場合、このシステムの安定化問題として考えることができる。

そこで、患者の診断結果による五原素木火土金水の状態変数ををそれぞれ $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, $x_4(t)$, $x_5(t)$ とし,

$$\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t), x_5(t)) \qquad (1)$$

とする。またこれを治療する為に五原素へ与える変化を $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, $u_4(t)$, $u_5(t)$ とすると、

$$\mathbf{u}(t) = (u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t), u_5(t)) \qquad (2)$$

とする。次に相生相剋の法則に基づき五原素の状態を変化させるマトリクスを

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix} \qquad (3)$$

とすると、患者の状態の変化は次の状態方程式であらわされることになる。

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}(t) \qquad (4)$$

3.2 相生相剋マトリクス A

相生相剋の特性を考え（図 1参照）、パラメーターを仮定してみる。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & -p & p \\ p & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -p \\ -p & p & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -p & p & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & -p & p & 0.0 \end{pmatrix} \qquad (5)$$

このマトリクスは相生相剋図（図 1）をもとに五行の変化図（図 2）を参考に作成したものである。相生の関係に当たるパラメーターには正の数値をあてはめ、相剋の関係に当たるパラメーターには負の数値を当てはめる。

またそれらの大きさにばらつきはないであろう。これは相生相剋の影響力が均等であると推定されるためである。よって相生の関係にある要素には p を、相剋の関係にある要素には $-p$ を配置した。

実際にもちいる p の値であるが、このマトリクスにより1回値が変化するのにどれほどの時間がかかるかという設定で決まってくる。

3.3 五原素の状態変数 x(t)

これは実数値によりそれぞれ表記されることになるが、『良導絡自律神経調整療法』にてもちいられるノイロメーターによる測定値を五行の原素の状態としてそのまま利用することが出来る。よって、2.4章で述べたとうり、健康な人間の数値というのは40から60の間であれば良いので、例えば、

$$\mathbf{x} = (50, 50, 50, 50, 50)$$

は各原素ばらつきもなく非常に健康である、理想ともいえる状態である。

これに対して例えば次のようになったとする。

$$\mathbf{x} = (30, 80, 40, 65, 30)$$

各原素間にばらつきが生じ、不健康な状態といえよう。診断結果としては木及び水の原素が虚しており、火の原素が実している。他のばらつきからいえば小さなものだが、一応金も実している。土のみなんとか健康である。

3.4 五原素への治療入力 u(t)

現在治癒入力は二つ存在するのではないかと仮定されている。一つは医者が理学療法等を用いて行なう外的なもの、また一つは人間そのものに備わる内的なものである。

前者は状態変数 x(t) を医者が判断し、独自の考え方で治療をきめる。後者は自己の力によるものなので、小さなバランスの崩れなら自動で修正するものである。

以後医者による治癒を『治療』、自己の力による治癒を『自己治癒』とよぶ。またこの考え方の導入に伴い、治療入力を u(t)、自己治癒を u'(t) とする。

3.4.1 自己治癒モデルの仮定

自己治癒に関するはっきりとした文献は現在見つかってはいない。しかし、2.4章よりある程度推察できる。

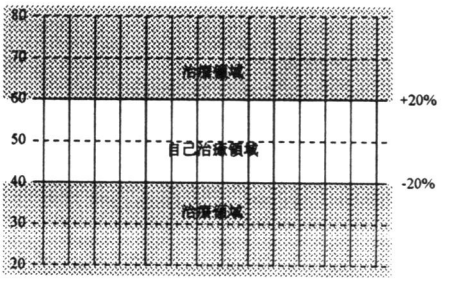


図 5: 自己治癒と治療の区分け

状態変数 x(t) をノイロメーターによる測定値を使用するので、健康状態は40から60の間にあれば良いことは確かである。

[1]経絡とは「生命エネルギーの循環路であり、各臓器と対応している」と東洋医学ではされている

また、ばらつきの度合が健康状態に大きく作用すること、40から60以外でも年齢等の理由によりばらつかない事があることから、健康状態の定義を測定値の平均値を基準に、±20％内であれば健康であるという様に考える事も出来る。（図 5参照）

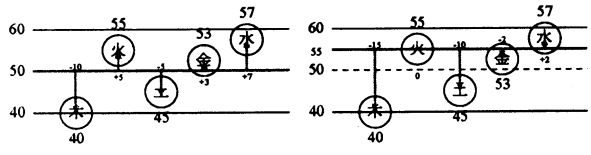


図 6: 治療時の五原素のばらつきや自己治癒の基準の例

自己治癒とは、「身体のバランスの崩れを自分の力で治せる範囲」である。つまりはこの範囲にある限り、これ以上病気になることはない。よって先の基準値± 20％以内であるなら、自己治癒能力を発動し治癒にあたり、そうでなければ自己治癒不可能とし治癒はしない様にすれば良い。

また治療方法であるが、本間 詳白著『鍼灸補瀉要穴之図 説明書附取穴論』[1] に三焦という、体の状態を操る器官が存在している。これは五行でいう火の原素にあたる。よって修正値そのものは火の原素を基準とし、これとの差を修正値とする。（図 6参照）

3.4.2 治療モデル

治療モデルは 2.3章を参考に組み立てる。また治療は自己治癒でなおる範囲では行なわず、その範囲を越えた時のみ治療に当たるようにする。範囲内かどうかの決定は 3.4.1同様平均値を基準にとり、それより± 20％を越えた時に治療が必要であると決定する。

六十九難は次のように設定する。先に決めた基準± 20％を越えた原素を A とする。原素 A に対し、その原素以外に基準± 20％を越えた原素がなければそれ自身を治療する。あった場合で＋ 20％を越えた場合は実しているので相生関係にあたる 1 つ後の原素を瀉、つまり－に治療する。また－ 20％を下に越えた場合は虚しているので相生関係にあたる 1 つ前の原素を補、つまり＋に治療するのである。治療する量は基準± 20％を越えた原素の越えた分を用いる。これらを図 7に示す。

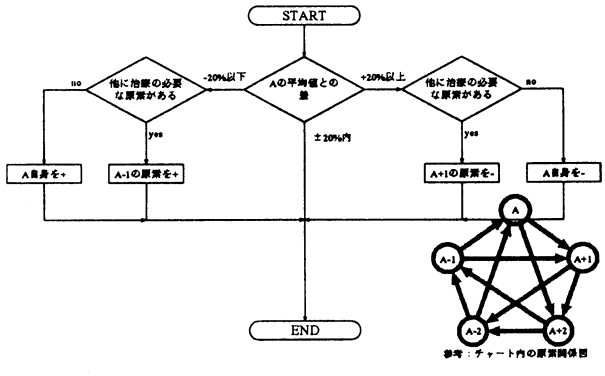


図 7: 六十九難フローチャート

七十五難は次のように設定する。先に決めた基準を＋に 20％を越えた原素を A とする。原素 A に対し、相剋関係の 1 つ前の原素がまた－に 20％を越えている場合、治療にあたる事にする。治療は＋に 20％を越えた原素の越えた分を、その原素より相生関係にあたる 1 つ後の原素を瀉、－に治療する。また－に 20％を越えた原素の越えた分は、その原素より相生関係にあたる 1 つ後の原素を補、＋に治療するのに当てる。これらは 2.3章の七十五難の解説より決定した。これらを図 8に示す。

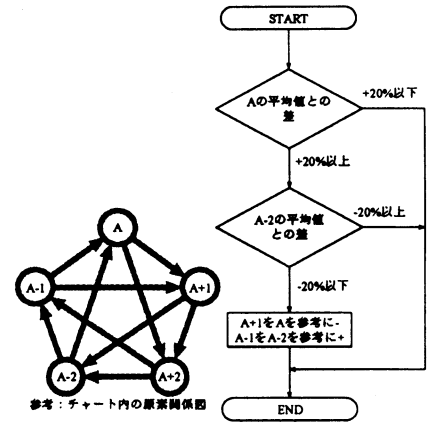


図 8: 七十五難フローチャート

これらの治療法は臨機応変に応用されることを加味しておく。

4 おわりに

この研究は、東洋医学が生まれ育った年月にくらべ、開始してからの年月が非常に浅い。整理した文献でさえ、研究が一歩進むごとにまだ整理されていなかった部分がでてくるなど、非常に奥深いものである。

文献・資料のさらなるさらなる収集・分析を重ね、モデルの修正をおこなっていきたい。また、実際に現場で行なわれている治療法との対比や、応用なども考えたい。

この東洋医学の基礎理念というものは、視野を広げるとその汎用性から応用範囲はかなり大きなものだとおもわれる。さらに、そこから現代にない新しい理論が生まれるかも知れない。

参考文献

[1] 本間 詳白, “鍼灸補瀉要穴之図 説明書附取穴論”, 医道の日本社 (1941)

[2] 蔡 恒息, “易のニューサイエンス”, 東方書店 (1989)

[3] 馬淵 通夫, “綜合医学への道”, 地湧社 (1983)

問い合わせ先

〒８０４ 北九州市戸畑区仙水町１－１
Phone & Fax: ＋８１－９３－８８４－３２４５
九州工業大学 工学部 電気工学科 情報工学教室

東原 正和

FD1-1

Aggregation Operatorの性質とクラスタリング

Properties of Aggregation Operators and Clustering

佐藤 美佳*, 佐藤 義治**
Mika SATO, Yoshiharu SATO

* 北海道武蔵女子短期大学
Hokkaido Musashi Women's Junior College
** 北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract- A classification of a given data set by using a structural model, we have developed a generalized fuzzy clustering model [6]. The essential merits of the additive fuzzy clustering models are 1) the amount of computations for the identification of the models are much fewer than a hard clustering model and 2) fewer number of clusters are needed to get a suitable fitness.

In this general class of the clustering model, in which fuzzy aggregation operators are used to define a degree of simultaneous belongingness of a pair of objects to a cluster. We discuss some required conditions for the fuzzy aggregation operators, and show the properties of the relationship between aggregation operators and clustering models. Moreover, the validity of this model is shown by investigating the characteristic feature of the model and numerical applications.

1 はじめに

個体間における類似度関係の構造モデルを仮定し, 類似度データにそのモデルを当てはめることによってクラスターを抽出するクラスタリング手法が提案されている [4]. このモデルにおいてクラスターとはなんらかの共通の性質を有する個体の集まりとして定義される. さらにいくつかの性質を共有するときこれらが類似度に寄与する度合は加法的である, すなわち互いに独立に寄与するものと仮定する. n 個の個体間の類似度を s_{ij} $(i,j=1,2,\cdots,n)$ とするとき, このモデルはつぎのように表現される.

$$s_{ij} \approx \hat{s}_{ij} = \sum_{k=1}^{K} w_k p_{ik} p_{jk}. \tag{1.1}$$

ただし, ≈は右辺と左辺が近似的に等しいことを示す. クラスターの個数は Kとし, $p_{ik} \in \{0,1\}$, $(k=1,\cdots,K)$ であり, w_kはクラスター kが有する性質の相対的顕著さを示す重みである. $\hat{s}_{ij}$はモデルにより推定された類似度を示す. p_{ik}は, 個体 i がクラスター kの性質をもつか否かを表すもので, 0 か 1 の二値をとる. このモデル (1.1) においては, 類似度 s_{ij}を個体 i と個体 jが共通の性質をもつクラスターの重さの和によって説明しようとするものである. 観測データ s_{ij} にこれらのモデルを当てはめるためには

$$\eta^2 = \sum_{i,j=1}^{n} (s_{ij} - \sum_{k=1}^{K} w_k p_{ik} p_{jk})^2$$

を最小にする (w_k, p_{ik}) を推定しなければならない. このときη^2は (w_k, p_{ik}) の関数であるが w_kは実数値をとるのに対し p_{ik}は 0 または 1 の離散値をとる. ここにη^2を最小にする問題の困難さがあり応用上の難点でもあった. そこでこれらのクラスタリングモデルにファジィ理論の概念を導入した一般化ファジィクラスタリングモデルが提案されている [6].

個体を与えられた個数のクラスターに分類する場合, クラスター間の類似度を考慮することはデータの潜在構造をより詳細に表現する上で重要である. クラスター間の類似度は従来の階層的分類や級間分散として k-means 法などで用いられているが, ここではモデルにクラスター間の類似度を示す構造を導入する. ここで導入されたクラスター間の類似度に非対称性を仮定することによって類似度データのもつ非対称性を説明できることが示されている [2]. 従ってこのモデルにおいては分析の対象となる類似度データは必ずしも対称である必要がない. さらに, 二つの個体がクラスターに同時に属する度合を共通帰属度とし, これをある種の演算 (Aggregation Operator) として定義し, これらの演算が満足すべき条件が検討されている [6].

本報告においては, Aggregation Operator の性質を示し, それらの性質がクラスタリングモデルの結果に及ぼす影響を検討する. さらに, モデルの妥当性を検討するため数値例を示す.

2 一般化ファジィクラスタリングモデル

ファジィクラスタリングモデルにおいても, クラスターを“ある性質を共有するものの集まり” と定義し, 二つの個体間の類似度は個体がクラスターに共通に属す度合に依存するものと定義する. 個体がクラスターに共通に属す度合を共通帰属度とし, 個体 i と jの共通帰属度をρ_{ij}で表現したとき, 一般化ファジィクラスタリングモデルをつぎのように定義する.

$$s_{ij} \approx \hat{s}_{ij} = \varphi(\rho_{ij}), \tag{2.1}$$

$$\rho_{ij} = (\rho(u_{i1}, u_{j1}), \cdots, \rho(u_{i1}, u_{jK}), \rho(u_{i2}, u_{j1}), \cdots, \rho(u_{i2}, u_{jK}), \cdots, \rho(u_{iK}, u_{j1}), \cdots, \rho(u_{iK}, u_{jK})).$$

ここに s_{ij}は個体 i と j間の類似度を示し, $0 \leq s_{ij} \leq 1$ とする. u_{ik}は個体 i がクラスター kに属するファジィグレード（帰属度）で一般に分割行列として $U = (u_{ik})$ と表される. また以下の条件を仮定する.

$$u_{ik} \geq 0, \ \sum_{k=1}^{K} u_{ik} = 1. \tag{2.2}$$

すなわち s_{ij}は個体 i と jが各クラスターに属す共通帰属度の関数φ として表されるものとする. このとき, ρがすべてα 倍されるならば, 類似度$\hat{s}_{ij}$もα倍されると考えるのが妥当である. そのため, 関数φ はρに関して 1 次正斉次性の条件を満足しなければならない. すなわち,

$$\alpha\varphi(\rho_{ij}) = \varphi(\alpha\rho_{ij}), \quad \alpha > 0.$$

φ の典型的な関数としてつぎのような関数が考えられる.

$$s_{ij} \approx \hat{s}_{ij} = \{\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{K} w_{kl}\rho^r(u_{ik}, u_{jl})\}^{\frac{1}{r}}, \tag{2.3}$$

ただし, w_{kl}は正の定数であり $0 < r < +\infty$ とする.

$$s_{ij} \approx \hat{s}_{ij} = \{\prod_{k=1}^{K}\prod_{l=1}^{K} w_{kl}\rho(u_{ik}, u_{jl})\}^{\frac{1}{K^2}}. \tag{2.4}$$

(2.4) は以下のような変換ができるため, 本質的に (2.3) となる.

$$\log s_{ij} \approx \log \hat{s}_{ij} = \frac{1}{K^2}\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{K} \log w_{kl}\rho(u_{ik}, u_{jl}).$$

そのため, ここでは (2.3) において $r = 1$ の場合のみを用いることとする.

共通帰属度ρの満たすべき条件はつぎのようである.

1. 境界条件
$$0 \leq \rho(u_{ik}, u_{jl}) \leq 1, \ \rho(u_{ik}, 1) = u_{ik}, \ \rho(u_{ik}, 0) = 0. \tag{2.5}$$

2. 単調性 $u_{ik} \leq u_{sk}, u_{jl} \leq u_{tl}$ ならば
$$\rho(u_{ik}, u_{jl}) \leq \rho(u_{sk}, u_{tl}) \tag{2.6}$$

3. 対称性 $\rho(u_{ik}, u_{jl}) = \rho(u_{jl}, u_{ik})$. (2.7)

条件 1 は, 個体 jがクラスター kに完全に帰属する（個体 j のクラスター kへの帰属度が 1 である）とき個体 i と個体 j が同時にクラスター kに帰属する度合は u_{ik}となり, 個体 jがクラスター kに全く属さないとき（個体 jのクラスター kへの帰属度が 0 である）ときρ は 0 となることを示す. 条件 2 は, 個体 s と t がクラスター kと lに属する度合が大きければ大きいほど, 個体 s と t が共に属する度合も大きくなることを示す. さらに, 条件 3 は, 個体 i と j のクラスターに属する度合は個体 j と i の度合と等しいことを意味する. 特に, T-ノルム（[1],[5]）は上記の条件を満足する.

本報告では, Aggregation Operator として良く知られているつぎの関数を共通帰属度関数として定義し, それらを用いたモデルの当てはめを行なう.

- Minimum
$$\rho(u_{ik}, u_{jl}) = \min(u_{ik}, u_{jl})$$

- 代数積
$$\rho(u_{ik}, u_{jl}) = u_{ik}u_{jl}$$

- Hamacher 積
$$\rho(u_{ik}, u_{jl}) = \frac{u_{ik}u_{jl}}{p + (1-p)(u_{ik} + u_{jl} - u_{ik}u_{jl})}$$

- Einstein 積
$$\rho(u_{ik}, u_{jl}) = \frac{u_{ik}u_{jl}}{2 - (u_{ik} + u_{jl} - u_{ik}u_{jl})}$$

3 共通帰属度の性質

$[0,1]\times[0,1]$ の直積空間をΠとし, 条件 (2.5), (2.6), (2.7) を満足する関数の族をΦとするとき, $\forall(u_a, u_b)$, $\forall(u_c, u_d) \in \Pi$, $\forall\rho_1, \forall\rho_2 \in \Phi$について

$$\rho_1(u_a, u_b) > \rho_1(u_c, u_d) \Rightarrow \rho_2(u_a, u_b) > \rho_2(u_c, u_d), \tag{3.1}$$

となるとき, 共通帰属度ρは単調 (狭義) であるとする. 単調な共通帰属度を用いたとき, このモデルの結果はほぼ同様な結果となる. 特に, 順位類似度データに対して, その順位のみを当てはめる場合には, すべて同一の結果が得られる. したがって異なる共通帰属度を定義してもそれらが互いに単調であるならば意味を持たない. そこで本論文で用いたいくつかの共通帰属度関数の単調性について検討する. 図 3.1 は 2 変数 x, yに関する$\rho(x, y)$ の曲面を表す. これらの曲面はいずれの場合においても, $x = y$に関して凹であり $x + y = 1$ に関して凸となるが, その凹凸の度合が異なっている.

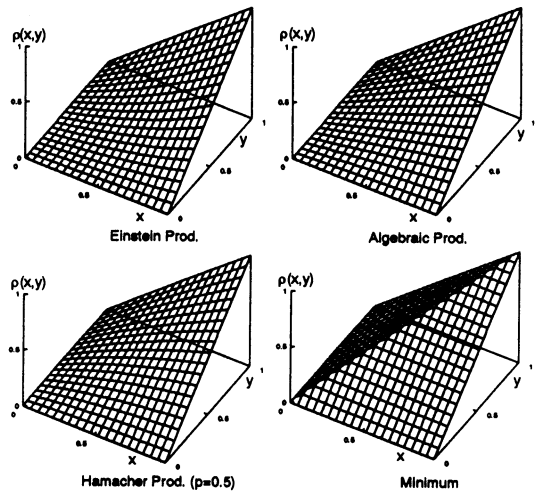


図 3.1 Aggregation Operator の曲面

図 3.2 は、二つの共通帰属度関数について点 (x,y) に関する増減関係を調べたものであり，

$$\{(x,y)|\quad (0.0,0.0),(0.0,0.1),\cdots,(0.0,1.0),\\ (0.1,0.0),(0.1,0.1),\cdots,(0.1,1.0),\\ \cdots\cdots\\ (1.0,0.0),(1.0,0.1),\cdots,(1.0,1.0)\}$$

の 100 組の (x,y) について$\rho_1(x,y)$ と$\rho_2(x,y)$ の値をプロットしたものである．これらの図において横軸はρ_1を示し，縦軸はρ_2である．(A) は共通帰属度ρ_1が Minimum 関数であるとき，ρ_2としてそれぞれ代数積，Einstein 積，Hamacher 積 $(p=0.1)$ としたときの (ρ_1,ρ_2) を示したものである．(B), (C), (D) はそれぞれρ_1を代数積，Hamacher 積，Einstein 積としたときの結果である．図 3.2 より，これらの共通帰属度 ρは (3.1) の条件を満たさず非単調であることがわかる．

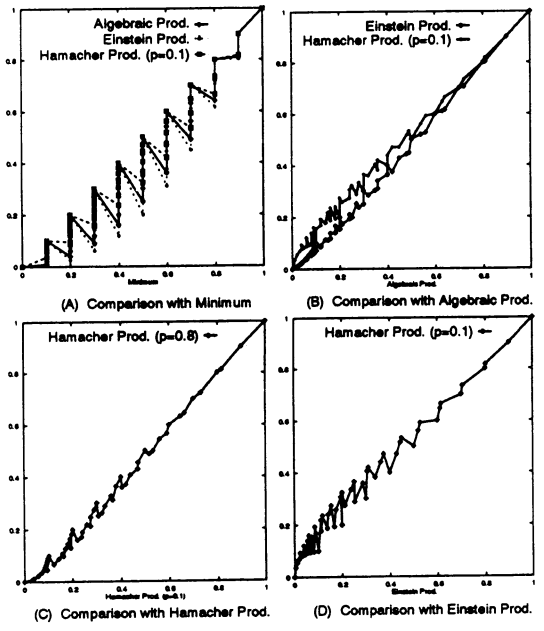


図 3.2 Aggregation Operator の比較

4 ロバスト性

観測データにモデルを当てはめる場合，データが真の構造から多少ずれていても結果はそれに応じたずれの範囲で求まり，大きくずれることはないというロバスト性が重要である．そこで前節において提案したいくつかのファジィクラスタリング手法におけるロバスト性を検討するためにシミュレーション実験を行なった．

(手順 1) 帰属度を与える分割行列 Uの初期値を一様疑似乱数で与え $s_{ij}=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\rho(u_{ik},u_{jl})$ より $S=(s_{ij})$ を計算する．

(手順 2) 疑似乱数により誤差ΔSを発生し

$$\tilde{S}=S+\Delta S$$

を計算する．

(手順 3) $\tilde{S}$を類似度データと見なしてファジィクラスタリングモデルの手法を適用し，分割行列 U^*を求める．

(手順 4) $S,\tilde{S}$, および U^*を用いて以下の式を計算する．

$$\varepsilon_s^2\equiv\frac{\sum_{i\neq j=1}^{n}(s_{ij}-\tilde{s}_{ij})^2}{n(n-1)}. \tag{4.1}$$

$$\varepsilon_{u,w}^2\equiv\frac{\sum_{i\neq j=1}^{n}(s_{ij}-s_{ij}^*)^2}{n(n-1)},\ s_{ij}^*=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\rho(u_{ik}^*,u_{jl}^*). \tag{4.2}$$

ここに $s_{ij},\tilde{s}_{ij},u_{ik}^*$は，行列 $S,\tilde{S},U^*$の要素である．また (4.1) は真値とデータの平均二乗誤差を表し，(4.2) は真値と推定値との平均二乗誤差を表す．

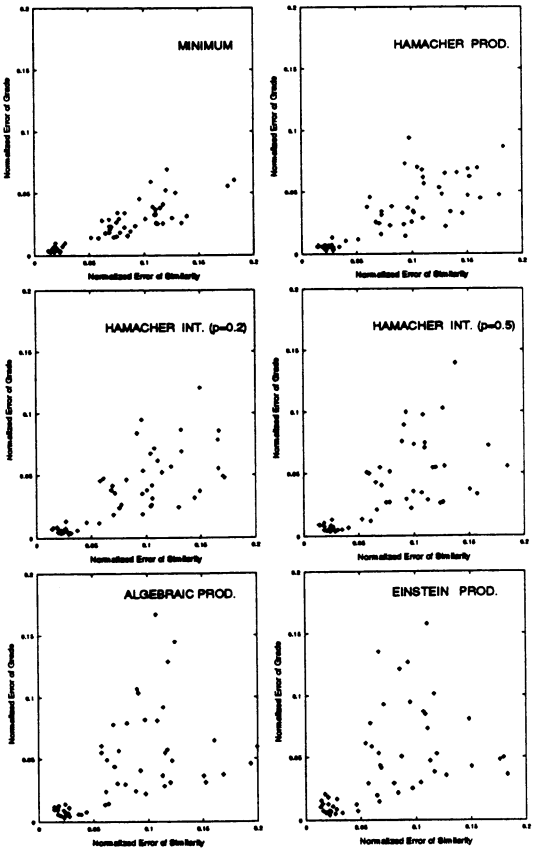


図 4.1 クラスタリングモデルのロバスト性

上記のシミュレーション手順を個体数 $n=15$ とし，60 回繰り返した結果を図 4.1 に示す．この図において横軸は真値とデータの平均二乗誤差を示し，縦軸は真値と推定値との平均二乗誤差を表す．これらのシミュレーション結果から，推定値の平均二乗誤差がデータの平均二乗誤差の範囲におさまることによりモデルのロバスト性が検証できる．また，minimum 演算を用いたモデルが最もロバスト性をもつことが示されている．さらに，Hamacher 積を用いたモデルが代数積を用いたモデルよりもロバスト性が優れていることがわかる．

5 数値例

モデル (2.3) の適用例を示すために, 表 5.1 に示すデータ [3] を用いた. この表は 16 人の子供間の人間関係を示し, 1〜7 は男の子を表し, 8〜16 は女の子である. データの値は子供間における好き嫌いの度合を表す. 値が小さいほど仲が良い関係を示すため, 各値は非親近度（非類似度）と見なされる. 提案した手法は類似度データを対象とするためこの非類似度 (d_{ij}) を $s_{ij} = 1 - d_{ij}/d_{\max}, (d_{\max} \equiv \max_{i,j} d_{ij})$ により類似度 (s_{ij}) に変換する. また人の好き嫌いの度合は必ずしも対称であるとは限らず, 非対称な類似度の典型的な例であり, 表 5.1 からその様子がうかがわれる. このようなデータに対してはモデル (2.3) におけるクラスター間の類似度を表す w_{kl}が重要な役割を果たす.

最適化アルゴリズムにおいては $[0,1]$ 上の一様疑似乱数を用いて 20 組の初期値を与え, その中で適合度の最良のものを採用した. クラスター数の増加に伴い適合度の値は減少するが, クラスター数を 5 より増加させてもそれほど適合度が減少しない. したがって, できるだけ少数のクラスターに分類するという立場から, クラスター数は 5 とした. 分析の結果, このデータの場合 Hamacher 積 $(p = 0.0)$ を用いたときが最も良い当てはまりとなることがわかる. Hamacher 積において p の値に関して共通類似度の値は単調ではないことより非適合度の値も単調にはならない. 表 5.2 は Hamacher 積において $p = 0.0$ の場合の結果を示す. C_1, C_2, C_3, C_4, C_5は, 5 つのクラスターを示し, 各値は子供が各クラスターへ属するファジィグレードを示す. さらに, η^2は非適合度の値である. クラスタリングの結果より, 同じクラスターにはいる子供は互いに仲が良いことがわかる. 特に, C_1と C_2のクラスターは, 少年だけから構成され, C_3, C_4, C_5は少女のみから成る. さらに, w_{kl}はクラスター間の関係を示す. 例えば, 表 5.2 において w_{25}の値が大きいため, クラスター C_2の子供はクラスター C_5の子供に関心があることがわかる. 一方, w_{52} の値が小さいため, C_5は C_2にそれほど興味がないと解釈できる.

6 結論

観測値が類似度あるいは非類似度で与えられる場合のファジィクラスタリング手法として提案されている一般化ファジィクラスタリングモデルにおいて, 個体対があるクラスターに共通に属する度合は Aggregation Operator を用いて定義される. これらの Operator の満たすべき条件から, その性質を検討した. Aggregation Operator は特殊なものとして T−ノルムを含むが必ずしも結合的である必要はない.

さらにこのモデルにおけるロバスト性をシミュレーション実験によって検証した.

表 5.1 子供間における非類似度

子供	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	2	3	3	1	1	2	1	3	6	2	3	6	4	6	4
2	6	0	1	1	6	6	6	6	1	6	6	2	6	2	6	2
3	6	1	0	2	6	6	6	6	1	6	6	1	6	2	6	2
4	6	1	2	0	6	6	6	6	1	6	6	2	6	1	6	2
5	1	3	3	4	0	1	1	2	4	6	3	3	6	4	6	4
6	1	3	2	4	1	0	2	2	3	6	3	2	6	3	6	3
7	1	3	3	4	1	1	0	2	4	6	3	3	6	4	6	4
8	6	1	2	2	6	6	6	0	2	6	1	3	6	3	6	3
9	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6	6	1	6	1	6	1
10	6	2	3	3	6	6	6	2	3	0	1	4	1	4	1	4
11	6	1	2	2	6	6	6	1	2	6	0	3	6	3	6	3
12	6	6	6	6	6	6	6	6	1	6	6	0	6	1	6	1
13	6	2	3	3	6	6	6	2	3	1	1	4	0	4	1	4
14	6	6	6	6	6	6	6	6	1	6	6	1	6	0	6	1
15	6	2	3	3	6	6	6	2	3	1	1	4	1	4	0	4
16	6	6	6	6	6	6	6	6	1	6	6	1	6	1	6	0

表 5.2 Hamacher 積 (p=0.0, $\eta^2 = 0.101093e-03$)

子供	C1	C2	C3	C4	C5
1	0.98	0.00	0.00	0.02	0.00
2	0.00	0.98	0.02	0.00	0.01
3	0.01	0.98	0.00	0.00	0.01
4	0.00	0.98	0.00	0.01	0.01
5	0.98	0.00	0.00	0.02	0.00
6	0.98	0.01	0.00	0.01	0.00
7	0.98	0.00	0.00	0.02	0.00
8	0.03	0.00	0.97	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
10	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
11	0.00	0.00	0.97	0.03	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
15	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

クラスター間の類似度

クラスター	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.83	0.78	0.81	0.00	0.79
C2	0.01	0.82	0.00	0.01	0.81
C3	0.00	0.80	0.88	0.00	0.79
C4	0.00	0.79	0.82	0.82	0.79
C5	0.02	0.00	0.02	0.02	0.82

[1] K. Menger, "Statistical Metrics", Mathematics, Vol. 28, pp. 535-537, 1942

[2] M. Sato, Y. Sato, "Structural Model of Similarity for Fuzzy Clustering", Journal of the Japanese Society of Computational Statistics, Vol.7, (in press), 1994

[3] Y. Sato, "Multidimensional Scaling in Minkowski space", Hokkaido Behavioral Science Report, Series M, No.20, pp. 69-99, 1992

[4] R.N. Shepard, P. Arabie, "Additive Clustering: Representation of Similarities as Combinations of Discrete Overlapping Properties ", Psychological Review, Vol. 86, No. 2, pp. 87-123, 1979

[5] S. Weber, "A General Concept of Fuzzy Connectives, Negations and Implications Based on T-Norms and T-Conorms", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 11, pp. 115-134, 1983

[6] 佐藤 美佳, 佐藤 義治, " 曖昧さを考慮したクラスタリングモデルについて", 日本分類学会 第 11 回研究報告会, pp. 9-16, 1994

[連絡先] 〒 060 札幌市北区北 22 条西 13 丁目
北海道武蔵女子短期大学
佐 藤 美 佳
TEL 011-726-3141
FAX 011-726-3144

Gaussian Clustering and Its Application to Rock Classification

Rui-Ping Li and Masao Mukaidono
Department of Computer Science, Meiji University
Kawasaki-shi 214, Japan

By means of maximum-entropy inference (MEI), a new clustering method which is called Gaussian Clustering (GC) is exploited. The resulting formulas have more beautiful forms and clearer physical meanings than those in the fuzzy c-means (FCM) method. The proposed method is applied to a real physical problem -- classification problem of underground rock. The theoretical results are compared with those obtained by geological experts:the grade of coincidence of the two is 97.2%.

Key Words: Gaussian clustering, Maximum-entropy inference, Rock classification.

1. INTRODUCTION

In recent years, fuzy c-means (FCM) method proposed by Bezdek [1] is widely used in data analysis, but a certain lack of clarity remained still in it [2]. To solve those problem, we proposed and proved the Gaussian Clustering (GC) algorithm using maximum-entropy inference (MEI). The resulting formulas have more beautiful forms and clearer physical meanings than those in the FCM method. The proposed method is applied to a real physical problem -- classification problem of underground rock [3]. The theoretical results are compared with those obtained by geological experts:the grade of coincidence of the two is 97.2%.

2. GAUSSIAN CLUSTERING (GC)

As have been mentioned in preceding section, clustering problem may is considered as one of the Maximum-Entropy Inference (MEI) problem as follows:

$$maximize\left\{-\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}\, log(u_{ik})\right\}, \qquad (1)$$

subject to:

$$0 \le u_{ik} \le 1 \qquad \forall\, i,\, k; \qquad (2a)$$

$$0 < \sum_{k=1}^{N} u_{ik} < N \qquad \forall\, i; \qquad (2b)$$

$$\sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1 \qquad \forall\, k. \qquad (2c)$$

$$L = \sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{c} u_{ik} \cdot d_{ik}^{2}. \qquad (2d)$$

Where, (2*c*) is called normalization condition, eqn (2*d*) is loss function defined by us (here, $L>0$, is expected to be smal as possibe); $d_{ik} = \| \mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i \|$, and $\| \cdot \|$ denotes inner product; N is the number of patterns, c is the number of clusters; $\mathbf{x}_k$ denotes the vector which represents the k-th pattern; $\mathbf{v}_i$ is the vector which defines the centrid of the i-th cluster (or, prototype); u_{ik} denotes the grade of membership which the k-th pattern belongs to the i-th cluster. Using Lagrangian multipliers method, the following proposition was proved:

Proposition 1. Assume that the N unlabeled data pairs (patterns) are given and c is fixed ($2<c<<N$).

1) If the membership assignments $\{u_{ik}\}$ are fixed, then the centroid vectors $\{\mathbf{v}_i\}$ are solutions which minimize locally eqn (2*d*) if and only if

$$\mathbf{v}_i = \sum_{k=1}^{N} u_{ik}\, \mathbf{x}_k \,/\, \sum_{k=1}^{N} u_{ik} \qquad \forall\, i\,. \qquad (3)$$

2) If the centroid vectors $\{\mathbf{v}_i\}$ are fixed, then the membership assignments $\{u_{ik}\}$ which satisfy eqn (1) and eqn (2*a*)-(2*d*) are just Gaussian distributions as follows

$$u_{ik} = e^{-\frac{d_{ik}^2}{2\sigma^2}} / \sum_{j=1}^{c} e^{-\frac{d_{jk}^2}{2\sigma^2}} \quad \forall\ i,\ k. \qquad (4)$$

Where the parameter σ is Lagrangian multiplier determined by eqn (2d), called the *admissible error radius* in this paper. It is well-known that, $2\sigma^2$ is called the "temperature" in statistical physics. We can find the optimal value of σ (for fixed c, to find the global minimization of L in eqn (2d)) by simulated annealing method [4]. So, GC algorithm is composed of two steps:

STEP 1 calculate the loss function $L(c)$ for fixed c. It is therefore necessary to find the global minimization of L in eqn (2d).
STEP 2 determine the plausible number of clusters by varying c.

STEP 1 is done according to *proposition 1*, and in STEP 2, a new clustering criterion, structure strength ($S\,S$) function [2]-[3] is used as follows:

$$SS(c) = (1-\alpha)E + \alpha A$$
$$= (1-\alpha)\log(N/c) + \alpha \log(L(1)/L(c)). \qquad (5)$$

Where $L(1)$ is the variance of the entire data, i.e., the value of loss function as $c = 1$, and $\alpha \in [0,1]$ presents the "weight" of the classification accuracy. In unbiased estimation, we make $\alpha = 0.5$.

GC algorithm:
1) Compute $L(1)$. Fix $\sigma > 0$, $\epsilon > 0$, α, C, T, Δ, δ and $S(1)$.
2) For $c=2,3,\ldots,C$. Initialize $u_{ik} \in [0,1]$ at random for each i, k. For $t=1,2,\ldots,T$.
3) Calculate $\{v_i(t)\}$ using (3) and $\{u_{ik}\}$.
4) Update $\{u_{ik}(t)\}$ using (4) and $\{v_i(t)\}\}$.
5) IF $max \parallel u_{ik}(t)-u_{ik}(t-1) \parallel > \epsilon$ next t;
ELSE calculate $S(c)$ using (5).
6) IF $SS(c)<SS(c-1)$ or $\exists i$ $max_k(u_{ik}) < \Delta$, or $\exists i \neq j$ $\parallel v_i - v_j \parallel < \delta$ stop; ELSE next c.

3. An Application to Rock Classification

The geological survey is important task for construction of large buildings. Traditionally, the geological survey implicates that make an "boring" investigation at many places, and then use these data to infer structures of strata. The reasoning of the properties of rock of each stratum and the structures of strata are done on the base of knowledge and experience of geological experts. Rock can be classified many types according to their process of formation, roughly, *igneous rock* (IR), *volcanic clastic rock* (VCR) and *sedimentary rock* (SR). The feature parameters (variables) for classification are commonly selected by geological experts corresponding to the place of geological survey. Traditionally, the selected feature variables are five: *pyroclastic ratio* (f_1), *average grain size* (f_2), *color index* (f_3), *clastic deposit quantity* (f_4) and *phenocryst quantity* (f_5).

We used GC algorithm to implement such tasks instead of geological experts with $\sigma = 0.7$, $\epsilon = 0.001$, $\alpha = 0.5$, $\Delta = 0.8$ and $\delta = 0.1$. The data used is called the Rock Data, in which the number of data $N=144$, and the number of feature variables $p=5$ [3]. Although we only obtained five clusters (it was classed six clusters), the *grade of coincidence* of two methods achieved 97.2%, because the number of "members" which belong to the cluster which do not occur in our results. Moreover, by GC algorithm, we can find the hierarchical structure of these rocks. It is implant to infer structures of strata and extract features of rocks.

4. DISCUSSIONS

In this paper we have reported GC method and its application to rock classification. One of our future works will be study on selection of feature variables.

REFERENCES

[1] J.C. Bezdek, Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, *New York, Plenum*, 1981.
[2] R.P. Li and M. Mukaidono, "A maximum-entropy approach to fuzzy clustering", *FUZZ-IEEE/IFES'95*, pp. 2227-2233, 1995.
[3] R.P. Li, *Rule learning based on fusion of fuzzy logic and neural networks*, Ph.D thesis, Meiji University, 1994.
[4] S. Geman and D. Geman, "Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of image", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-6, pp. 721-741, 1984.

REFERENCE:
Address: 201 Fuji Mansion, 6-18 Iizuka 1-chome, Kawaguchi-shi, Saitama-ken, 332, Japan
Telephone Number: (Home) +81-48-254-4506
E-mail: li@cs.meiji.ac.jp

FD1-3

ファジィクラスタリングによるファジィルールの生成
An Auto-generation of Fuzzy Rules by Fuzzy Clustering

山田恒嗣　亀井且有　井上和夫
Koji Yamada　Katsuari Kamei　Kazuo Inoue

立命館大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

Abstract- This report deals with an auto-generation of fuzzy rules by fuzzy clustering. It is hard to produce the most suitable fuzzy rules because a method for extracting from experts is ad hoc based on experience and knowledge. In this paper, we propose an auto-generation method of fuzzy rules by fuzzy clustering based on expert's operational data. Finally we compared the control results by our method with that by human- tuned method and expert's operation.

1. はじめに

非線形で不安定な制御対象に対して，熟練者は豊富な知識と経験を利用して適確な制御を行う．近年，熟練者に変わりこれらの制御対象をコンピュータに制御させようとする研究が盛んに行われている．このような研究の一つにファジィ理論を適用したファジィ制御がある．ファジィ制御の核となるファジィルールは，熟練者の豊富な知識と経験をいくつかのクラスターにファジィ分割し，*if-then*形式の推論ルールと [0,1] の無限多値で書かれたメンバーシップ関数からなる．一般的に，熟練者の知識や経験の獲得には困難をともなう場合が多いといわれている．これは，推論ルールの生成やメンバーシップ関数のチューニングを試行錯誤しているところに原因がある．そこで近年，ニューラル・ネットワーク，GAなどを用いてルールの生成やメンバーシップ関数の作成を自動化，簡略化する研究が行われている．

一方，熟練者の制御結果であるオペレータデータは具体的な数値として熟練者の知識や経験を表現している．そこで，これらのデータを最適にファジィクラスタリングすることによってファジィ分割が容易にできると考えられる．また，クラスターの中心をメンバーシップ関数の頂点と考えることによってメンバーシップ関数の作成も容易に行えると考えられる．

本報告ではファジィクラスタリングを用いてオペレータデータからファジィルールを生成する方法について報告する．制御対象に目標線上への自動車の軌道制御を取り上げる．まず，制御対象のシミュレータを作成しオペレータデータを取得する．これらのデータを分析しいくつかの前処理を行いFuzzy *c*-Means(FCM)法を用いてファジィクラスタリングする．推論ルールは分割に用いたクラスター数をルール数として決定する．メンバーシップ関数は各ルール毎のクラスタセンターを頂点と考え，ファジィクラスタリングに用いたデータ点を用いて作成する．そして，作成したファジィルールと試行錯誤しチューニングしたファジィルールの比較，並びに熟練者の行った軌跡との比較，検討を行う．

2. Fuzzy *c*-Means(FCM)法アルゴリズム

FCM法はファジィクラスタリングの代表的な手法の一つであり，クラスタセンターをクラスターの中心と考えファジィ分割を容易に行うアルゴリズムである．その手法は，最初にあるデータ集合をいくつのクラスターに分類するかを決定し，各クラスターの重心ベクトルであるクラスタセンターと呼ばれる値を算出する．次に，ある一つのデータがすべてのクラスターに対してどの程度帰属しているかを帰属度として{0,1}の無限多値で与えるものである．FCM法の特徴に出力結果が安定していることが挙げられる．次に，FCM法のアルゴリズムを示す．

FCM法アルゴリズム

xはn個のp次元データを表し，Xはデータ集合を表す．

$$x=(x_1,x_2,\cdots x_p) \quad (1)$$

$$X=(X_1,X_2,\cdots X_n) \quad (2)$$

また，i番目のクラスターに対するk番目のデータx_kの持つメンバーシップ値はu_{ik}を用いて表す．

$$u_i(x_k):X\rightarrow[0,1] \quad \text{for } \forall x \in X \qquad (3)$$

1)クラスター数c，重みmを設定する．

2)各データの初期メンバーシップ値 $\{U^{(0)}\}$ を与える．

メンバーシップ値はデータがそのクラスターに対してどの程度帰属しているかの度合いを示す．一つのデータに対するメンバーシップ値の和は1.0となるものとする．

$$\sum_{i=1}^{c} u_{ik}=1.0 \qquad \text{for } \forall k \qquad (4)$$

$$0.0\leq\sum_{k=1}^{n} u_{ik}\leq n \qquad \text{for } \forall i \qquad (5)$$

3)クラスタセンターVを求める．

$$v=(v_1,v_2,\cdots,v_p) \qquad (6)$$

$$v_{il}=\frac{\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m x_{kl}}{\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m} \qquad l=1,2,\cdots,p \qquad (7)$$

式(7)はデータの次元ごとにそのクラスターに対するメンバーシップ値で重みをつけて平均した値である．

4)全データに対して新しいクラスターのメンバーシップ値 $\{U^{(b+1)}\}$ を算出する．

3)で求めた新しいクラスタセンターに対して全データのメンバーシップ値を算出する．

$$u_{jk}=\frac{(\frac{1}{d_{jk}})^{\frac{2}{m-1}}}{\sum_{i=1}^{n}(\frac{1}{d_{ik}})^{\frac{2}{m-1}}} \qquad (8)$$

ここでd_{ik}，d_{jk}はデータとクラスタセンター間の距離を表す．

5)メンバーシップ値の変化を求める

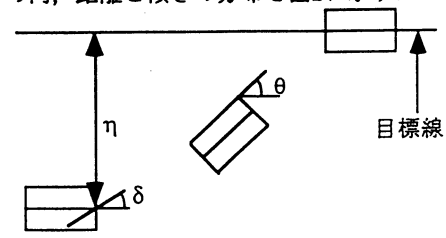
全てのメンバーシップ値の変化を求め，しきい値(e)に収まればクラスタリングを終了する収まらなければ3)に戻り同様に繰り返す．

$$\left|U^{(b)}-U^{(b+1)}\right|<e \qquad (9)$$

3. ファジィクラスタリングを用いたファジィルールの生成

3.1 オペレータデータの取得

対話型のシミュレーターを作成して制御対象のオペレータデータを取得する．図1に走行環境を示す．自動車を操作するとき，自動車と目標線間の距離(η)と目標線に対する自動車の傾き(θ)からそのときにあたえる舵角(δ)がわかる．そこでこれら3種類の値を取得する．また，ファジィルールを生成するときはη，θを前件部の入力変数，δを後件部の出力変数とする．取得したオペレータデータの内，距離と傾きの分布を図2に示す．



η：自動車と目標線間の距離
θ：目標線に対する車の傾き
(進行方向に対して左に傾くと正)
δ：舵角
(進行方向に対して左に切ると正)

図1 走行環境

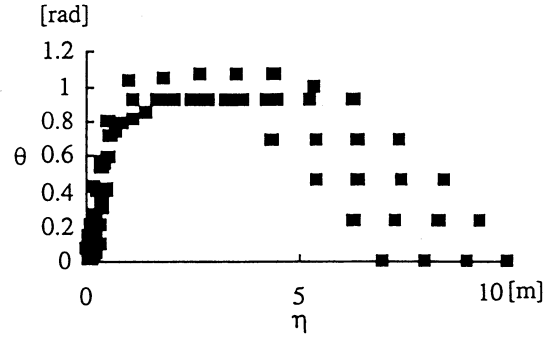
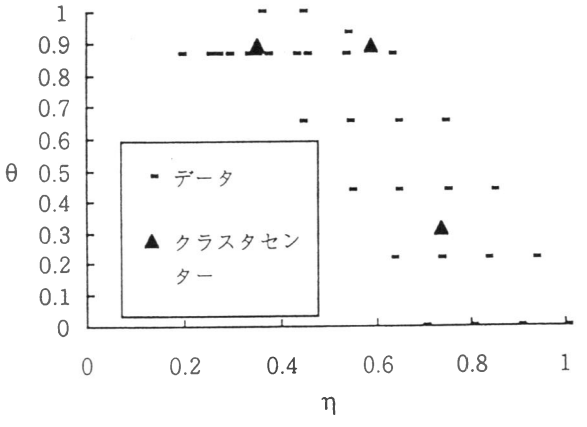


図2 オペレータデータの分布

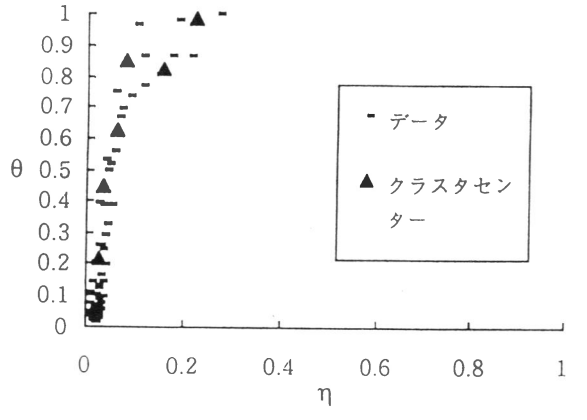
3.2 ファジィクラスタリング方法

図2のデータをFCM法を用いてファジィクラスタリングする．まず，取得したオペレータデータはそれぞれ単位が異なるので最大値が1.0となるように正規化する．オペレータデータは熟練者の知識や経験を表しているため各データ点は意味を有している．しかし，FCM法ではユークリッド距離を用いてファジィクラスタリングするため，異なる意味をもつデータ点が同じクラスターに統合されてしまう可能性が高い．また，制御対象の状況により必要なルール数が変化する可能性もある．そこで，オペレータデータを分析しこのような問題点を解決するために必要ならばデータを分類する．今，正の舵角を有しているデータは目標線に速く近づくことを目的としているため，与える舵角は大まかなものでありパターンも少ない．このような場合，ルールは少なくてよい．これに対して負の舵角を有しているデータは目標線軌道上に乗せる目的があるため，細かな舵角を与えておりあたえる舵角のパターンも多く存在する．このような場合，ルール数は多く必要となる．データ分析の結果，目標線と車との距離と目標線に対する車の傾きにより必要とされるルール数が異なる．そこで，$\delta\geq0.0$となるデータ（デー

タ1）とδ<0.0（データ2）に分類する．さらに，各データ集合を初期位置毎にファジィクラスタリングする．このようにして，各分類したデータにおいて初期位置毎に算出したクラスタセンターをさらにファジィクラスタリングする．図3にそれぞれの最終クラスタリング結果を示す．



a)　データ1のクラスタリング結果(c=3)



b)　データ2のクラスタリング結果(c=6)

図3　最終クラスタリング結果

3.3　ファジィルールの生成

3.3.1　前件部メンバーシップ関数の作成

FCM法では同じデータ点における，各クラスターへの帰属度の比較は可能であるが，同じクラスターに対する各データ点の帰属度比較はFCM法で算出された帰属度では不可能である．そこで新たな帰属度を考えメンバーシップ関数を作成する．まず，各ルールにおけるクラスタセンターをメンバーシップ値が1.0となる値とする．各クラスタセンターに対して最遠傍にあるデータ点のメンバーシップ値を0.0とし，各データ点のメンバーシップ値はそのデータとクラスタセンター間の距離とクラスタセンターが有する最遠傍距離との割合で算出する．入力x_kのルールR_iに対するメンバーシップ値u_{ik}を算出する式を(10),(11),(12)に示す．

$$d_i^m = \max_j \left\| v_i - x_j \right\| \quad \text{for } \forall j \tag{10}$$

$$\alpha_{ik} = \left\| v_i - x_k \right\| \tag{11}$$

$$u_{ik} = \left(1.0 - \frac{\alpha_{ik}}{d_i^m} \right) \vee 0.0 \tag{12}$$

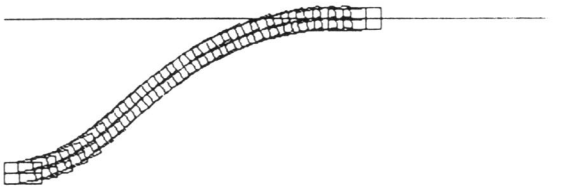
ここで，i：ルール番号，d_i^m：i番目のクラスタセンターが有する最遠傍距離，v_i：i番目のクラスタセンター，x_j：オペレータデータ，x_k：入力データとする．

3.3.2　後件部メンバーシップ関数の作成

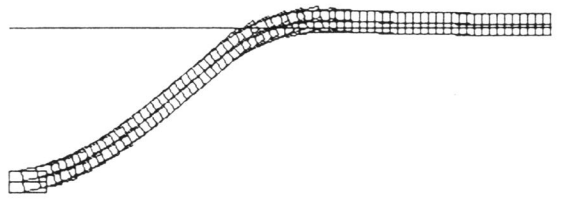
クラスタセンターをメンバーシップ値が1.0となる点とし，隣に存在するクラスタセンターを0.0とする三角形のメンバーシップ関数を構成する．

4. シミュレーション結果

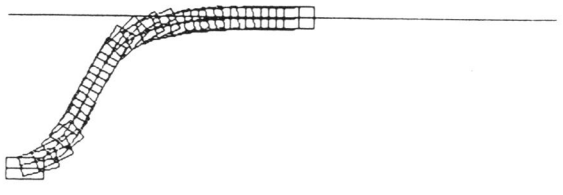
ファジィクラスタリングして生成したファジィルール（ルール1）によるシミュレーション結果を試行錯誤しチューニングしたファジィルール（ルール2）によるシミュレーション結果と比較する．並びにオペレータデータ取得時の軌跡との比較も行う．図4 (a)にη＝10.0m，θ＝0.0radで行った場合を(b)にη＝4.0m，θ＝0.0radで行ったシミュレーション結果を示す．なお，収束条件はηが0.1m以下でかつθが0.03rad以下となった場合とした．



1)ルール1



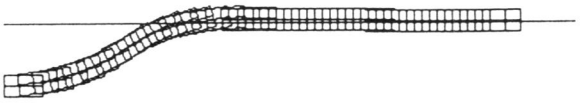
2)ルール2



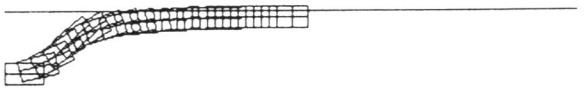
3)オペレータデータの軌跡
(a)　η＝10.0m，θ＝0.0rad



1)ルール1



2)ルール2



3)オペレータデータの軌跡
(b) η＝4.0m, θ＝0.0rad
図4 シミュレーション結果

２つのルールによるシミュレーション結果を比較すると，どちらの初期位置で初めてもファジィクラスタリングして生成したルールの方が目標線に速く移動することができ，目標線を越えることなく制御できている．また，収束条件にいたるまでに移動する距離も短くなっており本手法によって，従来のルールと比較して，良好なファジィルールができたといえる．しかし，オペレータデータ取得時の軌跡と比較すると，初期位置η＝4.0，θ＝0.0としたときは描く軌跡も異なっており収束条件にいたるまでに移動する距離も長くなっている．原因として今回の研究に用いたデータに初期位置η＝4.0，θ＝0.0という条件が存在しなかったことが考えられる．初期位置η＝10.0，θ＝0.0で行った場合，収束にいたるまでに移動する距離はあまり変わらないが異なる軌跡を描いている．異なる軌跡を描いてしまった原因の一つはファジィ分割の数に問題があったためと思われる．オペレータデータを分析すると目標線に近づき軌道上に乗せるとき，すなわちデータ2では，熟練者があたえる舵角は54パターンもあることに比べ,今回は6個のファジィ分割しか行わなかった．ファジィ分割数が適切な数でなかったため熟練者の知識経験が正確に抽出できなかったためと考えられる．

5. おわりに

本研究では，熟練技術者のオペレータデータをファジィクラスタリングしファジィルールを生成する方法を提案した．ファジィクラスタリングし生成したルールと試行錯誤しチューニングしたルール，熟練者の操作した軌跡とを比較・検討した．シミュレーション結果を比較するとファジィクラスタリングし生成したルールは目標線に速く近づくことができ，目標線を越えることなく収束するルールになっている．本手法により従来に比べて，より適確に熟練者の豊富な知識や経験を表現できることがわかった．しかし，熟練者の操作した軌跡と比較するとずれが生じており熟練者の知識や経験が正確に抽出できたとはいえない．

今後の課題として，後件部メンバーシップ関数の作成方法とクラスター数（ファジィ分割数）の決定方法が挙げられる．とくに，本研究におけるクラスター数の決定は試行錯誤的に行ったため個人的な感覚に依存していた．そこで何らかの指標を考え短時間で客観的に決定する方法を検討する．さらに多次元の入出力関係を必要とする制御対象への応用も考える予定である．

参考文献

[1] 菅野道夫：ファジィ制御；日刊工業社 (1988)

[2] 影山克三 他：自動車力学；理工図書 (1984)

[3] R.L.Channon,J.V.dave and J.C.Bezdek "Efficient Implementation of the Fuzzy *c*-Means Clustering Algorithms" IEEE trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence,vol.8,2,pp284-258 (1986)

[4] 廣田薫 吉成有介：ファジィクラスタリングを用いたファジィ制御；第５回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp253-258 (1989)

[5] 安川隆廣 菅野道夫：知識データおよび数値データに基づく定性的システム記述とファジィ制御器設計への応用；日本ファジィ学会誌，vol.6,4,pp720-735 (1994)

連絡先

〒525 滋賀県草津市野路町1916
立命館大学理工学部情報工学科
亀井研究室 山田恒嗣
Tel 0775-67-6632 内線8865
Fax 0775-61-2669
e-mail:yamada@spice.cs.ritsumei.ac.jp

FD1-4

L_1 および L_p 空間にもとづくファジィ c - means アルゴリズムの効率化と停止性

Efficient Algorithms for L_1 and L_p Based Fuzzy c - Means and Their Termination

宮本　定明　　ユーディ　アグスタ†

Sadaaki Miyamoto　　Yudi Agusta†

筑波大学　電子・情報工学系

Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba

†徳島大学大学院　工学研究科

†Graduate School of Engineering, University of Tokushima

Abstract

Efficient algorithms for calculating cluster centers in L_1 and L_p based fuzzy c - means are proposed. The both algorithms are based on one dimensional optimization of each component of a cluster center. The algorithm for the L_p fuzzy c - means uses a method of one dimensional search for a solution of the derivative of a function to be optimized, whereas the algorithm for the L_1 fuzzy c - means utilizes a step function that is an extension of the derivative. Termination of the algorithm in the L_1 case after a finite number of iterations is proved. Numerical examples show that the L_1 fuzzy c - means algorithm is as fast as the ordinary Euclidean fuzzy c-means.

1　はじめに

Bezdek らによる fuzzy c-means [1] はファジィクラスタリングの方法のなかで最もよく知られている。Fuzzy c - means はファジィクラスターの代表点と各個体との距離の差にグレードを重み付けして、グレードに関する最適化を行う最適クラスタリングの一種である。そのアルゴリズムは、グレードと代表点（以下、クラスターの中心という）に関する逐次最適化の繰り返し計算である。

ところで、統計解析における根本的問題点の一つに、基礎となる空間として、ユークリッド空間だけでよいか、あるいは他の空間も考える必要があるのではないか、という議論がある。これまでの研究からみて、少なくとも、ユークリッド空間の他に、マンハッタン空間とも呼ばれる L_1 空間が考察されることが多い。また、ときには、L_1 よりも一般的なミンコウスキー空間 (L_p) が考察されることもある。さらに、L_1 空間の長所として、ユークリッド空間よりも雑音に対する頑健性が高いということも指摘されている。

Fuzzy c - means はユークリッド空間にもとづいているが、L_1 空間にもとづく fuzzy c-means も研究されている [2, 3]。通常の fuzzy c-means アルゴリズムにおいて、クラスターの中心の計算は重心と同様の式で表されるため簡単であるが、L_1 や L_p の場合、中心の計算は簡単ではない。これらの研究で提案されているアルゴリズムは複雑で、アルゴリズムが収束あるいは停止するかどうかの保証はない。

本稿で提案する L_1 and L_p fuzzy c - means algorithms は、効率がよく、かつ停止性が保証されている。ここでの結果は次のように要約できる。

(1) データの順序付けによる 2 種類のアルゴリズムを述べる。1 つは、L_1 のみに利用でき、他方は、より一般的な L_p 空間に利用できる。特に第一のアルゴリズムはユークリッド空間の fuzzy c - means に匹敵する速さをもつ。

(2) これらのアルゴリズムは繰り返し計算の形式をもつが、有限回の繰り返しの後計算が終了することが証明される。

なお、筆者らが既に提案した L_1 fuzzy c-means アルゴリズム [4] よりも、ここで述べるアルゴリズムの方がはるかに効率的である。

2 L_1 および L_p fuzzy c - means

$x=(x^1,...,x^n)\in \mathbf{R}^n$ に対して、ユークリッドノルムを $\|x\|_2$, L_pノルム $(p\geq 1)$ を $\|x\|_p=(\sum_{i=1}^n |x^i|^p)^{\frac{1}{p}}$ で表す。そこで、N個のデータ $x_1,...,x_N$ を c 個のファジィクラスターに分けることを考える。

L_p fuzzy c - means $(p\geq 1)$ を、評価基準

$$J_p(U,v)=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{c}(u_{ik})^m\|x_k-v_i\|_p^p \qquad (1)$$

の (U,v) に関する最適化として定式化する。$p=2$ のとき、式 (2) は通常のユークリッド空間での fuzzy c - means を表す。また、特に $p=1$ のとき、この式は、L_1空間での fuzzy c - means を表している。ここで、$U=(u_{ik})$ は個体 x_k がクラスター i に所属する度合いを表し、vは v_iを並べたもの $(v=(v_1,...,v_c))$ を表す。$U=(u_{ik})$ はファジィ分割を表すと仮定されるので、$0\leq u_{ik}\leq 1$, $1\leq i\leq c$, $1\leq k\leq N$; $\sum_{i=1}^c u_{ik}=1$, $1\leq k\leq N$でなければならない。

Bezdek [1] に従い、(1) の解を求めるための繰り返し計算法を記しておこう。

1. $t=0$ とおき、U を初期化する。これを $U^{(t)}$とおく。

2. $U^{(t)}$を用いて $J_p(U^{(t)},v)$ を最小にする解 $v^{(t)}$:

$$J_p(U^{(t)},v^{(t)})=\min_v J_p(U^{(t)},v)$$

を求める。

3. $v^{(t)}$を用いて $J_p(U,v^{(t)})$ を最小にする解 $U^{(t+1)}$:

$$J_p(U^{(t+1)},v^{(t)})=\min_U J_p(U,v^{(t)})$$

を求める。

4. 収束判定基準$\epsilon>0$ によって、$\|U^{(t+1)}-U^{(t)}\|<\epsilon$ ならば終了。そうでなければ、$t=t+1$ とおいて 2. に戻る。

ステップ 3 における $U^{(t+1)}$の計算は p の値によらず共通の式で表すことができる。便宜上、$U^{(t+1)}$の成分を u_{ik}と書けば、

$$u_{ik}=[\sum_{j=1}^{c}(\frac{\|x_k-v_i\|_p^p}{\|x_k-v_j\|_p^p})^{\frac{1}{m-1}}]^{-1}. \qquad (2)$$

ただし、$x_k=v_i$ となる v_iがあるときは、この性質を満たす i 以外のクラスター jについては $u_{jk}=0$ とし、この性質を満たすすべての i を $i_1,...,i_h$とするとき、

$$u_{i_1k}=...=u_{i_hk}=\frac{1}{h} \qquad (3)$$

ととることにする。

これに対して、ステップ 2 におけるクラスター中心の計算は、$p\neq 2$ の場合簡単ではない。一般の L_p空間では、中心の各成分の一次元探索を行うアルゴリズムが考えられる。しかしながら、$p=1$ の場合、さらに効率のよいアルゴリズムがある。そこで、L_1の場合と L_pの場合とに分けて述べよう。

3 クラスター中心の計算

$x_k=(x_k^1,...,x_k^n)$, $v_i=(v_i^1,...,v_i^n)$ とおく。まず、クラスター中心については、J_p の形から、各座標成分について独立に最適化できることに注意しよう。すなわち、

$$F_\ell(v_i^\ell)=\sum_{k=1}^{N}(u_{ik})^m|x_k^\ell-v_i^\ell|_p^p \qquad (4)$$

とおけば、明らかに

$$J_p(\cdot,v)=\sum_{\ell=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}F_\ell(v_i^\ell). \qquad (5)$$

そこで、簡単のため、$w=v_i^\ell$ と書き、$\min_w F_\ell(w)$ を考える。$F_\ell(w)$ が凸であることは容易にわかるので、この関数が微分可能ならば、$dF_\ell(w)/dw=0$ の解を見いだすことによって、$F_\ell(w)$ の最適解が求められる。

上式は一般の $p(\geq 1)$ について成立するが、当面、$p=1$ と仮定する。このとき、関数 $F_\ell(w)$ は微分できないが、$w=x_k^\ell$ では右側微分係数を用いて、

$$d^+F_\ell(w)=\sum_{k=1}^{N}(u_{ik})^m sign^+(x_k^\ell-w) \qquad (6)$$

を $dF_\ell(w)/dw$の代わりとする。ここで、

$$sign^+(x_k^\ell-w)=\begin{cases}1 & (\ x_k^\ell-w\geq 0\ )\\ -1 & (\ x_k^\ell-w<0\ )\end{cases}$$

と定義する。

$x_1^\ell,...,x_N^\ell$がソートされ、$x_{s(1)}^\ell\leq x_{s(2)}^\ell\leq ...\leq x_{s(N)}^\ell$ と順序付けられているとしよう。$s(1),...,s(N)$ は順序の入れ替えを表すものとする。$F_\ell(w)$ を最小にする w は明らかに $x_1^\ell,...,x_N^\ell$のいずれかに一致する。$w=x_{s(r)}^\ell$ のとき、

$$d^+F_\ell(x_{s(r)}^\ell)=\sum_{k=s(1)}^{s(r)}(u_{ik})^m-\sum_{k=s(r+1)}^{s(N)}(u_{ik})^m \qquad (7)$$

階段関数 $d^+F_\ell(w)$ の符号が変わるときの $w=x_{s(r)}^\ell$ が最適解となるので、次のアルゴリズムが得られる。

```
begin
  S := -Σ_{k=1}^{N} (u_ik)^m;
  r := 1;
  while (S < 0) do
  begin
    S := S + 2(u_{i s(r)})^m;
    r := r + 1
  end;
  r shows the optimal solution
  output v_i^ℓ = x_{s(r)}^ℓ
end.
```

次に、$p>1$ のときについて考えよう。この場合、上の計算法は適用できない。しかしながら、$F_\ell(w)$ は微

分可能であるので、次の2段階による $dF_l(w)/dw = 0$ の解の探索を行えばよい。

(i) $\{x^l_{s(1)}, x^l_{s(2)}, ..., x^l_{s(N)}\}$ 上での2分探索を行い、解 $\bar{w}$: $dF_l(\bar{w})/dw = 0$ が $\bar{w} \in [x^l_{s(r)}, x^l_{s(r+1)}]$ をみたす区間を見いだす。

(ii) 区間 $[x^l_{s(r)}, x^l_{s(r+1)}]$ 上で通常の解の探索（2分探索、ニュートン法など）を行い、$\bar{w}$ の近似解を求める。

4 アルゴリズムの停止性

クリスプな K-means 法でも、第2節に記した繰り返し計算と同様に、(A) 個体のクラスターへの所属性と、(B) 重心の計算、の反復が行われる。また、クリスプな場合、有限回の反復の後計算が終了することが知られている。通常のファジィクラスタリングでもこの停止性あるいは収束性の議論は行われているが、いまだ満足なものではない [5]。

L_1空間での fuzzy c - means の場合、クリスプな K-means 法と同様の結果が得られる。すなわち、第2節に記した繰り返し計算が有限回の反復の後終了することが証明される。このことを以下に示そう。

準備のため、

$$\Pi = \{y = (y^1, ..., y^n) \mid y^j \in \{x^j_1, ..., x^j_N\}\}$$

とおく。上の議論から、最適解は、$v^{(t)} \in \Pi^c, t = 0, 1, ...,$ を満たすことがわかる。そこで、アルゴリズムが停止するためには、t が変化するとき、$v^{(t)}$ が有限集合Π^cの同一の要素にはならないことを示せばよい。このことが示されれば、最大反復回数は、高々$|\Pi^c|+1$ 回（$|\Pi^c|$ はΠ^cの要素数）であることがわかる。いま、繰り返しの構造から明らかに、

$$J(U^{(t)}, v^{(t-1)}) \geq J(U^{(t)}, v^{(t)}) \quad (8)$$
$$J(U^{(t)}, v^{(t)}) \geq J(U^{(t+1)}, v^{(t)}) \quad (9)$$

が成立する。そこで、

$$J(U^{(t)}, v^{(t-1)}) = J(U^{(t)}, v^{(t)}) \iff v^{(t-1)} = v^{(t)} \quad (10)$$
$$J(U^{(t)}, v^{(t-1)}) > J(U^{(t)}, v^{(t)}) \iff v^{(t-1)} \neq v^{(t)} \quad (11)$$

が満たされるように最適解 $v^{(t)}$ をとることを考える。

この条件が成立すれば、有限回の反復の後計算が終了することがわかる。いま、式 (10) が成立したとしよう。このとき、

$$J(U^{(t+1)}, v^{(t)}) = \min_U J(U, v^{(t)})$$
$$= \min_U J(U, v^{(t-1)}) = J(U^{(t)}, v^{(t-1)})$$

が成り立つ。式 (2),(3) によって、最適解は一意であるから、このとき

$$U^{(t+1)} = U^{(t)}$$

となり、解が収束するので、計算は終了する。

(10) が成り立つと終了することがわかったので、次に、(11) が成立しているとしよう。この式が満たされる限り、任意の $t-1, t' \geq 0$, $t-1 \neq t'$, について $v^{(t-1)} \neq v^{(t')}$が成り立つ。なぜなら、$t-1 < t'$ かつ $v^{(t-1)} = v^{(t')}$と仮定すれば、

$$J(U^{(t)}, v^{(t-1)}) > J(U^{(t)}, v^{(t)}) \geq ...$$
$$\geq J(U^{(t')}, v^{(t')}) = J(U^{(t')}, v^{(t-1)})$$
$$\geq J(U^{(t)}, v^{(t-1)})$$

となり、矛盾が生じるからである。このように、(10) が起こらない限り、最適解 $v^{(t)}$は、有限集合Π^cの各要素の値を、高々1回しかとらないことがわかった。

(10) と (11) を成り立たせるためには、第3節で述べた中心の計算アルゴリズムを少し変更すればよい。次のアルゴリズムは、基本的に前のものと同じ計算を行っているが、第2節の反復計算における一つ前の最適解 ($\bar{v}$ と書く) と新しい最適解の集合を調べ、前の最適解が新しい解の集合に入っているならば、新しい最適解として、前の解$\bar{v}$を優先的に出力する。

```
begin
  S := -Σ_{k=1}^{N} (u_ik)^m;
  r := 1;
  while (S < 0) do
  begin
    S := S + 2(u_is(r))^m;
    r := r + 1
  end;
  W := ∅;
  while (S = 0) do
  begin
    r := r + 1
    S := S + 2(u_is(r))^m;
    W := W ∪ {x^l_s(r)}
  end;
  W := W ∪ {x^l_s(r)};
  if v̄^l_i ∈ W then output v̄^l_i
  else choose any y ∈ W and output y
end.
```

第3節のアルゴリズムでは、(10) が成立する保証がないので、評価関数の値が減少しなければ、このように最適解を変えない工夫が必要である。

なお、アルゴリズムの停止性、あるいは収束性については、ファジィ最適クラスタリングに関して有限回の反復の後アルゴリズムが停止するという結果は他には未だ報告されていない。また、$p \neq 1$ の場合の L_p空間の fuzzy c-means アルゴリズムについて、L_1の場合のような停止性の議論を行うことも可能であるが、ここでは省略する。

5 数値例

座標平面の原点を左下隅とし、一辺が単位長の正方形があると考える。この正方形の頂点を左上から時計回りに A, B, C, D とする。この正方形を x 軸と 45 度の角度をなす直線にそって右上に移動し、左下の頂点座標が $(1-a, 1-a)$, $0 < a < 1$, となるようにする。移動された正方形の頂点を左上から時計回りに E, F, G, H とする。正方形 $ABCD$ と $EFGH$ が交わる点の左上を P、右下を Q とする。このように、正方形2つが重なった領域 $APEFGQCD$ ができる。この領域上に、(A) 1,000 個の点を領域上の一様分布によってランダムにばらまいた場合、および、(B) 10,000 個の点を同様にランダムにばらまいた場合、について、これらの点を個体として、2つのクラスターに分けることを試みる。

試行は、(A),(B) それぞれについて 10 回づつ行った。その結果得られた2つのファジィクラスターを $\alpha = 0.5$ で強 α-カットし、2つのクリスプなクラスターとして適切に分類されているかを調べた。上に述べた領域は PQ に線分を加えることで左下と右上の2つの部分に分かれる。2つのクリスプなクラスターが、これら2つの部分にちょうど一致するならば、誤分類なし、とし、右上の部分に存在する点が左下の領域の点と同じクラスターにはいる場合、およびその逆の場合に、これらの点を誤分類された個体と定義している。

表1は、2つの正方形が重なる程度を表すパラメータ a を変えたときの、成功数、誤分類の平均数、反復回数（10 回のうちの max）を示している。分類の成功と失敗との判断は、誤分類が 10%以下か否かであるが、実際には、成功時には 1%に満たなかった。

次に、この例について、L_1ファジィクラスタリングと通常のユークリッド空間に基づくファジィクラスタリングとの結果を比較した。両者の CPU time（ただし、一回の $v^{(t)}$ と $U^{(t+1)}$ の計算に要する）と反復回数との比較結果を表2に示す。2つのクラスタリングの方法では、基礎となる空間が異なるので、結果の優劣を定めることは簡単ではない。しかしながら、ここでの L_1ファジィクラスタリングアルゴリズムが通常の fuzzy c-means と同程度の計算時間をもち、反復回数の点では、通常のものよりもやや勝ることが示されている。なお、誤分類の点では、両者に殆ど差はなかった。

表 1: $a = 0.1, 0.2, 0.3$ に対する 10 回のクラスタリングのうちの成功数 (succ.)、誤分類の平均数 (miscl.)、反復回数 (iter.)

$n = 1,000$			
a	succ.	miscl.	iter.
0.1	7	1.7	11
0.2	9	3.2	10
0.3	8	2.4	11
$n = 10,000$			
a	succ.	miscl.	iter.
0.1	8	10.0	12
0.2	9	16.0	14
0.3	10	27.2	14

表 2: L_1 空間の FCM と通常のユークリッド空間の FCM との CPU time の比較 (それぞれ TL_1,TE) および反復回数の比較 (それぞれ IL_1,IE)

$n = 1,000$				
a	TL_1	TE	IL_1	IE
0.1	0.0697	0.0737	11	19
0.2	0.0700	0.0738	10	21
0.3	0.0712	0.0722	11	24
$n = 10,000$				
a	TL_1	TE	IL_1	IE
0.1	0.722	0.721	12	26
0.2	0.720	0.721	14	23
0.3	0.723	0.721	14	28

参考文献

[1] J. C. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum, 1981.

[2] L. Bobrowski and J. C. Bezdek, c-means clustering with the l_1 and l_∞ norms, *IEEE Trans. SMC*, 21, 3, 545-554, 1991.

[3] K. Jajuga, L_1 - norm based fuzzy clustering, *Fuzzy Sets and Systems*, 39, 43-50, 1991.

[4] 宮本, ユーディ・アグスタ, L1 距離によるハードクラスタリングとファジィクラスタリングのアルゴリズムの効率化, 第 10 回ファジィシステムシンポジウム, 575-580, 1994.

[5] R. J. Hathaway, J. C. Bezdek, and W. T. Tucker, An improved convergence theory for the fuzzy c-means clustering algorithms, in J. C. Bezdek, ed., *Analysis of Fuzzy Information, Vol.III*, 123-131, CRC Press, 1987.

連絡先
〒305 つくば市天王台 1-1-1
筑波大学電子・情報工学系
宮本 定明
TEL:0298-53-5346
FAX:0298-53-5206

FD2-1

ファジィ構造化ニューラルネットによる需要量長期予測

A Long-term Demand Forecast by Fuzzy Structured Neural Networks

清水　透
Tohru SHIMIZU
NEC 機能エレクトロニクス研究所
NEC Functional Devices Research Laboratories

山本　茂史
Shigeshi YAMAMOTO
NEC 情報システムズ
NEC Informatec Systems,Ltd

Abstract: This paper proposes a log-range demand forecast method based on fuzzy structured neural networks, which can identify min-operation and trapezoid membership functions fuzzy rules. The feasibility is examined applying to water demand prediction previous to a month for water supply system.

1．はじめに

上水道配水制御システムは、その公共性の高さから、安定な供給と共に、省エネルギー、省力化など経済性、信頼性、運用性等が求められている。一方、近年、水源利用形態の多様化、機器構成の複雑化により、高度な運転技術が必要となり、熟練運転員に匹敵する、高効率運転の自動化が望まれている。この自動化を実現するには、水需要量を的確に予測し、予測量に基づいて、制御・運用を行う必要がある。

先に我々は、ファジィ構造化ニューラルネット（F.N.N.）を用いて、時間単位での１日先の上水道の配水量予測[1]を行った。今回、より長期の配水運用計画をたてる際の指針となる、日単位での配水量総和の１ヶ月先までの予測を検討したので、その報告を行う。

2．ファジィ推論手法

本F.N.N.が対応するファジィ推論は、AND演算はmin演算、後件部は実数とし、ルールr(r=1,･･･N)におけるメンバーシップ関数（M.F.）を$Ar_1, Ar_2, \cdots, Ar_m$、後件部実数をWrとすると、入力x1,x2,･･･,xmに対する出力yは、次式で求まる。

$$\mu r = \min\left(Ar_1(x_1), Ar_2(x_2), \cdots, Ar_m(x_m)\right)$$

$$y = \sum_{r=1}^{N} \mu r \cdot Wr \Big/ \sum_{r=1}^{N} \mu r$$

ここで、$Ar_j(x)$は、直線と、関数Fl(x)で表される。

$$\begin{cases} y = a_{rj} \cdot x + b_{rj} \\ Fl(y) = \min(\max(y, 0.0), 1.0) \end{cases} \qquad Ar_j(x) = Fl(y)$$

また、"中"のような台形型M.F.は、二つのM.F.の差をとることでその形状を表現する。

3．ファジィ構造化ニューラルネットワーク

本F.N.N.の構造を、図１に示す。この場合は、2入力1出力、M.F.のラベル数３である。本ネットワークは、以下の点が、通常のニューラルネットワークと異なる。

- ○印の各ユニットが１機能（Ⓢ:入力の和を出力、Ⓟ:入力の積を出力、Ⓧ:入力の逆数を出力、○:入力を出力、□:常に１を出力）を持つ。
- ◇印の各ユニットは、図２、３に示すmin演算ネットワークとmax演算ネットワーク[2]により構成される。（Ⓕ:入力を関数Fl(x)=min(max(x,0.0),1.0)で変換、Ⓜ:入力のminを出力）
- 変化しない結合重みがある。（図１で太線のリンク【W_a、W_c、W_a】の重みのみが変化）

最急降下法により、W_a、W_c（M.F.の傾きと位置）、W_a（後件部定数）の学習を行う。

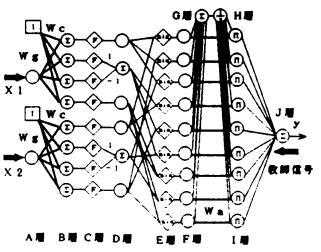


図1:ファジィ構造化ニューラルネットワーク

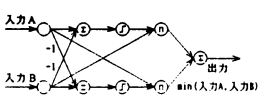


図2:min演算ネットワーク

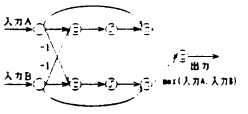


図3:max演算ネットワーク

4．配水量予測手法

4.1　入出力関係

システムの制約から、小規模の学習データから予測値の算出を可能とする方式とする。上水道配水量は、気温、天気、曜日、季節等に影響されると考えられ、それらの関係をF.N.N.にモデリングする必要がある。気温、天気は、気象庁の長期予報により日単位での向こう１ヶ月の予想が得られるものとして、以下の方法による予測の検討を行った。

方法１：絶７法（絶対値出力、７入力１出力）

【入力】：m月n番目のα曜日（「当日」と称す）の日総配水量、　当日の天気、　当日の最高気温、当日の最低気温、　（m＋１）月n番目のα曜日（「予測日」と称す）の予想天気、　予測日の予想最高気温、予測日の予想最低気温

【出力】：予測日の日総配水量

m=1～12　n=1～4　α=日,月,火,水,木,金,土

方法２：差７法（差分値出力、７入力１出力）

絶７法において、出力を、日総配水量の当日と予測日の差分値とした方法

方法３：絶３法（絶対値出力、３入力１出力）

絶７法において、温度に関する入力４つを削除した方法

方法４：差３法（差分値出力、３入力１出力）

絶３法において、出力を、日総配水量の当日と予測日の差分値とした方法

温度情報を省いた方法３、４を検討する理由は、１ヶ月先の予想温度の信頼性があまり高くないことと、入力の数を減らすことが可能となるからである。

4.2　天気情報数値化

天気の情報は、感覚的に、天候が良い方が小さく、悪くなるにつれ大きくなるように数値化を行う。すなわち、基

本となる天気の数値の設定として、上限を"大雨"、下限を"快晴"とし、それぞれの値を0.99、0.01と定め、基本となる天気カテゴリーを、"晴"、"曇"、"雨（霧雨、雪）"とし、それぞれの値を0.05、0.5、0.95とする。気象庁発表の天気情報の中には、"後"、"時々"等、各天気カテゴリーを接続する表現が存在する。それらを含む場合の数値化は、以下の式により行う。

A後B ＝ （A＋B）／2

A時々（一時）B ＝ （A＋A後B）／2

A後時々B ＝ （A＋A時々B）／2

A時々B後C ＝ （A時々B＋C）／2

A後B時々C ＝ （A＋B時々C）／2

A時々B時々C ＝ （A時々B＋A時々B後C）／2

上式による結果を、0.05の倍数に量子化した値を、その天気の数値とする。ただし上限下限は越えないようにする。

また、天気カテゴリとして、「大雨」、「薄曇」等が存在するが、それらは、それぞれ、「雨」、「曇」に置き換えた数値から0.1を加算・減算した値とする。

5．予測結果

M.F.の個数を２個（「大」「小」）、ルール数は、７入力では2^7から温度の大小関係の矛盾した組（" 最高気温が「小」で最低気温が「大」" 等）を除いた７２ルール、３入力では2^3＝８ルールとした。

ある都市の給水を賄う、４つの浄水場の配水量とその総和量の４～８月２年分のデータを用いて、学習・予測（４月入力５月予測～７月入力８月予測の４ヶ月分の評価）を行った。

学習は予測の１年前のデータを用い、当日－予測日と同じ月の組の１ヶ月分のデータによる学習（月学習）【月が変わる毎に学習を行う（１ヶ月学習×４）】と、４月入力５月出力～７月入力８月出力の４ヶ月分のデータによる学習（季節学習）【初めに４ヶ月分のデータで学習を行う（４ヶ月×１）】の２種類の方法で行った。各学習回数は500回である。

予測結果の誤差率を表１に示す。表において、定倍法とは、予測日（m月、第n番目のα曜日）のm，n，αと同じ１年前の日における総配水量を、定倍（m－１月の日総配水量の平均値の年間比）した値を、予測値とする手法である。誤差率は次式により求め、で４ヶ月分（４～７月）の平均値を示した。

$$|\text{実日総配水量} - \text{予測日総配水量}| / \text{実日総配水量} \times 100 \quad [\%]$$

表１：予測誤差率

	A	B	C	D	総和
絶７（1ヶ月学習）	15.2	3.96	32.0	11.2	3.78*
差７（1ヶ月学習）	10.3*	3.93	22.3	6.43*	4.02
絶３（1ヶ月学習）	14.7	3.44*	33.7	10.7	3.94
差３（1ヶ月学習）	11.5	3.99	22.2*	7.32	5.00
絶７（4ヶ月学習）	14.7	3.78	32.7	11.3	3.54
差７（4ヶ月学習）	8.41*	4.17	21.7*	6.63*	3.48*
絶３（4ヶ月学習）	15.7	3.47*	43.1	8.15	3.52
差３（4ヶ月学習）	10.1	4.07	31.4	6.89	4.09
定倍法	12.6	6.75	21.7	7.54	6.70

表において、*、＿は、誤差率の最小値（＿は浄水場毎、*は浄水場・学習データ数毎）である。C浄水場以外は、本提案方式の方が、全般的に良い結果が得られている。Cの結果が良くないのは、配水量が少なく、またそのパターンが曜日、天候に依存しないものが多かったためである。C以外では、それぞれ、最良となった方法は異なっているが、出力を差分値とし温度情報を入力に含めた方法が、全般的に良い結果が得られている。ただし、温度情報の有無と、「１ヶ月学習(月)×４」と「４ヶ月学習(季節)×１」の違いは、さほど顕著ではないので、入力情報の確実性と、システムの規模により選択することが望ましいと言える。

D浄水場と総和量の予測結果を図４（太線が実値、実線が本手法【差７法・月学習】、点線が定倍法）に示す。

図５に、３入力差分によるF.N.N.の学習結果（４月学習、総和）より抽出したファジィルール(点線は初期値)を示す。

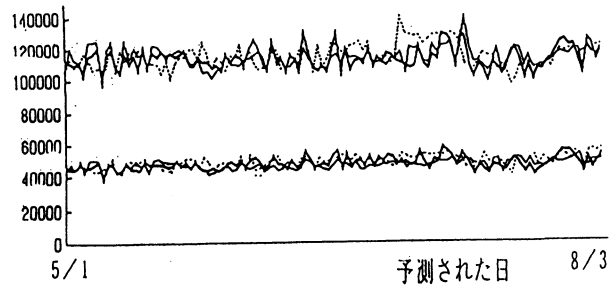
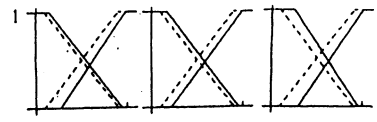


図４：予測結果（D(下) 総合(上) ７入力差分値出力）



ルール	当日の総配水量	当日天気	一ヶ月後の予想天気	学習後後件部定数
1	小	良	良	0.60
2	小	良	悪	0.31
3	小	悪	良	0.76
4	小	悪	悪	0.38
5	大	良	良	0.21
6	大	良	悪	0.00
7	大	悪	良	1.00
8	大	悪	悪	1.00

図５：３入力差分（８ルール）の学習ファジィルール

6．おわりに

上水道配水制御システムにおいて、日総配水量の１ヶ月先の長期予測の検討を行った。１年前の同じ月、同じ季節のデータでF.N.N.の学習を行い、１ヶ月後の同じ曜日の日総配水量を求めた。４ヶ月分のデータでの評価により、本手法が従来法の定倍法に対して優位性が見られ、有効性が確認された。

＜参考文献＞

[1]清水，山本："min演算-台形ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数型ﾌｧｼﾞｨ構造化ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄによる需要量予測"，第10回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集，pp. 471-472(1994) [2]清水，山本："大小比較ﾈｯﾄﾜｰｸを用いたﾌｧｼﾞｨ・ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄによるmin演算-台形型M.F.ﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙの同定"，第9回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集，pp. 428-432(1993)

問い合わせ先
〒216 神奈川県川崎市宮前区宮崎4-1-1
NEC機能ｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ研究所ﾒｶﾄﾛﾆｸｽ研究部 清水 透
tel(044)856-2038 e-mail shimizu@mech.cl.nec.co.jp

FD2-2

ニューラルネットワークとファジィ推論の経営計画問題への適用

An Application of Neural Network and Fuzzy Reasoning for Managerial Planning Problem

金子隆臣* ○池永美智子* 泉めぐみクリスチーナ** 矢野幸重**
Takaomi Kaneko Michiko Ikenaga Cristina Megumi Izumi Yukisige Yano

*九州東海大学工学部情報システム工学科 **国際協力事業団上級研修員
Kyusyu Tokai University Japan International Cooperation Agency

Abstract : Computed aided managerial planning simulation system based on neuro fuzzy is a new challenge for computer technology experts and management science specialist. The purpose of this paper is to design managerial planning simulation system based on neuro fuzzy system -fuzzy inference using a neural network-

Our study consists of three parts. The first part introduces some methods for acquiring fuzzy reasoning rules by neural network. The second part proposes a method to predict the future values in highly non-linear time series data by neural networks and fuzzy inference. And the third part suggests a managerial planning simulation system based on neuro fuzzy system.

Some practical examples will be given. Throughout the paper, the way of building managerial planning simulation system based on neuro fuzzy will be emphasized.

1．はじめに

ファジィ推論とニューラルネットワークとは、人間の知識や生体の構造を模擬した新しい情報処理の手法であり、非線形な入出力関係を容易に同定できる。これらの研究は1970年代中頃に始められ、1980年代中頃から融合方法や融合度合いの違いにより数多くのモデルが提案されている。本稿では、ファジィ推論とニューラルネットワークを融合したものを、経営計画問題に応用する。その事例として、経営計画立案に際し、ニューラルネットワークとファジィ推論を用いた各種のパラメータ設定のための時系列モデリングと予測システムによる経営計画シミュレーションの設計を試みる。

2．一階差分系列データ[1)]

本稿では、毎月の売上高に対して、一階差分演算を行うことで求められる値を、システムへの入力として用いる。ここで一階差分とは、2つの隣接した観測値間の差であると定義される。こうして求められる一階差分系列データにより売上高の動向をより詳細に見ることができる。

$$y(t)=z(t)-z(t-1) \qquad (1.1)$$

ここに、$z(t)$は原データ、$y(t)$は一階差分系列である。

3．ニューラルネットワークによる学習

ニューラルネットワークは、自己学習機能により、モデルの環境が動的に変化する場合でも非線形な入出力関係を同定できるという特徴を持っているが、学習機能や結果を明示的に表現することが出来ないという問題がある。しかし、本稿におけるシミュレーション・システムの構築にあたって、時系列的な各種パラメータの設定は、ニューラルネットワークによる学習によって算出することが必要であると考えられる。

本稿では、階層型ニューラルネットワークを用いて学習を行い、その学習方法としては、一般によく用いられている誤差伝播学習法(error-back-propagation)[2)]を採用する。

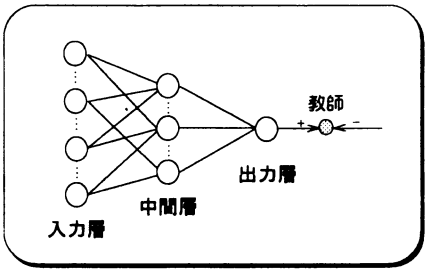


図1. 階層型ニューラルネットワークの構造

第 l 層の i 番目のニューロンの状態は以下の式で示される。ここで、$w_{ij}(l)$ は第 l 層の i 番目のニューロンと、第 $l-1$ 層の j 番目のニューロン間の情報のやり取りを行うシナプス結合であり、f は0,1に飽和する非線形関数で定義したシグモイド関数を用いる場合が多い。

$$x_i(l)=f\left\{\sum_j w_{ij}(l)\cdot x_j(l-1)\right\} \qquad (2.1)$$

出力の2乗誤差 E を求め、最急降下法により、最小化を行う。L は出力層の番号で$x_i(L)$はネットワークの出力を d_i は教師を示している。

$$E=\frac{1}{2}\sum_i\left(x_i(L)-d_i\right)^2 \qquad (2.2)$$

以下の階差方程式にしたがって出力誤差 E を減少するようにシナプス結合を変換し、収束するまで繰り返す。

$$\Delta w_{ij}(l)=-\mu\frac{\partial E}{\partial w_{ij}(l)} \qquad (2.3)$$

4．ファジィ推論

現実の売上高予測において、次期売上高がニューラルネットワークの予測結果と完全に一致するとは言い難く、その時点での周囲の経営環境等の外的要因が及ぼす影響を充分考慮に入れなければならない。そのために、幾つかの評価要素を設定し、種々のファジィ手法[3)4)]を用いた合成によって、予測売上高に与える修正パラメータの値の算出を行う。その流れを図2に示す。

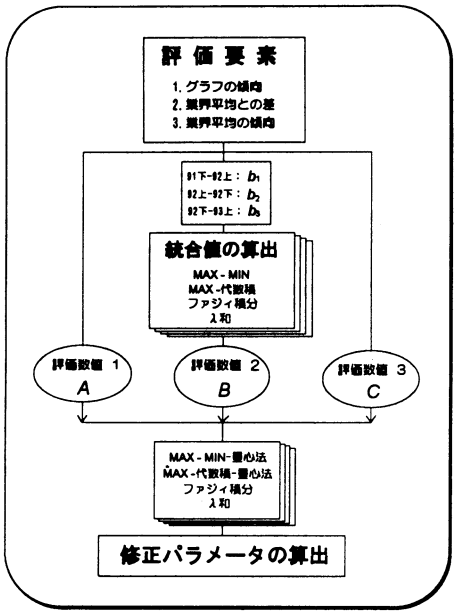


図2．ファジィ推論の流れ

5．適用例　≪経営計画シミュレーション・モデル≫

この経営計画シミュレーション・モデルを使用することによって企業の意思決定者は、外的要因あるいは個別計画が全体に及ぼす影響という見えざる構造を解き明かすことができる。モデルの大きな特徴としては以下の２点が挙げられる。第１は、期中における政策方針検討のためのモデルが分離されていることである。これまでの経営シミュレーションには２つのタイプのものがあった。１つは、マテシッチに代表される期首において一定期間の予算計画の立案を行うものであり、もう１つはボニーニに代表される意思決定方針の評価を行うことを目的とするものである。ここでのモデルでは、実務的な見地からこれら２つの要素を包含したものとなる。第２は月次の資金繰りにおいて適応過程が組み込まれていることである。

図3に示すフローチャートに基づいて、損益計算書の初期値と来期予想のマクロ計画、修正計画等の基本変数の値を決定し、入力すると月単位の損益計算書、貸借対照表、資金繰表等がアウトプットされるようになっている[5)]。

6．考察と今後の課題

我々は本稿でファジィ推論とニューラルネットワークを融合したものを経営計画問題に応用することを試みたのであるが、その方法論としては、ファジィ推論やニューラルネットワークの他に、近年、遺伝的アルゴリズムの組合わせ的探索方法が種々の工学的組合わせ問題に応用され、かなりの成果を挙げている。また、組合わせ探索、計画問題の解法ばかりでなく、機械学習法としても注目を浴びている。そこで今後の課題として、ファジィ理論への遺伝的アルゴリズムの応用としてファジィ推論と遺伝的アルゴリズムとの融合が考えられる。けだし、適切なファジィ推論機構を構成するには推論規則数や入出力空間の分割等多くのHow to的技術や試行錯誤的努力が必要であり、今まではこれを人間が行っていたのに対し、遺伝的アルゴリズムによれば、この最適なファジィ推論機構を発見するための試行錯誤的行為に代わり、遺伝子的な方法で組合わせ的に最適解を発見して学習させる事ができると考えられるからである。

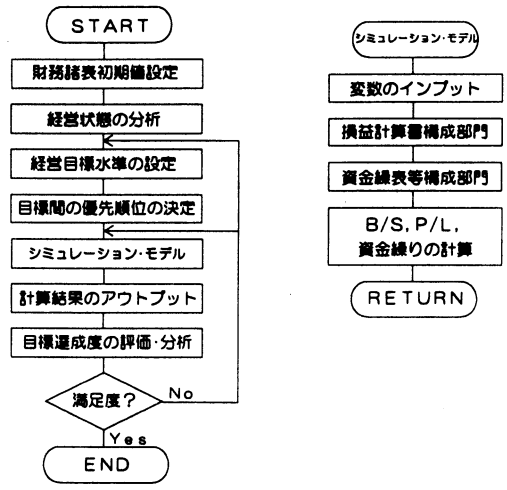


図3．モデル全体のフローチャート

参考文献

1) 岡本・高木・中西，「ニューラルネットワークとファジィ理論を用いた時系列モデリングと予測」，日本ファジィ学会第７回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.459-462，1991．

2) 合原一幸編著，「ニューロ・ファジィ・カオス」，pp.55-58，オーム社，1993．

3) Zimmermann, H.J. , "Fuzzy Set Theory and its Applications", Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, pp.11-39, 1991.

4) Zadeh, L. & Kacprzyk, J. , "Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty ", John Wiley & Sons, Inc., USA, pp.215-218, 1992.

5) 門田安弘著，「DSS会計の理論と実際」，第三出版，1988．

6) Y.Ijir, "Management Goals and Accounting for Control", North-Holland Pub. Co., Amsterdam, 1975.

7) 金子・古波蔵・泉・池永，「ニューラルネットワーク及びファジィ推論に基づく経営計画シミュレーションの一研究」，日本ファジィ学会ノンエンジニアリング・ファジィ研究会第５回ワークショップ講演論文集，pp.48-51，1995．

連絡先

〒862　熊本市渡鹿 9丁目1-1
九州東海大学工学部情報システム工学科
金子研究室
TEL　096-382-1141（内線1820）
FAX　096-381-7956

FD2-3

階層化された砂時計型ニューラルネットによる自律的な内部表現獲得

Hierarchical Information Integration Model using Unsupervised Autoencoder Neural Networks

山川　宏*　　木本　隆**　　柳沼 義典**
Hiroshi YAMAKAWA　Takashi KIMOTO　Yoshinori YAGINUMA

*ＲＷＣＰつくば研究センタ
Real World Computing Partnership

** (株)富士通研究所
FUJITSU LABORATORIES LTD

Abstract – For acquiring abstract internal representation from real world data, gradual learning and hierarchical architecture are essential. We propose hierarchical information integration model using auto-encode neural networks, which can learn high-level internal representation form raw sensor data. We demonstrate that the hierarchical model, which takes two camera images of one target from different view, learns to restore three dimensional potion of that target.

1.はじめに

人間は認識・行動において様々な内部表現を利用しながら情報を段階的に統合する。これは現実世界と直接相互作用する際に取り扱う多様かつ大量の感覚情報や自身の運動情報などに対処する方策であると考えられる。本報告書ではこの内部表現を階層的に自動獲得する方法を提案するが、これに先立ち、内部表現とその自動獲得さらにその階層性の必要性について述べる。

内部表現の重要な役割は、その時に対処している課題に関する情報のみを適切な形で表現することである。もし、コンパクトな内部表現を使わずに解決処理を行うと、課題と無関係な情報を同時に取り扱うことになるため、しばしば考慮すべき組み合わせが膨大になり現実的な速度で実行できない。

内部表現を獲得するには、外部からの設計とシステム自身による学習がある。人間の場合には遺伝という情報伝達手段に制約されるため、多くの内部表現を後天的に獲得せざるを得ないが、人工的なシステムにおいては内部表現を望むだけ設計できるので(設計者の作業量は増大するが)、自動獲得の能力はそれほど重要でなく思える。しかし、設計の段階で将来システムが必要とする全ての内部表現を用意することは不可能なので、システムが外界に対して高度に柔軟な適応能力を持つためには、人工的なシステムにおいても内部表現の自動獲得能力を欠くことはできない。

内部表現を階層的に積み上げる利点として、獲得済の内部表現の流用による学習コストの削減が揚げられる。例えば、すでに"カップ"と"グラス"を区別できる形に関する内部表現と色を区別できる内部表現を持つシステムが、"赤いカップ"と"青いグラス"を区別する内部表現を生成するケースでは、新たにセンサ情報から内部表現を直接生成するよりも、前記二つの内部表現からの出力を統合した表現を学習する方が容易である。さらに、この様に階層化を行うと、同じような処理系統を複数作ることを避けられるので、処理資源の点からも効率的である。

そこで本報告書では、内部表現を自動的に獲得する能力を有する砂時計型のニューラルネットワークを階層化することでセンサ情報(低次)から内部表現(高次)を自律的に獲得する情報統合モデルを提案する。

2. 砂時計型ニューラルネットワークモデルと階層化

2.1 砂時計型ニューラルネットワークモデル

砂時計型ニューラルネットワークモデル(以下、砂時計ネットワークと呼ぶ)は、入力層と出力層のユニットの数が同じで、しかも最もユニットの数が少ない中間層(圧縮層と呼ぶ)のユニットの数が入出力層のユニット数よりも小さい３層以上のニューラルネットワークである(図1)。

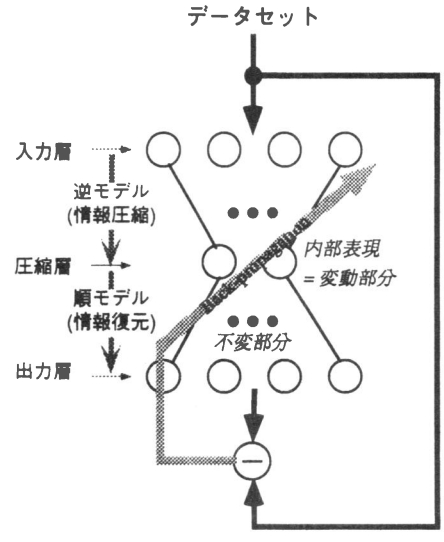


図１ 砂時計ネットワークと学習

恒等写像を誤差逆伝搬法で学習したネットワークでは、圧縮層にデータセットの変動部分に応じた情報をマップする内部表現空間が形成され、入力層-圧縮層間に逆モデルが、圧縮層-出力層間にデータセットの不変部分に関する情報をもつ順モデルが、形成される。

砂時計ネットワークの優れた特徴として、少なくとも以下の３つが上げられる。

(1)内部表現の自動獲得と補間機能：

しばしば認識では、変化する部分が重要な意味を持つから、自動獲得される内部表現が変動部分であることは有用である。また、同じデータセットに対して獲得される内部表現には任意性があるが、空間の連続性は保たれる。そして、入出力層、圧縮層ともに補間機能を持つ。

(2)逆モデルの生成が容易：

ある入力に対して一意に出力を決定できない写像(一対多)を要求する内部状態の設計に起因する、学習困難な逆モデルの設計を避けられる。

(3)教師なし学習：

学習は入力層と出力層に同じデータセットを与える恒等写像学習なので、教師が不必要であり自律的システム構築に有利。

砂時計ネットワークの応用例としては、画像圧縮に用いた先駆的な研究[1]や、実行時の圧縮層の出力を特徴量として利用して画像情報から人の性別・表情などの識別する例[2,3]や、実行時の入力層と出力層の誤差量から入力データが学習データセットに含まれるか否か識別する研究[4,5]がある。さらに、圧縮層の最小次元数を自動的に探し出す過負荷学習法[6]や、抜けがある不完全なデータセットにiterative inversion法を組み合わせることで対処する研究[7]もある。

2.2. 階層化された砂時計ネットワーク

階層的に高次の内部表現を獲得するために、各砂時計ネットワークを折り曲げて圧縮層の出力を上位側の入出力層に連結する階層モデルを提案する(図２)。

このモデルでは、各砂時計ネットワークが自律的に学習可能なので、下位の砂時計ネットワークから段階的に上位のネットワークを学習させることで、システム自身により次第に高次の内部表現を獲得できる。

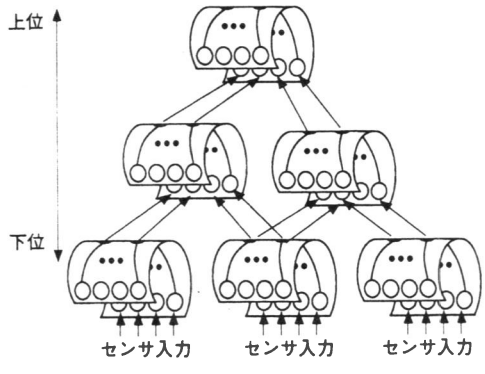


図２ 階層化された砂時計ネットワーク

3. 計算機シミュレーション

3.1 課題

提案したモデルの動作確認のために、２台の固定カメラから得られる画像情報から対象物体の三次元情報を復元するシステムを自律的に形成するという、簡単なシミュレーションを行う。

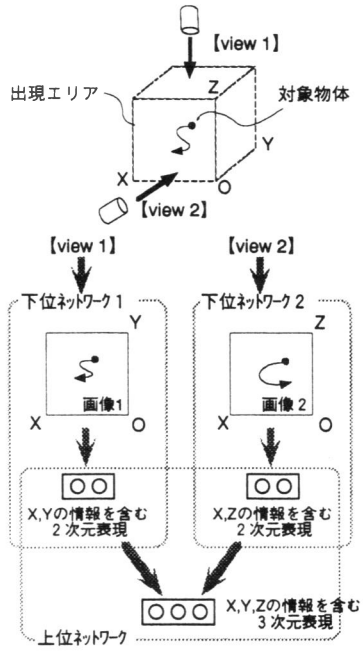


図３ シミュレーションの原理

まず、学習後の階層的な情報復元を説明する(図３)。立方体の中を蝿のように飛び回る対象物体を二方向view1、view2から観測し画像１と画像２を得る(数値実験とカメラの位置が違う)。下位ネットワーク１は画像１から対象物の位置(X,Y)を本質的に含む情報を抽出し、下位ネットワーク２についても同様である。上位ネットワークは二つの下位ネットワークからの情報を統合して本質的に位置(X,Y,Z)を含む情報を抽出する。

学習時にはまず、画像を各下位ネットワークに与えて恒等写像の教師無し学習を行い、次に上位ネットワークは下位ネットワークの出力を利用して学習を行う。結果として、２つの画像情報を統合して対象物体の３次元位置を復元する機構を自律的に獲得する。

シミュレーションでは、原点からx軸沿いに左右に6離

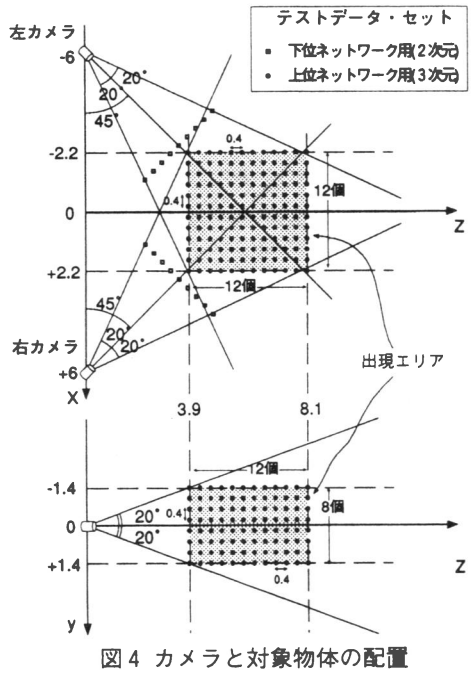


図４ カメラと対象物体の配置

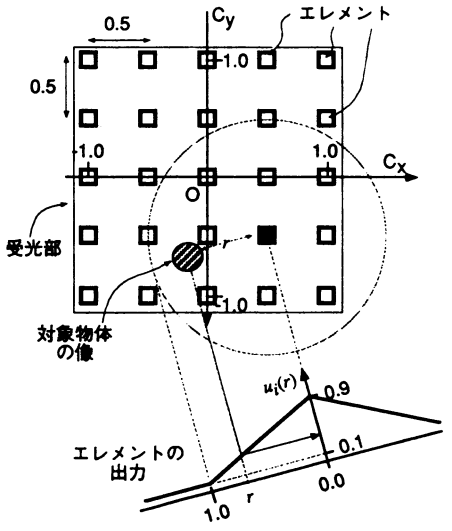


図5 受光部のエレメント配置と出力特性

れた二つのカメラが45度内側を向き、各カメラの視野角は上下左右とも20度である(図4)。なお対象物体の出現エリアはx=-2.2～+2.2, y=-1.4～+1.4, z=3.9～8.3とした。

各カメラ内の受光部上でのCx-Cy座標においてのCx=-1～+1、Cy=-1～+1が視野角に対応する(図5)。受光部には上記範囲内に等間隔(0.5)で25個(=5*5)の受光エレメントが配置されている。エレメント(i番目)は受光部座標上での、それ自身と対象物体の像との距離(r)に依存した出力特性、

$$u_i(r) = 0.9 - 0.8r \quad \text{if} \quad r < 1.0$$
$$u_i(r) = 0.1 \quad \text{else}$$

を持つ。下位ネットワークの入出力ユニット同士は空間的な隣接関係の情報を持たないため、対象物体の位置をぼかすような前処理によりデータセットが隣接関係の情報を持つことは、学習にとって重要である。

両カメラの受光部からの25次元アナログ出力は階層モデルに伝達される(図6)。階層モデルは、対応するカメラから画像情報を受け取り対象物体の画像上での位置に対応する2次元情報を出力する左右2つの下位ネットワークと、下位ネットワークから出力されるの合計4次元の

	下位ネットワーク	上位ネットワーク
レイヤー構成	25-10-2-10-25 (5層)	4-6-3-6-4 (5層)
重みの学習定数	5.0	5.0
重みのモメンタム	0.4	0.4
出力の範囲	[0.0, 1.0]	[0.0, 1.0]
学習回数	20000	80000

表1 各砂時計ネットワークの実験条件

情報から対象物体の3次元的な位置情報を復元する上位ネットワークにより構成される。

実験に使用したデータセットは以下である。

(a)学習データセット

対象物体を出現エリア内のランダムな位置にセットした1000個のデータ。

(b)テストデータセット

(b-i)下位ネットワーク用（2次元）

カメラの視野角内をスキャン。つまり、Cx-Cyの各軸に対し0.25刻みで対象物体像を移動した、81個(=9*9)のデータ。

(b-ii)上位ネットワーク用（3次元）

対象物体を出現エリア内でX,Y,Z各方向に0.4刻みでスキャンした、1152個(=12*9*12)のデータ。

3.2 結果

下位ネットワークは学習データセット(a)に対して誤差逆伝搬法で恒等写像を20000イテレーション学習し、その後に同じ学習データセットに対する下位ネットワークの圧縮層の出力を利用して同様に上位ネットワークの学習を80000イテレーション行った。

学習した下位ネットワーク(左)にテストデータセット(b-i)を与えた時の圧縮層の出力を示す(図7)。ここではほぼユニット1の出力がCyに、ユニット2の出力がCxに対応している。一方、下位ネットワーク(右)では逆にユニット1の出力がCxに、ユニット2の出力がCyに対応している。よって何れの下位ネットワークとも期待通りに入力情報の変動部分が内部表現に抽出された。

引き続く上位ネットワークの学習では、同じ学習データセット(a)に対する二つの下位ネットワークの圧縮層の

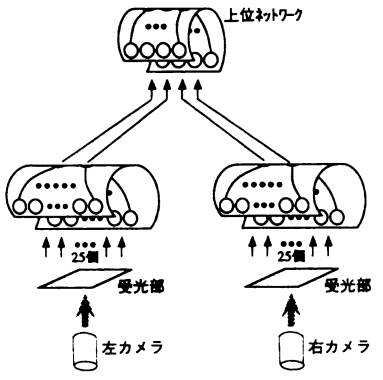


図6 実験に用いた階層モデル

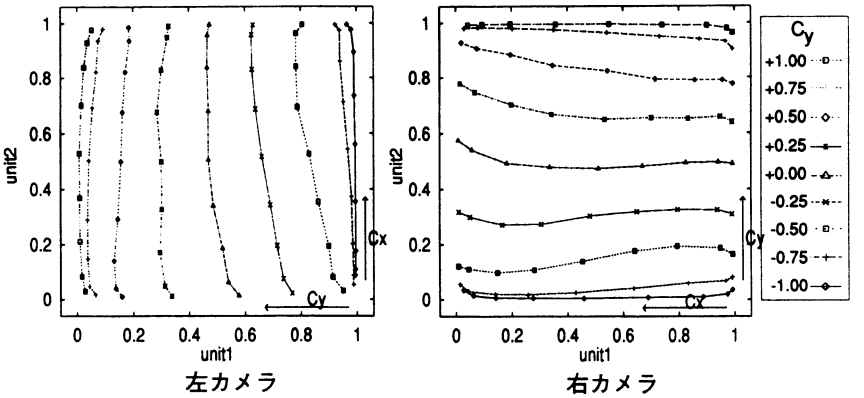


図7 下位ネットワークの内部表現

出力を利用して80000イテレーションの誤差逆伝搬法を行った。学習させたネットワークにテストデータセット(b-ii)を与えたときの上位ネットワークの圧縮層の出力を図８に示す。このように上位ネットワークは対象物体の３次元位置に対応する内部表現を獲得した。

実験において、下位ネットワークが獲得した内部表現は圧縮層の出力空間の大部分を利用している。これは、入力層と出力層との誤差を小さくする恒等写像の学習が、圧縮層を通過する情報の解像度を落とさないように利用可能な空間をできる限り使用したためではないかと考えられる。これに対して、上位ネットワークの内部表現は圧縮層の出力空間の一部分しか使用しておらず、さらに学習を続けても状況の変化はなかった。その点は疑問が残り、今後の検討が必要であると思われる。

4. まとめ

現在のコンピュータなどによる知的システムには、多種多様かつ矛盾や曖昧さを含んだ情報から必要な情報を取捨選択・統融合する高度の能力が必要とされつつある。これらの能力はシステムが、現実世界と直接相互作用して大量かつ多様な情報を扱う場合や、情報のデジタル化・マルチメディア化が進展したネットワーク社会のなかで活躍する場合に重要である。

上記能力の実現にはシステム自身による内部表現の柔軟な操作が一つの重要な基盤技術であると考えられる。そこで本報告書では、砂時計型のニューラルネットワークの階層化により、センサ情報(低次)から内部表現(高次)を自律獲得する情報統合モデルの提案を行った。さらに、モデルの基本的な動作確認のために、計算機シミュレーションにより提案したモデルが２台の固定カメラの前で動き回る物体の画像情報から３次元情報をコードする内部表現を学習により復元できることを示した。

このように、本報告書では内部表現の自動獲得機構の実現という問題意識に基づき、これを階層化する方法の提案を行った。今回提案したモデルでは、高次の内部表現を獲得するには各ニューラルネットワークの構造やその接続関係をあらかじめ与える必要があり、その点は自律的でなく、さらに研究を進める必要がある。しかし、現状においても表現それ自体を与えるよりも少ない情報からシステムを構築できるので十分に有用である。

参考文献

1. Cottrell,G. W.,Muno,P.,and Zipser,D.,"Image Compression by Back Propagation. An Example of Extensional Programmins",ICS Report 8702,Institute for Cognitive Science,UCSD,1987.
2. Cottrell,G. W.and MetcalfeJ.,"EMPATH: Face, Emotion, and Gender Recognition Using Holons",NIPS3,pp. 564-572,1991.
3. DeMers,D.and Cottrell,G. W.,"Non-Linear Dimensionality Reduction",NIPS5,pp. 580-587,1993.
4. 鈴木,安藤,"モジュール学習による３次元物体の認識と類別",信学技報,NC93-62,pp. 59-66,1993.
5. 柳沼義典,木本隆,山川宏,"砂時計型ニューラルネットによる物体認識のための複数センサ情報の融合",第11回ファジィシステムシンポジウム講演予定,1995.
6. 野田,"過負荷学習を用いた恒等写像学習による内部表現獲得",日本神経回路学会第５回全国大会講演論文集,pp. 80-81,1994.
7. 木本隆,柳沼義典,山川宏,"不完全なデータに対応する砂時計型ネットワーク",信学技報,NC94-62,pp.17-24,1995.

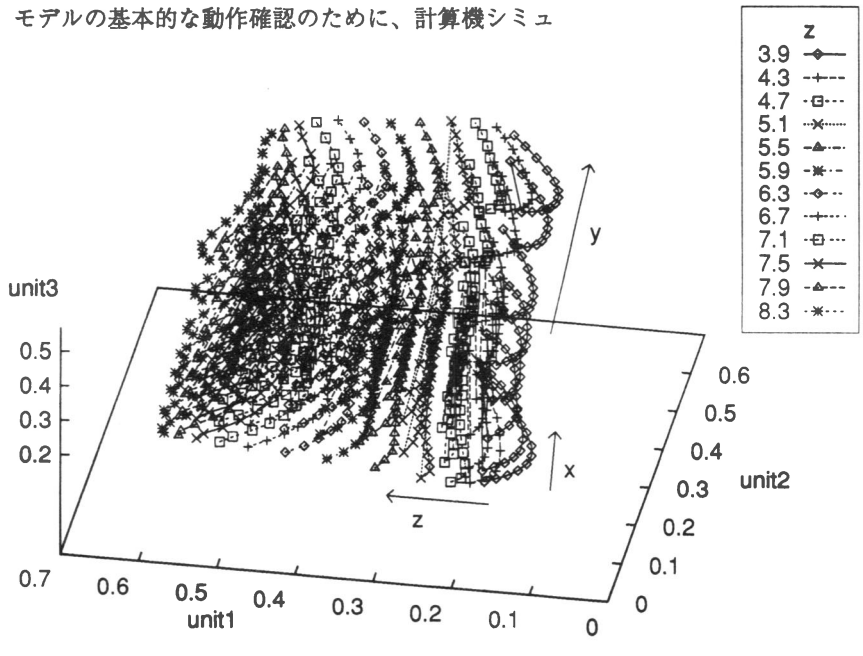


図８ 上位ネットワークの内部表現

上位ネットワーク用の12*9*12個のテストデータ(図４参照)の入力に対する上位ネットワーク圧縮層の３ユニットの出力を示した。カメラ座標のｘ軸がユニット２に、ｙ軸がユニット３に、ｚ軸がユニット１に、ほぼ対応する結果が得られた。

連絡先

山川宏
〒305 茨城県つくば市竹園1-6-1
つくば三井ビル 16F
ＲＷＣＰ つくば研究センタ
能動知能研究室
TEL:0298-53-1664,
FAX: 0298-53-1652
E-mail: yamakawa@rwcp.or.jp

木本隆、柳沼義典
〒211 神奈川県川崎市上小田中1015
（株）富士通研究所
知識処理研究部
TEL:044-754-2667,
FAX: 044-754-2664
E-mail: kimoto@flab.fujitsu.co.jp
yaginuma@flab.fujitsu.co.jp

FD2-4

砂時計型ニューラルネットワークを用いたセンサ情報融合による内部表現の自動獲得

Learning Internal Representation for Multi Sensor Fusion using Autoencoder Neural Networks

柳沼義典 * 木本 隆 * 山川 宏 **
Yoshinori YAGINUMA Takashi KIMOTO Hiroshi YAMAKAWA
*富士通株式会社 **RWCPつくば研究センタ
FUJITSU LIMITED Real World Computing Partnership

Abstract -- For applying a system to real-world, it is important that the system can integrate from many kinds of information and obtain the essence with the system's purpose from that information. In this paper, at three-dimensional object recognition, we propose an autoencoder neural network model obtaining the essence for recognition with mutli sensor fusion. We also verified the effectiveness of the proposed model by simulation exercises of a doll recognition problem, that uses camera image segmenting by that's hue and saturation.

1. はじめに

人間は、複数種類の感覚器官から得られる多種多様かつ膨大な情報から、問題に応じて必要な情報を選択適用することで、現実世界に適応的に生活している。そして、以前に行った事例を学習により内部に蓄え効率的に参照することで、膨大な情報の実時間処理を可能としている。

人間のような情報処理機構を工学的に実現しようとした場合、複数センサから得られる多種多様で曖昧かつ不完全な情報を統合し、問題に応じて必要とされる情報を自動的に抽出し、システム内部にコンパクトな表現として蓄えるしくみが重要となる。本報告では、情報圧縮の特長を持つ砂時計型ニューラルネットワークに着目し、これを用いたセンサ情報融合モデルを提案する。

以前より砂時計型ニューラルネットワークは、画像圧縮の手法として研究されてきた[1]。最近では、モデル獲得や物体認識問題において、画像情報から人の性別・表情などの識別に関する研究[2.3]や、Jordanらのモジュール構造型ネットワークと組合せた3次元物体のモデル表現に適用する研究[4]などがある。また、よりコンパクトな内部表現の自動獲得の研究[5]なども報告されている。さらに、砂時計型ニューラルネットワークを階層的に積み上げることで高次の概念を抽出する研究[6]や入力情報に欠損値がある場合の学習および欠損値推定方法の研究[7]なども報告されている。

本報告では、砂時計型ニューラルネットワークを用いて複数センサ情報を融合し、認識に必要な内部表現を自動獲得するセンサ情報融合モデルを提案し、その有効性を3次元物体認識実験により示す。

まず砂時計型ニューラルネットワークの性質を説明し、さまざまな視点から視覚センサにより観測した3次元物体の射影像を学習する計算機シミュレーション実験を行い、獲得された内部表現を解析する。

つぎに、砂時計型ニューラルネットワークを用いたセンサ情報融合モデルを提案し、人形を対象物体として、視覚センサからHSI値により切り出すことで生成した複数の色画像情報を融合することで対象物体を認識する認識実験を行い、提案したモデルの有効性を示すとともに、物体認識のための適切な内部表現が自動的にニューラルネットワーク内に獲得されていることを示す。

2. 砂時計型ニューラルネットワークの内部表現

2-1 砂時計型ニューラルネットワーク

砂時計型ニューラルネットワークとは、入力層と出力層に同じデータを提示して恒等写像を学習させる3層以上の階層型のニューラルネットワークである。この際に、中間層ユニット数を入出力層よりも少なくするのでその形状から砂時計型と呼ばれる（図1）。

砂時計型ニューラルネットワークでは入力層から中間層までを逆モデル、中間層から出力層までを順モデルと見ることができる。つまり、入力層から中間層までで入力情報から本質的に重要な情報を抽出し、中間層から出力層までで抽出された情報から入力情報を復元する。一般に逆モデルの生成は不良設定問題（入力に対して出力が一意に決定できない問題）であり教師データの設定が難しいのだが、砂時計型ニューラルネットワークでは、恒等写像を学習して内部に逆モデルと順モデルを生成することで、不良設定問題を意識することなく逆問題を解くことが可能である。

砂時計型ニューラルネットワークの中間層に現れる内部表現とは、提示したデータのうちの変動部分である。変動部分が、内部表現としてコンパクトで連続的な空間にマッピングされる。一方、固定部分はその砂時計型ニューラルネットワーク内での順モデル部分の重みとし

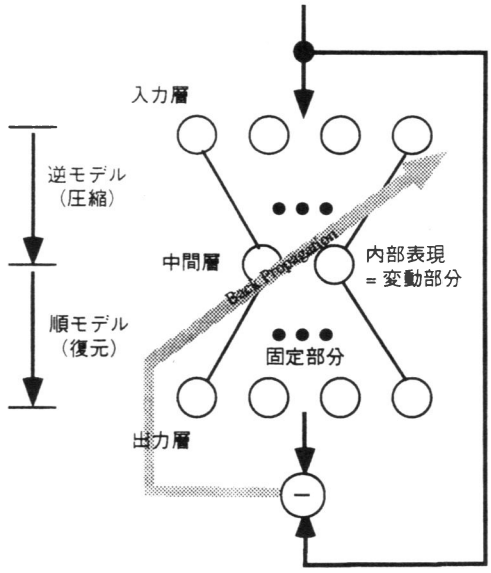


図1　砂時計型ニューラルネットワーク

て作成される。すなわち、砂時計型ニューラルネットワークは変動部分と固定部分を分離し、変動部分の抽出を行うことが可能である。

砂時計型ニューラルネットワークの性質をまとめると以下のようになる。

(1). 情報がコンパクトに表現

砂時計型ニューラルネットワークでは中間層が絞り込まれているために、その中間層部分に入力情報のうちの必要な情報がコンパクトに表現される。ここではこれを、砂時計型ニューラルネットワークの持つ内部表現と呼ぶ。

(2). 内部表現は連続空間上で表現

連続関数であるニューラルネットワークは、補間機能という特長を持つ。これは、サンプル点としていくつかの情報を学習させると、そのサンプル点間を連続的に補う機能である。この補間機能により内部表現は連続空間上で表現される。

(3). 教師データが不要

砂時計型ニューラルネットワークは恒等写像を学習するために、ニューラルネットワークの学習に必要な教師データが不要であるというメリットがある。例えば物体認識問題に適用する場合には、対象物体を提示するだけでその物体を表わす情報が砂時計型ニューラルネットワークの内部表現として抽出されることが期待される。

2-2. 内部表現獲得シミュレーション

砂時計型ニューラルネットワークを用いて、物体を提示した時に作成される内部表現について計算機シミュレーションを行なった。対象物体として５角形を用い、それを中心とした半球状に沿って視点を変更させた時の対象物体の見えをデータとして与えた。θ=0° ... 360° まで30° おき、ϕ = 0° ... 60° まで30° おきよって、合計で36データを学習データとして用いた（図2）。入力は５角形の頂点の座標値(x, y)で合計10入力である。用いた砂時計型ニューラルネットワークは５層の階層型ニューラルネットワークで、各層のユニット数は、それぞれ (10 - 10 - 2 - 10 - 10) である。

100,000回の学習後、θ, ϕ とも5° おきにデータを与えた時の中間層2個の出力結果を図3に示す。図3より θ、ϕ の２次元が中間層上で連続した空間として綺麗に表現されていること、また、未学習の点が補間されていることがわかる。このように、砂時計型ニューラルネットワークを用いることで、与えられた情報のうちの変動部分である「視点の変更」が、絞り込まれた中間層上にコンパクトで連続な表現として抽出されることが確認された。

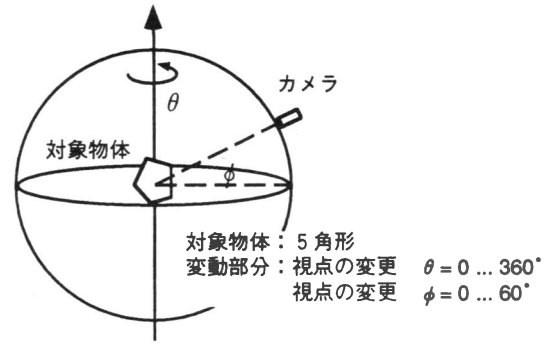


図2　シミュレーション条件

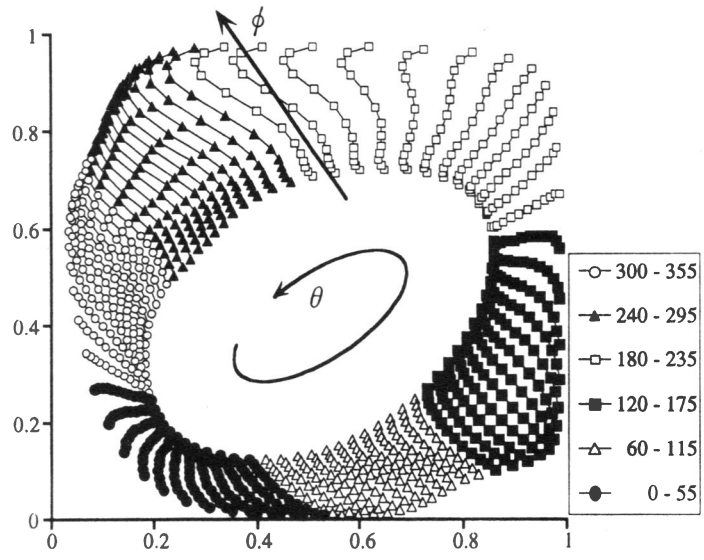


図3　抽出された内部表現

3. 内部表現を自動獲得するセンサ情報融合モデル

複数センサから得られる情報を融合して、内部表現を自動的に獲得するセンサ情報融合モデルを提案する（図4）。センサ1、センサ2 ... など、複数センサからの情報を同一の砂時計型ニューラルネットワークに入力して学習させることで、それらセンサ情報の融合結果が砂時計型ニューラルネットワークの中間層に内部表現として獲得される。

現実環境においては、その時々の環境やシステム内部状態・目的に応じて、有用な情報を提供できるセンサと不完全で曖昧な情報しか得られないセンサが頻繁に変わりうる。このような環境では、複数センサ情報入力を融合するセンサ情報融合モデルは有効である。つまり、状況に応じて有用な情報を提供できるセンサが異なるような、センサ情報の不連続性から連続的な内部表現を生成できると期待されるからである。センサ情報融合モデルを用いることにより、現実環境に適用可能なロバストなシステム構築が可能となる。

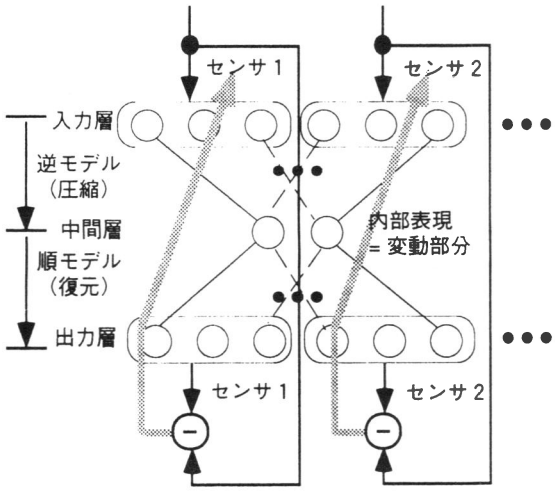


図4　センサ情報融合モデル

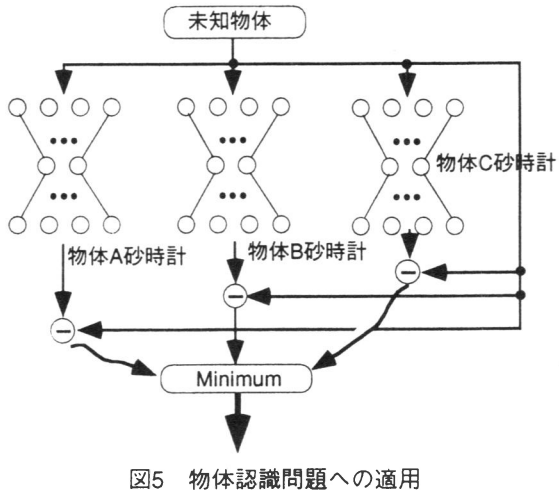


図5　物体認識問題への適用

4.物体認識実験

4-1. センサ情報融合モデルの物体認識への適用

砂時計型ニューラルネットワークを用いたセンサ情報融合モデルを、物体認識問題に適用する方法を図5に示す。これは、一つの砂時計型ニューラルネットワークに一つの物体を学習させ、学習後、提示された物体を各砂時計型ニューラルネットワークに入力し、その誤差が最も小さな砂時計型ニューラルネットワークが示す物体を該当物体とみなす方法である。この場合、各物体のサンプル点を学習した砂時計型ニューラルネットワークが、十分に各物体を汎化しているかどうかが重要となる。

4-2. 実画像による物体認識

対象物体に人形を用い、視覚センサから色切り出しにより生成した複数画像情報を砂時計型ニューラルネットワークを用いて融合することで、物体認識のための内部表現を自動獲得する実験を行った。

図6に対象物体（上）と比較物体（下）、図7に実験システムを示す。ここでは、変動分としては1次元の視点の変更（回転）を用いた。すなわちターンテーブル上に乗せた対象物体を、0°から360°まで30°ずつ回転させてカメラにて撮影し、その実画像を、それが持つHSI値の固まりで切出した後（図8）、大きなセルに分割して各セルごとに各HSI値固まりの割合を入力として砂時計モデルに学習させた（表1）。

用いた砂時計型ニューラルネットワークは、各層のユニット数がそれぞれ(36 - 16 - 2 - 16 - 36)の5層の階層型ニューラルネットワークである。100,000回の学習後、中間層に生成された内部表現を図9に示す。図9より、1次元の回転を表す円が内部表現として獲得されている。また、同物体未学習データ(30°おきの学習データの間の点）を学習後の砂時計モデルに入力したところ、内部表現値はちょうど学習データの間に収まっており、自動獲得された内部表現上で補間されていることが確認される。さらに、汎化性能を調べるために、対象物体（上）学習済みネットワークに比較物体（下）のデータを入力してその2乗誤差を調べた結果が図10である。図10より、同物体未学習データに対して、未知物体データの2乗誤差値は平均で3倍程度違い、学習した物体かそうでないかを砂時計型ニューラルネットワークの2乗誤差値から識別することが可能であることが確認された。

表1　実験条件

実画像	320 x 240 pixel
セル	4 x 3　個（80pixelの正方形）
HSI値の固まり	3種類　（よって入力36個）
学習データ	30°おき（12パターン）

5. まとめ

砂時計型ニューラルネットワークの性質を検証し、3次元物体の射影像を学習する計算機シミュレーション実験を行い、砂時計型ニューラルネットワーク内部に提示された情報の変動部分が自動的にコンパクトに獲得されることを示した。そして、この砂時計型ニューラルネットワークを用いたセンサ情報融合モデルを提案し、複数色画像情報を融合する物体認識実験を行い、物体認識のための適切な内部表現が自動的にニューラルネットワーク内部に獲得されていることを示し、提案したモデルの有効性を確認した。

今後は、行動を予測するニューラルネットワークと階層的に組み合わせることで、能動的にセンシングしながら物体を認識する能動的物体認識モデルへと発展させていきたいと考えている。

謝辞

なお本研究の一部は、科学技術庁の科学技術振興調整費による「センサフュージョンの基盤的技術の開発に関する研究」の一環として行なったものである。

6. 参考文献

1. Cottrell、G. W.、Muno、P.、and Zipser、D.、"Image Compression by Back Propagation. An Example of Extensional Programmins"、ICS Report 8702、Institute for Cognitive Science、UCSD、1987.

2. Cottrell、G. W.and Metcalfe、J.、"EMPATH: Face, Emotion, and Gender Recognition Using Holons"、NIPS3、pp. 564-572、1991.

3. DeMers、D.and Cottrell、G. W.、"Non-Linear Dimensionality Reduction"、NIPS5、pp. 580-587、1993.

4. 鈴木、安藤、"モジュール学習による3次元物体の認識と類別"、信学技報、NC93-62、pp. 59-66、1993.

5. 野田、"過負荷学習を用いた恒等写像学習による内部表現獲得"、日本神経回路学会第5回全国大会講演論文集、pp. 80-81、1994.

6. 山川、木本、柳沼、"階層化された砂時計型ニューラルネットによる自律的な内部表現獲得"、第11回ファジィシステムシンポジウム講演予定、1995

7. 木本、柳沼、山川、"不完全なデータに対応する砂時計型ネットワーク"、信学技報、NC94-62、pp.17-24、1995.

連絡先

柳沼義典、木本隆
〒211 神奈川県川崎市中原区上小田中1015
株式会社富士通研究所マルチメディアシステム研究所
テクノロジ研究部門知識処理研究部
TEL:044-754-2667 FAX:044-754-2664
E-mail: yaginuma@flab.fujitsu.co.jp
kimoto@flab.fujitsu.co.jp

山川宏
〒305 茨城県つくば市竹園1-6-1 つくば三井ビル16F
RWCPつくば研究センタ 能動知能研究室
Tel 0298-53-1664 Fax 0298-53-1652
E-mail: yamakawa@trc.rwcp.or.jp

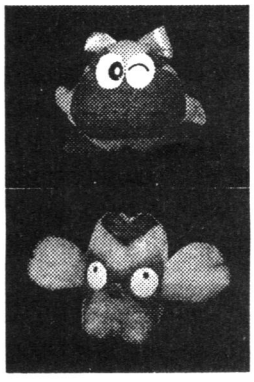


図6 対象物体（上）と比較物体（下）

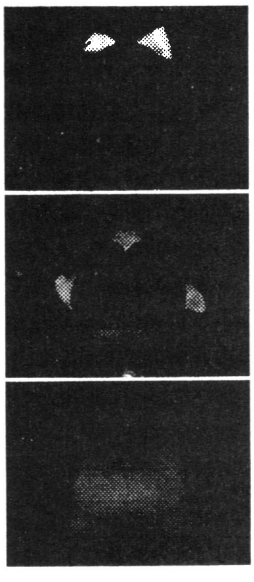


図8 色切出し画像

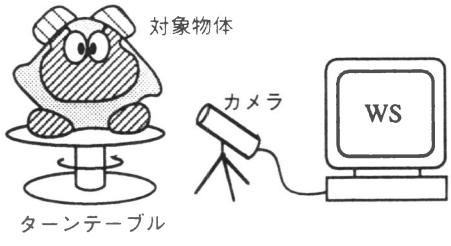


図7 実験システム

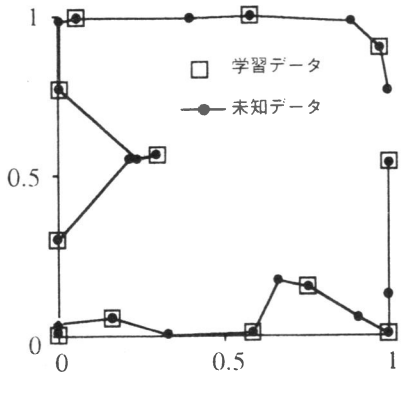


図9 学習後の砂時計ニューロの内部表現

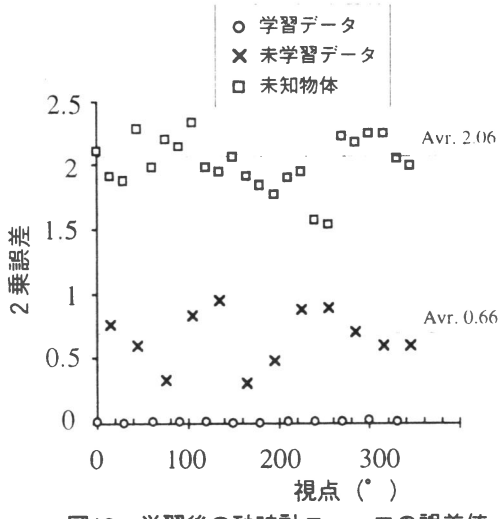


図10 学習後の砂時計ニューロの誤差値

FD3-1

ニューラルネットワークを応用した「火花による異材判別システムの開発」

Discrimination System of Foreign Materials by Sparks : Applying Neural Network

○米澤好司*　五百旗頭正*　清水俊雄**　** 鷲巣　悟**
○Yoshitsugu Yonezawa　Tadashi Iokibe　Toshio Shimizu　Satoru Washizu

* 株式会社　明電舎　Meidensha Corporation,
** 株式会社　システムサコム　System Sacom Ltd.,

Abstract-The purpose of our development is to automate foreign materials inspection for the iron and steel production line. In the inspection, the inspector visually test whether foreign materials have mixed or not based on "Method of Spark Test for Steels(JIS G 0556)". Human inspection requires skills and experiences, involves dispersions from one person to another and have other problems to solve.

In this paper, we propose the judging system of foreign materials which judges foreign materials according to the features of sparks with the aid of the neural network.

The judging processes of the system are, firstly, input learning data into the neural network by means of sparks of a reference material, then the compares the sparks of the product under test with the said learning data to know the similarity of the former with the latter and, according to the results, judges foreign materials.

Keywords : Spark, iron and steel production, Foreign materials inspection, Neural network, Image processing

1．はじめに

異材判別検査は、鉄鋼製品の中で、特に、パイプや棒鋼材の中間および最終工程検査で、異材のパイプや棒鋼が、混ざり込んでいないかを確認する検査である。この検査は、発注先より製品の全数確認が義務づけられる場合もある。異材混入を正確に検査する方法としては、成分分析、分光分析等がある。これらの方法は、使用環境条件や検査時間等において、問題がある。

このため、検査員の勘と経験に頼る火花による異材判別検査が主流になっている。この方法は、検査員が、グラインダで検査品より発生させた火花の色、形、グラインダの手ごたえ等の情報によって、異材混入を検査している。火花による鋼種の判別方法は、JIS規格の「鋼の火花試験方法(G 0556)」に規定されている。

しかし、検査員のﾚﾍﾞﾙの違いによる検査結果のバラツキは、避けられない。また、約5Kgのグラインダを持って、1日に2000～3000本のパイプ等を検査する事は、かなりの重労働になる。

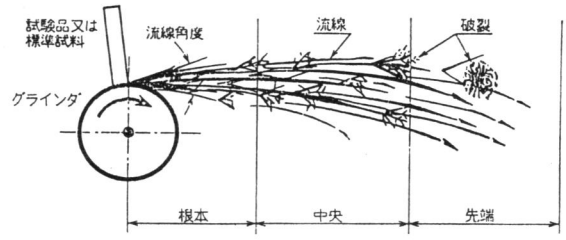
我々は、これらの問題を解決するために、火花の特徴を画像処理とニューラルネットワークで判別する方法を開発した。以下に詳細を述べる。

2．火花の特徴

鋼材ごと火花の特徴及び識別する方法について、JIS規格に記載されている中より、火花の形と名称及び炭素鋼の火花特徴を、図1と表1に示す。

尚、この方法を利用する場合、先立って成分分析で確認した材料を標準材料とし、あらかじめ試験対象とする材料の火花を確認しておくことが大切である。また、判定を正確にするために、火花の形、明るさ、色等の現象を同一環境で観察できるようにするのも大切である。

図　1　火花の形状及び名称



JIS G 0556より

表　1　炭素鋼の火花特性表

C %	流線					破裂				手ごたえ
	色	明るさ	柱さ	太さ	数	形	大きさ	数	花粉	
0.05未満	だいだい色	暗い	長い	太い	少ない	破裂なし(*)				軟らかい
0.05						2本破裂	小さい	少ない	なし	
0.1						3本破裂			なし	
0.15						数本破裂			なし	
0.2						3本破裂2枝咲き			なし	
0.3						数本破裂2枝咲き			つき始める	
0.4						数本破裂3枝咲き			あり	
0.5		明るい	長い	太い			大きい			
0.6										
0.7										
0.8										
0.8を超える	赤色	暗い	短い	細い	多い	屋根	小さい	多い	多い	硬い

注　(4)　破裂はないが、とげは認められる。

JIS G 0556より

３．ニューラルネットワークによる異材判別システムの開発

3.1　開発の概要

本開発の目標は、ＪＩＳ「鋼の火花試験方法」の内容を満足ことであるが、今回は、火花に比較的特徴がでやすい炭素鋼を用いて異材判別システムの要素技術を開発した。

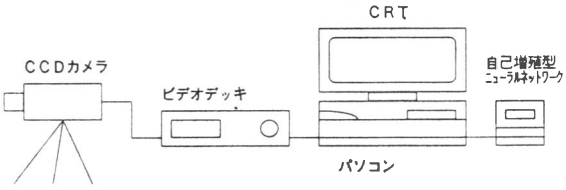
1)火花の特徴を映像データに捉える方法
2)映像データから火花の特徴が抽出できる前処理方法
3)判別方法の確立

以下に、これら技術を用いて、炭素鋼を判別した内容を示す。

3.2　機器の基本構成

今回使用した鋼種判別装置の基本機器構成を、図２に示す。各機器の役割は，初めに，グラインダを試料鋼材に押し当てて発生させた火花を、ＣＣＤカメラで撮影し、一旦、ビデオテープに録画する。次に、その録画映像をパソコン内の画像処理ボードを介して取り込み、前処理を行い、自己増殖型ニューラルネットワークに学習および判別をさせる。最後に、その結果をＣＲＴ画面上に表示する。

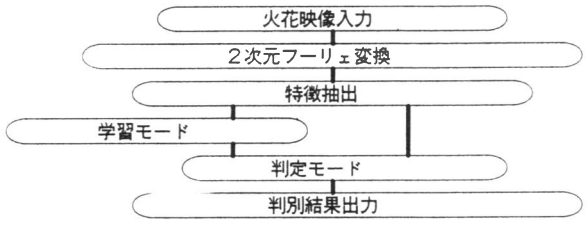
図　２　基本機器構成



3.3　映像データ処理基本フローチャート

映像データ処理基本フローチャートを図３に示す。映像データ処理基本フローの内容は、入力された火花映像より、火花の破裂部等の特徴部分を抜きだす。次に、その部分を２次元フーリェ変換し，パワースペクトルを求める。次に、パワースペクトルのヒストグラムを求め、さらに、正規化を行い特徴量とした。この特徴量をニューラルネットワークの取り扱うデータとし，学習および判別を行い、その結果をＣＲＴに表示する。

図３　基本ﾌﾛｰﾁｬｰﾄ



４．炭素鋼による検証試験

4.1　検証試験の概要

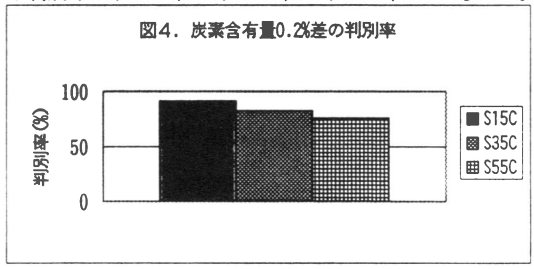
本試験では、火花発生の基となる炭素含有量の違いによる炭素鋼の判定能力を検証した。使用した炭素鋼は、次の５種類である。

1)S15C（炭素含有量0.15%）
2)S25C（炭素含有量0.25%）
3)S35C（炭素含有量0.35%）
4)S45C（炭素含有量0.45%）
5)S55C（炭素含有量0.55%）

4.2　検証結果

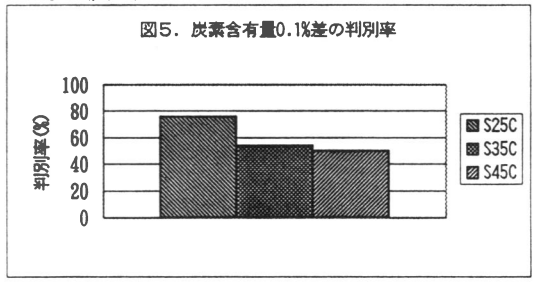
最初に、炭素含有量0.2%の差があるS15C,S35C,S55Cの３種類を試料として判別試験を行った。結果を図４に示す。それぞれの判別率は、S15C,91%、S35C,82%、S55C,76%であった。

図4．炭素含有量0.2%差の判別率



次に、炭素含有量0.1%の差があるS25C,S35C,S45Cの３種類の判別試験を行った。結果は、S25C,76%、S35C,54%、S45C,50%あった。（図５）

図5．炭素含有量0.1%差の判別率



以上の結果より、今回開発したシステムでは、炭素含有量0.2%の差があれば、約70%以上の確立で判別できることが確認できた。炭素含有量0.1%差については、比較的火花の特徴が離れたS25Cの判別が良い結果を出しているが、特徴が似通っているS35CとS45Cの判別では、互いに誤認識していまい、約50%の結果となっている。

５．おわりに

今回の火花による異材判別システムの開発は、火花の捉える基本条件および、前処理を含めたニューラルネットワークを用いた基本アルゴリズム開発とその検証が目的であった。今後は、今回の成果をもとに、炭素鋼以外の鋼種の判別とその正解率の向上を目指して、異材判別システムの改善を図る予定である。

参考文献

1)日本工業標準調査会：ＪＩＳ　Ｇ　０５５６　”鋼の火花試験法”（1980）
2)日本鉄鋼協会：第３版　鉄鋼便覧　Ⅳ　”鉄鋼材料、試験・分析”pp.443-446(1980)
3)牛尾　修、西堀元博：”自己増殖型ニューロ・モデル”日経インテリジェントシステム　別冊夏号　pp.120-131(1992)

連絡先

〒103　東京都中央区日本橋箱崎町36-2リバーサイドビル
株式会社　明電舎　システム技術部システム開発課
米澤好司
TEL 03-5641-7506　　FAX 03-5641-9303

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

FD3-2

ニューラルネットワークによる材料配合設計支援システム

Material Design Support System using Neural Network

玉江 寛志　　熊本 洋
Hiroshi Tamae　　Hiroshi Kumamoto

東陶機器株式会社
TOTO LTD.

Abstract：

In this paper, we propose a new learning method of neural network for material design. The new learning method is based on a relationship between outputs of neural network. The relationship is required by material design rule.

A numerical example and a simulation using actual pigments design data for color matching of sanitary ware are done to verify the feasibility of the new method, and the results show that the new learning method is useful to material design.

1．はじめに

これまでの技術革新により，自動化・機械化が進んだ製造部門に対して，材料設計部門のような知的生産部門の効率化が近年強く望まれている．

材料設計は，組み合わせる原材料の数が増えれば増えるほど，数理モデルやルールでの表現が困難になり，設計者の勘とノウハウに依存する試行錯誤的なアプローチが主体となっている．

この試行錯誤の結果，蓄積される設計の事例データを活用して設計案を予測する技術として，ニューラルネットワーク（以下，ニューロと略す）を適用した材料配合設計支援システムが注目されている[1][2]．

本稿では，材料配合設計問題特有の配合率間の関係を考慮した新しいニューロ学習法を提案し，数学モデル及び衛生陶器の色合わせの為の顔料配合設計への適用事例を報告し，新しい学習法の有効性を示す．

2．一般のニューロの問題点

図１は，一般に最も実用化されているバックプロパゲーションタイプのニューロのネットワークを模式的に表したものである．

図１に示すネットワークの一般的学習法は予測する事象全てをニューロの出力層に割付け，出力値（y_1～y_4）と教師データ（d_1～d_4）を対比させ，その誤差を最小にするように学習を進めるようになっている[3]．

このネットワークの特徴は異層間に情報伝達はあるが，同一層内には情報伝達がないところである．

したがって，この一般的な学習法をそのまま利用すると，出力値は他の出力値に関係なく独立な値となる．

ところが，ニューロの幅広い適用分野の中には，材料配合問題で出力値を配合率にしたときのように予測事象（出力値）間に，ある特定の関係が存在するような分野がある．このような分野で一般的な学習法を用いれば出力値間の関係が保証されず，ニューロの出力値をそのまま実作業に適用できないという問題がある．

この問題を解決するためには，出力値が予め決められた関係を保つように新しいネットワークを構築する必要がある．

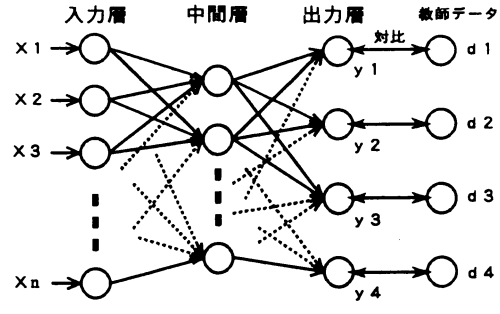


図１　一般的なネットワーク

3．新しい学習法

3．1　概要

材料配合問題のように予測事象間に，ある特定の関係が存在することが予め分かっているときの新しいニューロ学習法について述べる．

顔料の配合や合金の金属元素配合などのような材料配合問題では，各配合率間には次のような関係がある．

$$y_1 + y_2 + \cdots\cdots + y_N = 100 \qquad (1)$$

ここで，y_1，y_2，……，y_Nはそれぞれの材料の配合率（%）である．

式(1)を用いるとN-1個の材料の配合率が分かれば自動的に残り1個の配合率（y_N）も分かる．

式(1)が成り立つときの新しいニューロ学習法として，図2に示すように4出力の学習法を例にとり，その概要を説明する．

ネットワークの構造としては，y_1～y_3までの3出力を使って学習を進める．このとき，残りの1出力（y_4）を全く無視するのではなく，y_4も教師データに近づくように，y_4とd_4の誤差をy_1～y_3の重み学習に必ず反映させるようにする．

学習を完了して，ニューロに予測をさせる場合，ネットワークとしては3出力を使い，残りの1出力については，式(1)から求めるようにすると，全部で4出力の予測が可能となる．

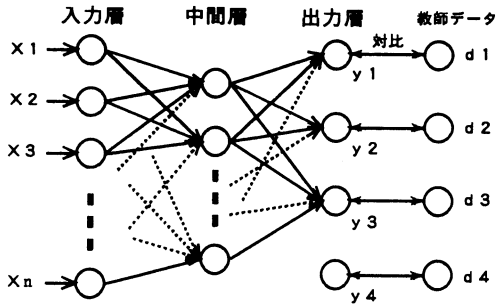


図2　新しいネットワーク

3．2　新しいニューロ学習法のアルゴリズム

出力がN個の場合，一般の学習法と同様に新しい学習法でも，i番目の出力予測値y_iとi番目の教師データの2乗誤差の総和Eを，次のように定義する．

$$E = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}(y_i - d_i)^2 \qquad (2)$$

ここでは，最急降下法を用いて，評価関数Eを最小にするように，出力層のi番目のニューロンと出力層の1つ前の中間層のj番目のニューロンの重み係数W_{ij}を以下のように，順次更新していく．

$$W_{ij}(n+1) = W_{ij}(n) - \eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} \qquad (3)$$

ここで，　$W_{ij}(n)$：n回学習時の重み係数

η：極値探索のパラメータ（定数）

式(3)の偏微分は，式(4)のように分解できる．

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial x_i}\cdot\frac{\partial x_i}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial y_i}\cdot\frac{\partial y_i}{\partial x_i}\cdot\frac{\partial x_i}{\partial W_{ij}} \qquad (4)$$

ここで，　x_i：i番目のニューロンの入力の総和

さらに，式(4)中の右辺の偏微分はそれぞれ次のように表される．

①．式(1)(2)より，

$$\frac{\partial E}{\partial y_i} = y_i - d_i + d_N - y_N \qquad (5)$$

$$(i = 1,2,3,\cdots,N-1)$$

となる．

②．ニューロの入出力関係をシグモイド関数fで定義する．

$$y_i = f(x_i) \qquad (i = 1,2,3,\cdots,N-1) \quad (6)$$

したがって，式(6)より，

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_i} = f'(x_i) \qquad (i = 1,2,3,\cdots,N-1) \quad (7)$$

となる．

③．i番目のニューロンの入力の総和x_iは，その前の層の出力値と重みを掛けた次の式で表せる．

$$x_i = \Sigma W_{ij} y_j(-1) - \theta_i \qquad (8)$$

ここで，　θ_i：しきい値

$y_j(-1)$：1層前の出力値

したがって，式(8)より式(9)が表現される．

$$\frac{\partial x_i}{\partial W_{ij}} = y_j(-1) \qquad (9)$$

このように，新しいアルゴリズムでは，式(5)(7)(9)から算出した式(4)を式(3)に用いて，重みを更新していく．

このように新しい学習法のネットワーク構造は，y_1～y_{N-1}までのN-1個の出力を使って学習を進めるが，残りの1出力（y_N）を全く無視するのではなく，y_Nとd_Nの誤差をy_1～y_{N-1}の重み学習アルゴリズムに必ず反映させて学習させ，想起のときはy_1～y_{N-1}をニューロで予測し，y_Nは式(1)を用いて予測するため，必ず式(1)を満たす予測が可能となる．

5．数学モデルでの効果の検証

5．1　検証の概要

ここでは，新学習法の効果を確認するために，3入力（X_1，X_2，X_3），4出力（Y_1，Y_2，Y_3，Y_4）の数学モデルを用いて検証する．

4出力間には，

$$Y_1+Y_2+Y_3+Y_4=100 \quad (12)$$

という関係があり，さらに，

$$Y_1=X_1+X_2 \quad (13)$$

$$Y_2=X_2+X_3 \quad (14)$$

$$Y_3=X_3+X_1 \quad (15)$$

という関係がある数学モデルの入出力関係をニューロで学習，予測させることにする．

5．2　学習・予測データ

式(12)～(15)を満たす学習・予測データを表1，2のように作成した．

表1　学習データ

No	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	33	11	6	44	17	39	0
2	34	9	5	43	14	39	4
3	34	11	2	45	13	36	6
4	36	10	3	46	13	39	2
5	31	9	6	40	15	37	8
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	29	11	6	40	17	35	8

表2　予測データ

No	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	35	10	3	45	13	38	4
2	30	13	6	43	19	36	2
3	32	9	6	41	15	38	6

5．3　予測結果

新学習法と一般的学習法の予測精度を比較するために，この2通りの学習法でそれぞれ学習させた．

新学習法と一般的学習法の予測結果例を下表に示す．

表3　新学習法と一般的学習法での予測結果

No	真値	新学習法		一般的学習法	
		予測値	自乗誤差	予測値	自乗誤差
1	45.0	44.98	0.0004	45.25	0.0625
	13.0	12.98	0.0004	12.82	0.0324
	38.0	38.02	0.0004	38.24	0.0576
	4.0	4.02	0.0004	4.02	0.0004
計	100.0	100.00		100.33	
2	43.0	43.18	0.0324	43.08	0.0064
	19.0	18.95	0.0025	18.90	0.0100
	36.0	36.12	0.0144	35.75	0.0625
	2.0	1.75	0.0625	1.31	0.4761
計	100.0	100.00		99.04	
3	41.0	40.96	0.0016	40.87	0.0169
	15.0	15.02	0.0004	14.76	0.0576
	38.0	37.92	0.0064	38.33	0.1089
	6.0	6.10	0.0100	6.31	0.0961
計	100.00	100.00		100.27	

表3から，新学習法は必ず式(12)を満たし，一般的学習法に比べ真値に近く，精度良く予測できていることがわかる．

また，ネットワークを形成する出力を少なくでき，学習する重みの数を減らせるので，一般的学習法より学習時間が短くて良いという利点もある．（プロセッサ時間を約10%短縮可能）

6．衛生陶器の顔料配合設計での検証

個性的なデザインや色が取り入れられるようになってきた現代の住空間において，衛生陶器やタイルなどの色も様々な色が採用されるようになってきた．

衛生陶器は，粘土など複数の原料を調製した素地を用いて成形し，施釉，焼成して作られる．衛生陶器への彩色は複数の顔料を混ぜた釉薬により行われるが，後工程に高温焼成工程があるために，焼成前後の釉薬層の色は大きく異なり，焼成前に人が目で見て望みの色になるように顔料を調製し，調色することは不可能である．

そこで調色には，顔料の光学的特性値を用いて望みの色になるような顔料組み合わせおよび配合率を予測するコンピュータカラーマッチング（以下，ＣＣＭと略す）が利用される[4]．しかし，ＣＣＭは顔料の単純な混合による混色の式を用いて数値計算しているために，顔料間の化学反応等がある場合はＣＣＭの予測誤差が大きいという問題がある．そこで，ＣＣＭのような混色の式を全く利用せず，事実データのみを基に解析できるニューロ技術を適用した顔料配合設計支援システムが検討されている[5]．

彩色した陶器を分光光度計で測色すると図3に示すような分光反射率波形を示す．陶器の色を目標色と完全に等色にするには，この波形を一致させればよい．

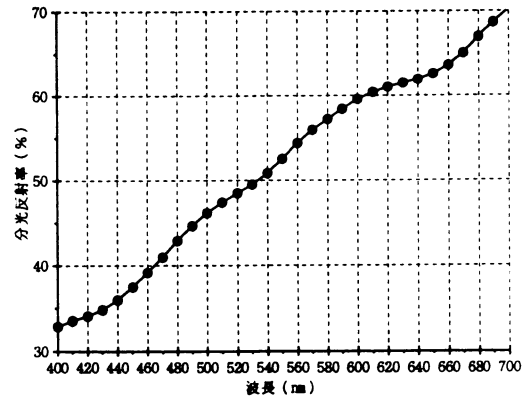


図3　ある色で彩色した陶器の分光反射率波形例

一方，釉薬に用いる顔料はそれぞれ固有の色を有し，その配合量の増減で，彩色した陶器の特定波長領域の分光反射率が変化する．

そこで，図４に示すような可視光（400～700nm）の範囲で測定した陶器の分光反射率を入力情報とし，各顔料の配合率を出力情報としたニューロを用いた衛生陶器の顔料配合設計支援システムを検討した．

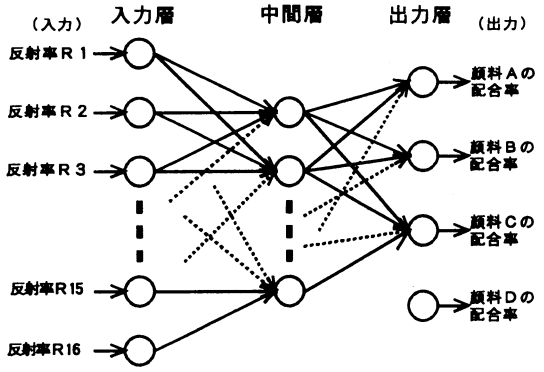


図４　衛生陶器の顔料配合設計の入出力関係

釉薬には，通常３色の有色顔料と，色の明度を調節するための白顔料の合計４顔料が利用される．

４顔料の配合率（C_A，C_B，C_C，C_D）の間には，

$$C_A+C_B+C_C+C_D=100 \qquad (16)$$

という関係があり，この入出力関係をニューロで学習，予測させる．

学習データは９つで，新学習法と一般的学習法の２通りの学習法でそれぞれ学習させた．

新学習法と一般的学習法の予測結果を表４に示す．

表４から，新学習法の方がターゲットに近く，精度良く予測していることがわかる．

また，一般的学習法では，出力値が独立であるので，４顔料の配合率合計が100とならないが，新学習法は必ず式(16)を満たしており，出力値をそのまま作業指示値とできることがわかる．

７．おわりに

新しいニューロ学習法は，予測事象間の特定の関係を保つように学習を進めることができ，一般的学習法に比べて，出力値が独立になることがなく，材料配合設計のような場合に有効である．

また，ネットワークを形成する出力を少なくでき，学習する重みの数を減らせるので，一般的学習法に比べて学習時間が短くできるという利点もある．

新学習法の効果を確認するために，第５章では，数学モデルの入出力データを用いて検証し，第６章では，衛生陶器の顔料配合データを用いて検証を行った．

検証の結果，新学習法は一般的学習法と比較し，有効であることがわかった．

参考文献

［１］吉原，高野，上田：「ニューラルネットワークによる材料設計支援」，情報処理学会第42回全国大会講演論文集，３Ｅ７，PP.2-185/186，1991年

［２］舟橋：「ニューロコンピューティング入門」，オーム社，1992年

［３］八名，鈴木：「ニューロ情報処理技術」，海文堂，1992年

［４］井本，熊本：「色計測とコンピュータカラーマッチング」，塗装工学，掲載予定

［５］玉江，熊本：「ニューロ技術によるコンピュータカラーマッチング」，塗装工学，Vol.29，No.３，1994年

連絡先

〒802　北九州市小倉北区中島２丁目１－１

東陶機器株式会社

情報技術開発部

情報技術開発第一課

玉江 寛志

TEL:093-951-2932，FAX:093-951-2094

表４ 実配合率と新学習法・一般的学習法での予測結果

サンプル名	サンプルの L*a*b*値	顔料名（色系）	ターゲット 実配合率(%)	新学習法 予測結果(%)	一般的学習法 予測結果(%)
＃Z 淡い肌色	L* = 77.65	A（赤系）	7.67	7.26	7.33
	a* = 3.18	B（黄系）	13.33	13.58	14.08
	b* = 16.46	C（青系）	3.33	3.33	3.33
		D（白）	75.67	75.83	75.00
		合計	100.00	100.00	99.74

FD3-3

RBF ネットワークにおける自己組織化特徴マップの応用
Application of Self-Organizing Feature Map to RBF Network

田中雅博，辻本賢司，古河靖之，谷野哲三
Masahiro Tanaka, Kenji Tsujimoto, Yasuyuki Furukawa and Tetsuzo Tanino
岡山大学工学部
Faculty of Engineering, Okayama University

Abstract. In this report, the application of self-organizing feature map to radial basis function(RBF) network is considered. Among various methods for the determination of centers of RBF networks, the unit allocation based on the clusters of data is most promising. The k-means algorithm has been used for this purpose, but there are some problems in this method; the number of the clusters has to be pre-determined, and there is some possibility that the unit may be put where the data are sparse. To avoid these problems, we apply the self-organizing feature map to allocate the RBF units.

1 はじめに

Radial Basis Function (RBF) ネットワークを用いれば多層パーセプトロンと同様，広いクラスの関数を同定することができるため非線形システムの同定に対して有効な方法として利用されている．このネットワークを組む際，データの個数ほどユニットを設け，補間法としてRBF ネットワークを用いる方法が最初に提案された [1]．しかし，システム同定の道具として考えると，なるべく少ないユニットを用いることは，単に計算量を節約するためだけでなくネットワークの汎化性を得るためにも重要である．そのためには入力変数ベクトルを k-means アルゴリズムによりクラスタリングし，そのクラスタの中心に RBF のユニットを配置する方法が一般的に用いられている [2]．しかし，k-means アルゴリズムではあらかじめクラスタ数を仮定する必要があり，また，データの希薄な領域にユニットが配置される可能性もある．我々は，自己組織化特徴マップ (Self-Organizing Feature Map; SOFM) を用いてクラスタの形状や個数をある程度とらえてそれに基づいてユニットを配置する方法を適用し，RBF ネットワークを構成する方法を提案しているが [5]，本報告ではそれに一般化項を含め拡張したシステムでの計算例を示す．

2 RBF ネットワークモデル

RBF ネットワークモデルは次式で表される．

$$F(x) = \sum_i w_i \Phi(\|x - c_i\|) \tag{1}$$

ここで，x を入力ベクトル，$F(x)$ をスカラー出力，$w_i, i = 1,2,...$をネットワーク出力層の重み係数，$c_i, i = 1,2,...$を基底関数の中心ベクトルとする．また，$\Phi(v)$ はラジアル基底関数であり，ここでは最もよく使われるガウス関数$\Phi(v) = \exp(-v^2/\beta^2)$ を用いる．βはあらかじめ定める定数である．厳密には RBF ネットワークではないが，次の形の関数も用いて比較する．

$$\tilde{F}(x) = \frac{\sum_i w_i \Phi(\|x - c_i\|)}{\sum_i \Phi(\|x - c_i\|)} \tag{2}$$

これは，言語的な説明を付けるのは困難であるが関数形だけ見るとファジィモデルの一種と考えることができる．

3 同定問題

データの組を $\{(x(k), y(k)),\ k = 1,2,\cdots,N\}$ とする．ただし，すべてのデータは異なるものとする．このとき，βを十分小さくとれば，$c_i = x_i; i = 1,2,\cdots,N$とすることによりすべてのデータを満たすように (1) 式における $\{w_i\}$ を定めることができる [6]．しかし，得られたネットワークは与えた点以外の領域に対しては何も考慮していないため，βを小さく取った場合，データ点から遠い点での (1) 式によるネットワーク出力は 0 に近い値となる．(2) 式によるネットワーク出力はデータ点間でそれらの中間的な値をとるが，データの外では，最も外側にあったデータの値が続くが，場合によってはこの現象は好ましくない．そこで，特に (1) 式モデルでは，データ間を滑らかにつなぐような関数が好ましいことを表現するためにモデルの複雑さをコスト関数に含める方法が [7] により提案されている．すなわち，コスト関数を

$$L = \sum_k (y(k) - F(x(k)))^2 + \lambda \|\mathbf{P}F\|^2 \tag{3}$$

とする．ここに $\mathbf{P}$ は関数 Fの微分作用素である．本研究でも，この作用素を用いる．また，(2) 式によるモデルでも同様の複雑さに対するペナルティを課す．すなわち，

$$\tilde{L} = \sum_k \left(y(k) - \tilde{F}(x(k))\right)^2 + \lambda \|\mathbf{P}F\|^2 \tag{4}$$

とする．

4 クラスタリング方法

SOFM は，多次元データを二次元格子上に写像するネットワークであり，その写像は自己組織的に行われる．SOFM の特徴として，巨視的にも微視的にも，トポロジーをうまく保存するという点が挙げられる．これは，近傍領域を初期には大きくとり徐々に小さくしながら学習するためである．従って，多数の類似するベクトルがある部分ではそれらをさらに詳細に分けて写像する一方，データのまばらな部分が写像される点付近では学習頻度が少ないので，隣接するベクトルは大きく異なる．従って，隣接する格子点との m_{ij}の差異を見ることによりもとのベクトルが密集していたか空疎であったかが容易にわかる．つまり，元の空間でのデータの密度と

m_{ij}が密接に対応することになる．そこで，上下左右の格子点とのm_{ij}誤差二乗平均$f(i,j)$を次式により計算する．

$$f(i,j) = \frac{1}{|D|} \sum_{(k,l)\in D} (m_{i,j} - m_{i-k,j-l})'(m_{i,j} - m_{i-k,j-l}) \tag{5}$$

ここで，Dは1次近傍であり，通常は4点である．ただし境界部分では，2〜3点である．
これにより生じた$\{f(i,j)\}$は元の空間で対応するベクトルが密な部分では小さい値をとり，逆に疎な部分では大きな値をもつ．したがって，これがデータ全体の塊（これをここではクラスタという）の個数やそれらのトポロジカルな関係を示すことがわかる．つまり，これを見ることで，クラスタの個数をいくつと見ればよいかということが比較的簡単にわかる．$\{f(i,j)\}$からクラスタを検出するためには，極小値を求め，そこから「盆地状」になっている領域をさがせばよい．そのためのアルゴリズムはここでは省略するが，それを構成することはそれほど困難なことではない（例えば[4]参照）．

5 基底関数の設定

得られた二次元格子上のクラスタに基づきそれに写像される元の空間のベクトルのクラスタを検出することは簡単である．しかし，データの次元を変更しているので，二次元平面上のクラスタともとの空間でのクラスタの形状は必ずしも類似していないので，形を判定することは困難である．そこで，ここではクラスタの形状を楕円(体)と仮定し，主成分分析の考え方により主成分をもとにした直交ベクトルの組を求める．これは，下の方法で計算できる([5])．その軸にそって，長さに応じて個数を変えてユニットを配置する．

1. ユニットを配置する間隔$\mu(>0)$を決める
2. 平均値$\bar{x} = \sum x/N$　(N:クラスタ内データの総数)
   共分散$R = \sum\{(x-\bar{x})(x-\bar{x})^T\}/N$
   を求める．
3. Rの固有値$\lambda_i, i = 1,2,\ldots$，固有ベクトル$v(1), v(2), \ldots$を求める．
4. $m = [\lambda/\mu]$として，点
   $$\bar{x} \pm k\sqrt{\lambda_i}v(i),\ k = 0,1,\ldots,m$$
   にユニットを配置する．

6 数値例

植物工場と呼ばれる日射量を制御するプラントのデータを扱う．植物工場では建て屋内部の照度を植物の成育に適した値に制御し，成育を促進している．そのために，半透明な天井で覆われ，照度を下げるためにはブラインド，上げるためには人工照明を使っている．ここでは，外部日射量とブラインド開度，人工照明のon-offを用いることはもちろんであるが，太陽の方位により天井の透過度が異なることを考慮し，太陽高度と方位も入力項目に加え，それら5入力で内部照度が決まるものと仮定する．その関係は非線形であるから，それをRBFネットワークで同定することを試みた．表1は，(2)式において$\lambda = 0.0001$として本稿で用いたSOFMの応用による方法で中心を設定し(45個となった)，同数の中心をk-meansで設定した方法，および1つの線形モデルで同定したものによる誤差絶対値平均を3回行い，それらを示したものである．なお，最適なβの値はそれぞれ1.1, 3.1であった．
また，SOFMの1回目の場合の観測値（実線）と推定値（破線）を図1に示す．

表1: 誤差絶対値平均の比較

SOFM	0.4273	0.4292	0.4273
k-means	0.4826	0.4833	0.4826
linear model	0.9637	-	-

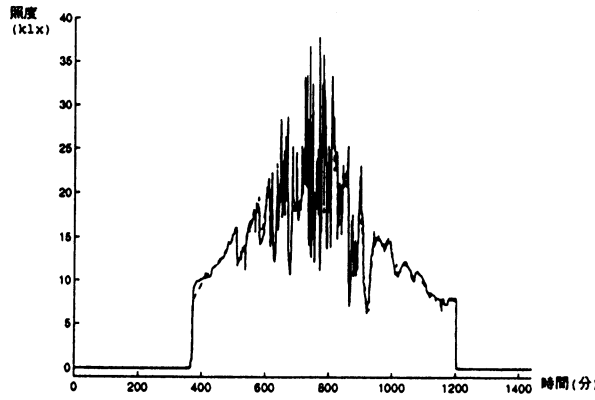


図1: 観測値と推定値

参考文献

[1] D. S. Broomhead and D. Lowe: Multivariable functional Interpolation and adaptive networks, Complex Systems, Vol. 2, pp. 321-355, 1988.

[2] S.Chen, S.A.Billings, C.F.N.Cowan and P.M. Grant: Non-linear systems identification using radial basis functions, Int. J. Systems Sci., Vol.21, No.12, 2513-2539, 1990.

[3] T.Kohonen: The Self-Organization and Associative Memory, Springer-Verlag, 1989.

[4] 古河，田中，谷野：コホーネンの自己組織化特徴地図とその応用，第38回システム制御情報学会研究発表講演会，pp. 439-440, 1994.

[5] 辻本，田中，谷野：RBFネットワークを用いたシステムモデリング，日本ファジィ学会中国・四国支部第4回大会，pp. 35-36, 1994.

[6] J. Park and I. W. Sandberg: Universal approximation using radial-basis-function networks, Neural Computation, Vol.3, pp. 246-257, 1991.

[7] T. Poggio and F. Girosi: Networks for approximation and learning, Proc. IEEE, Vol. 78, No. 9, pp. 1481-1497, 1990.

連絡先

〒700　岡山市津島中3-1-1
岡山大学工学部情報工学科
田中雅博
PHONE 086-255-8785
FAX 086-255-9136
e-mail tanaka@mathpro.it.okayama-u.ac.jp

FD4-1

ニューラルネットワークによるHUBの最適配置

Optimal Allocation of HUBs using Neural Networks

玄　光男　　辻村泰寛　　石崎俊介
Mitsuo Gen　　Yasuhiro Tsujimura　　Syunsuke Ishizaki

足利工業大学　経営工学科
Dept. of Industrial & Systems Engg. , Ashikaga Institute of Technology

Abstract

In this paper, we propose an efficient method for optimal allocation of HUBs using neural networks. The proposed method can derive the optimal solution of the large-scale HUB allocation problem much faster than the conventional linear programming method. Also we show some numerical experiments to demonstrate good performances for solving the problems.

1　はじめに

スター型LAN(Local Area Network)において，既設のコンピュータを効率よく，しかもできる限り低コストで接続するために集線装置(HUB or concentrator，以下HUB)を最適配置し，接続することは，重要な問題の一つである．この問題は0-1線形計画問題として定式化されるが，HUBとそれらに接続されるコンピュータの数が多くなると計画問題の規模が大きくなるため，実規模の問題に対しては計算に非常に多くの時間を費やさなければならない．したがって，この種の問題の効率的な解法が必要とされる．

本稿では，このようなHUB－コンピュータの最適配置問題をニューラルネットワークを用いて効率的に解くための手法を提案し，数値実験によりその有効性を検討した結果について報告する．

2　HUB－コンピュータ最適配置問題

HUB－コンピュータ最適配置問題[1]は，n個のHUB設置可能場所に，j個のHUBを設置し，既設のm台のコンピュータ$(m > n)$を総HUB設置費用および総接続費用が最小になるようにする問題で，次のような0-1線形計画問題として定式化される．

0-1HubAP：

$$\min \quad C(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij} + \sum_{j=1}^{n} b_j y_j$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, \qquad i = 1,2,\cdots,m$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \le K_j y_j, \qquad j = 1,2,\cdots,n$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_j \le n$$

$$x_{ij} = 0 \ or \ 1 \quad y_j = 0 \ or \ 1 \qquad (1)$$

$$i = 1,2,\cdots,m, \quad j = 1,2,\cdots,n$$

ここで，

$C(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$：総接続費用

c_{ij}：コンピュータiをHUBjに接続する費用

b_j：HUBjの設置費用

K_j：HUBjに接続可能なコンピュータの最大数

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{コンピュータ } i \text{ がHUB}j\text{に接続されている場合} \\ 0 & \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{HUBを位置 } j \text{ に置いた場合} \\ 0 & \text{その他の場合} \end{cases}$$

式(1)の0-1制約条件を$0 \le x_{ij} \le 1,\ 0 \le y_j \le 1$と置き換えればこの問題は線形計画問題となる．この場合，制約条件式のtoutally unimodular性が保証されているので[1][2]，解は0か1となる．

3　ニューラルネットワーク

ここでは，指定されたエネルギー(誤差)関数を最小にする連立差分あるいは微分方程式によって表されるニューラルネットワークを用いる．

0-1HubAPを線形計画問題に直すと，次のようになる[2][3]．

HubAP：

$$\min \quad C(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij} + \sum_{j=1}^{n} b_j y_j$$

$$\text{s. t.} \quad h_i(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{n} x_{ij} - 1 = 0, \qquad i = 1,2,\cdots,m$$

$$g_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = K_j y_j - \sum_{i=1}^{m} x_{ij} \ge 0, \quad j = 1,2,\cdots,n$$

$$g(\boldsymbol{y}) = n - \sum_{j=1}^{n} y_j \ge 0$$

$$0 \le x_{ij} \le 1, \quad 0 \le y_j \le 1$$

$$i = 1,2,\cdots,m, \quad j = 1,2,\cdots,n$$

この線形計画問題を，外部ペナルティ法により次のようなエネルギー関数$E(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\kappa)$に変換する[3][4]．

$$E(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\kappa) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij} + \sum_{j=1}^{n} b_j y_j + \frac{\kappa}{2}\left\{\sum_{i=1}^{m}([h_i(\boldsymbol{x})])^2 + \sum_{j=1}^{n}([g_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})]_-)^2 + ([g(\boldsymbol{y})]_-)^2\right\} \qquad (2)$$

$$x_{ij}(0) = x_{ij}^{(0)},\ y_j(0) = y_j^{(0)} \qquad i = 1,2,\cdots,m \quad j = 1,2,\cdots,n$$

ここで，$\kappa > 0$はペナルティパラメータである．また，$[g_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})]_- = \min\{0, g_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\}$，$[g(\boldsymbol{y})]_- = \min\{0, g(\boldsymbol{y})\}$である．式(2)のエネルギー関数より次のような連立常微分方程式が導出される．

$$\frac{dx_{ij}}{dt} = -\mu\left[c_{ij} + \kappa\left\{\sum_{i=1}^{m} h_i(\boldsymbol{x}) + \sum_{j=1}^{n} S_j g_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\right\}\right] \qquad (3)$$

$$\frac{dy_j}{dt} = -\mu\left[b_j + \kappa\left\{\sum_{j=1}^{n} S_j g_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) + S\ g(\boldsymbol{y})\right\}\right] \tag{4}$$

$$x_{ij}(0) = x_{ij}^{(0)},\ y_j(0) = y_j^{(0)} \quad i = 1,2,\cdots,m \quad j = 1,2,\cdots,n$$

ここで，μは時定数の逆数，S_jおよびSはステップ関数で，次のように定義される

$$S_j = \begin{cases} 0 & ;\ g_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) \geq 0 \\ 1 & ;\ g_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) < 0 \end{cases} \quad j = 1,2,\cdots,n \tag{5}$$

$$S = \begin{cases} 0 & ;\ g(\boldsymbol{y}) \geq 0 \\ 1 & ;\ g(\boldsymbol{y}) < 0 \end{cases} \tag{6}$$

式 (3),(4) を常微分方程式の解法 (ここでは Runge-Kutta 法を用いる) を用いて解くことによって最適解を得ることができる．

4 アルゴリズム

HUB－コンピュータ最適配置問題を解くためのニューラルネットワークによる解法アルゴリズムは，次のようになる．

ステップ 1 ：外部ペナルティ法を，用いて HUBAP を式 (2) のようなエネルギー関数に変換する．

ステップ 2 ：式 (2) のエネルギー関数 $E(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\kappa)$ より，式 (3),(4) のような連立常微分方程式を導出する．

ステップ 3 ：時定数の逆数 μ，ペナルティパラメータ κ，$l = 0$，初期値 $x_{ij}^{(0)}, y_j^{(0)}$，ステップ幅 η，許容誤差 ε を設定する．時間 $t = 0$ とする．

ステップ 4 ：ステップ 2 で得られた常微分方程式を Runge-Kutta 法を用いて解く．$x_{ij}^{(l)}, y_j^{(l)}$ は，次のように更新される．

$x_{ij}^{(l)}$ ：

$$k_{ij1} = \eta\ C(t,\ x_{11}^{(l)},\ x_{12}^{(l)},\cdots,\ x_{mn}^{(l)})$$
$$k_{ij2} = \eta\ C(t+\eta/2,\ x_{11}^{(l)} + k_{ij1}/2,\cdots,x_{mn}^{(l)} + k_{ij1}/2)$$
$$k_{ij3} = \eta\ C(t+\eta/2,\ x_{11}^{(l)} + k_{ij2}/2,\cdots,x_{mn}^{(l)} + k_{ij2}/2)$$
$$k_{ij4} = \eta\ C(t+\eta,\ x_{11}^{(l)} + k_{ij3},\cdots,x_{mn}^{(l)} + k_{ij3})$$
$$x_{ij}^{(l+1)} = x_{ij}^{(l)} + \frac{1}{6}(k_{ij1} + 2k_{ij2} + 2k_{ij3} + k_{ij4})$$

$y_j^{(l)}$ ：

$$k_{j1} = \eta\ C(t,\ y_1^{(l)},\ y_2^{(l)},\cdots,\ y_n^{(l)})$$
$$k_{j2} = \eta\ C(t+\eta/2,\ y_1^{(l)} + k_{j1}/2,\cdots,y_n^{(l)} + k_{j1}/2)$$
$$k_{j3} = \eta\ C(t+\eta/2,\ y_1^{(l)} + k_{j2}/2,\cdots,y_n^{(l)} + k_{j2}/2)$$
$$k_{j4} = \eta\ C(t+\eta,\ y_1^{(l)} + k_{j3},\cdots,y_n^{(l)} + k_{j3})$$
$$y_j^{(l+1)} = y_j^{(l)} + \frac{1}{6}(k_{j1} + 2k_{j2} + 2k_{j3} + k_{j4})$$

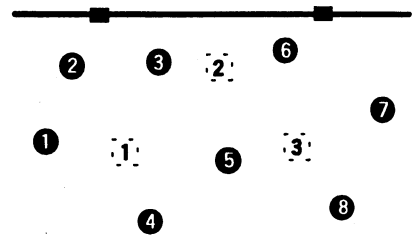
$$t = t + \eta$$

ステップ 5 ：更新された $x_{ij}^{(l+1)}, y_j^{(l+1)}$ を用いてコスト $C(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ の値を求める．

ステップ 6 ：$|x_{ij}^{(l+1)} - x_{ij}^{(l)}| \leq \varepsilon$ かつ $|y_j^{(l+1)} - y_j^{(l)}| \leq \varepsilon$ ならば，計算を終了する．そうでなければ $l = l+1$ としてステップ 4 へ戻る．

5 数値実験

図 3 のような 2HUB － 8 コンピュータの最適配置問題を解く．



●：コンピュータ

：HUB設置可能位置

図 3 2HUB － 8 コンピュータ最適配置問題

HUB とコンピュータの接続費用および HUB の設置費用は，次表のように与えられる

表 1 HUB とコンピュータの設置費用

		i								
c_{ij}		1	2	3	4	5	6	7	8	b_j
j	1	5	5	10	10	10	10	15	15	100
	2	10	10	15	15	5	5	10	10	150
	3	15	15	20	20	10	10	15	15	100

HUB_j に接続可能なコンピュータの数 $K_j = 4,\ \ j = 1,2,3$

[実験結果]

$\mu = 1000, \kappa = 1000$ に設定したときの実験結果は，次表のようになった．同時に，線形計画法 (LP) による計算結果も併記した．

表 2 最適解

	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{31}	x_{32}	x_{33}
NN	1	0	0	1	0	0	1	0	0
LP	1	0	0	1	0	0	1	0	0

x_{41}	x_{42}	x_{43}	x_{51}	x_{52}	x_{53}	x_{61}	x_{62}	x_{63}
1	0	0	0	0	1	0	0	1
1	0	0	0	0	1	0	0	1

x_{71}	x_{72}	x_{73}	x_{81}	x_{82}	x_{83}	y_1	y_2	y_3	$C(x,y)$
0	0	1	0	0	1	1	0	1	280
0	0	1	0	0	1	1	0	1	280

6 おわりに

本稿では，HUB －コンピュータ最適配置問題をニューラルネットワークを用いて効率的に解くための手法を提案し，数値実験によりその有効性を検討した．実験結果より，線形計画法で解いたものと同じの結果が得ることができた．これにより，HUB －コンピュータ最適配置問題にニューラルネットワークを用いることの有効性を確認した．

参考文献

[1] Bertsekas, D. and R. Gallager : *Data Networks*, 2nd ed. Prenitece-Hall, 1992.

[2] 相良信子：数理計画法入門－数学ライブラリー入門 44 －，森北出版，1976.

[3] Cihoki, A and R.Unbehauen : *Neural Networks for Optimization and Signal Processing*, Wiley, 1993.

[4] 玄・辻村・石崎：ニューラルネットワークによるデータネットワークの最適化，日本経営工学会春季大会予稿集，pp. 150-151, 1994.

問合せ先： 〒 326 栃木県足利市大前町 2 6 8
足利工業大学 経営工学科
辻村泰寛
Tel : 0284-62-0605 ext.378
Fax : 0284-64-1071
E-mail: tujimr@genlab.ashitech.ac.jp

FD4-2

ガウスクラスタリング法を用いたニューラルネットワーク構造の決定
Determination of Construction of Neural Networks using Gaussian Clustering Method

梁　青　　李　瑞平　　向殿　政男
Sei Ryou　　Rui-Ping Li　　Masao Mukaidono

明治大学理工学研究科
Department of Computer Science, Meiji University

In this paper, we will use Gaussian Clustering (GC) method to determine construction of a feed forward Neural Network. The first, we analyze structures of the given input data, and then give initial number of neurons of the hidden layer based on these results. Finally, according to target signals, we will adjust the number of neurons of the hidden layer and find the optimal construction of the neural networks.

Key Word: Gaussian Clustering, Neural Networks, Construction of Neural Networks

1　初めに

典型的な階層型ニューラルネットワークでは，入力層と出力層については明確にされている．これらの間に隠れた中間層がある．入力層のニューロン数は入力変数の数と等しく，出力層のニューロン数は解決する問題によって決定されるが，中間層のニューロン数を決定するルールがなく，経験で決定されるのがほとんどである．最適なニューラルネットワーク構造を求めることは大変重要であり，無駄な計算を避けることができる．本論文では，ガウスクラスタリング法を用いて，最適なニューラルネットワークの構造を決定する方法を提案する．

クラスタリング法は、データ構造分析に広く応用されている方法の一つである．この方法によって，与えられたデータ内の構造と関係が解明され，大量なデータでも比較的簡潔な記述にまとめられる．

本論文ではこのようなクラスターリング法を用いて、典型的な階層型ニューラルネットワークにおいて明確にできない隠れ層（中間層）を明確し、高い認識精度、最適なニューラルネットワークの構造を持つモデルを提案した．このモデルはまず入力データ構造を解明し、それらの結果によって中間層のニューロン数を決め、次に出力（教師）信号に基づいて中間層のニューロンを逐次的に生成して、最適なニューラルネットワークの構造を決めていく．

本論文の構成は、まず、ガウスクラスタリング法を簡単に紹介し、ガウスクラスタリング法を用いてデータ構造認識アルゴリズムを検討する．そして最後に、ガウスクラスタリング法を用いたニューラルネットワーク構造を決定するという順になっている．

2　ガウスクラスタリング法について

クラスタリング法の基本は，ある一群の互いに類似している対象をまとめて，いくつかのサブ群に分ける．さらにその中の一つのサブ群に対し，もっと詳しく分けられ，精度の高いサブサブ群を見つけるというものである．この分析をするためにさまざまな数学的な方法が用いられており，数

学を道具として，実際に存在するものを分析する一つ方法である．この方法はあらゆる分野に活用され，地理学，地質学，水文学，植物学などの分野に役立っている．例えば，新幹線，高速道路，発電所など重要な建築を行うとき，地面からボーリング調査を行うか，地層の岩石の分類による地質の調査などにたいへん有効な方法である[4].

近年，沢山あるクラスタリング法の中で，ファジィc-means法がよく利用されでいる．しかし，このファジィc-means法にもいくつかの問題が残されていた[1]．それらの問題を解決するために，筆者の一人がガウスクラスタリング法を提案した[1].

ガウスクラスタリング法は，次のような損失関数を提案した.

$$L=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}\cdot d_{ik}^2 \qquad (1)$$

ここに $d_{ik}=\|x_k - v_i\|$，Nはデータ組の数，cはクラスタの数である.

x_k は k 番目のデータ組のベクトル，v_i はi番目のクラスタのベクトル（重心），u_{ik} は k 番目データ組が，i 番目クラスタに属するメンバーシップ関数の値である.

式（1）を最小するために，エンロトピー(Entropy)最大原理に基ついて，次の結果が得られた.

もしメンバーシップ関数 $\{u_{ik}\}$ が固定であれば，クラスタの重心は次の式で表される.

$$v_i=\frac{\sum_{k=1}^{N} u_{ik}x_k}{\sum_{k=1}^{N} u_{ik}} \quad (i=1\ to\ c) \qquad (2)$$

もしクラスタの重心 $\{v_i\}$ が固定であればメンバーシップ関数の値は

$$u_{ik}=\frac{e^{-\frac{d_{ik}^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{j=1}^{c} e^{-\frac{d_{jk}^2}{2\sigma^2}}} \quad (i=1\ to\ c,\ k=1\ to\ N) \qquad (3)$$

と表される[1].

上では，ガウスクラスタリングの損失関数，重心，メンバーシップ関数について説明したが，以下にそのアルゴリズムについて述べる．このアルゴリズムはわれわれが指定したクラスター数で，データを分析し，各クラスターの重心，メンバーシップを求める.

1）はじめにメンバーシップ関数の値 $\{u_{ik}\}\in[0,1]$ を乱数で初期化する.

2）$\{u_{ik}\}$ と式（2）によって，$\{v_i\}$ を計算する.

3）$\{v_i\}$ と式（3）によって，$\{u_{ik}\}$ を計算する.

4）もし $max\|u_{ik}(t)-u_{ik}(t-1)\|>\varepsilon$ ならば2）に戻る．そうでなければ，終了する.

3　ニューラルネットワーク構造決定

ここでは，われわれは伝統的なニューラルネットワークをちょっと変形した階層型ニューラルネットワークを提案する.

例え，このニューラルネットワークが三層とする．入力層，出力層が従来と変わらないが，中間層が学習することで明確化する．つまり従来では分かりにくい隠れ層を明示し，特定の意味をもち，決定できないの隠れ層のニューロン数をガウスクラスタリング法を用いて，最適なニューロン数を決定する.

このニューラルネットワーク構造を図1のように示す

この構造は中間層から出力層への連結は非常に単純である．中間層から出力層へ定義可能である．その連結は強連結で，つまり重みの値を1で連結されている.

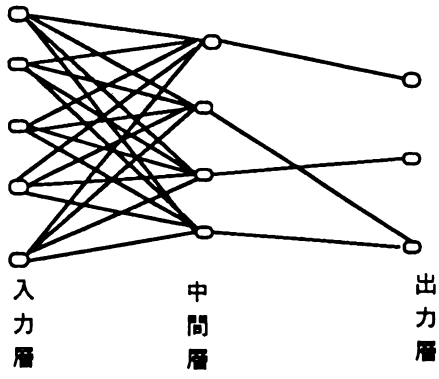


図1　ニューラルネットワークの構造

図1のように入力層と中間層の関係は，入力層ニューロンを複数の中間層ニューロンに連結し，中間層から出力層へは単射である．つまり，一つ中間層のニューロンから複数の出力層ニューロンへの連結は不可である．複数の中間層ニューロンが出力層の一つのニューロンへの連結が可能である．入力層と中間層の結合重みは可変であるか，中間層と出力層の間に結合重みは常に1である．

図2は二つの意味が持つ．一つはクラスタリングのイメージである．もう一つはクラスタリングと出力層ニューロンの関係を表わす．このように入力したデータを中間層でいくつのクラスタに分解され、各クラスタから、出力層のニューロンに定義する。定義ルールは教師信号に従う．例え，ある入力がAクラスタに分類され，クラスタAは出

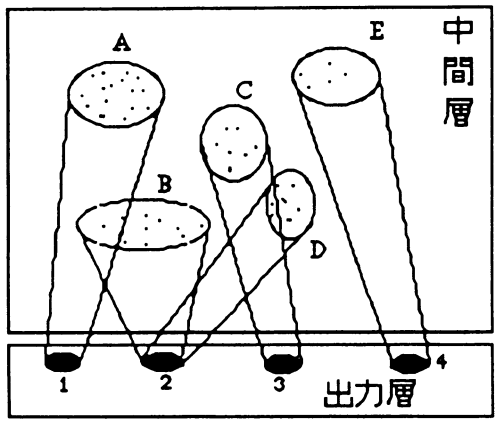


図2　クラスタとニューロンの関係

力層ニューロン1と定義されているので，この入力の出力はニューロン1である．

伝統的なニューラルネットワークが最初にネットワーク構造を決め，そして学習させ，重み修正をするアプローチであるが，われわれのモデルには入力層ニューロン数が入力変数で決められ，出力層のニューロン数が与えられた問題により明確にされている．中間層のニューロン数はガウスクラスタリング法に基づいて得られたクラスタ数と設定する．そして，この中間層のニューロン値を教師信号に従って，出力層のニューロンへの連結を調整する．このように，要求解析精度によってクラスタ数（中間層ニューロン数）を増やしながら，逐次的にニューラルネットワークを構築する．これは従来のニューラルネットワークと根本的に違うところである．

中間層から，出力層への出力は，教師信号により決定教師あり学習法であるが，入力層から中間層への出力はガウスクラスタリング法を用いた教師なし学習法で，二つ学習方法を融合するアプローチである．

このニューラルネットワークの生成手順を以下のように示す．

1）教師信号TTk，最大クラスタ数C，計算回数T，データ数N,定数α，εを設定する．

2）中間層から出力層への連結初期化hij=0

3）上述したガウスクラスタリングアルゴリズムで重心$\{v_i\}$とメンバーシップ$\{u_{ik}\}$を計算する．

4）For k=1 to N and each For i=1 to c

If $u_{ik} > \alpha$ then j=TT_k, $h_{ij} = 1$

5）If $\sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{J} h_{ij} > c$ then c=c+1 goto 2)

else stop

この生成手順は以下の図で示す．

ます，最初に，クラスタ数は2と仮定する．

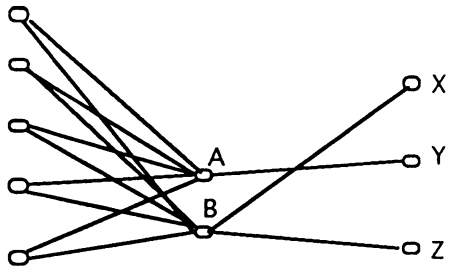


図３　中間層ニューロンが２の時

この図３に示すように，入力データがA,Bに分類された．教師信号によりAクラスタの出力がYであるが，Bに分類されたデータの出力が，XとZが二つあるので，クラスタリングを増やして，再分類の必要がある．

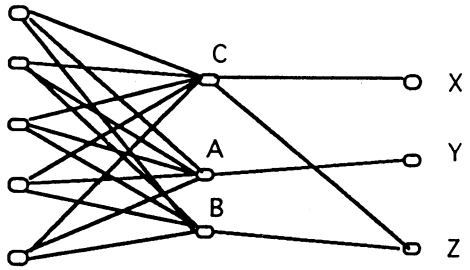


図４　中間層ニューロンが３の時

今度，図４のようにクラスタリング数が追加して再計算する．Bクラスタから，新たにクラスタCが生成される．しかし，BクラスタからZに定義できるが(f(B) = g(Z))，Cクラスタが条件満足できないので，クラスタリング数を増やす，再計算する．

以上のステップで，すべての中間層から出力層へ定義できるまで計算を繰り返す．

4　おわりに

本論文は，ニューラルネットワークにおいて中間層ニューロン数を最適化したニューラルネットワーク構造の決定方法を提案した．この方法は従来明確化されていないニューラルネットワークの中間層問題を解決可能にした．また，本方法により構築されるニューラルネットワークの学習法は，従来の教師信号ありの学習法のみのアプローチと，ガウスクラスタリング法を用いた教師なし学習法と融合するアプローチであるため，より合理的な学習法であると思われる．

参考文献

[1] R.P. Li and M. Mukaidono, "A maximum-entropy approch to fuzzy clustering", FUZZY-IEEE/IFES'95, pp.2227-2233, 1995.

[2] J.C. Bezdek, Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithme, New York, Plenum, 1981.

[3] M.R. Anderberg , Cluster Analysis for Applications, New York San Francisco London, 1973

[4] 林，李＆向殿：”重心嗅共鳴型ニューラルネットワークを用いた岩石の分類”第１０回ファジィシステムシンポジウム．

連絡先：

〒２１４

神奈川県川崎市多摩区東三田１－１－１

明治大学理工学研究科基礎理工学専攻

システム科学研究室

Tel: 044-943-7442　　梁　青

FD4-3

ニューラルネットワークにおける中間層出力のコントロール

A Hidden Unit Control by Entropy Methods

長峰伸明* 上村龍太郎** 菊池浩明* 中西祥八郎*

Nobuaki NAGAMINE Ryotaro KAMIMURA Hiroaki KIKUCHI Shohachiro NAKANISHI

* 東海大学工学部

** 東海大学計算センター

Abstract: As the information of neural networks is represented by the distributed weights and unit activities, it is a very difficult to understand the meaning of accquired knowledge of the neural networks from the given deta and patterns. Then the authors propose a new entropy algorithm to control and concentrate the internal information of the neural networks and to extract the meaning of the accquired knowledge. Finally we apply the method to pattern recognition of the alphabet, and demonstrate the ability of the meaning understanding for the knowledge accquisition of the neural networks.

1．はじめに

ニューラルネットワーク（以下ＮＮ）の有用性は広く知られているところであり、工学のみならず広範な分野に応用されている。その最大の理由はＮＮが学習能力を有しているところに起因していると言える。しかも、入出力パターン（データ）を単に提示するだけでそれらの因果関係を容易に学習することができる。このことはこれらのパターンあるいはデータに内包されている知識をＮＮが抽出・獲得していることになる。確かにＮＮの入出力関係だけに着目すれば、ＮＮはそれらの関係（知識）を明示的ではないが学習している。しかしながらこの学習内容、すなわち獲得された知識（関係）を入出力関係として表現することは極めて困難であった。これは、ＮＮの知識表現がネットワーク内の重みとユニットの活性値に分散して表現されていることに起因している。ネットワークは多数のユニットによって構成されているために、これらの値を一別しただけでは学習内容を理解することができない。すなわち、ＮＮの学習内容理解を阻害しているのはＮＮの特徴である分散表現である。従って、この分散表現を集中化することができれば学習内容を理解することが可能となることが期待できる。

ＮＮの分散表現を集中化するために、中間層ユニットの活性値に関するエントロピーの概念を導入する。このエントロピーを最小にすることにより、ユニットの出力分布をコントロールして学習内容の意味理解ができるようにする。さらに、中間層ユニットの入出力関数にガウス関数を用いて、その出力をメンバーシップ関数の出力値と見なすことにより曖昧概念も取り扱えるようにする。

2．エントロピー最小化法

本稿の主目的は、中間層ユニットの出力に着目して、この出力をコントロールする事でＮＮが如何なる知識を獲得（学習）しているかを探らんとするものである。ここで取り扱うＮＮは図１に示すような入力層、中間層、および出力層の３層からなる構造を有しているものとする。通常この様なＮＮでは、獲得された知識は入力層と中間層間の結合の重み w_{ij}、中間層と出力層間の結合の重み W_{ij}、および中間層の出力に分散して表現されている。本稿では中間層出力に着目してこの出力を集中化せんとしている。そこで、これら中間層

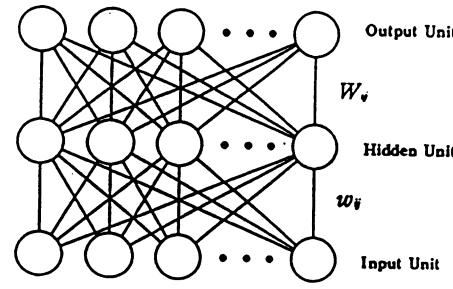


図１ N.N. の構造

出力を評価する尺度として、中間層出力に関するエントロピー（情報量）を導入する[1]。

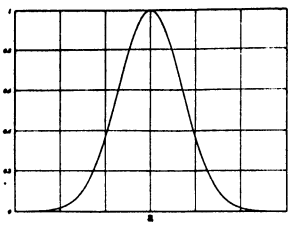
ＮＮのユニットの入出力関数には通常シグモイド関数が用いられている。ここでは中間層ユニットの出力をファジィ値として捉えるために、中間層ユニットの入出力関数として図２に示すようなガウス関数を用いている。

２．１アルゴリズム

本稿では中間層ユニットの入出力関数として次式に示すようなガウス関数を用いている。（図２参照）

$$f(x) = exp(-\frac{(x-a)^2}{b})$$

ここで、ａはガウス関数の中心を示しており、ｂは広がりを示すパラメータである。学習アルゴリズムはＮＮの重みの更新とガウス関数の中心および広がりに関する更新の３つを行う必要がある。



第２図　ガウス関数

入力層ｊ番目のユニットと中間層ｉ番目ユニット間の結合の重みをw_{ij}とし、中間層ｊ番目のユニットと出力層ｉ番目のユニット間の重みをW_{ij}とする。ｉ番目の中間層ユニットの出力は、ｆをガウス関数として、次のように表される。

$$v_i = f(u_i)$$

ただし、

$$u_i = \sum_j w_{ij}\xi_j$$

である。ただし、ξj はｊ番目の入力層の出力を表している。

ｉ番目の中間層ユニットの規格化された出力は次のように表される。

$$P_n = \frac{v_n}{\sum_{r=1}^{M} v_r}$$

ただし、Ｍは中間層ユニットの数を表している。この規格化された出力を用いて、中間層出力に関するエントロピーを次のように定義する。

$$H = -\sum_{n=1}^{M} P_n \log P_n$$

このエントロピーは中間層出力によって表されているので中間層エントロピー(Hidden Entropy)と呼ぶ。このエントロピーを用いて中間層の情報量を定義することができるので、ここではエントロピーと情報量を同一視して進める。本稿ではこのエントロピー（情報量）を最小化（最大化）する事により中間層ユニットの出力を集中化して、学習内容の理解をせんとするものである。

本稿では中間層ユニットの入出力関数としてガウス関数を用いている。そこで、学習アルゴリズムとしては

1：結合の重みを更新する

2：ガウス関数の中心位置を更新する

3：ガウス関数の広がりを更新する

のような３通りの場合が考えられる。これらの場合について学習アルゴリズムを求める。

先に定義したエントロピー関数を用いて、重みに関する学習則を次のように定義する。

$$\Delta w_{ij} = -\alpha_w \frac{\partial H}{\partial w_{ij}} - \beta_w \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$$

$$\frac{\partial H}{\partial w_{ij}} = (-(\log P_i + 1)/\log 2)\frac{\sum_{r=1}^{M} v_r - v_i}{(\sum_{r=1}^{M} v_r)^2} f'(u_i)\xi_j$$

ここで、第１項はエントロピーによる項を示し、第２項は通常の２乗誤差を最小にする項である。また、中心位置に関する学習アルゴリズムを次のように定義する。

$$\Delta a_i = -\alpha_a \frac{\partial H}{\partial a_i} - \beta_a \frac{\partial E}{\partial a_i}$$

$$\frac{\partial H}{\partial a_i} = \frac{\partial H}{\partial P_i}\frac{\partial P_i}{\partial v_i}\frac{\partial v_i}{\partial a_i}$$

$$= (-(\log P_i + 1)/\log 2)\frac{\sum_{r=1}^{M} v_r - v_i}{(\sum_{r=1}^{M} v_r)^2} v_i \left(\frac{2}{b_i}\right)(u_i - a_i)$$

ただし、第２項は２乗誤差に関する項である。ガウス関数の広がりに関する学習アルゴリズムは次のように求める。

$$\Delta b_i = -\alpha_b \frac{\partial H}{\partial b_i} - \beta_b \frac{\partial E}{\partial b_i}$$

$$\frac{\partial H}{\partial b_i} = \frac{\partial H}{\partial P_i}\frac{\partial P_i}{\partial v_i}\frac{\partial v_i}{\partial b_i}$$

$$= (-(\log P_i + 1)/\log 2)\frac{\sum_{r=1}^{M} v_r - v_i}{(\sum_{r=1}^{M} v_r)^2} v_i \frac{(u_i - a_i)^2}{(b_i)^2}$$

ここで、α、β等は学習に関するパラメータである。

3．アルファベットの文字認識

アルファベットは文字認識には適切なパターンなので、ここでは大文字のアルファベット２６文字の認識を例に取り、ＮＮの学習内容理解を考える。アルファベットの各文字は図３に示すような5×7の要素を用いて表す。一般に、階層型ＮＮに学習させる場合には教師信号が必要になる。教師信号に入力パターンと異なる信号を用いる場合には教師信号自体に入力パターンを弁別する情報が内在する。この影響を排除するために、ここでは入力パターンと教師信号には同じパターンを使用する。すなはち、オートエンコーダーを用いる。この様な理由から入力層ユニットの数と出力層ユニットの数は同数である。

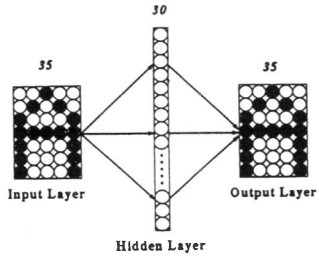


図３　オートエンコーダー

3．1　結合の重みを変えた場合

図４に、本手法の中で結合の重みだけを変化させてアルファベット２６文字を学習させた場合の中間層出力を示す。また、図５は通常の誤差逆伝搬法を用いた場合の中間層出力である。図４はエントロピー最小化した場合の図であるが、これと反対にエントロピーを最大化した場合の中間層出力を図６に示す。

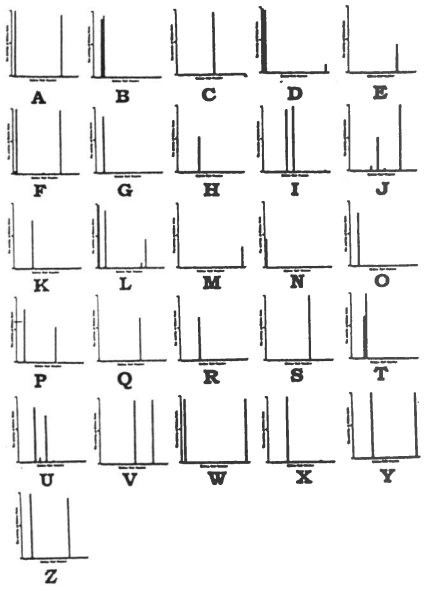


図４　エントロピー最小化

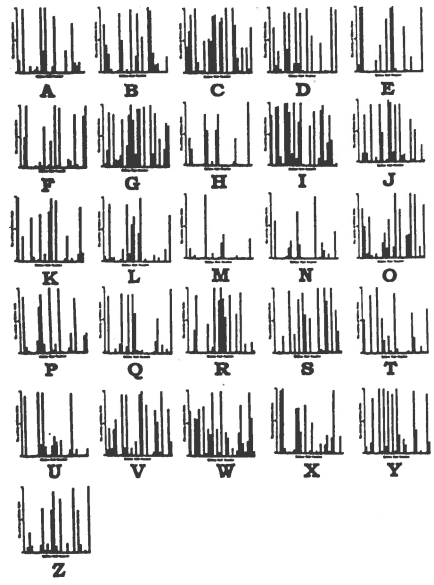


図５　誤差逆伝搬法

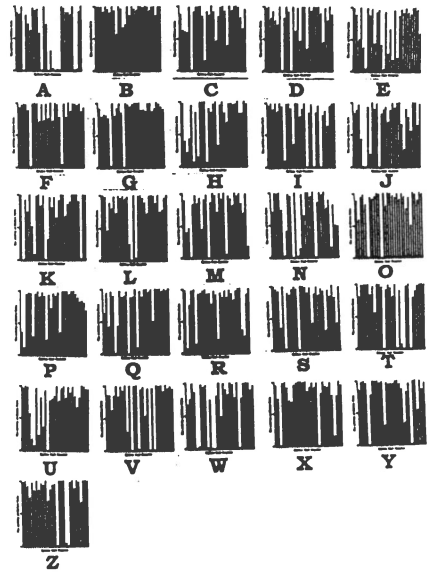


図６　エントロピー最大化

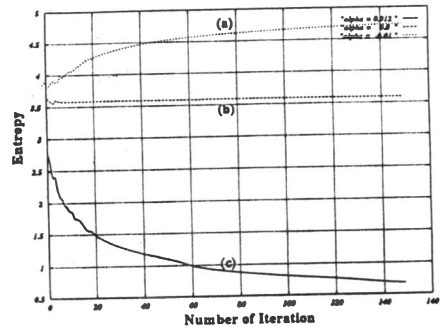


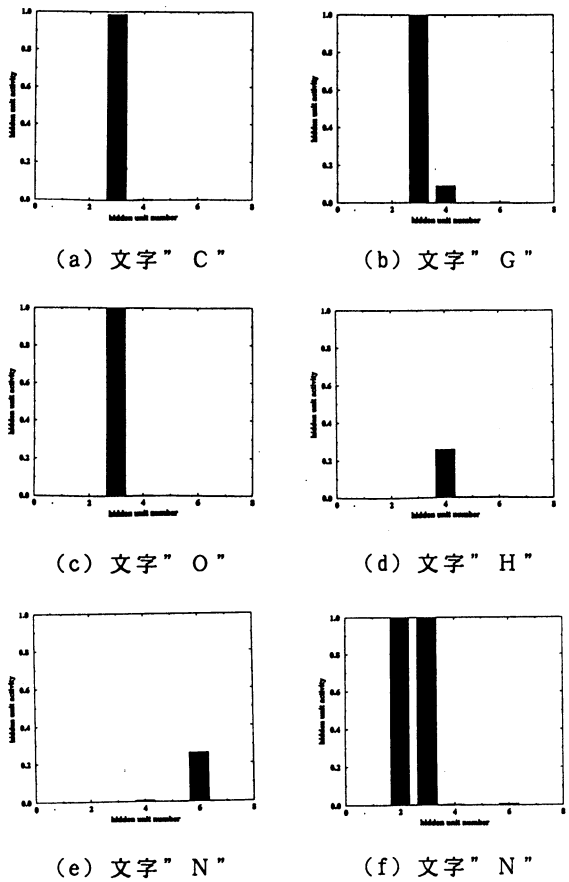
図７　エントロピーの変化

図７はエントロピー最小化（曲線(ｃ)）、ＢＰ法（曲線(ｂ)）、最大化（曲線(ａ)）それぞれの場合の中間層のエントロピーを示している。図４、５、６、７よりエントロピーを最小化することにより、中間層ユニットが個別化されていることがわかる。さらに、図４からもわかるように、エントロピー最小化法では２６文字を学習するのに総ての中間層ユニットを使用しては居ない。一方ＢＰ法やエントロピー最大化法では総てのユニットを使用して学習している。このことから、エントロピー最小化法ではエントロピーの意味におけるネットワークの最小構造を示している事がわかる。

３．２ 提案手法を用いた場合

本稿では中間層ユニットの入出力関数にガウス関数を用いている。ガウス関数はその位置と広がり決めるパラメータによって特徴づけられる。そこで、本手法ではガウス関数の位置と広がりおよび結合の重みを同時に変化させて学習する方法を採用している。

ここではアルファベット２６文字の中で、Ｃ、Ｇ、ＯとＨ、Ｎ、Ｙの６文字を例に取り説明する。



（a）文字" C"　（b）文字" G"

（c）文字" O"　（d）文字" H"

（e）文字" N"　（f）文字" N"

図８　中間層ユニットの出力

Ｃ、Ｇ、Ｏの３文字は類似の文字であり、他の３文字は類似度の低い文字である。また、ここで用いたネットワークの中間層ユニットの数は６個に設定した。図８にこれらを学習させた場合の中間層出力を示す。ＣＧＯは類似の文字なのでユニット" ３"の１つのユニットで学習していることが解る。

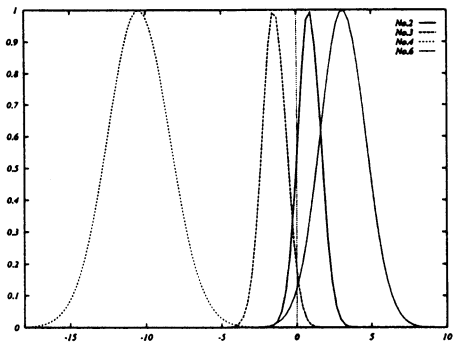


図９　中間層ユニットのガウス関数

図９に学習に使われた中間層ユニットのガウス関数の位置を示す。使用されたユニットの番号は" ２、３、４、６"の４個のユニットである。図９において、左から順にNo.4, No.3, No.2, No.6のユニットのガウス関数を示している。図からわかるように、各ユニットのガウス関数の位置が近接している所では、関数の広がりが余り大きく広がらない事を示している。

４．まとめ

中間層ユニットにガウス関数を用い、中間層のエントロピーをコントロールして学習させる方法を提案した。中でも中間層のエントロピーを最小化することで学習内容の意味理解ができることを示した。

参考文献

(1) R. Kamimura, R. Yager, and S. Nakanishi: "Representing Accquired Knowledge of Neural Networks by Fuzzy Sets; Control of internal information of neural networks by entropy minimization," Proc. of FUZZ-IEEE'94, pp.58-63, 1994.

連絡先
中西祥八郎
〒259-12 平塚市北金目1117
東海大学工学部電気工学科

FD5-1

リカレント型ニューロ・ファジィモデルによるカオス力学系の学習

Learning Chaotic Dynamics in RBF Recurrent Networks

○ 三好哲也　市橋　秀友，岡本　茂樹，早川　武
○ Tetsuya Miyoshi, Hidetomo Ichihashi, Shigeki Okamoto, Takeshi Hayakawa
大阪府立大学工学部
College of Engineering, University of Osaka Prefecture

Abstract : Recurrent neural network with feedback and self-connection seems suited for temporal dynamics which expresses the input-output relation depending on time. Two learning procedures of the recurrent networks for computing gradients of the error function have been proposed. One is to use sensitivity equations, the other is to use adjoint equations. We propose a recurrent RBF (Radial Basis Function) network and describe a procedure for finding the error gradients. We take advantage of the excellent function approximation capability of the RBF network.

キーワード：リカレントネットワーク，RBF，カオス

1. はじめに

フィードバック結合や自己ループを持つことによりダイナミクスが表現できるリカレント・ニューラルネットワークでは，多層型ニューラルネットのBP法のように学習アルゴリズムを簡単に導くことができないため，感度方程式や随伴方程式などの感度解析によるパラメータ最適化法が用いられている．感度方程式を用いるものとして，銅谷ら [1] は，連続時間のリカレントネットワークに対して近似的BP学習則を適用し，さまざまな振動パターンがニューラルネットに学習できることを示している．離散時間に対しては，Williamsら [2] の研究がある．また随伴方程式を用いるものとして，河村 [3] や Pearlmutter ら [4] や黒江 [5] の研究がある．

本研究では，従来のシグモイド関数を用いるニューラルネットワークに比べて関数近似能力や学習効率に優れているとされているRBF（Radial Basis Function）[6, 7] を用いたリカレント型ネットワークを提案する．連続時間モデルと離散時間モデルの二つの学習則を黒江 [8] に従って導出し，非線形ダイナミクスやカオスダイナミクスの学習を行う．カオス（Chaos）とは，ある方程式に従う力学系の解が初期値に鋭敏に依存する予測不可能な振る舞いを示す現象であり，位相空間で観測可能な安定状態（力学系でのアトラクタ）が存在するものをいい，非線形力学系の中でも学習が難しい対象である．数値シミュレーションとして，Rössler方程式 [9] やカオスニュラルネットワーク [10, 11] をとりあげ，観測されたカオス時系列からそれらの力学系をリカレント型RBFネットワークに同定する．

2. リカレント型 RBF ネットワークによる連続時間モデルの学習

RBFネットワークは，ファジィ推論モデルとも，3層ニューラルネットワークともみなすこともができ，ニューロ・ファジィと呼ばれている [12, 13]．N個のサブモデルがそれぞれフィードバック結合や自己ループを含む任意の結合を持つ完全相互結合型リカレントネットワークの連続時間モデルを考える．対象とするネットワークモデルを図1に示す．ネットワーク全体のモデルを外部入力のない自由系を表す常微分方程式

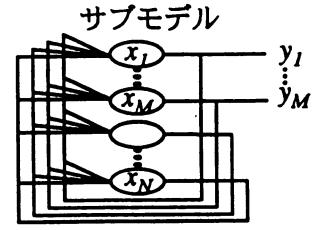


図1 リカレント型RBFネットワーク

$$\frac{d\boldsymbol{x}}{dt} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}), \quad \boldsymbol{x}(t_0) = \boldsymbol{x}_0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} g_r(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) &= \sum_{k=1}^{K} \mu_k^r w_k^r \\ &= \sum_{k=1}^{K} \left\{ \prod_{j=1}^{N} \exp\left(-\frac{(x_j - a_{jk}^r)^2}{b_{jk}^r} \right) \right\} w_k^r \end{aligned} \tag{2}$$

と表す．ただし，$\boldsymbol{g}(\in R^N)$はガウス基底を用いるRBFネットワーク，$\boldsymbol{x}(\in R^N)$はサブモデルの状態変数ベクトル，$\boldsymbol{w}$，$\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$はRBFの未知パラメータを表すベクトルである．出力$\boldsymbol{y}(\in R^M, M \leq N, M$；出力数）は，ベクトル$\boldsymbol{x}$の要素の一部で

$$\boldsymbol{y} = I \cdot \boldsymbol{x} \tag{3}$$

$$I = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & & O & \\ & 1 & & O \\ & & \ddots & \\ O & & 1 & \end{array} \right), \quad (I \in R^{M \times N}) \tag{4}$$

とする．

また，このときのネットワークの学習に用いる評価関数Eを，ネットワークの出力$\boldsymbol{y}$と観測された出力時系列データ（教師信号）$\boldsymbol{y}^*$との二乗誤差で表し

$$E = \int_{t_0}^{t_f} L(\boldsymbol{y})\, dt \tag{5}$$

$$L(\boldsymbol{y}) = \frac{1}{2} (\boldsymbol{y} - \boldsymbol{y}^*)^T \cdot (\boldsymbol{y} - \boldsymbol{y}^*) \tag{6}$$

とする．ただし，t_0, t_fは学習で考慮すべき初期時刻および終端時刻である．

未知パラメータ$\boldsymbol{w}$，$\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$の学習則は次式の勾配法を用いる．

$$c_i^{NEW} = c_i^{OLD} - \lambda \frac{\partial E}{\partial c_i} \tag{7}$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = \int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial \boldsymbol{y}}{\partial c_i}^T \cdot \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{y}} dt \tag{8}$$

ただし，c_iは未知パラメータで $c_i \in \{w_k^r, a_{jk}^r, b_{jk}^r | j, r = 1, \cdots, N, k = 1, \cdots, K\}$，$\lambda$は正の学習係数である．感度方程式（Forward Sensitivity Equation）や随伴方程式（Adjoint Equation）を用いて勾配を求める [8]．

式 (8) において，$\partial L/\partial \boldsymbol{y}$ は直接計算できる．$\boldsymbol{x}$ の初期値はパラメータ$\boldsymbol{w}$，$\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$に依存しないので$\partial \boldsymbol{x}(t_0)/\partial c_i = \boldsymbol{O}$ とし（$\boldsymbol{O}$;零ベクトル），$\boldsymbol{z}_i = \partial \boldsymbol{x}/\partial c_i$，$G = \partial \boldsymbol{g}/\partial \boldsymbol{x}$ （$\in R^{N \times N}, G$; $\boldsymbol{g}$ の $\boldsymbol{x}$に関するヤコビ行列），$\boldsymbol{g}_{c_i} = \partial \boldsymbol{g}/\partial c_i$ とおき，式 (1) を未知パラメータ c_iで偏微分すると

$$\frac{d\boldsymbol{z}_i}{dt} = G \cdot \boldsymbol{z}_i + \boldsymbol{g}_{c_i}, \quad \boldsymbol{z}_i(t_0) = \boldsymbol{O} \tag{9}$$

となる．式 (9) は，感度方程式と呼ばれている．この感度方程式を区間 $[t_0, t_f]$ で積分することにより，$\boldsymbol{z}_i$が算出できる．このとき式 (8) の$\partial \boldsymbol{y}/\partial c_i$は$\boldsymbol{z}_i$ の一部であり$\partial \boldsymbol{y}/\partial c_i = I \cdot \boldsymbol{z}_i$ で求めることができる．

感度変数$\boldsymbol{z}_i$に対し，$\boldsymbol{z}$の随伴変数$\boldsymbol{v}(\in R^N)$ を導入する．式 (9) の両辺の各項と$\boldsymbol{v}$との内積をとると

$$\begin{aligned} \frac{d\boldsymbol{z}_i}{dt}^T \cdot \boldsymbol{v} &= (G \cdot \boldsymbol{z}_i)^T \cdot \boldsymbol{v} \\ &\quad + \boldsymbol{g}_{c_i}^T \cdot \boldsymbol{v} \end{aligned} \tag{10}$$

となる．ここで

$$\frac{d}{dt}(\boldsymbol{z}_i^T \cdot \boldsymbol{v}) = \frac{d\boldsymbol{z}_i}{dt}^T \cdot \boldsymbol{v} + \boldsymbol{z}_i^T \cdot \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} \tag{11}$$

$$(G \cdot \boldsymbol{z}_i)^T \cdot \boldsymbol{v} = \boldsymbol{z}_i^T \cdot (G^T \cdot \boldsymbol{v}) \tag{12}$$

なる関係を用いると

$$\boldsymbol{z}_i^T \cdot \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} + \boldsymbol{z}_i^T \cdot (G^T \cdot \boldsymbol{v}) = -\boldsymbol{g}_{c_i}^T \cdot \boldsymbol{v} + \frac{d}{dt}(\boldsymbol{z}_i^T \cdot \boldsymbol{v}) \tag{13}$$

となる．さらに両辺に $(\partial \boldsymbol{y}/\partial c_i)^T \cdot (\partial L/\partial \boldsymbol{y})$ を加え，左辺の $\partial \boldsymbol{y}/\partial c_i$を $I \cdot \boldsymbol{z}_i$ で置き換え，$\boldsymbol{z}_i$についてまとめると

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{z}_i^T \cdot \left(\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} + G^T \cdot \boldsymbol{v} + I^T \cdot \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{y}}\right) \\ &= \frac{\partial \boldsymbol{y}}{\partial c_i}^T \cdot \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{y}} - \boldsymbol{g}_{c_i}^T \cdot \boldsymbol{v} + \frac{d}{dt}(\boldsymbol{z}_i^T \cdot \boldsymbol{v}) \end{aligned} \tag{14}$$

となる．ここで

$$\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = -G^T \cdot \boldsymbol{v} - I^T \cdot \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{y}} \tag{15}$$

とおくと，式 (15) を満たす$\boldsymbol{v}$に対して式 (14) より

$$\frac{\partial \boldsymbol{y}}{\partial c_i}^T \cdot \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{y}} = \boldsymbol{g}_{c_i}^T \cdot \boldsymbol{v} - \frac{d}{dt}(\boldsymbol{z}_i^T \cdot \boldsymbol{v}) \tag{16}$$

となる．上式を $[t_0, t_f]$ で積分すると次式が得られる．

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial \boldsymbol{y}}{\partial c_i}^T \cdot \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{y}} dt &= \int_{t_0}^{t_f} \boldsymbol{g}_{c_i}^T \cdot \boldsymbol{v}\, dt - \int_{t_0}^{t_f} \frac{d}{dt}(\boldsymbol{z}_i^T \cdot \boldsymbol{v})\, dt \\ &= \int_{t_0}^{t_f} \boldsymbol{g}_{c_i}^T \cdot \boldsymbol{v}\, dt \\ &\quad - \{\boldsymbol{z}_i(t_f)^T \cdot \boldsymbol{v}(t_f) - \boldsymbol{z}_i(t_0)^T \cdot \boldsymbol{v}(t_0)\} \end{aligned} \tag{17}$$

ここで，$\boldsymbol{z}_i(t_0) = \boldsymbol{O}$，$\boldsymbol{v}(t_f) = \boldsymbol{O}$とすると式 (8) より

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = \int_{t_0}^{t_f} \boldsymbol{g}_{c_i}^T \cdot \boldsymbol{v}\, dt \tag{18}$$

となる．$\tau = t_f + t_0 - t$と時間軸の変換を行うと，$d\tau/dt = -1$ であるので

$$\frac{d\boldsymbol{v}}{d\tau} = G^T \cdot \boldsymbol{v} + I^T \cdot \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{y}}, \quad \boldsymbol{v}(t_0) = \boldsymbol{O} \tag{19}$$

なる随伴方程式が得られる．この微分方程式を$\tau = t_0 (t = t_f)$，$\tau = t_f (t = t_0)$ の下で解き，式 (18) により勾配が計算できる．

3. 連続時間モデルでの数値シミュレーション

Rössler 微分方程式 [9] から得られるカオス時系列を提案手法により学習を行う．

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -x_2 - x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} &= x_1 + 0.344\, x_2 \\ \frac{dx_3}{dt} &= 0.44\, x_1 - (4.5 - x_1)\, x_3 \end{aligned} \tag{20}$$

初期値 $(x_1, x_2, x_3) = (0.6, 1.0, 0.09)$ のときのアトラクタは図 2(a) である．このアトラクタの時間間隔 $[0, 25]$，刻み 0.05 の 500 個の時系列データ x_1, x_2, x_3を教師信号 y_1^*, y_2^*, y_3^*とし，各々を $[-1.0, 1.0]$ 内に規準化したものについて学習を行った．用いたネットワークは 3 個のサブモデル ($N = 3$) の各々を 27 個のガウス基底 ($K = 27$) で構成し，式 (2) の未知パラメータの初期値を，w_k^rは $[-0.5, 0.5]$ 内の一様乱数，a_{jk}^rは教師信号の最小値と最大値の範囲を均等に分割した値，b_{jk}^rは 0.1 とした．随伴方程式を用いる場合の (i)y_1^*のみ，(ii)y_1^*, y_2^*，(iii)y_1^*, y_2^*, y_3^*を与えた場合の学習を行った．このときの各パラメータごとの学習係数，学習回数，学習後の評価関数の値，学習時間を表 1に示す．

表 1 例 3 の学習シミュレーション結果

	(i)y_1^*のみ	(ii)y_1^*, y_2^*	(iii)y_1^*, y_2^*, y_3^*
学習係数λ	0.0005	0.0001	0.0005
評価関数 E	0.0142	0.1236	0.0485
学習回数（回）	30000	20000	20000
学習時間（時間）	90.0	60.0	60.0

図 2(a) に教師信号の軌跡（カオスアトラクタ）を示す．学習後の各パラメータを用いた時間間隔 $[0, 100]$ における各状態変数の軌跡を同図 (b) に示す．この結果より，いずれの場合も非周期的アトラクタとなっていて，カオス力学系を近似しているといえる．

4. リカレント型 RBF ネットワークによる離散時間モデルの学習

本節では離散時間モデルの学習法について述べる．離散時間モデルの場合は RBF を用いてネットワーク全体の数式

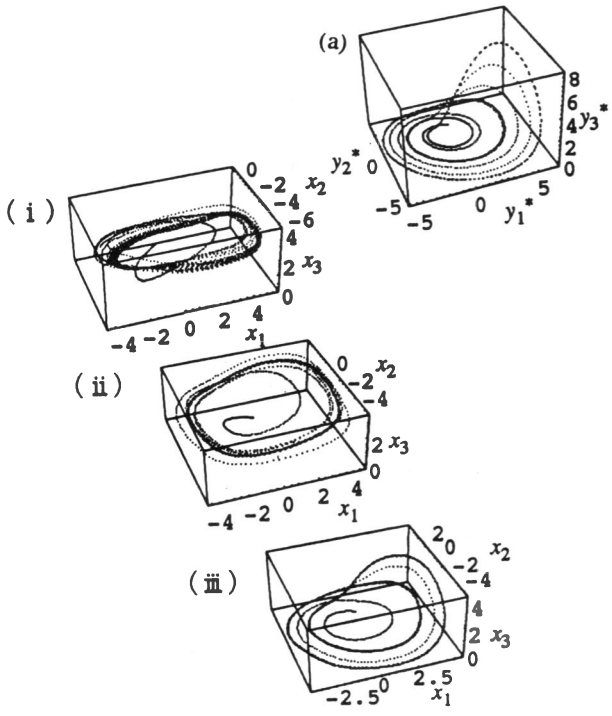


図 2 例 3 の学習シミュレーション結果（アトラクタ）

モデルを

$$x[t+1] = g(x[t], w, a, b), \quad x[t_0] = x_0 \tag{21}$$

と差分方程式で表す．出力yを状態変数xの一部として

$$y[t] = I \cdot x[t] \tag{22}$$

とする．誤差の評価関数を

$$\begin{aligned} E &= \sum_{t=t_0}^{t_f} L(y) \\ &= \sum_{t=t_0}^{t_f} \frac{1}{2}(y[t] - y^*[t])^T \cdot (y[t] - y^*[t]) \end{aligned} \tag{23}$$

とする．また勾配法による学習則は

$$c_i^{NEW} = c_i^{OLD} - \lambda \frac{\partial E}{\partial c_i} \tag{24}$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = \sum_{t=t_0}^{t_f} \frac{\partial y}{\partial c_i}^T \cdot \frac{\partial L}{\partial y} \tag{25}$$

となる．$z_i = \partial x/\partial c_i, G = \partial g/\partial x, g_{c_i} = \partial g/\partial c_i$とすると感度方程式は

$$z_i[t+1] = G \cdot z_i[t] + g_{c_i}, \quad z_i[t_0] = O \tag{26}$$

の差分方程式で表される．これを区間$[t_0, t_f]$で反復計算することにより，z_iが算出できる．$\partial y/\partial c_i$はz_iの一部であり$\partial y/\partial c_i = I \cdot z_i$で求めることができる．

次にzの随伴変数vを導入する．上式の両辺の各項と$v[\tau]$との内積をとると次式が得られる．

$$z_i[t+1]^T \cdot v[\tau] = (G \cdot z_i[t])^T \cdot v[\tau] + g_{c_i}^T \cdot v[\tau] \tag{27}$$

上式の両辺に$z_i[t]^T \cdot v[\tau+1]$を加えて整理すると次式が得られる．

$$\begin{aligned} & z_i[t]^T \cdot v[\tau+1] - z_i[t]^T \cdot (G^T \cdot v[\tau]) \\ = \; & g_{c_i}^T \cdot v[\tau] - z_i[t+1]^T \cdot v[\tau] \\ & + z_i[t]^T \cdot v[\tau+1] \end{aligned} \tag{28}$$

さらに上式の両辺から

$$\frac{\partial y}{\partial c_i}^T \cdot \frac{\partial L}{\partial y} = (I \cdot z_i[t])^T \cdot \frac{\partial L}{\partial y} \tag{29}$$

を引いて整理すると

$$\begin{aligned} & z_i[t]^T \cdot (v[\tau+1] - G^T \cdot v[\tau] - I^T \cdot \frac{\partial L}{\partial y}) \\ = \; & -\frac{\partial y}{\partial c_i}^T \cdot \frac{\partial L}{\partial y} + g_{c_i}^T \cdot v[\tau] - z_i[t+1]^T \cdot v[\tau] \\ & + z_i[t]^T \cdot v[\tau+1] \end{aligned} \tag{30}$$

となる．

$$v[\tau+1] = G^T \cdot v[\tau] + I^T \cdot \frac{\partial L}{\partial y} \tag{31}$$

とおき，$\tau = t_0 + t_f - t$かつ$v[t_0] = O$とする．また，$x[t_0]$は未知パラメータw，a，bの値に依存しないので$z_i[t_0] = O$であるとすると

$$\sum_{t=t_0}^{t_f} (-z_i[t+1]^T \cdot v[\tau] + z_i[t]^T \cdot v[\tau+1]) = O \tag{32}$$

となるので次式を導くことができる．

$$\sum_{t=t_0}^{t_f} \frac{\partial y}{\partial c_i}^T \cdot \frac{\partial L}{\partial y} = \sum_{t=t_0}^{t_f} g_{c_i}^T \cdot v[\tau] \tag{33}$$

したがって，$v[\tau]$を$t = t_f, t_f - 1, t_f - 2, \cdots, t_0$に対して$\tau = t_0, t_0 + 1, t_0 + 2, \cdots, t_f$として順に，次の随伴方程式から求めると式 (25) の勾配が計算できる．

$$v[\tau+1] = G^T \cdot v[\tau] + I^T \cdot \frac{\partial L}{\partial y}, \quad v[t_0] = O \tag{34}$$

以上の学習則は，厳密な感度計算によるものであるが，リカレントネットワークの学習を大域的な最適解にうまく収束させるのは，フィードフォワード型ネットワークの BP 学習に比べてはるかに困難であり，λを一定とする学習則の収束はほとんど期待できないとも言われている．学習の改善策として，時系列データ 1 件ごとの逐次的学習および逆伝播計算を 1 段で打ち切る方法が有効である．

5. 離散時間モデルでの数値シミュレーション

本節では，前節で述べた式 (21) の離散時間モデルを図 3 に示すように，ある時間tのときの第 1 サブモデルからフィードバックされる値$x_1[t]$を教師信号$y_1^*[t]$に変えたネットワークとする．また，時系列データ 1 件ごとの逐次的学習および逆伝播計算を 1 段で打ち切る直接 BP 法を適用する．

$$x_i[t] = \left(1.0 + \exp\left(-\frac{y_i[t]}{\varepsilon}\right)\right)^{-1} \tag{35}$$

$$y_i[t+1] = k y_i[t] + \sum_j d_{ij} x_j[t] - \alpha x_i[t] + a_i \tag{36}$$

式 (35),(36) は合原ら [10, 11] によるカオス・ニューラルネットワークの第iニューロンのダイナミクスを表す．$i, j \in \{1, 2\}$，

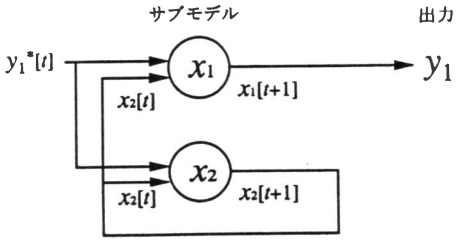


図 3 離散時間モデルのネットワーク

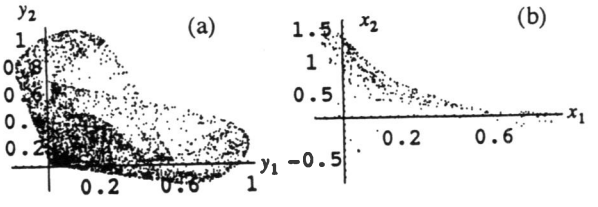


図 4 例 4 のカオスアトラクタ

$t = 0, 1, \cdots, 99$, $k = 0.8$, $d_{12} = d_{21} = 0.2$, $d_{11} = d_{22} = 0.0$, $a_1 = a_2 = 0.68$, $\varepsilon = 0.04$, 初期値 $(y_1, y_2) = (0.5, 0.0)$ としたときの y_1, y_2の時系列を位相平面上にプロットしたハートアトラクタ [10, 11] を図 4 (a) に示す. このときの y_1の時系列を教師信号 y_1^*として $[-1.0, 1.0]$ 内に規準化して学習を行った. ガウス基底 25 個 $(K = 25)$, 未知パラメータの初期値を, w_k^1は $[-0.25, 0.25]$ 内の一様乱数, w_k^2は 0.0, a_{jk}^rは $[0.0, 1.0]$ の範囲を均等分割した値, b_{jk}^rは 0.3 とした. このときの各パラメータごとの学習係数$\lambda = 0.01$, 学習回数は 50000 回とし, 学習後の評価関数の値は 0.041, 学習時間は約 6 時間であった.

図 4に,(a) カオスニューラルネットのハートアトラクタと (b) 学習後のリカレント型 RBF ネットワークの状態変数 x_1, x_2の 5000 個の出力時系列データのプロットを示す. また図 5に (a) カオスニューラルネットによる x_1のみのリターンマップと (b) RBF ネットワークによるリターンマップを示す. ここで, 学習後のネットワークの出力時系列がカオスであるかを調べるためにリアプノフ指数 [14] を計算した. $t = 300$ までのリアプノフ指数は $(\lambda_1, \lambda_2) = (0.01032, -0.00094)$, $t = 500$ まででは $(\lambda_1, \lambda_2) = (-0.00887, -0.00500)$ である. $t = 300$ 程度までは初期値に依存した軌道不安定性がある程度再現されている.

6. おわりに

本研究では, RBF を用いたリカレント型ネットワークの連続時間モデルと離散時間モデルを提案した. また, 感度方程式と随伴方程式を用いる場合の学習則の導出と, 数値例として非線形ダイナミクスやカオスダイナミクスの学習シミュレーションを行った.

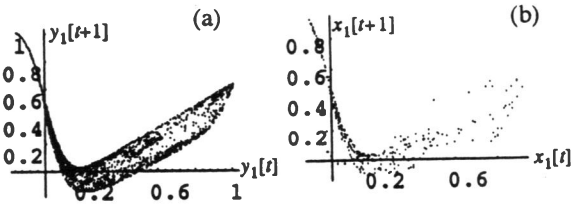


図 5 例 4 のリターンマップ

参考文献

[1] K.Doya and S.Yoshizawa, "Adaptive Neural Oscillator Using Continuous-Time Back-Propagation Learning", Neural Networks, Vol.2, No.5, pp.375-385 (1989)

[2] R.J.Williams and D.Zipser, "Experimental Analysis of the Real-Time Recurrent Learning Algorithms", Connection Science, Vol.1, pp.87-111 (1989)

[3] 河村 嘉顕, 猪飼 武夫, 小迫 秀夫," 相互結合ニューロン回路の逆伝播学習－動的システム 最適化法としての考察－", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J73-D-II, No.9, pp.1545-1554 (1990)

[4] B.A.Pearlmutter, "Learning State Space Trajectories in Recurrent Neural Networks", Neural Computation, Vol.1, No.2, pp.263-269 (1989)

[5] 黒江 康明," 動的・静的混合型リカレント・ネットワークの学習法", 電子情報通信学会技術研究報告, No.NC92-132, pp.33-39 (1993)

[6] D.S.Broomhead and D.Lowe, "Multivariable Functional Interporation and Adaptive Networks", Complex Systems, Vol.2, pp.321-355 (1988)

[7] T.Poggio and F.Girosi, "Regularization Algorithms for Learning That Are Equivalent to Multilayer Networks", Sciences, Vol.247, pp.987-982 (1990)

[8] 黒江 康明," リカレントニューラルネットワークの学習法", システム／制御／情報, Vol.36, No.10, pp.634-643 (1992)

[9] O.E.Rössler, "Continuous Chaos", Annals New York Academic Scdi., Vol.31,pp.376-392 (1979)

[10] K.Aihara, T.Takabe and M.Toyoda, "Chaotic Neural Networks", Physics Letters A, Vol.144,No.6, pp.367-373 (1991)

[11] K.Aihara, "Deterministic Prediction and Neural Dynamics", Proc. of the First NOLTA Workshop on Nonlinear Dynamical Theory of Adaptively Learning Systems, pp.367-373 (1991)

[12] 市橋 秀友," ニューロ・ファジィによる一対比較の数量化法", 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.5, pp.958-967 (1992)

[13] 市橋秀友, 佐藤禎浩, 三好哲也, 長坂一徳," ニューロ・ファジィ有限要素法と誤差解析", システム制御情報学会論文誌, Vol.8, No. 3, pp.122-129 (1995)

[14] T.Ikeguchi and K.Aihara, "An Analysis of Electroencephalographic Potentials by Deterministic Nonlinear Prediction", Proceedings of the 2nd International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp.967-970 (1992)

[問い合わせ先]

〒593 大阪府堺市学園町 1－1
大阪府立大学工学部経営工学科
市橋 秀友
TEL : 0722-52-1161
FAX : 0722-59-3340

FD5-2

ニューロ・ファジィGMDHによる関数近似

Function Approximation by Neuro Fuzzy GMDH

○大谷 崇 Takashi Ohtani
市橋 秀友 Hidetomo Ichihashi
長坂 一徳 Kazunori Nagasaka
三好 哲也 Tetsuya Miyoshi
大阪府立大学
University of Osaka Prefecture

Abstract- In this paper, we report on results of simulation studies of function approximation by Neuro-Fuzzy GMDH. Three examples are given: approximating nonlinear mappings, predicting chaotic dynamics of the Mackey-Glass equation, and classifying Fisher's iris data.

1．はじめに

シグモイド関数を基底関数とする多層型ニューラルネットワークは，任意の関数を近似できることが数学的に証明されていて，パターン認識や非線形制御などに多くの応用がなされている．主に旧ソビエト連邦でA.G.Ivakhnenko等によって開発されたGMDH（Group Method of Data Handling）[1]も，脳や神経回路網の自己組織化機能にまねた数学モデルであり多変数非線形関数のひとつの近似法となっている．GMDHと同種の手法で，主に米国で研究された適応学習ネットワーク[2]は，多項式の部分表現（基礎関数）を多層に積み上げたもので，ネットワーク型のGMDHとも呼ばれている[3]．

シグモイド関数や多項式に対して，ガウス関数などの単峰性と回転対称性をもつ関数を基底とするRadial Basis Functions（RBF，円形基底関数）も適応学習ネットワークとして用いることができる[4]．J.MoodyとC.Darken[5,6]をはじめとするRBFでの学習の収束の早さに注目した研究や正則化理論から導かれる3層ネットワーク構造に関する理論的な研究も多く行われてきている[7]．

ファジィ制御[8]の分野では基底関数に相当するものはメンバーシップ関数と呼ばれ，言語表現や人の主観に基づいて大まかな制御ルールを表現する非線形写像を獲得する方法が広く実用化されている．また実験などで得られたデータから，逐次的または適応的にモデルのパラメータを決定する手法はファジィモデリングと呼ばれている[8,9]．メンバーシップ関数にはガウス関数も用いられていて，RBFを簡略化されたファジィモデルとみなすことができる[10,11]．

本論文では，階層構造を持つGMDHの部分表現にRBFを用いるニューロ・ファジィGMDH[12]の関数近似能力を比較する．まず，単調関数，複雑な非線形関数，単峰形関数の3種類の関数の近似精度を3層ニューラルネットワーク[13]と比較する．次にMackey-Glass時間遅れ微分方程式から得られるカオス時系列の予測に適用し木構造適応学習ネットワーク[14]と比較する．さらにパターン判別問題も関数近似の応用と考えてR.Fisherのあやめのデータ[15]を用いたベンチマークテストの結果を報告する．

2．ニューロ・ファジィGMDH

ニューロ・ファジィGMDH(NF-GMDH)は図1に示す階層構造をもつ適応学習ネットワークである．このネットワークの第p層第mモデルの出力y^{pm}は，μ_k^{pm}を第p層第mモデル第k番目のガウス基底とすると，次のように求められる．

$$y^{pm}=F\left(y^{p-1,m-1},y^{p-1,m}\right)=\sum_{k=1}^{4}\mu_k^{pm}w_k^{pm} \tag{1}$$

$$\mu_k^{pm}=\exp\left[-\frac{\left(y^{p-1,m-1}-a_{k\ 1}^{pm}\right)^2}{b_{k\ 1}^{pm}}-\frac{\left(y^{p-1,m}-a_{k\ 2}^{pm}\right)^2}{b_{k\ 2}^{pm}}\right] \tag{2}$$

最終層を第P層とし，各層でのサブモデルの数をMとすると，最上層のサブモデルの出力の平均値がモデルの出力yとなる．

$$y=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}y^{Pm} \tag{3}$$

この出力値を基にして誤差逆伝播学習法を用いる．誤差の評価関数を$E=\frac{1}{2}(y^*-y)^2$とし，Eが小さくなる方向に学習を進める．学習則は

$$w_k^{pmNEW}=w_k^{pmOLD}-\tau\mu_k^{pm}\delta^{pm} \tag{4}$$

$$a_{k\ i}^{pmNEW}=a_{k\ i}^{pmOLD}-\tau\mu_k^{pm}w_k^{pm}\frac{2\left(x_i^{pm}-a_{k\ i}^{pm}\right)}{b_{k\ i}^{pm}}\delta^{pm} \tag{5}$$

$$b_{k\ i}^{pmNEW}=b_{k\ i}^{pmOLD}-\tau\mu_k^{pm}w_k^{pm}\frac{\left(x_i^{pm}-a_{k\ i}^{pm}\right)^2}{\left(b_{k\ i}^{pm}\right)^2}\delta^{pm} \tag{6}$$

である．ただし，τは正の学習係数である．また，x_i^{pm}は第p層第mモデルにおける第i入力変数で，$x_1^{pm}=y^{p-1,m-1}$,$x_2^{pm}=y^{p-1,m}$である．δ^{pm}は最上層から下の層へと計算を進める誤差逆伝播法により求める．最上層では$\delta^{pm}=-(y^*-y)$であり，それ以外の層(中間層)では，

$$\delta^{pm}=\frac{\partial E}{\partial y^{pm}}=2\sum_{l=m}^{m+1}\delta^{p+1,l}\sum_{q=1}^{K}w_q^{p+1,l}\mu_q^{p+1,l}\frac{\left(y^{pm}-a_{q\ r}^{p+1,l}\right)}{b_{q\ r}^{p+1,l}} \tag{7}$$

となる．なお，a,bの添え字rは$l=m$のとき，$r=2,l=m+1$のとき$r=1$とする．また$m=M$のときは$m+1$は1とする．以上のような操作をトレーニングデータの数だけ行い1回の学習とする．

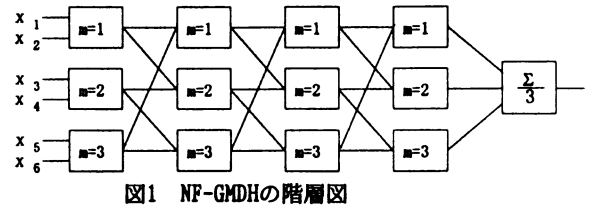


図1 NF-GMDHの階層図

3．関数近似能力のシミュレーションによる比較

関数近似能力を比較するために単調関数，複雑な非線形関数，単峰形関数，Mackey-Glass微分方程式から得られるデータをトレーニングデータとしてNF-GMDHの学習シミュレーションを行った．また，R.Fisherのあやめのデータ[15]の判別問題でも比較検討した．

3．1 種々の関数の近似

三つの5変数関数と区間[0,1]内の乱数によって生成された50件のデータ($(x_1,\cdots,x_6)$と対応するy)全てをトレーニン

グデータとして学習を行った．ネットワークは6入力1出力とした．x_6は出力yに関係しないダミーである．NF-GMDHの各層でのサブモデル数は3である．

強い非線形性がある場合や，単峰形の場合はNF-GMDHの方が誤差の減少が早く，3000回学習後の誤差も小さくなった．これはNF-GMDHでは単峰形であるガウス基底を用いているためと考えられる[16]．しかし，学習1回あたりの計算時間はNF-GMDHのほうが数倍長い．

3．2　Mackey-Glass微分方程式の解の近似

Mackey-Glassの微分方程式(8)を数値的に積分することによって537ステップの時系列データを得て，これを教師データとして6入力1出力のネットワークに学習した．数値積分には，$\dot{x}(t)$を$x(t)-x(t-1)$で近似する差分法と4次のRunge-Kutta法を用いた．Mackey-Glass微分方程式は次式のように表される．

$$\dot{x}(t)=\frac{0.2x(t-\eta)}{1+x^{10}(t-\eta)}-0.1x(t) \tag{8}$$

なお，初期値を$x=1.02$とし，$\eta=30$とした．学習に用いるデータは，現在がtステップ目であるとき，6個の入力値$x(t-6n)$：$n=0,1,\cdots,5$と1個の出力$x(t+6)$となる．NF-GMDHによる学習では，教師データとNF-GMDHの出力との誤差の2乗和を計算しながら階層数を増やして学習を行い，誤差の2乗和の最も少ない階層数でのモデルを採用した．そして同定されたモデルを用いてt=37から337まで，出力を再び入力として用いる繰り返し予測を行った．

Mackey-Glass微分方程式の解をRunge-Kutta法で求め，500件全てをトレーニングデータとしてニューラルネット及びNF-GMDHに学習した結果を表3.1に示す．ニューラルネットの結果は，慣性項の係数や隠れユニット数を種々変えてシミュレーションを行った中で最も2乗誤差の和の少なかった場合である．ニューラルネットの学習係数は0.003，慣性項の係数は0.9，隠れユニット数は10であり，NF-GMDHの学習係数は0.007である．学習回数はいずれも1万回である．学習回数が一定であるので，通常のGMDHと異なり階層数に対して誤差が単調に減少せず，4層の場合に最小となっている．そこで，NF-GMDHの階層数は，二乗誤差の和が最も少なかった4層とした．

表3.1　Runge-Kutta法による時系列の同定精度

ネットワークの構造	層	2乗誤差の和
NF-GMDH	1	0.02487
	2	0.01406
	3	0.01171
	4	0.01005
	5	0.01322
Neural Net	3(10)	3.40764

ニューラルネットによる学習はうまく収束せず，2乗誤差の和はNF-GMDHのそれと比べてかなり大きくなった．図3.2は教師データの時系列とNF-GMDHによる学習後の時系列を示している．

次に，予測精度を確認するために上述と同じ学習係数・階層数でトレーニングデータ400件，チェッキングデータ100件で学習を行った．その結果を図3.2と同様に図3.3に示す．438件目以降も精度よく予測できている．

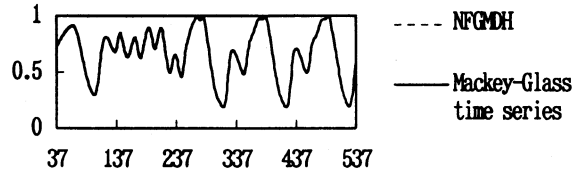


図3.2　4層のNF-GMDHの学習後の時系列

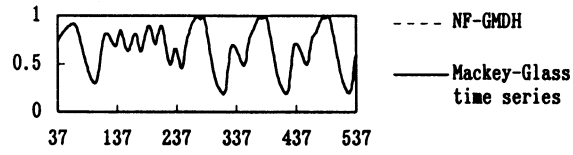


図3.3　4層のNF-GMDHの予測精度(438～537ステップ)

上述の学習後のパラメータを用いて，37ステップから337ステップまで教師データを用いずに，出力を次の入力として用いて6ステップ先の予測を繰り返した．その結果を図3.4に示す．またNMSE(Normalized Mean Squared Error)[14,17]の推移を図3.5に示す．NMSEは(9)式で定義されている．NMSEが1.0未満であることは，データの平均値を予測値とするよりはうまく予測を行っていることを意味している[18]．図3.4に示すようにほぼ200ステップ先までの予測ができている．

$$\mathrm{NMSE}=\frac{E\left[\left(\hat{x}(t)-x(t)\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}{E\left[\left(x(t)-E\left[x(t)\right]\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{9}$$

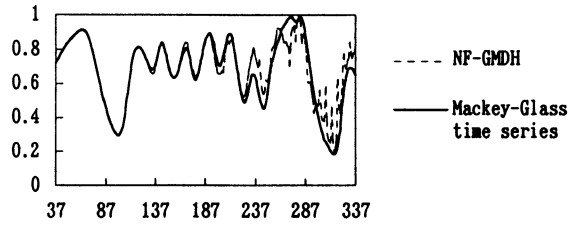


図3.4　NF-GMDHによる繰り返し予測

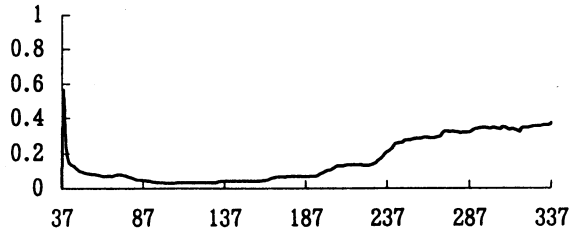


図3.5　NMSEの推移

次にMackey-Glass微分方程式の解を差分法で求めた結果について述べる．差分法ではRunge-Kutta法より計算精度が悪く，時系列が200ステップ以降から異なってくるが，NF-GMDHでは，ほぼ同様の同定精度が得られた．表3.2にシミュレーション結果を示す．ニューラルネットは最も2乗

誤差の和の少なかった場合を示している．ニューラルネットの学習係数は0.004，慣性項の係数は0.9，隠れユニット数は10であり，NF-GMDHの学習係数は0.007である．学習回数はいずれも１万回である．階層数は平均二乗誤差が最も少なかった4層とした．

前述の結果と同様に，ニューラルネットによる学習における２乗誤差の和はNF-GMDHのそれと比べてかなり大きくなった．図3.6は教師データと4層のNF-GMDHによる学習結果を示している．

表3.2　差分法による時系列の同定精度

ネットワークの構造	層	2乗誤差の和
NF-GMDH	1	0.01968
	2	0.01159
	3	0.00891
	4	0.00734
	5	0.01007
Neural Net	3(10)	2.59420

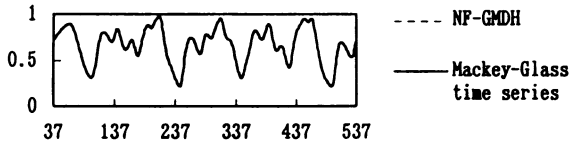


図3.6　4層のNF-GMDHの学習後の時系列

トレーニングデータ400件，チェッキングデータ100件で学習を行った結果を図3.2と同様に図3.7に示す．図3.6～3.7では図3.2～3.3とは時系列が変化しているがほぼ同様の精度が得られている．

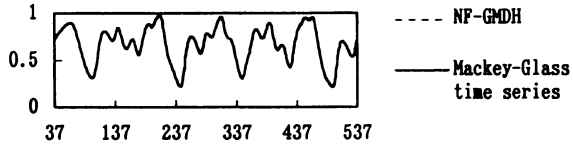


図3.7　4層のNF-GMDHの予測精度(438～537ステップ)

上述の学習を行った後に，37ステップから337ステップまで教師データを用いずに，出力を次の入力として用いて6ステップ先の予測を繰り返した．その結果を図3.8に示す．またNMSEの推移を図3.9に示す．ほぼ300ステップ先まである程度の誤差で予測できている．

NF-GMDHは階層構造の適応学習ネットワークであるが，Mackey-Glass微分方程式の解の近似を木構造適応学習ネットワークで行った研究に，Terence D. SangerによるA Tree-Structured Adaptive Network[14] (A-Tree) がある．A-Treeによる６ステップ先の繰り返し予測において400ステップ先までの予測でのNMSEの値は0.5より小さいと報告されている．それに対してNF-GMDHによる6ステップ先の繰り返し予測において400ステップ先までの予測のNMSEの値は，0.60(Runge-Kutta法)と0.40(差分法)である．ほぼ同様の結果であるが，NF-GMDHのパラメータが240個であるのに対して，A-Treeのパラメータ数が2120個でかなり多い．

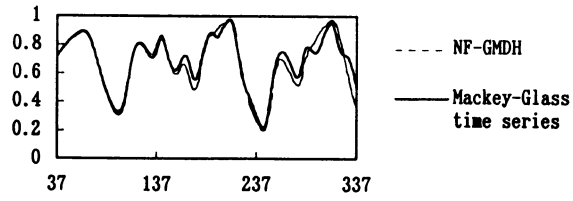


図3.8　NF-GMDHによる繰り返し予測

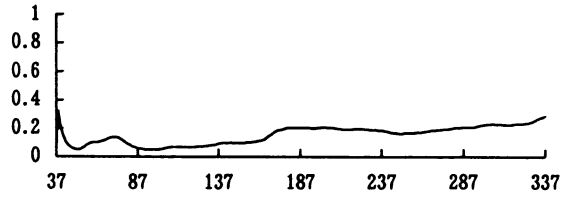


図3.9　NMSEの推移

３．３　あやめの判別

本節ではNF-GMDHをパターン判別に用いる．ベンチマークテストとして判別分析の例によく用いられているR.Fisherのあやめのデータ[15]を用いた．これはあやめのIris3品種(Setosa,Versicolor,Verginica)それぞれ50個について，花の特徴量4つ(がく片の長さ，がく片の幅，花弁の長さ，花弁の幅)を計測したものである．入力変数が4つと少数であるので，図3.10のネットワーク構造とした．モデルの入力x_1,・・・,x_4はそれぞれ表3.3の通りである．また，本研究では関数近似の問題として判別問題を考えているので，理想出力として，３つのクラスSetosa，Versicolor，Verginicaに対応する出力をそれぞれ0，0.5，1.0とした．モデルの出力が$0.3\dot{3}$より小さいならSetosa，$0.6\dot{6}$以上ならVerginica，それ以外はVersicolorと判別する．

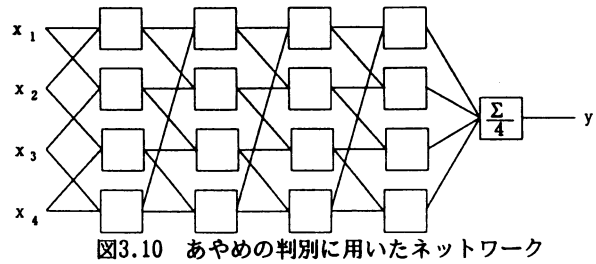


図3.10　あやめの判別に用いたネットワーク

表3.3　NF-GMDHへの入力

変数名	特徴名	変数名	特徴名
x_1	がく片の長さ	x_2	がく片の幅
x_3	花弁の長さ	x_4	花弁の幅

このモデルの判別能力を測るための基準として誤判別率(誤判別したデータ件数を総データ件数で除したもの)を用いる．2-fold-CV法を用いてこのモデルの判別能力を検討した．ここではそれぞれのクラスから25件づつ合計75件をトレーニングデータ，残りをチェッキングデータとして学習を行い，次にデータを入れ替えて学習した．後述の従来手法との比較を行うために，学習回数を1000回，学習系数を0.008に固定し，NF-GMDHの層の数を増やしながら学習を

行った．図3.11にその結果を示す．○の実線，□の太い実線はそれぞれトレーニングでの誤判別率の平均，チェッキングでの誤判別率の平均を表す．チェッキングでの誤判別率の平均が最も小さい2層のモデルの場合は，2回の誤判別率の平均値は，トレーニング，チェッキングとも0.026であった．

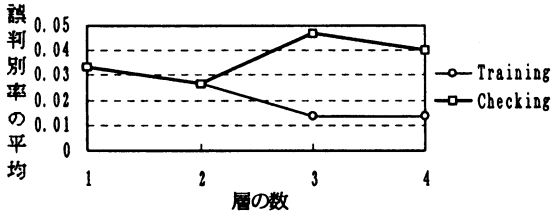


図3.11 NF-GMDHの誤判別率

以下にS.M.Weissら[19]が同じデータを用いて種々の従来手法によって判別を行った結果の誤判別率を表3.4に示す．表中のErrAPPは150件すべてをトレーニングデータとした場合の誤判別率で，ErrCvはCV法の中のLeaving-one-out法による誤判別率を示す．また，表中のMethodは，判別に使用された手法名であり，Linear以下Bayes 2nd orderまでが統計的パターン認識法，PVM rule以下が機械学習による判別である．Neural Netでの値はいずれも５回の平均である．ErrAPPでは，Nearest NeighbourとNF-GMDHのみが0である．Leaving-one-out法は1件のデータ以外を全てトレーニングデータとして用いて学習する方法で，表3.4に示される結果は，それを150回繰り返した結果の平均値であるので，2-fold-CVよりも誤判別率が低くなる．NF-GMDHでは計算時間がかかるために2-fold-CVの結果のみを示しているが，この点を考慮すると比較的良い性能が得られていると考えられる．

表3.4 種々の判別分析法による誤判別率

Method	ErrApp	ErrCv
Linear	.020	.020
Quadratic	.020	.027
Nearest Neighbor	.000	.040
Bayes independence	.470	.067
Bayes 2nd Order	.040	.160
Neural net(BP)	.017	.033
PVM rule	.027	.040
Optimal rule size 2	.020	.020
CART tree	.040	.047
NF-GMDH	.000	.027*

*：2-fold-CVの結果

またNeural Net(BP)では出力を3つにし，各々1または0を理想出力としているのに対して，NF-GMDHでは関数近似の応用として，理想出力を0，0.5，1.0の3段階としている．

4．おわりに

本研究では，階層型適応学習ネットワークであるニューロ・ファジィGMDHとニューラルネットワークの関数近似能力を一般的な非線形関数，Mackey-Glass時系列，あやめのデータを用いて比較し，その近似精度について検討した．複雑な非線形性がある場合はNF-GMDHの方がうまく近似できた．また，Mackey-Glass時系列の場合は，木構造のA-TREEよりも少ないパラメータ数でほぼ同程度の精度で予測することができた．あやめの判別では統計的判別分析等の従来法に比べてNF-GMDHの方が計算時間はかかるが良い誤判別率が得られた．

参考文献

[1] A.G.Ivakhnenko, IEEE Trans. System. Man and Cybernetics, Vol.SMC-1, No.4, pp.364-378(1971)

[2] A.N.Mucciardi, Cybernetics, Artificial Intelligence and Ecology, The Macmillan Press LTD., London, pp.159-194(1972)

[3] 池田,システムと制御, Vol.24, No.1, pp.46-54 (1980)

[4] 丸山,システム／制御／情報, Vol.36, No.5, pp.322-329(1992)

[5] J.Moody and C.J.Darken, Proc.(1988) Connectionist Models Summer School, Ed. by D.Touretzkey, G.Hinton and T.Sejnowski, Morgan Kaufman, San Mateo, CA. pp.281-294(1989)

[6] J.Moody and C.J.Darken, Neural Computation, Vol.1, pp.281-294(1989)

[7] T.Poggio and F.Girosi, Sciences, Vol.274(1990) pp.978-982(1990)

[8] 菅野,ファジィ制御, 日刊工業新聞社(1988)

[9] M.Sugeno and G.T.Kang, Fuzzy Sets and Systems, Vol.28, pp.15-33(1988)

[10] 市橋,日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.5, pp.958-967(1992)

[11] 市橋, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.2, pp.191-203(1993)

[12] K.Nagasaka, H.Ichihashi and R.Leonard, Int. J. of Production Research(to appear)

[13] D.E.Rumelhart, G.E.Hinton and R.J.Williams, Nature, Vol.323, No.9, pp.533-536(1986)

[14] T.D.Sanger, IEEE Trans. Neural Networks, Vol.12, No.2, pp.285-293(1991)

[15] R.Fisher, Ann. Eugenics, Vol.7, pp179-188(1936)

[16] 市橋, システム／制御／情報, Vol.37, No.1, pp30-37(1993)

[17] A.Lapedes and R.Farber, Neural Information Processing Systems, Ed. by D.Z.Anderson, Am. Inst. Physics, New York, pp.442-456(1988)

[18] E.Hartman and J.D.Keeler, Neural Computation, Vol.3, pp.566-578(1991)

[19] S.M.Weiss and I.Kapouleas, Neural Nets and Machine Learning Classification Methods, Proc. Int. Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.781-787(1989)

連絡先
〒593 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学工学部経営工学科
市橋 秀友 TEL:0722-52-1161. FAX:0722-59-3340
E-mail:ichi@center.osakafu-u.ac.jp

FD5-3

ウェーブレットニューロンによる信号解析とその心電図への応用

Signal Analysis by Wavelet Neuron and Its Application to Electrocardiogram

山川 烈 *1　　内野 英治 *1　　藤波 敦 *2

Takeshi YAMAKAWA　Eiji UCHINO　Atsushi FUJINAMI

*1 九州工業大学情報工学部　Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

*2 上野精機(株)　Ueno Seiki Co., Ltd.

Abstract- This paper describes a signal analysis by a wavelet neuron which is obtained by modification of an ordinary neuron with a wavelet basis. Noise reduction, data compression, and also a high speed algorithm for learning are discussed with reference to an analysis of an electrocardiogram.

1 はじめに

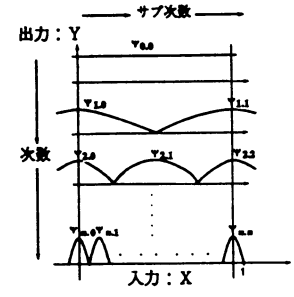
近年波形解析の手段としてウェーブレット解析が注目されている. ウェーブレット解析はフーリエ解析では難しい信号の局所的解析を得意とし, 信号に潜む局所的な変化を捉えることができる. 本研究ではこの局所的解析手段であるウェーブレット解析とニューラルネットワークの学習機能を組み合わせたウェーブレットニューロン [1] を心電図に応用し, 雑音の除去およびデータ圧縮が可能なことを実験により確認した.

2 ウェーブレットニューロン

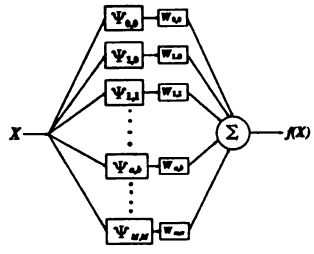
本研究では, 図1に示すような基底関数 $\psi_{a,b}$ に区分的な cos 波を使用したウェーブレットニューロン [1] を用いる. このシステムの特徴はウェーブレット級数展開:

$$Y = \sum_a \sum_b W_{a,b} \cdot \psi_{a,b}(X) \qquad (1)$$

における重み $W_{a,b}$ を学習によって求め (グローバルミニマムの保証), 入出力特性 $Y = f(X)$ を高精度で同定することができる. ここで a は次数, b はサブ次数と呼ばれる. 本研究では a を周波数に b を時間に採る.



(a) 基底関数の配置



(b) ネットワークモデル

図1 ウェーブレットニューロン

3 学習の高速化

ウェーブレットニューロンにおける学習は, 最急降下法で低次より順に高次へと進める. 今, 次数 i, サブ次数 $j-1$ までの基底関数に対して学習が進行し:

$$\int_{t_j}^{t_{j+1}} (\hat{y}(t) - y_i(t))\, dt \approx 0 \qquad (2)$$

となった状態を考える. ここで, $y_i(t)$ は次数 i までのウェーブレットニューロンの出力, $\hat{y}(t)$ は原波形 (教師信号) である. この状態を模式的に示したのが図2である. このとき, 図2中の基底関数 $\psi_{i+1,j}$ に対する重み $W_{i+1,j}$ に関してはこの時点での学習は避け, むしろ, より高次の基底関数における重みでこの波形を学習させたほうが効果的である. すなわち, 学習に使用する基底関数を選択することで学習に要する時間を短縮できる. 実際には式 (2) において, あるしきい値 θ を設け, θ 以下では学習せずに高次の基底関数での学習に任せることにする. この単純なアルゴリズムにより高速化が実現される. 本アルゴリズムを使用した場合と, 使用しなかった場合との比較結果を図3に示す. これは共に学習回数6回という条件で同じ波形を学習させた時の結果である. 本手法の有効性が確認できる.

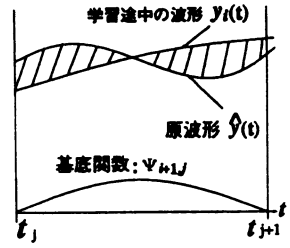


図2 学習途中の状態

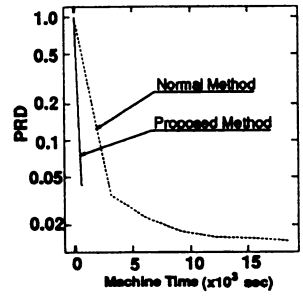


図 3 高速処理の効果 (次数 40)

図中の PRD は:

$$PRD = \frac{\sqrt{\sum_k \left((\hat{y}(k) - \overline{\hat{y}(k)}) - (y(k) - \overline{y(k)})\right)^2}}{\sqrt{\sum_k (\hat{y}(k) - \overline{\hat{y}(k)})^2}} \quad (3)$$

で定義される規格化 R.M.S. 誤差である. ここで, $\bar{*}$ は平均値を表す.

4 ウェーブレットニューロンの学習性能

ここではある適当な信号にノイズを乗せた疑似信号を人工的に作り出し, この信号に本ウェーブレットニューロンを適用した. ウェーブレットニューロンの次数を変化させた時の復元信号の変化を図 4 に示す. これにより, 次数を適当に選ぶと雑音の除去ができるのがわかる. 本実験においては, 次数 40 近辺が最良の復元性能を示している.

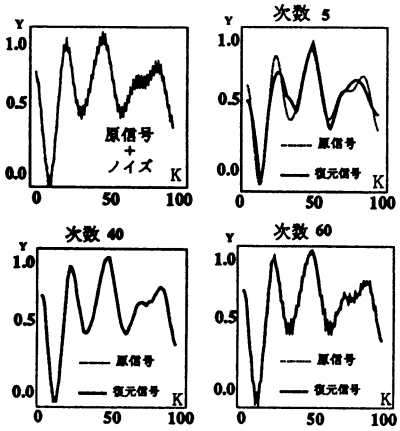


図 4 信号復元

5 心電図への応用

本手法を実際の心電図へ適用した時の信号の復元結果を図 5 に示す. 復元結果は実用上良好である.

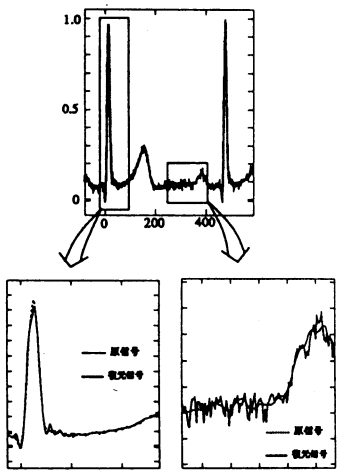


図 5 心電図の復元波形

さて, 一般に心電図データの場合, 心拍はほぼ一定でまた各周期ごとの波形は概略同じである. 各周期毎にウェーブレットニューロンを適用し, その重みの変化を調べてみる. 表 1 は図 6 に示す基線ドリフト (周期の長いノイズ) のある心電図への適用結果である. この結果より重みは各周期であまり変化していないのがわかる. このことは第 1 周期目を一種のテンプレートと考え, 第 2 周期目以降はこれより変化した重みのみを記録することによりデータの圧縮ができることを示している. また基線ドリフトは適当な基底関数の重みを補正することにより取り除くことができる.

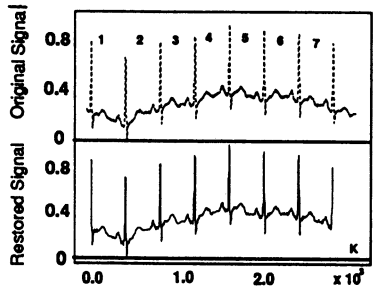


図 6 基線ドリフトを含む心電図の復元結果 (次数 45)

表 1 重みの変化数

一周期目で 0 でない重みの数 : 4 0 4	
周期	変化した重みの数
2	73
3	9
4	12
5	4
6	10
7	17

最後に, 学習したウェーブレットニューロンの重みを 3 層ニューラルネットワークへ入力し, 各部分 (P 波, QRS 波群) の特徴から個人を認識する実験を行なった. これに関する詳細は発表当日述べる.

6 結論

ウェーブレットニューロンを心電図に応用し, 雑音, 基線ドリフト等の除去, およびデータ圧縮などが行なえることを確認した. また学習後の重みは心電図の各波形 (P 波, QRS 波群) についての各種情報を反映しており, これらを用いて心電図解析 (病名診断等) を行なうことも可能と思われるが, これらについては今後の研究課題である.

参考文献

[1] T. Yamakawa, E. Uchino, T. Samatsu, The 3rd IEEE Int. Conf. on Neural Networks, pp.1391-1396,1994.

[2] 三宅, 田中 他, 信学技報, MBE92-106, pp.33-39,1992.

[3] 清水, 小栗, 山内, 信学技報, MBE94-96, pp.15-20,1994.

[問い合わせ先] 〒 820 福岡県飯塚市川津 680-4
九州工業大学情報工学部制御システム工学科
山川 烈, Phone: 0948-29-7712, Fax: 0948-29-7742
E-mail: yamakawa@ces.kyutech.ac.jp

FE1-1

局所ファジィ再構成法の外気温度予測への応用

An Application of Local Fuzzy Reconstruction Method to Temperature Prediction

○村田　昌司　　五百旗頭　正
○Shoji Murata Tadashi Iokibe

株式会社明電舎システム技術部
System Technology Division
Meidensha Corporation

Abstract: It is said that an energy demand in a district heating and cooling system, an electric power demand and etc. are highly influenced by temperature. Suppliers are required to operate these system with energy conservation. It is very important to predict temperature in near future for its requirement. For prediction of timesereis, many methods such a recurrent neural network, ARX models as a representative of stochastic process are studied. They have disadvantages, for example,in the former method it requires a much computing time and many data for learning the dynamics of the timeseries, in the latter method it requires nanny explanation variables and corrective functions. For the reason stated above, we applied the local fuzzy reconstruction method which is a non-linear short-term prediction method for temperature, because the method requires only timeseries data. In this paper, we describe the result of short term prediction of temperature which is considered chaotic.

Keywords: Short-term prediction, Local fuzzy reconstruction method, District heating and cooling system, Temperature prediction

1. はじめに

外気温度はさまざまな分野（熱源プラントの熱負荷、電力需要、エアコン、ビールの売上等）に強い影響を与えている。これらの安定供給を行いながら、省エネルギー、コストダウンを実現することが不可欠である。従来、自己回帰分析に代表される線形確率課程では、外気温度の予測に気温、湿度、天候、風向、時刻、季節等の数多くの説明変数を用いなければならない。本論文では、熱需要に強い影響を与える要素のうち、非線形でカオス性を持つと言われている外気温度の短期予測を過去の時系列データのみを用い、カオス・ファジィ理論に基づく「局所ファジィ再構成法」を適用した結果について述べる。

2. 従来手法の問題点

熱源プラントの熱負荷予測においては、代表的な手法として自己回帰モデル（ＡＲＸモデル）、カルマンフィルタ等が研究されている。しかし、気象因子を含む時系列データは、非線形となり線形回帰モデルではうまく表現できないという問題点があり、一般的にも非線形モデルは同定させるのが困難であることが報告されている(2)-(4)。また、説明変数の一部である外気温度の予測のみを天気予報の最高気温や最低気温、湿度、月別、時刻毎に定められる係数を加味した上で処理し、精度を向上させているものもあるが、数パターンに分けるといった作業が生じる(5)-(6)。その他の手法を見ても、外気温度の予測に多数のパラメータ（気温、湿度、気圧、蒸気圧、風向、風速、日射量、最高気温、最低気温）を用いなければならないといった問題があげられる。

3. 局所ファジィ再構成法による外気温度予測

局所ファジィ再構成法とは、図3.1に示すように最新の観測値z(T)の近傍空間における近傍データベクトルX(i)を占める空間をファジィ的に分割し、ｓステップ後の値X(i+s)へ移動したときの軌道のダイナミクスをIF～THEN～形式のファジィルールとして言語的表現で表す。そしてz(T)をこのファジィルールの入力データとしファジィ推論を行うことによってz(T+s)の予測値z^*(T+s)を推論する手法である(1)。この手法を外気温度予測に適用することによって、観測時系列データのみで予測を行うことができる。

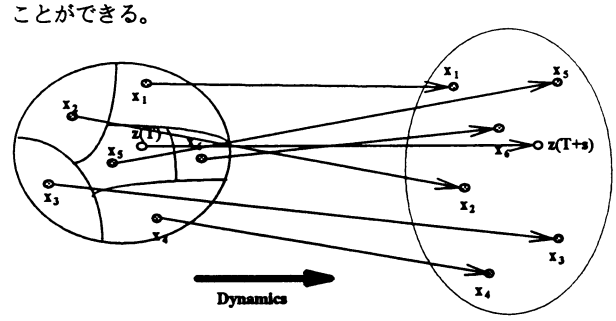


図3.1 局所ファジィ再構成法

4. 予測結果

今回は、一年を通し季節の変わりめで、予測が難しいといわれる9月～11月の外気温度予測に局所ファジィ再構成法を適用する。実際に使用した時系列データグラフを図4.1に、図4.2～図4.4に埋め込み次元(n=2)，遅れ時間(t=2)，近傍データ個数(N=15)での予測した結果を、図4.5に1～6,9,12,24ステップ先の相関係数の変化を示す。なお使用したデータは都内某所における'91.4.1～'91.11.31までの一時間毎に観測された5856データで、既知データとして'91.4.1～'91.8.31の3672データ、残りの'91.9.1～'91.11.31の2184データに関して１ステップ（１時間）先の予測を行った結果、相関係数は0.993,ＲＭＳＥは0.573℃であった。

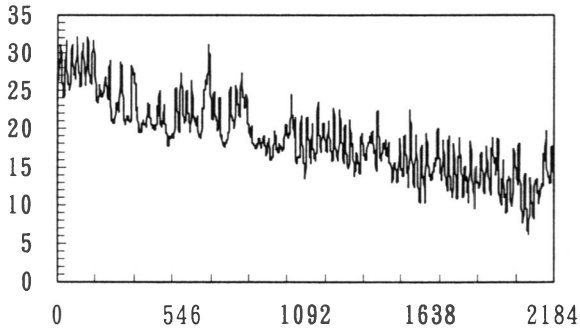


図4.1 観測値の時系列データ

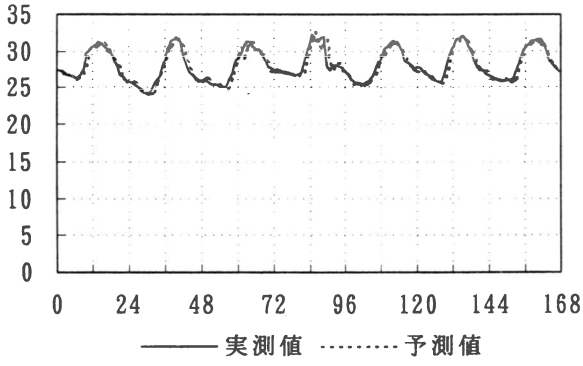


図4.2 1ステップ先の予測結果（時系列）

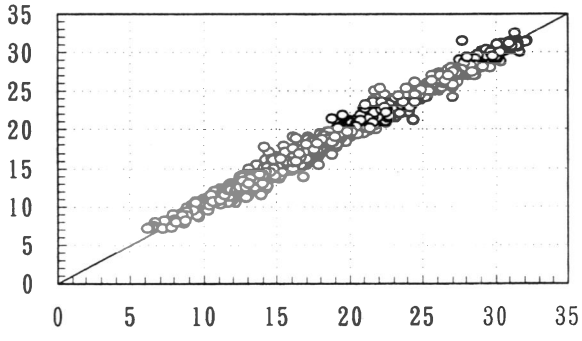


図4.3 1ステップ先の予測結果（相関）

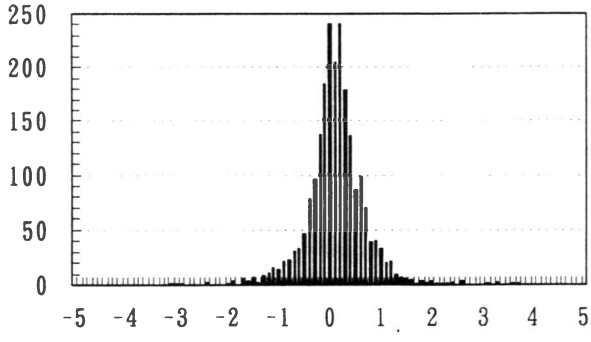


図4.4 1ステップ先の予測結果（誤差分布）

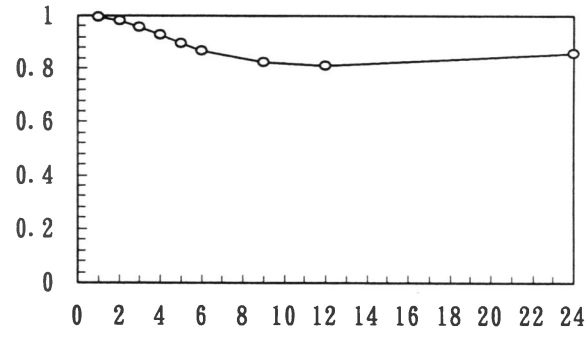


図4.5 予測ステップ先毎の相関係数の変化

5. まとめ

本論文では、局所ファジィ再構成法を用いて外気温度の短期予測を行った結果、4節に示したような良好な結果を得ることができた。また、従来の自己回帰モデル、カルマンフィルタ等においては多数の説明変数の設定やパターン分けをしなければならないが、決定論的非線形短期予測の適用により、観測時系列データ以外のデータを一切使用せずに良好な予測結果を得ることができる。

参考文献

(1)五百旗頭正,菅家正康,藤本康成,鈴木新悟:"カオス的時系列の短期予測のための局所ファジィ再構成法"日本ファジィ学会誌,Vol.7,No.1,pp186-194(1995)

(2)竹山良次,田邑什二,神村一幸,薬師寺大,岡田和之:"空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集"'91.10.31～11.2（金沢）],pp713-716(1991)

(3)金原昭臣,黒須茂,宮坂房千加,神村一幸:"空気調和・衛生工学会論文集"No.44,'90.10,pp55-62(1990)

(4)岩崎喜彦,酒井治,小林主一郎,長岩明弘,山田幸弘:"第26回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集"('92.4.21,22東京),pp121-124(1992)

(5)久札裕子,領家美奈,吉田幸男,野村淳二,中森義輝:"9th Fuzzy System Symposium"(Sapporo,May 19 ～ 21.),pp809-812(1993)

(6)水野稔,中村安弘,塚原研,山口隆男,竹内正蔵,藤田寿士:"空気調和・衛生工学"第65巻 第12号,pp49-55(1991)

連絡先

〒103東京都中央区日本橋箱崎町36-2
リバーサイドビル
株式会社明電舎
システム技術部システム開発課

FE1-2

パターンと記号を扱う連想記憶モデルとカオス的想起

Associative Memory for Patterns and Symbols and its Chaotic Retrieval

古橋武　服部陽一郎　八木透　内川嘉樹
Takeshi Furuhasi　Yoichiro Hattori　Toru Yagi　Yoshiki Utikawa
名古屋大学
Nagoya University

Abstract - In this paper, we study a new model of associative memory for the purpose of construction of the computational model of memorization and association. This model consists of two layers - the pattern layer and the symbol layer, and each layer influences the other in the process of association. Moreover, we introduce non-linear dynamics to association in the symbol layer. By this, we expect an appearance of chaotic behavior in the association. The correlation dimension of the state of the units in the symbol layer is calculated.

1. はじめに

脳における記憶と想起の工学モデルを構築することは、知能機械の実現の近道と考える。事象の記憶とその管理の仕組みが明らかとなれば、概念の獲得とその操作も可能になると期待される[1][2]。本稿では記憶と想起の工学モデルの構築を目指して、記号層とパターン層からなる新しい2層構造ネットワークにおける記憶と想起について検討する。本ネットワークは記号層とパターン層の相互作用により、連想記憶モデルの記憶・想起の容量を増大している。記号層の想起には非線形ダイナミクスを導入し、その想起のカオス性について併せて検討する。

2. 2層構造ネットワークによる連想記憶モデル

従来の連想記憶モデルでは、記憶・想起できるパターン数が全ユニット数の3割弱と少なく[3]、さらに、記憶パターン数が増えるに従って連想されるパターンの精度が劣化するという問題があった。本稿では、まず記号層とパターン層の相互作用を通した連想により、この問題の解決を図る。

図1は本論文で検討するパターン・記号の2層構造ネットワークを示す。記号層の想起結果とパターン層の想起結果が互いに影響を及ぼしあうことで、前述の問題点の解決を図る。

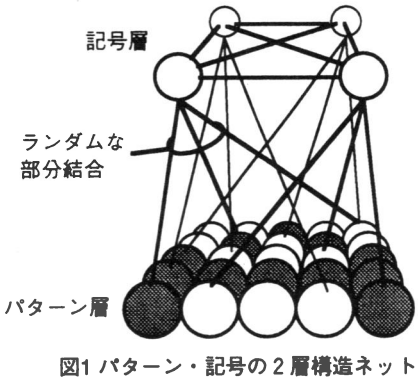


図1 パターン・記号の2層構造ネットワーク

2.1 記憶方法

(a) パターン層における記憶

パターン層は全結合型ネットワークであり、従来の連想記憶モデルで主に用いられている*Widraw*則によって結合荷重を決定し、記憶を行う。パターン層のユニットi, j 間の結合荷重をpat_w_{ij}とする。

(b) 記号層及び層間における記憶

記号層も全結合型ネットワークであり、記号層の各ユニットは互いに発火を抑制しあうように結合荷重が決められる。シンボル層のユニットi, j 間の結合荷重を$symb_w_{ij}$とする。

記号層の各ユニットはそれぞれパターン層間からランダムに選ばれた複数のユニットと結合している。その結合荷重はパターン層の記憶パターンの一つに対応して、パターン層のユニットが1であれば1、-1であれば-1とする。これによって、記号層のユニットはパターン層の記憶する多くのパターンの一つに対応づけられ、層間の結合荷重は対応するパターン情報の一部を持つことになる（図2）。記号層のユニットiとパターン層のユニットj 間の結合荷重をbet_w_{ij}とする。

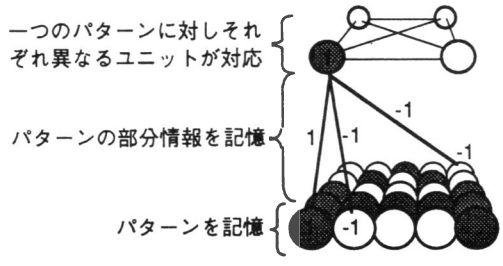


図2 2層構造ネットワークの記憶

2.2 想起方法

(a) パターン層における想起

パターン層における連想は、ランダムに選んだ部分的な結合情報を用いる[4]。

パターン層のユニットiの出力値をb_iとする。パターン層の想起は記号層の想起結果から刺激を受ける。いま、記号層のユニットlの出力が1であるとする。このときパターン層のユニットiがこの記号層ユニットlと結合しているとき、すなわち$bet_w_{li} \neq 0$のとき、$b_i(k+1)$は

$$b_i(k+1) = bet\_w_{li} \tag{1}$$

と決定される。ただし、kは想起のステップを意味する。

記号層のユニットkと結合がないパターン層のユニットiの出力は

$$b_i(k+1)=\begin{cases}1 & (\sum_j pat\_w_{ij}\ b_j(k)\geq 0 \text{ のとき})\\ -1 & (\sum_j pat\_w_{ij}\ b_j(k)<0 \text{ のとき})\end{cases} \quad (2)$$

と決定される。

(b) 記号層における想起

記号層ではパターン層における想起パターンの部分情報を初期値として、非線形ダイナミクス[5]による想起と確率による想起のいずれかを行う。

まず、非線形ダイナミクスの利用を検討する。i番目の記号層ユニットの内部状態u_iを次式で与える。

$$m\ddot{u}_i+f(\dot{u}_i,\omega t)+k\dot{u}_i=\sum_j symb\_w_{ij}\,a_j+d_3 init\_a_i \quad (3)$$

$$f(\dot{u},\omega t)=[d_0 sin(\omega t)+d_1]\dot{u}+d_2\dot{u}^2 sgn(\dot{u}) \quad (4)$$

ここでa_iはi番目のユニットの出力、$symb_w_{ij}$はユニットjからiへの結合荷重、$init_a_i$はユニットiへのパターン層からの入力、d_0, d_1は線形抵抗の係数、d_2は非線形抵抗の係数、sgn(・)は符号関数をあらわす。ただし、a_i, sym_w_{ij}, $init_a_i$は次式で表されるものとする。

$$a_i=1/(1-exp(-u_i)) \quad (5)$$

$$symb\_w_{ij}=(a_i-\sum_{j\neq i} a_j)/const \quad (6)$$

$$init\_a_i=\frac{\sum_j bet\_w_{ij}\,b_j(k)}{\left(\begin{array}{c}\text{ユニット}i\text{と結合している}\\ \text{パターン層のユニット数}\end{array}\right)} \quad (7)$$

(7)式より、パターン層からの記号層ユニットiへの入力$init_a_i$は、その記号層ユニットの対応する記憶パターンと、パターン層で想起されているパターンとの部分的な相関値となっている(図3)。また、(4)式の関数fにより(2)式の微分方程式は非線形ダイナミクスを有し、記号層ユニットの内部状態u_iは、パターン層ユニットからの外部入力$init_a_i$によって決まる値を中心に、不安定な振動を繰り返す。この振動は(4)式の係数d_2を小さくすると大きくなる。すなわちd_2を大きくすると、記号層内の各ユニットの出力値の大小関係は変化しにくいが、d_2を小さくすると、その大小関係は逆転しやすくなる。記号層においては、出力値の最も大きなユニットの持つ記号が想起されるものとする。

次に確率を用いた想起を検討する。記号層内のユニットiの発火を決定する選択確率p_iを次式で与える。

$$p_i=\begin{cases}(init\_a_i)^n / positive\ init\_a_j) & (init\_a_i>0)\\ 0 & (init\_a_i\leq 0)\end{cases} \quad (8)$$

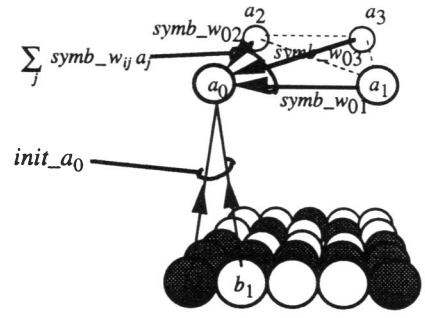


図3 記号層の想起（非線形ダイナミクスを導入）

この式は、記号層ユニットの選択確率が、外部入力のn乗で与えられることを意味する。

3. 連想実験

3.1 非線形ダイナミクスによる想起

記号層における想起は(3)式の微分方程式をルンゲ・クッタ法で解き、その計算刻み幅ごとに最大出力値を持つユニットの記憶情報が想起されたとする。パターン層の想起に利用される記号層ユニットの出力は、(5)式の値をそのまま用いるのではなく、想起の時に置いて最大出力値を持つユニットの出力を1、それ以外のユニットの出力を0に置き換えている。パターン層の想起はこの置き換えた記号層の出力を受けて、10ステップにわたって行い、10ステップ後に、パターン層から記号層への入力$init_a_i$を更新する。記号層はこの値を受けて、次の計算刻みでの想起を行う。

なお、パターン層の想起は(1)式で決定される。

今回用いたモデルでは、パターン層のユニット数256個、記号層のユニット数100個、記憶パターン数100個（パターン層ユニット数の約4割）とした。また、パターン層の想起において、パターン層ユニットは、他のユニット256個の内からランダムに選ばれた230個と結合しているものとした。図4は記憶パターンの例を示す。各図とも上側が記号層、下側がパターン層に対応する。記憶させたパターンに対応して記号層では1個のユニットの出力が1 (白抜きで示す)となっている。

実験結果を図5に示す。図5(a)はd_2=3.0とし、非線形性が弱い場合の想起であり、図5(b)はd_2=2.0とし、非線形を強くした場合の想起である。図は記号層の想起10回(計算刻み10回)ごとの想起結果を示す。(a),(b)共に、次々と記憶パターンもしくはそれに近いパターンが想起されているが、(a)では前後の想起パターンの相関値が高いのに対して、(b)ではこの値が小さい。

この記号層の連想に非線形ダイナミクスを用いる手法では、パターン層内での連想、パターン層とシンボル層の相互干渉による連想、記号層内での連想がなされ、自然に近い想起がされていると期待する。

3.2 確率による想起

前節と同じく、パターン層のユニット数256個、記号層のユニット数100個、記憶パターン数100個とした。また、パターン層の想起において、パターン層ユニットは、同一層内の他のユニット256個の内のランダムに230個から刺激を受けるものとした。また、(8)式において、n = 4とした。

実験結果を図6に示す。図6(a)は、記号層の想起1回につき、

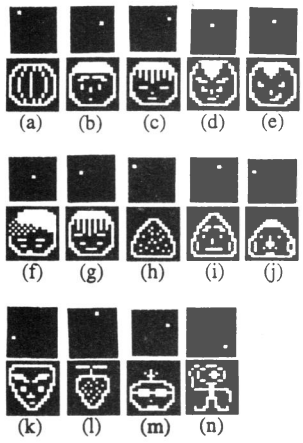


図4 記憶パターンの例

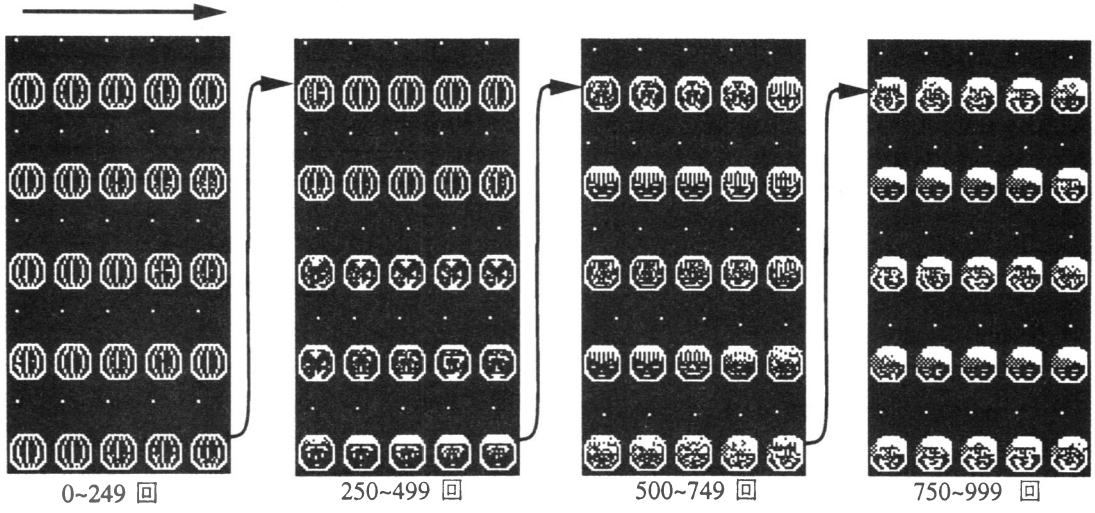
パターン層の想起を10ステップ行ったものであり、図6(b)は、記号層の想起1回につき、パターン層の想起を100ステップ行ったものである。図5と同様に、記号層の想起10回ごとの想起結果を示す。確率による想起では、記号層での想起結果が1回ごとに異なることが多いため、(a)では、この想起の変化にパターン層の想起がついて行くことができず、パターン層では記憶パターンの完全な想起はほとんどできていない。これに対して(b)では、パターン層の想起を、記号層1回に対して、100回も行っているため記憶パターンをほぼ完全に想起している。

一見するとこれは自然な想起ができているように見えるが、単に相関値の比較的近いものがランダムに選択されるだけの結果となっている。

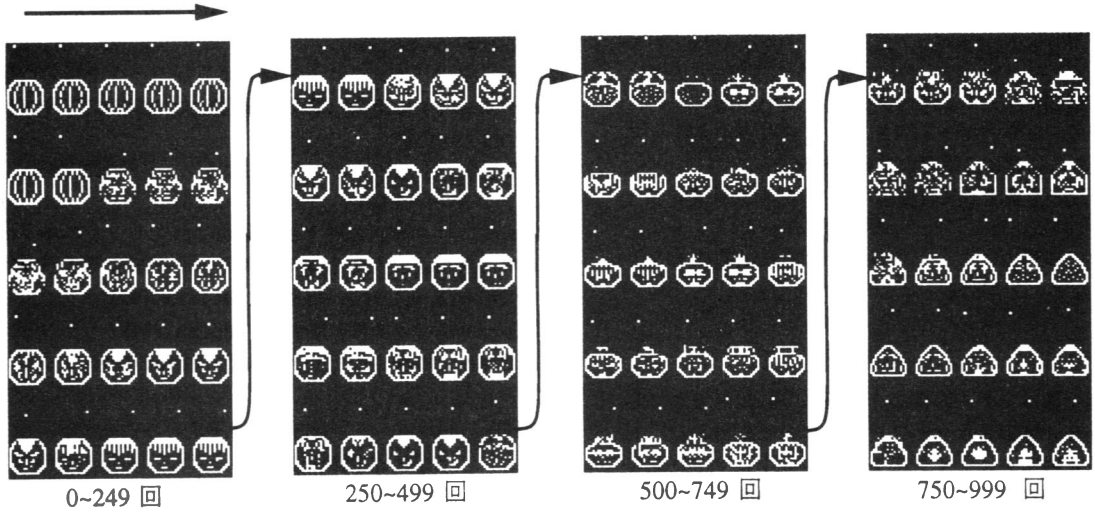
4. 想起のカオス性の検討

生物の脳内ではカオス的な挙動が観測されている[6]。そこで、非線形ダイナミクスを導入した連想のカオス性を検討する。もし、今回提案したモデルにカオス的な挙動が見られれば、このモデルによる連想が自然に近いものであることが期待できる。

今回は、このモデルの記号層ユニットの内部状態の時系列データの相関次元を求めることより、その現象の「複雑さ」を調べた。相関次元とはアトラクターの複雑さを測る指標で

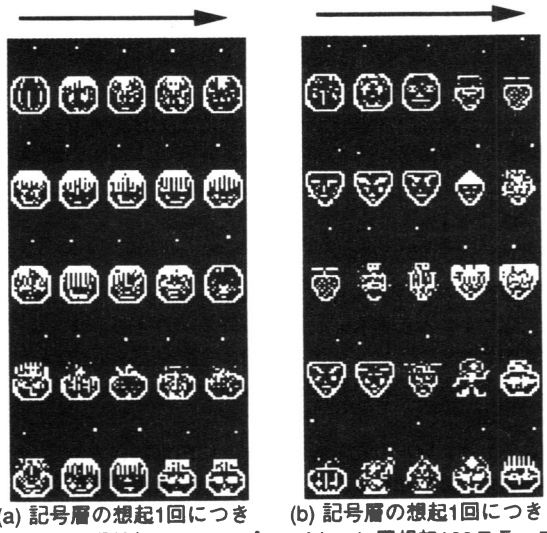


(a) 非線形性が弱い場合



(b) 非線形性が強い場合

図5 非線形ダイナミクスを導入した場合の想起結果



(a) 記号層の想起1回につき パターン層想起10ステップ　(b) 記号層の想起1回につき パターン層想起100ステップ

図6 確率による想起

あり、相関次元が整数ならばアトラクターは規則的な軌道であり、非整数ならば複雑な軌道である。また、相関次元が求まらない場合は、そのアトラクターはランダムな振る舞いをしているとみなすことができる。ここで相関次元の求め方を述べる[7]。相関次元を求めるには、相関積分

$$C(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^{N} H(\varepsilon - |x_i - x_j|) \tag{9}$$

を利用する。ここでH(・)はヘビザイド関数である。$|x_i - x_j|$はベクトル間の距離である。信号$x(t)$よりm次元空間の点の集合$x_j = (x(t_j), x(t_j+\tau), \ldots, x(t_j+(m-1)\tau)), (j=0,1,2,\ldots)$を得る。$\tau$は遅れ時間である。また、$\varepsilon$は$x_j$を中心とした球の半径である。相関次元$D_2$は

$$D_2 = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log C(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \tag{10}$$

と求まる。本稿のモデルの記号層のユニットの内部状態についてアトラクターを描いた例を図7に示す。図は埋め込み次元が3の場合である。図8は相関次元を求めた結果を示す。

埋め込み次元mを増やして行くにつれて(10)式の値はほぼ一定値に収束している。本モデルでは相関次元D_2=2.2であった。この結果から記号層のユニットの振舞いは、規則的でもなくランダムでもないことが判る。

5. まとめ

記憶と想起の基本モデルの構築を目指して、記号層とパターン層からなる2層構造ネットワークについて検討した。記号層の想起に非線形ダイナミクスを導入することで、自然に近い想起ができたと期待している。今後は、非線形ダイナミクスを導入した連想のカオス性を、リアプノフ指数等の計算によってさらに調べていく予定である。

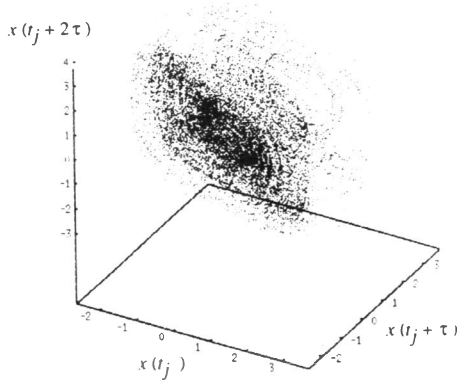


図7 アトラクターの例 （埋め込み次元3）

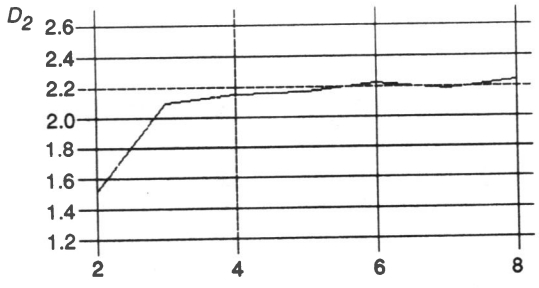


図8 相関次元の計算結果

6. 参考文献

[1] T.Takagi , T.Yamaguti and M.Sugeno "Conceptual Fuzzy Sets", Int'l Fuzzy Engineering Sympo. '91 PART2, pp.261-272 (1991)

[2]佐藤、牛田、山口、井村、高木「ファジィ連想記憶システム におけるカオス的記憶探索」日本ファジィ学会誌、vol.6, No.4, pp765-774(1994)

[3]笠原、中川「カオスニューラルネットワークを用いた想起モデルに関する研究」電子情報通信学会技術報告, NC93-99, pp.143-150(1994)

[4]奈良重俊, ピーター・デイビス「カオスと知的情報処理」ジャストシステム(1994)

[5]谷淳「カオス的再急降下法を適用したニューラルネットにおける学習及び記憶想起の動特性について」電子情報通信学会論文誌, vol.j74-A No.8 pp.1208-1215(1991)

[6]相原一幸編「カオスセミナー」海文堂(1994)

[7]長島弘幸、馬場良和「カオス入門」培風館(1992)

連絡先　〒464-01 名古屋市千種区不老町名古屋大学
工学部電子情報学科
古橋 武
Tel 052-789-2792　Fax 052-789-3166
E-mail furu@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

FE1-3

自己組織化モデルの非線形現象について

On the Nonlinear Phenomena in Self-organization Model

今井 正文、柯 トウ、清水 静江、西川 智登
Masafumi Imai, Tong Ke, Shizue Shimizu, Tomonori Nishikawa

東京都立科学技術大学
Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Abstract: This paper focuses on behavior of system included personal required as a constituent element and considers the dynamics of the system as the self-organization process in system. This system is constituted in three variables, interaction, cohesion and activity, and is identified as the self-organization model using nonlinear differential equation. And this process which indicates the changes in the states of system is analyzed through attractor by lyapunov spectrum. By considering the dynamics of the self-organization model applying the nonlinear deterministic theory, we clarify that the self-organization process indicates chaotic complex behavior.

Key Words: self-organization, nonlinear differential equation, chaos, attractor

1 序論

自己組織化の原理を導入したシステムの同定及び解析に関する研究は、工学や技術の分野において活発に行われている[1],[2],[3],[4]。自己組織化とは、集合の持つ各機能の挙動の一様性の中から新たに目的に合わせて機能的な構造を作り出すことである。つまり、集合体において固体間の相互作用によって生み出される関係であるといえる。そこには、目的に対して制御機能をより適応的に達成するような自律性が存在している。自己組織化は、物理システム、生態（情報）システム、社会システムに大別される。物理システムにおいては、「複雑な挙動を示すシステムにおける現象は空間的に一様な場の中で非線形に相互作用するようなシステムの振舞いである」として論じられている。

本研究は、社会システム、特に人間を構成要素とするシステムの挙動に焦点をあて、そのシステムの状態の動特性をシステムの自己組織化の過程として考察している。人間を含む組織のシステムは、相互作用、凝集性、組織の活動量の3変数から構成され、非線形微分方程式による自己組織化モデルとして定式化される。さらに、システムの状態の変化を示す自己組織化過程は、アトラクタ（attractor）をとおしてリアプノフスペクトルにより解析される。非線形決定論による自己組織化モデルの動特性を考察することにより、自己組織化過程がカオス的な複雑な挙動を示すことを明らかにする。

2 自己組織化モデルの定式化

人間を含む組織構造をシステムとして、それを定式化する理論的考察 [5],[6],[7] には多くの成果がある。本論では、Simon、Festinger、Homans による組織の動特性の仮定を考慮して、自己組織化モデルを構成する状態変数を、相互作用（interaction）$x_1(t)$、凝集性（cohesion）$x_2(t)$、活動量（activity）$x_3(t)$ の時間に依存する3変数とする。任意の時間における組織の状態が、$x_1(t)$,$x_2(t)$,$x_3(t)$ の3つによって、推定できるものと仮定する。変数の値は複数の人間行動に関するものであるから、平均または総和のようなレベルを表すものとする。相互作用、凝集性、活動量それぞれを高める入力を $u_1(t)$、$u_2(t)$、$u_3(t)$ とする。この3状態変数による自己組織化モデルの動特性を非線形微分方程式による集中定数系で定式化する。

2.1 自己組織化モデルの動特性の仮定

まず、自己組織化のモデルの動特性を以下のように仮定する[6]。

① 対象とする自己組織化モデルは非線形モデルであるとする。

② 相互作用の水準の変化は、凝集性の水準と相互作用を増大させようとする入力の差、及び活動量と相互作用を増大させようとする入力の差に依存する（相互作用を持たせようとする入力とは、そのグループに参加するメンバーに対する動機（motivation）など）。

③ t 時点の凝集性の変化量は、相互作用の水準と凝集性の水準、凝集性に対する入力に依存して増大する。凝集性が、相互作用の水準に対し調整を成し遂げるには、時間を要するものとする。

④ t 時点の活動量の変化量は、その時点における相互作用と活動量の水準、および活動量入力の非線形関係により増減する。相互作用と活動量が同時に発生するときと、活動量の水準が目標達成入力より低いときに活動量は発生する。また、相互作用と活動量は非線形の関係、すなわち、相乗効果をもつ。活動量が親密度に対応して調整を完了するまでには、時間を要する。

2.2 自己組織化モデルの定式化

次に、組織構造の達成度が、自己組織化のレベルとして

$$s = f(x_1(t), x_2(t), x_3(t), t) \tag{2.1}$$

が与えられるとすると、モデルの動特性の仮定から次の状態方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{x_1}(t) &= a_2(\alpha u_1(t) - x_2(t)) + a_3(\beta u_1(t) - x_3(t)) \\ &= -a_2 x_2(t) - a_3 x_3(t) + (a_2\alpha + a_3\beta)u_1(t) \\ &= -a_2 x_2(t) - a_3 x_3(t) + u_1'(t) \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\dot{x_2}(t) = b_1 x_1(t) + b_2 x_2(t) + u_2(t) \tag{2.3}$$

$$\dot{x_3}(t) = c_1 x_1(t) - c_3 x_3(t) + c_{13} x_1(t) x_3(t) + u_3(t) \tag{2.4}$$

係数パラメータや入力は、構成員の管理スタイルと組織の構造と安定性の調整という二つの面から決定されるのだが、この係数パラメータを調整するとモデルの非線形性によって挙動が大きく変化することになる。つまり、ある係数パラメータにおいて非線形現象（特にカオス現象）を示す場合がある。

3 自己組織化モデルのカオス性

本論では、各変数の時間発展に注目して、リアプノフスペクトル [8] によってモデルの挙動の複雑さを定量化する。リアプノフスペクトルは、非線形写像$\boldsymbol{x}(t) = G(\boldsymbol{x}(t))$ において、n 次元接空間の互いに直交する単位ベクトルの組$\boldsymbol{I}_i(t), (i = 1, \ldots, n)$ で与えたときの各ベクトルの拡大率を時間平均することによって得られる。具体的には、

$$\boldsymbol{e}_i(t+1) = JG(\boldsymbol{x}(t))\boldsymbol{I}_i(t) \tag{3.1}$$

$$\boldsymbol{e'}_i(t) = \begin{cases} \boldsymbol{e}_i(t) & (i=1) \\ \boldsymbol{e}_i(t) - \sum_{j=1}^{i-1} < \boldsymbol{e}_i(t), \boldsymbol{I}_j(t) > \boldsymbol{I}_j(t) & (i \geq 2) \end{cases} \tag{3.2}$$

$$\boldsymbol{I}_i(t) = \frac{\boldsymbol{e'}_i(t)}{\| \boldsymbol{e'}_i(t) \|} \tag{3.3}$$

となる。ここで、JG は G のヤコビ行列を表し、<>は内積を表す。$\boldsymbol{I}_i(t)$ は$\boldsymbol{e}_i(t)$ をイテレーション毎にグラムシュミットの直交化をしたものである。上記の繰り返しにより、リアプノフスペクトル

$$\lambda_i = \lim_{N \to \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+N} \ln \| \boldsymbol{e'}_i(t) \| \tag{3.4}$$

が得られる。このリアプノフスペクトルのうち 1 つでも、正の値をとる成分があればカオスを生じることになる。

4 数値例

モデルの動特性の仮定に基づいて、自己組織化モデルの係数パラメータを、以下のように二つのタイプに決定する。

- タイプ 1：$a_2 = 1.0, a_3 = 0.1,$
  $b_1 = 0.5, b_2 = 0.23,$
  $c_1 = 0.4, c_3 = 1.0, c_{13} = 0.23$
- タイプ 2：$a_2 = 1.0, a_3 = 0.1,$
  $b_1 = 0.5, b_2 = 0.23,$
  $c_1 = 0.4, c_3 = 1.0, c_{13} = 0.43$

この二つのタイプの自己組織化モデルに対して、定数入力と正弦的入力を考える。

4.1 定数入力を与えた場合

この二つのモデルについて、初期値 $x(0) = [0.1, 0.1, 0.1]$、定数入力 $u(t) = [0.1, 1.0, 0]$ として計算すると Fig.1 から Fig.4 のようになる。ただし、Fig.1 はタイプ 1 の自己組織化モデルの $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ のアトラクタであり、Fig.2 は活動量 $x_3(t)$ の時系列のグラフである。Fig.3、Fig.4 は、それぞれタイプ 2 のモデルに対するアトラクタと活動量 $x_3(t)$ である。さらに、リアプノフスペクトルの計算結果を table 1 に示す。

アトラクタの比較をすると、係数パラメータ c_{13}の値に対してモデルの自己組織化のレベルが異なることがわかる。table 1 のリアプノフスペクトルより、この 2 つのモデルが共にカオスである。本来、係数パラメータは組織の管理形態と構造安定性の調整という二つの面から決定されるのだが、モデルの係数パラメータを調整することにより非線形カオス現象を示す場合があることがわかる。

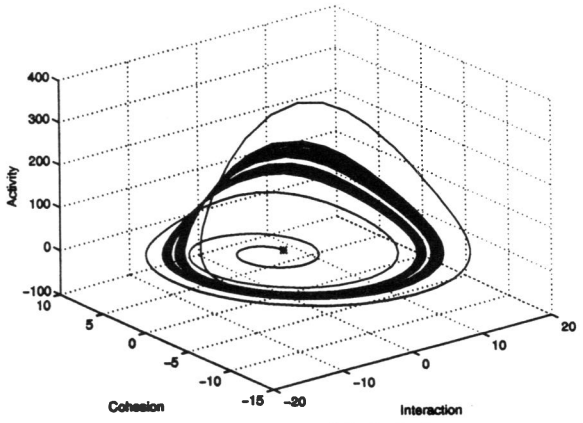


Fig.1 アトラクタ（タイプ 1）

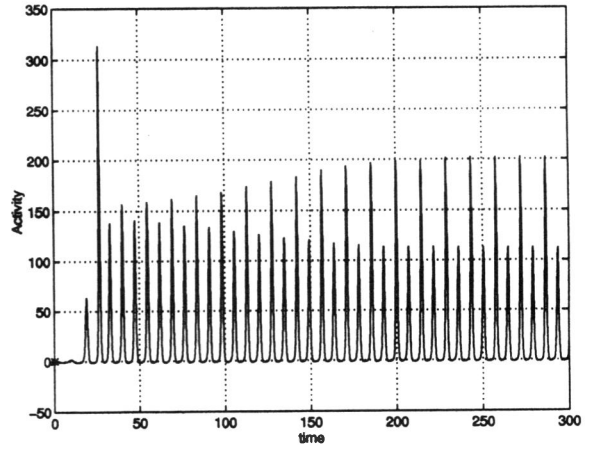


Fig.2 活動量 $x_3(t)$（タイプ 1）

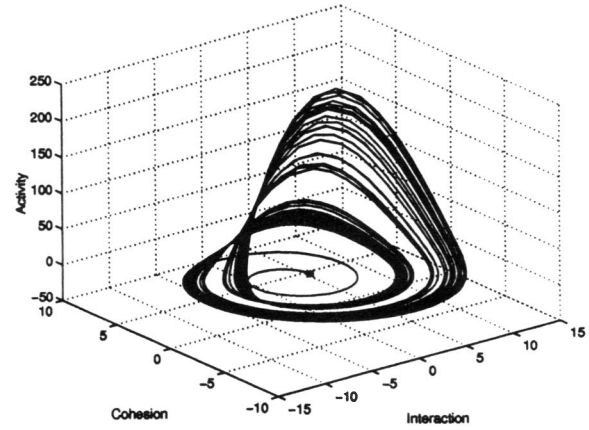


Fig.3 アトラクタ（タイプ 2）

table 1 リアプノフスペクトル

モデル	λ_1	λ_2	λ_3
タイプ 1	0.12553712	0.033021504	-1.7110100
タイプ 2	0.067338388	0.064214503	-2.3585370

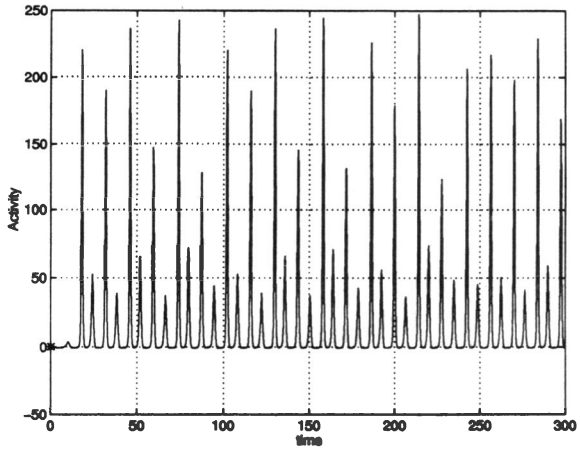


Fig.4 活動量 $x_3(t)$（タイプ 2）

4.2 正弦的入力を与えた場合

次に、タイプ 1、タイプ 2 の自己組織化モデルに対して、以下の二つの正弦的入力を考える。

- タイプ a： $u_1(t) = 0.1, u_2(t) = 1, u_3(t) = 10\sin t + 10$
- タイプ b： $u_1(t) = 0.1\sin t + 0.1, u_2(t) = \sin t + 1, u_3(t) = 0$

これらの自己組織化モデルをタイプ 1a、2a とタイプ 1b、2b とする。タイプ 1a、2a は、活動量 $x_3(t)$ を高めようとする入力として正弦的入力 $u_3(t)$ が加えられており、相互作用と凝集性に対する入力 $u_1(t)$、$u_2(t)$ は定数である。タイプ 1b、2b は、相互作用 $x_1(t)$ と凝集性 $x_2(t)$ それぞれを高めようとする入力として、正弦的入力 $u_1(t)$,$u_2(t)$ を与えたものである。ただし、活動量 $x_3(t)$ に対する入力 $u_3(t)$ は 0 とする。

タイプ 1a、タイプ 2a を計算すると Fig.5 から Fig.8 のようになる。Fig.5、Fig.6 は、タイプ 1a のモデルに対するアトラクタと活動量 $x_3(t)$ である。Fig.7、Fig.8 は、それぞれタイプ 2a のモデルに対するアトラクタと活動量 $x_3(t)$ である。

タイプ 1b、タイプ 2b を計算すると Fig.9 から Fig.12 のようになる。Fig.9、Fig.10 は、タイプ 1b のモデルに対するアトラクタと活動量 $x_3(t)$ である。Fig.11、Fig.12 は、それぞれタイプ 2b のモデルに対するアトラクタと活動量 $x_3(t)$ である。これらの正弦的入力 $u(t)$ を与えた場合のリアプノフスペクトルの計算結果を table 2 に示す。

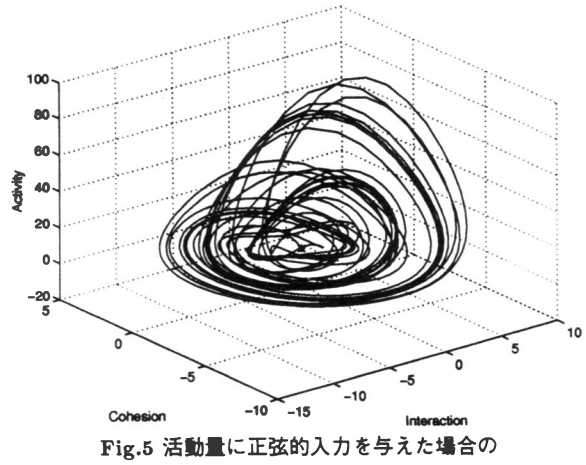


Fig.5 活動量に正弦的入力を与えた場合のアトラクタ（タイプ 1a）

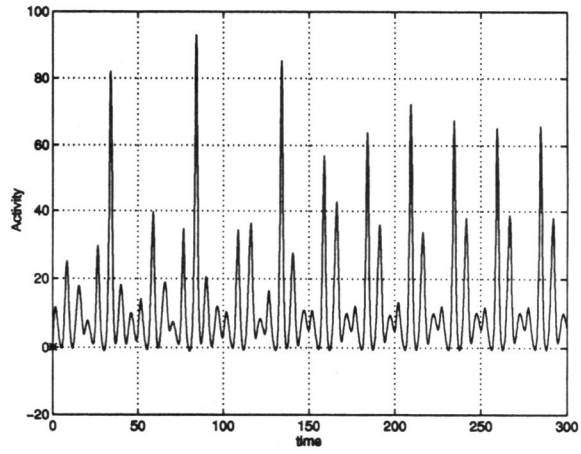


Fig.6 活動量に正弦的入力を与えた場合の活動量 $x_3(t)$（タイプ 1a）

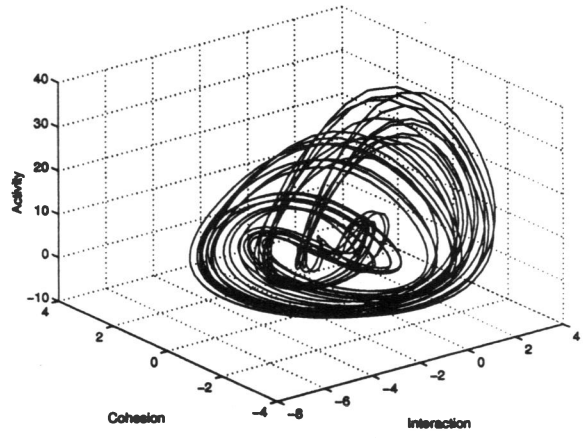


Fig.7 活動量に正弦的入力を与えた場合のアトラクタ（タイプ 2a）

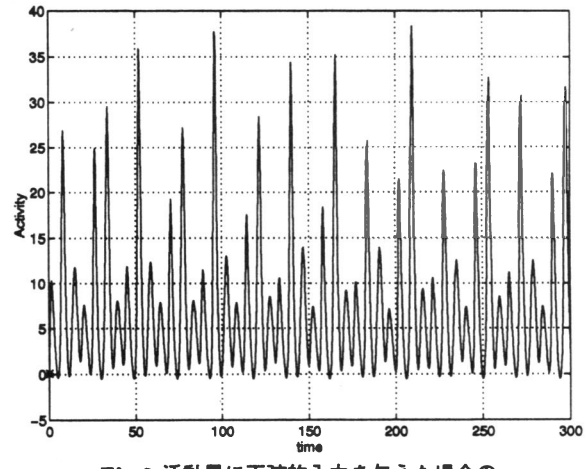


Fig.8 活動量に正弦的入力を与えた場合の活動量 $x_3(t)$（タイプ 2a）

table 2 正弦的入力を与えた場合のリアプノフスペクトル

モデル	λ_1	λ_2	λ_3
タイプ 1a	0.055063239	0.0059883149	-1.2861366
タイプ 2a	0.075193464	0.0060915351	-2.0781640
タイプ 1b	0.12569038	-0.056467593	-1.2651910
タイプ 2b	0.10188374	0.0026507527	-1.9641794

定数入力が与えられた場合のアトラクタと比較をすると、正弦的入力 $u(t)$ によってモデルの自己組織化のレベルが変化していることがわかる。table 2 のリアプノフスペクトルより、正弦的入力 $u(t)$ を与えてもモデルのカオス性はあまり変化していないことがわかる。つまり、この自己組織化モデルはカオスであり、組織の構造が本質的に同じであることがわかる。

5 結論

本論では、人間の組織システムを、相互作用と凝集性、活動量の 3 変数からなる非線形微分方程式によって自己組織化モデルとして定式化し、動特性を解析した (すなわち、相乗効果を考慮した組織モデルを提案した)。組織モデルの挙動から、係数パラメータの変化に対応してモデルの自己組織化のレベルが変化するということが得られた。また、リアプノフスペクトルから、この自己組織化モデルがカオス性を持つ場合があることが示された。つまり、係数パラメータは組織の管理形態と構造安定性の調整という二つの面から決定されるのだが、モデルの係数パラメータを調整することにより非線形カオス現象を示す場合があることがわかった。

モデルの挙動を自己組織化の過程として考察することによって、非線形決定論による自己組織化モデルが、カオス的な動特性、すなわち、複雑な状態で安定する場合があることを見いだすことができた。

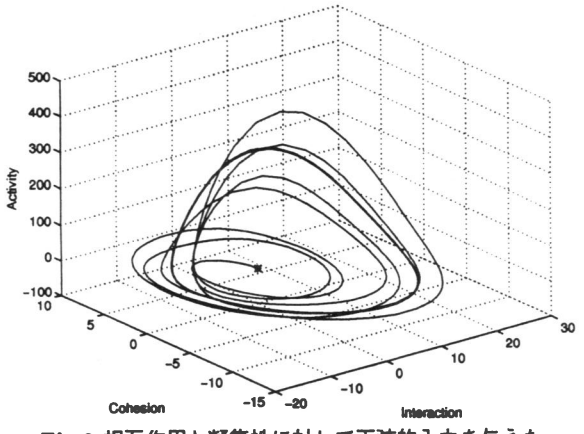


Fig.9 相互作用と凝集性に対して正弦的入力を与えた場合のアトラクタ（タイプ 1b）

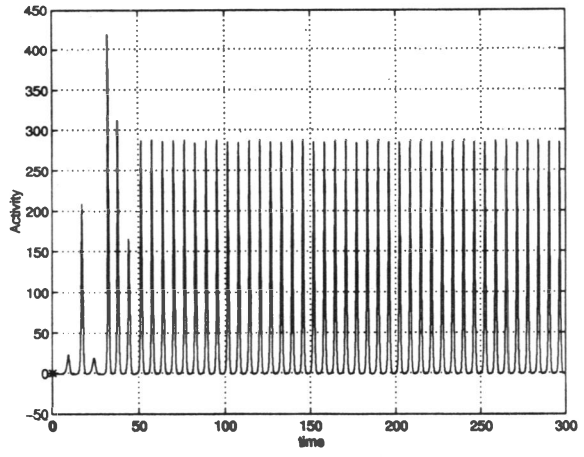


Fig.10 相互作用と凝集性に対して正弦的入力を与えた場合の活動量 $x_3(t)$（タイプ 1b）

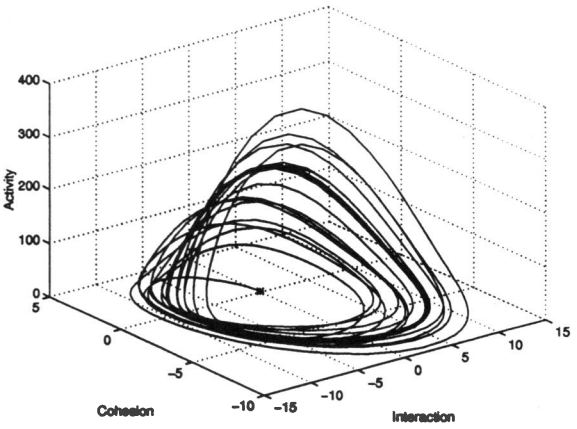


Fig.11 相互作用と凝集性に対して正弦的入力を与えた場合のアトラクタ（タイプ 2b）

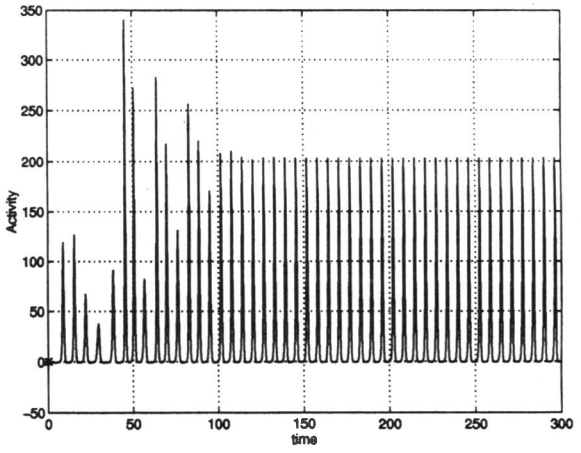


Fig.12 相互作用と凝集性に対して正弦的入力を与えた場合の活動量 $x_3(t)$（タイプ 2b）

参考文献

[1] A.G.Ivakhnenko :Heuristic self-organization in problems of engineering cybernetics, Automatica 6,pp.207-219(1970).

[2] A.G.Ivakhnenko :Polynomial and logical theory of dynamic systems(part 1,2), Sov. Automat. Contr. 15(3,4),pp.1-13,11-30(1970).

[3] T.Nishikawa and S.Shimizu :The characteristics of a biased estimator applied to the adaptive GMDH, Math. Comp. Modelling, Vol.17,No.1,pp.37-48(1993)

[4] 甘利 俊一：「自己組織化とは何か」, 別冊数理科学, pp.92-96(1989)

[5] 市橋 英世：「組織行動の一般理論」, 東洋経済, pp.134-146(1978)

[6] H.A.Simon/宮沢 光一監訳：「人間行動のモデル」, 同文舘, pp.224-240(1970)

[7] 西川 智登、清水 静江：「経営のためのシステム工学」, 朝倉書店, pp.41-56(1990)

[8] 合原 一幸：「カオスセミナー」, 海文堂, pp.19-107(1994)

連絡先

〒 191　東京都日野市旭が丘 6-6
東京都立科学技術大学 大学院 工学研究科
今井　正文（Masafumi Imai）
TEL 0425-83-5111 (内) 3610,3615,
FAX 0425-83-5119
E-mail imai@nishi.mg.tmit.ac.jp

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

毛筆書体におけるフラクタルを用いたかすれ表現
The Scratched-look Expression of Calligraphy Characters Using Fractals

中村 剛士 松下 政親 野崎 勝彦 世木 博久 伊藤 英則
Tsuyoshi NAKAMURA Masachika MATSUSHITA Katsuhiko NOZAKI Hirohisa SEKI Hidenori ITOH
名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

Abstract The scratched-look expression (*"kasure"* in Japanese) is one of the most important factors in calligraphy (*"shodo"* in Japanese). In Japanese calligraphy, beauty is reflected in *"kasure"*. In this paper, we describe a method to express the scratched look which is one of reflection of user individuality. The scratched look is expressed by using fractals in this system, and several types of scratched-look pattern by using this expression are shown.

1 はじめに

筆者らはこれまでユーザの個性が反映した毛筆文字を生成することを目的とした毛筆文字出力システムを研究, 開発してきた. このシステムでは, ユーザが電子筆圧ペンを用いてディスプレイ上に描いた一画 (1ストローク) を認識部のニューラルネットに入力し, 毛筆ストロークを持つデータベースと照合した結果, 入力画に相当する毛筆画に変換出力する. [1][2]

システムは上記のように一画ごとに処理を行なうため, 画ごとにユーザの個性を毛筆出力画に反映させることが可能である. つまり, 各ストロークの相対位置はもちろん, 各ストロークごとに長さ, 曲がり度合, 筆速, 筆圧などのユーザの個性を毛筆文字に反映させることができる. これらの個性のうち筆速, 筆圧については特にファジィ推論を用いて評価し, かすれを施す度合に反映させている.

毛筆文字におけるかすれは個人の趣を表現する重要な要素の1つであり, 芸術的な視点からもその表現は批評の対象となる. 本論文では, かすれ表現にフラクタルを用いることにより, 視覚的により実際の毛筆文字におけるかすれに近い自然な表現を実現した. また, 視覚的な評価以外に本システムで作成したかすれパターンと現実の書道のかすれ双方をフラクタル次元解析し, 比較を行なった.

2 システム構成

本システムは図1に示すように, 入力部, 認識部, 分類データベース, 標準画データベース, 画変形部, ファジィ演出部, フラクタル処理部, および出力部の8つの部分から構成される.

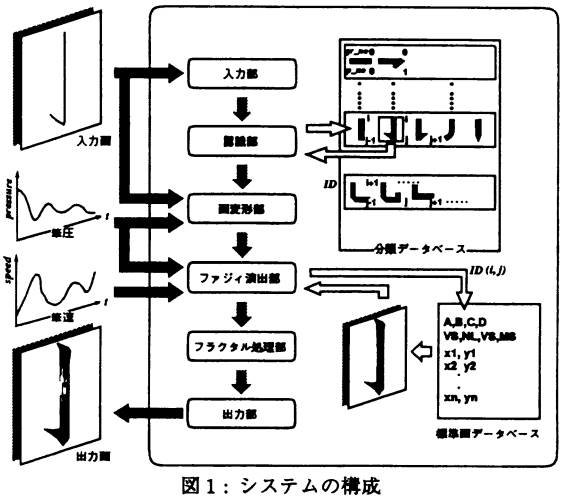


図1：システムの構成

3 かすれの表現

3.1 筆速と筆圧の評価

筆速と筆圧は墨の量とともに次のルールにより評価する. A, B, C はそれぞれ筆圧 (high, normal, low), 筆速 (fast, normal, slow), 墨の量 (much, normal, little) であり, D, E はそれぞれかすれ度合 ($0.0 \leq s\_degree \leq 1.0$), にじみ度合 ($0.0 \leq b\_degree \leq 1.0$) を表す.

if A *and* B *and* C *then* D *and* E

3.2 フラクタルによるかすれ表現

本システムではストローク上に複数のかすれ線と呼ぶかすれを表示する位置を示す線を描き, 各かすれ線上にフラクタルを用いて多数の点 (白色) をプロットすることで自然に近いかすれパターンの実現を試みた. 1本のかすれ線は図2に示すように $\{P_i(x_i, y_i) : i = n-1, n, \ldots, m\}$ を通る連続関数で表され, 各区間 $i(P_{i-1}P_i(i = n, n+1, \cdots, m))$ において線形である.

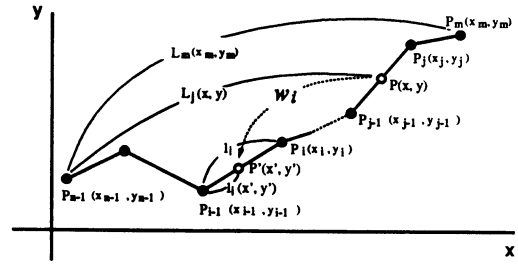


図2：かすれ線上のフラクタル処理

本システムで用いたアフィン変換 $w_i(i = n, n+1, \cdots, m)$ は条件式 (1) から導出される. $L_j(x, y)$ は $P_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1})$ から区間 j にある $P(x, y)$ までの累積距離であり, $L_m(x_m, y_m)$ はかすれ線全体の累積距離である. $l_i(x', y')$ は P_{i-1} から区間 i の $P'(x', y')$ までの距離を表し, l_i は区間 i の距離を表す.

確率 $P(w_i)$ で選択された変換 w_i により区間 j 上の $P(x, y)$ は区間 i 上の $P'(x', y')$ に移動する. $P'(x', y')$ に点 (白色) をプロットし, $P'(x', y')$ を新たに $P(x, y)$ として, 以降, 同様の変換を反復する. この処理をかすれ線ごとに行ない, かすれを表現する.

$$\frac{L_j(x, y)}{L_m(x_m, y_m)} = \frac{l_i(x', y')}{l_i} \tag{1}$$

ただし

$$\begin{aligned} l_i(x', y') &= \sqrt{(x' - x_{i-1})^2 + (y' - y_{i-1})^2} \quad (i = n, n+1, \ldots, m) \\ l_{n-1} &= 0 \\ l_i &= \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (i = n, n+1, \ldots, m) \\ L_j(x, y) &= \sum_{k=n-1}^{j-1} l_k + l_j(x, y) \quad (j = n, n+1, \ldots, m) \end{aligned}$$

変換 w_i の選択確率 $P(w_i)$ は次式で表される．$s\_degree(i)$ は区間 i におけるかすれ度合 (ファジィ推論による出力結果) を表す．

$$P(w_i) = \frac{s\_degree(i)}{\sum_{i=n}^{m} s\_degree(i)} \tag{2}$$

$$\sum_{i=n}^{m} P(w_i) = 1 \tag{3}$$

3.3 かすれ表現の出力例

図 3 にかすれパターンのフラクタル次元 (ハウスドルフ次元) を解析した結果を示す．ここで用いたかすれパターンは実際の毛筆文字 (図 4) のパターンおよび，図 5–8 に示す本システムで作成した毛筆文字 “夏” のうち図 6–8 のかすれ部分である．

4 おわりに

かすれ表現にフラクタルを利用することで，視覚的には自然なかすれに近い表現を実現できた．しかし，ハウスドルフ特性を比較した結果，その特性は完全には一致しなかった．今後，この点についても検討を重ね，自然なかすれに近づけていく予定である．

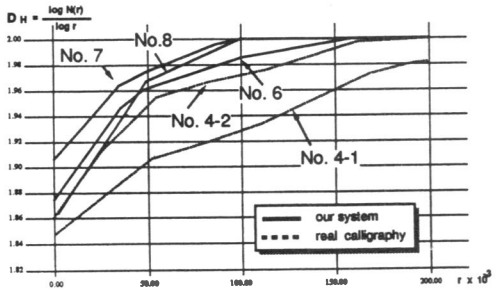


図 3：ハウスドルフ特性

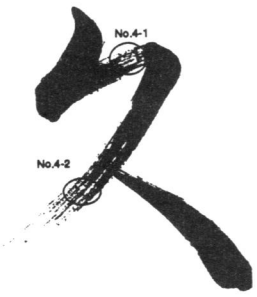


図 4：実際の毛筆文字 “久”



図 5：パターン 1(端部分かすれ)



図 6：パターン 2(高筆速部かすれ)

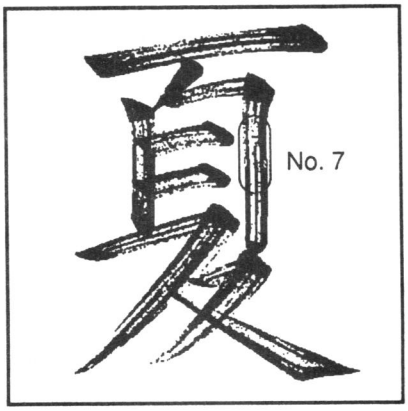


図 7：パターン 3(墨量不足かすれ)



図 8：パターン 4(穴空きかすれ)

参考文献

[1] T. Nakamura et al : Fuzzy-Based Writing System for Acquiring Good Writing Skill of Brush Characters Based on the Analysis of Writing Speed, Proc. of PRICAI '94, vol.2, pp.822–827, 1994.

[2] 中村 他：筆記速度のファジィ評価方法を導入した毛筆文字生成システムについて，日本ファジィ学会論文誌，Vol. 7, No. 2, 1995.

[3] M. Barnsley, Fractals Everywhere, Academic Press, 1988.

問い合わせ先：〒 466 名古屋市昭和区御器所町
名古屋工業大学知能情報システム学科
伊藤研究室
中村　剛士
TEL (052)-735-5469 FAX (052)-735-5477

FE2-1

カオス的アプローチによる心室細動判別

A Method for Discrimination of Ventricular Fibrillation by Chaotic Approach

杉浦 敏文* ○五百旗頭 正** 村田 昌司** 小山 雅也**

Toshifumi Sugiura ○Tadashi Iokibe Shoji Murata Masaya Koyama

*静岡大学電子工学研究所

Research Institute of Electronics

Shizuoka University

**株式会社明電舎システム技術部

System Technology Division

Meidensha Corporation

Abstract: In a healthy state, the human heart beat shows an extensive spectrum and its attractor has a chaotic orbit. However, in a damaged state, fluctuations in the heart beat become periodical. An, Implantable Cardioverter / Difibrillator (ICD), along with an implanted pace maker unit in either the subcutaneous chest wall, or subpectoral or subcutaneous abdomen, or sub-musculus rectus abdominis serve to detect abnormalities as follows and eliminate them quickly. The abnormalities affected include : ventricular fibrillation (non-regulated electrical activity in a ventricle) and other arrhythmia, such as, ventricular tachycardia (VT) or supra ventricular tachycardia (SVT). There are 2 methods for detecting arrhythmia available with the present ICD. One is to investigate the heart beat or period, and the other is to investigate the electrocardiographic wave. However, the employment of these techniques, either singly or in combination doesn't always reach the accuracy that is needed. The authors have a remedy that applies a hydro turbine generator for abnormal diagnostic examination and express changes in the dynamics of the oscillating waveform as a value, in terms of the chaotic approach. Also, changes in the dynamics shown in the electrocardiographic waves from normal to abnormal states are applied to electrocardiographic analysis with a proposed method of distinction through the chaotic approach. At first, this paper describes traditional analysis methods and the problems of ICD in brief. Subsequently, it covers the chaotic approach. Finally, the results suitable for real testing, as well as future topics, are given.

Keywords: Chaos, Local fuzzy reconstruction, Implantable cardioverter/defibrillator, Ventricular fibrillation, Ventricular tachycardia, Lyapunov exponents, Fractal dimension

1. はじめに

健康な人の心拍数は幅広いスペクトルを示し、そのアトラクタはカオス的軌道を持ち、病的状態では心拍数の変動が周期的になる事が知られている(1)-(3)。また、埋め込み式除細動器(ICD : Implantable Cardioverter / Defibrillator)は、ペースメーカ本体を胸壁皮下あるいは胸筋下に、または腹壁皮下あるいは腹直筋下に埋め込み、心室細動(VF : Ventricular Fibrillation)などの調和のとれていない心室の電気活動や、これ以外の不整脈、たとえば心室性頻拍(VT : Ventricular Tachycardia)や上室性頻拍(SVT : Supra Ventricular Tachycardia)などを検出し、これを素早く除去する事を目的としている。現在のICDで採用されている不整脈の検出方法は、大きく分けて脈拍あるいは周期に注目するものと、心電図波形に注目するものがありこれらを単独または組み合わせて用いているが必ずしも満足するものではない。

ところで筆者らは、既に水車発電機の振動波形のダイナミクスの変化をカオス的アプローチにより数値的に捉え、水車発電機の異常診断への適用を行ってきた(4)。これと同様に正常時の心電図波形のもつダイナミクスが異常時になると変化する事に注目し、カオス的アプローチによる判別法を提案するとともに、犬の心電図解析に適用した。本論文では、はじめに従来の解析手法とICDの問題点に簡単に触れる。つぎに、筆者等が提案するカオス的アプローチについて説明し、最後に実データに適用した結果と今後の課題について述べる。

2.従来の判別手法と問題点

不整脈の判別法の研究は、致死的不整脈の代表である心室細動を識別する為に行われてきた。心室細動は、心室が心室のさまざまな場所からバラバラに興奮する事により起

こり、有効な心拍出量を確保できなくなる状態で、数分間で脳死に至るものである。

Bachら[5]の調査によれば、形態学的アプローチによる研究としては、Lin[6]やPannizzoら[7]によるFFTを用いた周波数領域分析法(frequency domain analysis)、Tomaselliら[8]による電位の最大変化率やPeak-Peakを用いた形状抽出法(feature extraction)、テンプレートマッチング法(template matching)や差分領域法(area of difference method)などがある。しかしこれらの方法はいずれも判別パラメータのチューニングを必要としたり100%の判別結果が得られないといった問題がある。また、VTを判別する上で優れた結果を得る事ができるものに、相関波形分析法[9]-[11] (correlation waveform analysis)があるが計算量が多すぎてICDに組み込むのが困難である。

現在ICDで用いられている判別方法は、脈拍あるいは周期に着目したものは、周期が一定であるか不安定であるかを判断基準にしているが、以下のような問題点がある。

(1)一般にVFは正常に比べて周期が短く不規則であるが例外もある。

(2)VTは毎分150～200程度、VFはそれ以上とされているがこれも絶対でない。

(3)VT正常に比べ周期が速く変動が少ない。これも絶対ではない。

(4)洞性頻脈の始まる時の周期変化は比較的穏やかであるのに対し、VTの始まりは突然である。

また、波形解析としては心電図波形の基線部分の水平部分がどの程度あるかを判断基準にする方法があるが、正常電位図は等電位部分がかなりあるが、VFではほとんどない。またVTでも一部の例外を除いて同様の事が言えるが、使用する電極および検出位置により大きく異なるという問題がある。

3. カオス的アプローチによる判別法

ある時系列データがカオス的かどうかの判別方法は、その定義により異なるが、参考文献[12]-[16]に示すように様々である。しかし、片山が提案したものは計算機処理にて実用的である[17]。これは観測した時系列データをスペクトル解析を行い、幅広い周波数帯を持つ事、自己相関関数が遅れ時間の増加と共にゼロに収束する事、最大リアプノフ指数が正である事でカオスかどうかを判別するものである。しかし現実に我々が実世界から観測しうる時系列データは、周波数成分比が無理数のトーラス（弱いカオス）からカオスに至るものが大半で、特に自己相関関数が遅れ時間の増加と共にゼロに収束するものは極めて少ない。またICDに内蔵する為には、正常か異常かのみならず不整脈の種類を何らかの数値として識別する必要がある。

上述した理由から筆者らは、正常時と異常時の心室電位の時系列データのダイナミクスの変化を、タケンスの埋め込み定理[18]を用いて、もとの時系列データの位相的性質を保存する最適埋め込み次元および最適遅れ時間、最大リアプノフ指数およびフラクタル次元の変化から求める方法を提案する。なお、最適埋め込み次元および最適遅れ時間は、五百旗頭らの局所ファジィ再構成法[19] [20]による短期予測性能が最大となる場合のデータを用いる。

4. 心電図データへの応用

心電図は心臓の活動電流を記録するもので、不整脈と病態の解析、虚血性心筋障害の診断、心肥大・拡張の診断などを目的としている。筆者らは、犬の心室電位を256Hzで測定した時系列データを用いて、3節で提案したカオス的アプローチにより、その波形から正常、VFおよびVTの識別を試みた。実際に使用したのは表4.1に示すように心内誘導、第Ⅱ誘導それぞれ5種類であるが、図4.1に心内誘導による時系列データ3種、図4.2に第Ⅱ誘導による時系列データ3種を示す。なお第Ⅱ誘導の正常データは人間のものである。具体的には、各々の時系列データをその位相的性質を保存できる多次元状態空間に埋めこんだ時の、次元数と遅れ時間の比較、正常時の再構成状態空間にVFおよびVTを埋めこんだ時の最大リアプノフ指数およびフラクタル次元の比較を行った。各データにおける最適埋め込み次元および遅れ時間を表4.1に示す。

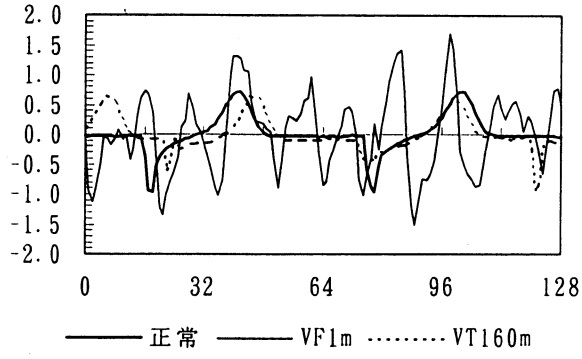


図4.1 心内誘導で観測した時系列データ

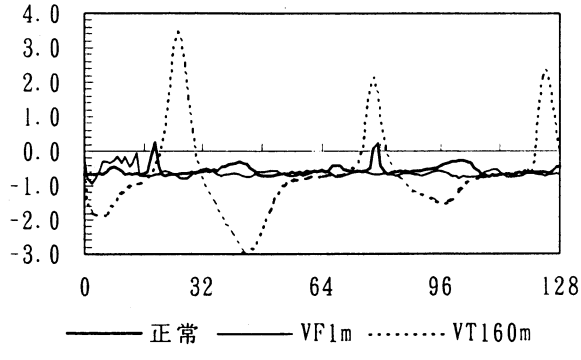


図4.2 第Ⅱ誘導で観測した時系列データ

表4.1 最適埋め込み次元と遅れ時間

心内誘導

種別	埋め込み次元	遅れ時間
正常	9	5
VF1m	2	2
VF2m	2	2
VF3m	2	2
VT160m	9	6
VT200m	7	6

第Ⅱ誘導

種別	埋め込み次元	遅れ時間
正常	9	2
VF1m	2	2
VF2m	2	2
VF3m	2	2
VT160m	8	6
VT200m	6	2

つぎに、64データ毎の最大リアプノフ指数の変化を図4.3～図4.4に、フラクタル次元の変化を図4.5～図4.6に示す。

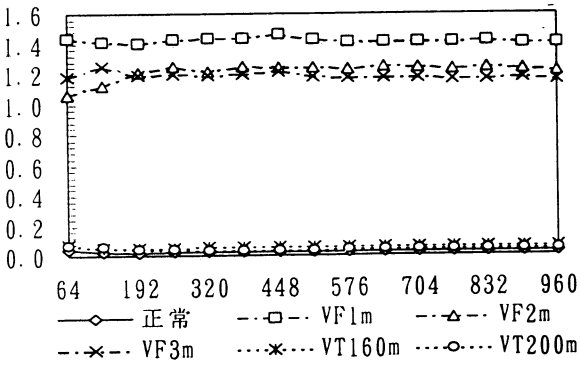


図4.3 心内誘導での最大リアプノフ指数の変化

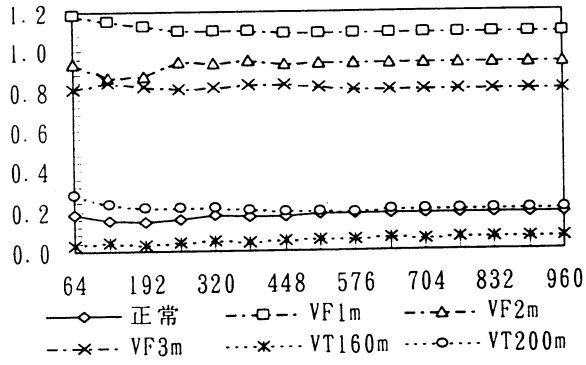


図4.4 第Ⅱ誘導での最大リアプノフ指数の変化

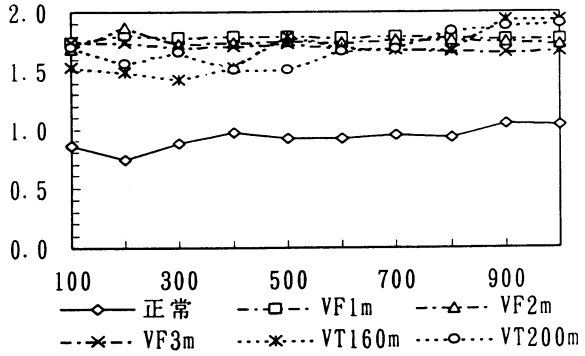


図4.5 心内誘導でのフラクタル次元の変化

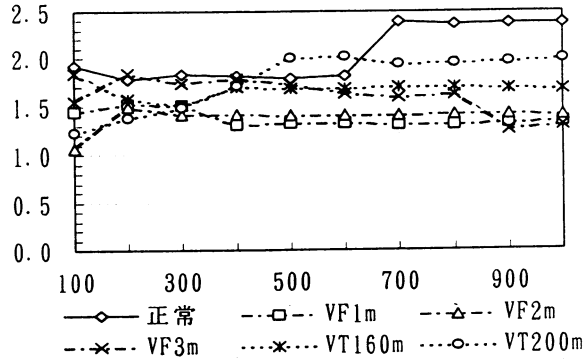


図4.6 第Ⅱ誘導でのフラクタル次元の変化

以上の結果から心内誘導、第Ⅱ誘導ともに正常時とVF、VTでは、その時系列データの持つダイナミクスが変化している事が分かる。また、最大リアプノフ指数を比較する事により正常とVTのグループとVFを分離する事ができ、フラクタル次元を比較する事によりVTとVFのグループと正常を分離する事が可能であると言える。

5. まとめ

本論文では、カオス的振る舞いをする時系列データのダイナミクスの変化が、正常時と異常時では異なる事に注目し、観測された時系列データからその対象が正常であるか異常かをカオス的アプローチにより、熟練者による観測波形やそれから得られるアトラクタなどを図形的に判断するのではなく数値的に判別する手法を提案した。

そして、本手法を犬の心電図を用いて不整脈の判別に適用した。この結果、4節に示すように最大リアプノフ指数とフラクタル次元を併用する事により、正常、VFおよびVTを分離可能である事を示した。また一回の計算に使用したデータ数は64で、これは250msecで判定が可能ということを示している。なお、最大リアプノフ指数による判定は64データでも十分可能であるのに対し、フラクタル次元による判定は少なくとも700データ必要である。

今後の課題として如何に少ないデータで判定が可能かの調査およびICDにインストールする為の問題の把握と解決がある。

参考文献

(1) A.L. Goldberger, D.R. Rigney and B.J. West: "Chaos and fractals in human physiology", Sci. Am., 262(2), pp.42-49(1990) ", (西江弘 訳著:"身体の中のカオスとフラクタル 日経サイエンス, 244(4), pp.56-65(1990))

(2) 西江弘: "生命現象を説明するカオス", 日経サイエンス, 246(3), pp.34-39(1992)

(3) 西江弘: "生理機能系のカオス", 応用カオス（合原一幸編著）, サイエンス社, pp.327-354(1994)

(4) 藤本泰成, 村田昌司, 谷村隆義, 五百旗頭正: "異常診断へのカオスの応用", 日本ファジィ学会関東支部第4回ワークショップ講演論文集, 1995/3/8, pp.54-57(1995)

(5) S.M. Bach and J.C. Hsung: "Implantable Device Algorithms for Detection and Discrimination of Tachyarrhythmia", The Implantable Cardiovester / Difibrillator (eds. E. Alt and J.C. Griffin), Springer-Verlag, pp.67-81(1992)

(6) D. Lin, L.A. Dicarlo and J.M. Jenkins: "Identification of ventricular tachycardia using intracavitary ventricular electrograms: analysis of time and frequency domain patterns", PACE 11: pp.1592-1606(1988)

(7) F. Pannizzo and S. Furmans: "Frequency spectra of ventricular tachycardia and sinus rhythm in human intracardiac electrograms-application to tachycardia detection for cardiac pacemakers", IEEE Trans. Biomed. Eng. 35, pp.421-425 (1988)

(8) G.F. Tomaselli, A.P. Nielsen, W.L. Finke, L. Singupta, J.C. Clark and J.C. Griffin: "Morphologic differences of the endocardial electrogram in beats of sinus and ventricular origin", PACE 11, pp.254-262 (1988)

(9) C.L. Feldman, P.G. Amazeen, M.D. Klein et al.: "Computer detection of ventricular ectopic beats", Comput. Biomed. Res. 4, pp.666-674 (1971)

(10) R. Arzbaecher, P. Biancalana, T. Stibolt, G. Masek and R. Dean: "Computer technique for detection of cardiac dysrhythmias", J. Adv. Med. Instrum. 5, pp.104 (1971)

(11) J. Jenkins, D. Wu and R. Arzbaecher: "Computer diagnosis of supraventricular and ventricular arrhythmias", Circulation 5, pp.977-987(1979)

(12) Y. Oono and M. Oshikawa: "Chaos in nonlinear difference equations. I-Qualitative study of (formal) chaos", Progr. Theo. Phys., 64, pp.54-67(1980)

(13) R.L. Devaney: "An introduction to chaotic dynamical systems, (Benjamin/Cummings Publishing, Menlo Park, 1986) (後藤憲一訳, 「カオス力学系入門」, 共立出版 (1987))

(14) E. Ott: "Strange attractors and chaotic motions of dynamical systems", Rev. Modern Phys., 53-4/1, pp.655-671(1981)

(15) H.G. Schuster: "Deterministic chaos - An introduction (2nd, ed.), (VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1989)

(16) P. Berge, Y. Pomeau and C. Vidal: Order within chaos - Towards a deterministic approach to turbulence, (John Wiley and Sons, New York, 1984)

(17) 片山立: "カオス理論の民生機器への応用",講習会「カオス理論の基礎と工学への応用」テキスト, 日本ファジィ学会, pp.37-52(1993)

(18) F. Takens: "In Dynamical Systems and Turbulence", (eds. Rand and Young), Springer, Berlin, pp.366-381 (1981)

(19) T. Iokibe, M. Kanke, Y. Fujimoto and S. Suzuki: "Short-term Prediction on Chaotic Timesereis by Local Fuzzy Reconstruction Method", In Proc. of the 3rd International Conference on Fuzzy Logic, Neural Nets and Soft Computing, 1994/8/1-8/7, Iizuka, Japan, pp.491-492 (1994)

(20) 五百旗頭正, 菅家正康, 藤本泰成, 鈴木新悟: "カオス的時系列の短期予測のための局所ファジィ再構成法", 日本ファジィ学会誌, Vol.7, No.1, pp.186-194(1995)

連絡先

〒103 東京都中央区日本橋箱崎町36-2
リバーサイドビル
株式会社明電舎
システム技術部システム開発課
五百旗頭 正
TEL 03-5641-7507
FAX 03-5641-9303

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

FE2-2

間欠性カオス写像を用いた大域的最適化手法

Global Optimization Method using Intermittency Chaos

藤田得光　渡辺隆男　安田恵一郎　横山隆一

Tokumitsu Fujita Takao Watanabe Keiitiro Yasuda Ryuiti Yokoyama

東京都立大学工学部

Dept. of Electrical Engineering, Tokyo Metropolitan University

Abstract - In this paper we propose a new unconstrained global optimization method using intermittency chaos. The proposed method takes advantage of intermittency chaotic behavior of the discrete dynamical system, that is composed to introduce a map generating intermittency chaos into gradient system. The system has the ability to converg at a local minima intermittently.The global solution is searched with simulation of the dynamical system behavior.The effectiveness and feasibility of the proposed method are demonstrated on typical nonlinear optimization problems.

1　はじめに

本稿では、間欠性カオスを用いた無制約大域的最適化手法を提案する。間欠性カオスとは、周期的な変動がしばらく続いたのち突然大きく乱れた状態が現われ、また周期的な状態に戻るという変化を非周期的に繰り返す変動である。

提案手法では、パラメータを変更することによりカオスから間欠性カオスまで発生可能な写像である変形ベルヌーイ系の出力を局所的最適解から逃れるための揺らぎとして利用する。具体的には、最急降下法に変形ベルヌーイ系を導入した離散力学系により、間欠性カオスの周期的な変動を用いて局所的最適解へ収束し、大きく乱れた変動を利用して局所的最適解から脱出するようなダイナミクスを構成する。このように離散力学系を構成することにより、局所的最適解に捕われることなく大域的最適解を探索することが可能となる。

提案手法は局所的最適解から逃れるための揺らぎとして、パラメータを変更することによりカオスから間欠性カオスまで発生可能な変形ベルヌーイ系を利用している。このパラメータを変更することにより、ランダム性が強い探索から、間欠的に局所的最適解に収束する探索まで実現できる。ランダム性の強い探索はカオスを用いたある種の初期点設定法と捉えることができる。間欠性カオスを用いた探索は、間欠的に局所的最適解に収束し精度の高い解が得られる。また、提案手法でもちいる離散力学系はシンプルなものであり、アルゴリズムが単純であるという特徴を有している。

標準テスト問題に提案手法を適用した結果として、高速かつ高い割合で大域的最適解が得られており、提案手法の有効性が確認された。

以下、2章において提案手法の概要を間欠性カオスとその最急降下法への導入について述べる。3章において、いくつかの標準テスト問題に提案手法を適用する。最後に、4章において得られた知見をまとめている。

2　間欠性カオス写像を用いた大域的最適化

2.1　間欠性カオス写像

提案手法は、最急降下法に間欠性カオスを発生する写像を外力として導入することにより構築される。したがって、提案手法の理解には、この写像のダイナミクスの理解が不可欠である。これ以降、パラメータ特性を中心に、この写像の説明をおこなう。

提案手法で用いる間欠性カオスを発生する一次元写像力学系である変形ベルヌーイ系[1]は、式(1)で与えられる。

$$y_{j+1}=g(y_j)=\begin{cases} y_j+2^{B-1}(1-2\varepsilon)y_j^B+\varepsilon & (0\le y_j\le 0.5) \\ y_j-2^{B-1}(1-2\varepsilon)(1-y_j)^B-\varepsilon & (0.5<y_j\le 1) \end{cases} \tag{1}$$

ここで、εは正の微小パラメータで、Bは1以上のもう一つのパラメータである。この写像は$B=1$のときはベルヌーイ系と呼ばれ、y_jの変動はランダム性が強く、Bが増加するにしたがって変動が間欠的になる。パラメータをBとしたときの変形ベルヌーイ系の時間発展を図1に示す。この図に示されているように、Bの増加により探索点が$y_j=0$と1の付近に長時間淀むようになり、大きく乱れた状態の発生が間欠的になる。

Bの増加による間欠的な変動の発生原因を説明するため、図2にBをパラメータとしたときの変形ベルヌーイ系のリターンマップを示す。この図から、Bが増加すると$y_j=0$と1の付近の$g(y)$の傾きが1に近づくことがわかる。このため、この付近では探索点の変化量$y_{j+1}-y_j$が微

小となり、この付近に長時間淀むことにより間欠的な変動が発生する。また、Bの値が同一のときは、εの値が小さいほど、探索点の変化量が減少するため、$y_j=0$と1の付近に探索点が淀む時間は長くなる。

次に、探索点の変化量y_{j+1}-y_jを観測量したときのダイナミクスについて述べる。図3は、パラメータをBとしたときの観測量の時間発展である。この観測量の取り得る値の範囲は-0.5から0.5であり、Bの増大にしたがって、0付近の状態の持続時間が長くなり、大きな変動は間欠的になる。次節において、この観測量y_{j+1}-y_jを最急降下法に外力として導入することにより、提案手法を構築する。

2.2 提案手法の構築

局所的最適性を有する無制約最適化手法の一つである最急降下法は、式(2)で定義される無制約最適化問題に対して、目的関数の最急勾配方向への探索を繰り返す手法であり、式(3)に従って点列x^jを生成する。

$$\min f(x),\ x\in R^n \tag{2}$$

$$x^j=x^{j-1}-\alpha\nabla f(x^{j-1}) \tag{3}$$

ただし、$\alpha\in R^1$はステップ幅、jは繰り返し回数

ステップ幅αを固定としたときの最急降下法は、式(3)で表わされる離散力学系の時間発展を求めることにより最適解を探索する手法である。この離散力学系により生成される点列は目的関数の最大減少方向に時間発展するため、初期点に依存した局所的最適解へ収束する。大域的最適解への収束を可能とするためには、目的関数の増加方向への時間発展も部分的に許すことが必要である。これを実現するために、式(4)に示すような外力を

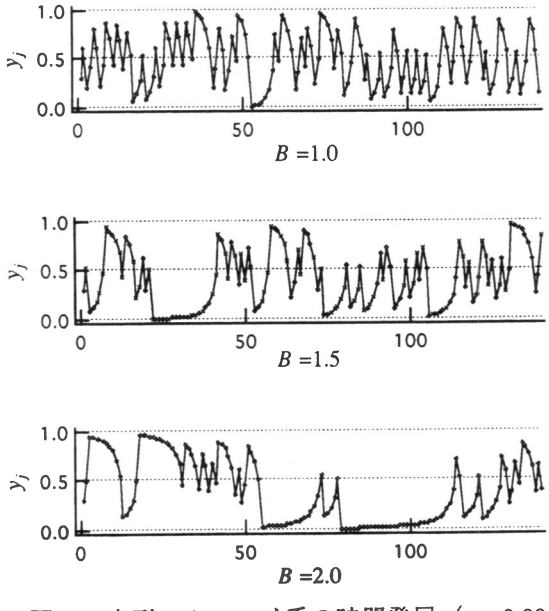


図1　変形ベルヌーイ系の時間発展（$\varepsilon=0.001$）

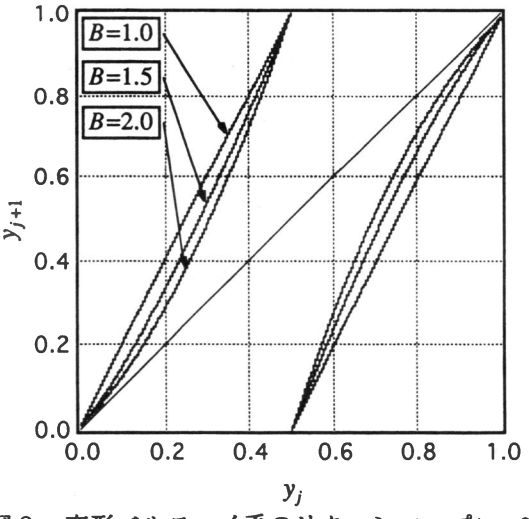


図2　変形ベルヌーイ系のリターンマップ($\varepsilon=0.01$)

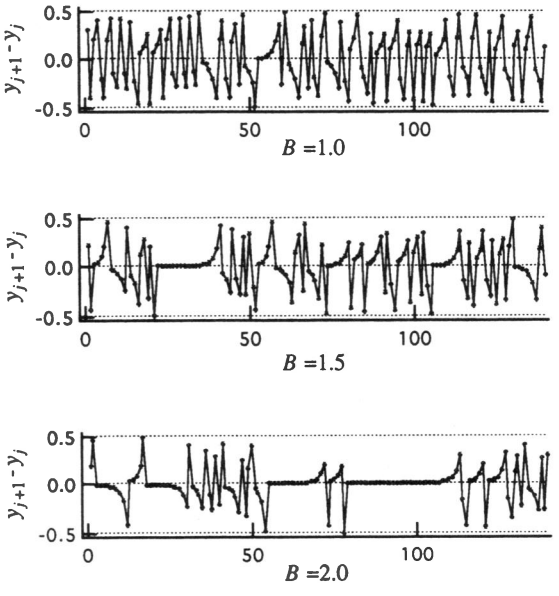


図3　変形ベルヌーイ系の変化量の時間発展
($\varepsilon=0.001$)

加える。

$$x^j=x^{j-1}-\alpha\nabla f(x^{j-1})+F\,sgn(\nabla f(x^{j-1})) \tag{4}$$

ただし、$F\in R^n$、sgnは式(5)に示す符号関数である。

$$sgn(z)=\begin{cases}+1, & z>0\\ 0, & z=0\\ -1, & z<0\end{cases} \tag{5}$$

この外力の方向は、Fが正の場合には目的関数の増加方向となり、負の場合は減少方向となる。提案手法では、外力Fを間欠性カオス写像を用いて発生させることにより、局所的最適解に間欠的に収束するダイナミクスを構築する。前節で説明した変形ベルヌーイ系の出力を

用いて、外力を式(6)のように導入する。

$$F=k(y_{j+1}-y_j) \qquad (6)$$

ただし、$k \in R^n$である。

式(6)のように外力を導入することにより、間欠性カオスが周期的な変動のときに$F \fallingdotseq 0$となり、式(3)が最急降下法のダイナミクスと類似になるために局所的最適解に収束する。またカオス的に大きく乱れた変動においては、Fが大きな値を取るために局所的最適解からの脱出が可能となる。この離散力学系をシミュレーションすることにより、局所的最適解に間欠的に収束しながら大域的最適解を探索することが可能となる。

提案手法は、この離散力学系の時間発展をあらかじめ決められた探索回数（ITERS）だけシミュレーションし、その過程で得られた最小解から局所的最適化手法を適用することにより構築される。提案化手法のアルゴリズムを以下に示す。

アルゴリズム

Step-0　パラメータ設定

$1 \leqq B \leqq 2,\ 0<\varepsilon<0.1,\ 0<\alpha,\ 0<k \in R^n,\ 0<\Delta \in R^n,$ ITERS

Step-1　初期点$x(0) \in R^n$, $0 \leqq y_0 \leqq 1$の設定, $x^*=x(0)$, $j=0$

Step-2

$$y_{j+1}=g(y_j)=\begin{cases} y_j+2^{B-1}(1-2\varepsilon)\,y_j^B+\varepsilon & (0 \leqq y_j \leqq 0.5) \\ y_j-2^{B-1}(1-2\varepsilon)\,(1-y_j)^B-\varepsilon & (0.5<y_j \leqq 1) \end{cases} \qquad (1)$$

Step-3

$$x_i(j+1)=x_i(j)-P_i(x_i(j)) + h_{\Delta i}\left\{-\alpha\frac{\partial f(x(j))}{\partial x_i}+k_i\,(y_{j+1}-y_j)\,sgn\left(\frac{\partial f(x(j))}{\partial x_i}\right)\right\}_{i=1,\ldots,n} \qquad (7)$$

ここで、$h_{\Delta i}$, Piは以下で与えられる関数である

$$h_{\Delta i}(z)=\begin{cases} +\Delta i, & \Delta i<z \\ z, & -\Delta i \leq z \leq \Delta i \\ -\Delta i, & z<-\Delta i \end{cases} \qquad (8)$$

$$P_i(x_i)=\begin{cases} +\Delta i, & x_{i\,max}<x_i \\ 0, & x_{i\,min} \leq x_i \leq x_{i\,max} \\ -\Delta i, & x_i<x_{i\,min} \end{cases} \qquad (9)$$

Step-4　もし$f(x(j+1)) < f(x^*)$なら、$x^*=x(j+1)$とする

Step-5　$j=j+1$, 探索回数の上限以下（$j <$ ITERS）ならば、Step-2へ

Step-6　x^*を初期点として、局所的最適化をおこない、得られた解を最適解とする。

アルゴリズム中の$x_{i\,max}$, $x_{i\,min}$は、それぞれ探索範囲の上限・下限である。式(8)は、シミュレーション途中での数値的発散を防ぐために、探索点の移動量の制限をおこなう関数である。また、式(9)は、探索点が探索範囲の外に飛び出した場合に、範囲内に引き戻すためのペナルティ関数である。

3　適用例

3.1　例題

この章では、提案手法の能力を調べるために、以下に示す標準テスト問題を含む５つの例題に提案手法を適用する。ただし、Ωは探索範囲である。

例題１　「Six-hump camelback 関数 SHC(n=2)[2]」

$$f(x)=(4-2.1x_1^2+\frac{1}{3}x_1^4)x_1^2+x_1x_2+(-4+4x_2^2)x_2^2 \qquad (11)$$

$$\Omega=\{\,x \mid -2 \leq x_i \leq 2,\ i=1,2\}$$

この関数には６つの局所的最適解が存在し、その中の２つが大域的最適解である。２つの大域的最適解は(-0.0898,0.7126), (0.0898,-0.7126)である。大域的最適値は-1.0316である。

例題２　「2次元の Shubert 関数[3]」

$$f(x)=\{\sum_{i=1}^{5} i\cos[(i+1)x_1+i]\} \times \{\sum_{i=1}^{5} i\cos[(i+1)x_2+i]\} \qquad (12)$$

$$\Omega=\{\,x \mid -2 \leq x_i \leq 2,\ i=1,2\}$$

この関数には760の局所的最適解が存在し、その中の18個が大域的最適解である。大域的最適値は-186.73である。

例題３　「Goldstein-Price 関数 GOLDPR(n=2)[2]」

$$f(x)=\{1+(x_1+x_2+1)^2(19-14x_1+3x_1^2-14x_2+6x_1x_2+3x_2^2)\}\{30+(2x_1-3x_2)^2(18-32x_1+12x_1^2+48x_2-36x_1x_2+27x_2^2)\} \qquad (13)$$

$$\Omega=\{\,x \mid -2 \leq x_i \leq 2,\ i=1,2\}$$

この関数には、４つの局所的最適解が存在し、その中の１つが大域的最適解である。大域的最適解は(0,-1)であり、大域的最適値は３である。

例題４　「2^n minima 関数[4]」

$$f(x)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(x_i^4-16x_i^2+5x_i) \qquad (14)$$

$$\Omega=\{\,x \mid -10 \leq x_i \leq 10,\ i=1,\ldots,n\}$$

この関数には、少なくとも2^n個の局所的最適解が存在し、その中の一つが大域的最適解である。大域的最適解は(x_i=-2.90353, i=1...,n)である。本稿ではn=100と200の場

合の適用をおこなう。

例題５　「Levy and Momtalvo 関数[3]」

$$f(x)=\frac{\pi}{n}\{\sum_{i=1}^{n-1}[(x_i-1)^2(1+10sin^2(\pi x_{i+1}))] +10sin^2(\pi x_1)+(x_n-1)^2\} \quad (15)$$

$$\Omega=\{x\mid -10\le x_i\le 10,\ i=1,\ldots,n\}$$

この関数は、多数の局所的最適解が存在するが、大域的最適解は１つである。大域的最適解は、$(x_i=1,\ldots,n)$でであり、大域的最適値は0である。本稿ではn=20と50の場合の適用をおこなう。

3.2　パラメータ設定

提案手法の大域的最適解の探索能力は、パラメータの設定に強く依存している。したがって、これらのパラメータは慎重に決定しなければならない。本手法における各パラメータの設定は、2章と3章で述べた離散力学系の定性的な性質と著者らの数多くのシミュレーションから得られた経験則を用いて試行錯誤的に決定している。この種の定性的な性質と経験則を以下に述べる。

αは、最急降下法のステップ幅に対応するパラメータであり、この値が適切であれば高速に精度が良い解が得られる。しかし、小さすぎると精度は良いが収束するまでの計算時間が増加し、大きすぎると発散してしまい解が得られない。

kは、カオスの揺らぎの大きさを表わすパラメータであり、この値が小さいと局所的最適解から脱出できなくなる。また、大きすぎると探索領域が広くなりすぎるため、探索効率が低下する。実際の設定においては、$0<k_j<0.5(x_{i\,max}-x_{i\,min})$の範囲で、局所的最適解から脱出できる値を試行錯誤的に決定した。

また、提案手法は収束判定を満たす解を得るため、最終段（アルゴリズムのStep-6）で局所的最適化を行うが、今回用いた局所的最適化手法は、Fletcher-Reevesの共役勾配法であり、直線探索には二次補間による最適刻み幅を求めるアルゴリズムを用いている。

収束判定は、

例題１～３では$\|f(x)\|<10^{-5}$、

例題４と５では、$\|f(x)\|<10^{-3}$

とした。

3.3　適用結果

例題１～５に対して、それぞれの探索範囲（Ω）からランダムに100個の初期点$x(0)$とy_0（$0\le y_0\le 1$）を与えシミュレーションを行った。

表１　パラメータの設定値と適用結果

パラメータ	α	ki	ITERS	成功回数
例題１	0.01	2.0	200	100
例題２	10^{-5}	3.0	1000	100
例題３	10^{-5}	2.0	1000	100
例題４ n=100	0.001	5.0	1000	100
n=200	0.001	5.0	1000	100
例題５ n=20	0.005	0.5	5000	100
n=50	0.01	0.5	10000	100

例題1～5を通して、パラメータB, ϵは、局所的最適解への収束時間が比較的短い間欠性カオスを発生する値であるB=1.5, ϵ=0.0001と設定した。また、Δは例題1～5通して、$\Delta i=0.45(x_{i\,max}-x_{i\,min})$と設定した。この他のパラメータの設定値と適用結果を表1に示す。

表1の成功回数とは初期点を変えて提案手法を100回適用し、大域的最適解が何回得られたかを示している。この結果より、例題1～5を通じて、すべての初期点から大域的最適解が得られている。

4　まとめ

本稿では、間欠性カオス写像を用いた無制約大域的最適化手法を提案した。提案手法は、間欠性カオスを発生する写像を外力として最急降下法に導入した離散力学系を構築することにより、局所的最適解に間欠的に収束させながら、局所的最適解にとらわれることなく大域的最適解を探索する手法である。

提案手法の特徴は、以下の通りである。(1)確定論的な手法であるが、間欠性カオスに内在する安定不安定性を利用することにより、局所的最適解に間欠的に収束するという柔軟なダイナミックスを有している。(2)間欠性カオスは簡単な一次元写像から発生可能なので、提案手法の離散力学系もシンプルなものとなっており、アルゴリズムが単純である。

参考文献

[1] 相沢洋二："カオスと1/fゆらぎ-両者を結ぶ普遍則-",数理科学,No.349,pp.8-16,JULY(1992)

[2] 呂　敏、志水清孝："ϵ-近似手法による多変数関数の大域的最適化",信学論,J75-A,4, pp.769-777(1992).

[3] A.V.Levy and A.Montalvo："The Tunneling Algorithm for The Global Minimization of Functions", SIAM J. SCI. STAT. COMPUT., 6,1,pp.15-29(1985).

[4] 橋口住久　訳："非線形力学とカオス", オーム社(1988).

FE2-3

「回想」記憶モデル：カオス、ランダム的探索と連続想起

"Retrospective" Associative Memory Model: Continual Association with Chaotic and Random Search

八木　透　古川栄一　古橋　武　内川嘉樹
Tohru Yagi　Eichi Furukawa　Furuhashi Takeshi　Yoshiki Uchikawa

名古屋大学工学部
School of Engineering, Nagoya University

Abstract – It is widely known that association is a searching process of global minimum in associative memory model. Conventional association is, however, stopped when a memorized pattern is associated. In order to design continual searching and successive association, we evaluate the energy space empirically on computer simulation by means of "climbing search." Afterwards, we discuss if chaotic serrate or random search is suitable for our purpose.

1　はじめに

「連想」という言葉を、手許にある辞書（旺文社標準国語辞典）で調べてみると、次のような説明が記載されてある。

一つのことからそれに関係のあるほかのことを思い浮かべること

では一般に「連想記憶モデル」と呼ばれているものは、どのような性質のものだろうか。

あるシステムに、画像、音声など、任意のデータを記憶させたとする。次に、記憶したデータの一部が欠落したもの、あるいは、ノイズが多く加わったものが、システムに与えられたとする。この不完全なデータから、元の記憶したデータを復元するものが、「連想記憶モデル」である[1]。これまでの研究により、このモデルは、記憶時に形成された「エネルギー曲面」において、グローバルミニマムの探索を行なっていることが明らかになっている[2]。そのため、探索が最小値に達すれば、そこで連想は終了する。そのため、このモデルは、冒頭で述べた「連想」とは、多少意味合いの異なることを実現している。

さて、我々が目指すのは、冒頭に述べた「連想」を、工学的に実現することである。記憶によって形成されるエネルギー曲面上を自在に動き回ることにより、次々とグローバルミニマムに達することができるモデルを構築したいと考えている。そして将来は、あるデータを入力すれば、それに関連した色々なデータを出力するような、「発想支援システム」へと、このモデルを発展させたいと考えている。なお本研究では、従来モデルの「連想」と紛らわしいので、我々が目指す「連想」を「回想」と呼ぶことにする。（回想の本来の意味は「昔のことを色々と思い出すこと」であるが、これを「過去に記憶した事柄を」というように、定義する。）

そこで本報告では、「回想」実現の第一段階として、従来モデルの記憶方法によって形成される、エネルギー曲面の構造を探る。そして記憶した各々のパターンが、エネルギー曲面上で、どのような位置関係に配置されているかを推測する。さらに、エネルギー曲面を自在に動き回ることができる探索手法として、ランダム探索やカオス探索[3]が適切か否かを議論する。以下の実験では、16x16のユニットを２次元格子上に並べたHoppfield型のネットワーク[4]を用いる。ユニットの出力関数はシグモイド型の関数、出力値は「1」と「-1」の二値をとるものとする。そして、相対ベクトルを用いて学習を行なうWidrow則を用いて、アルファベット「A～Z」、数字「0～９」、トランプ記号「ハート、ダイヤ、スペード、クラブ」の合計40個のパターンを記憶させた。

2　「山登り」による曲面探索

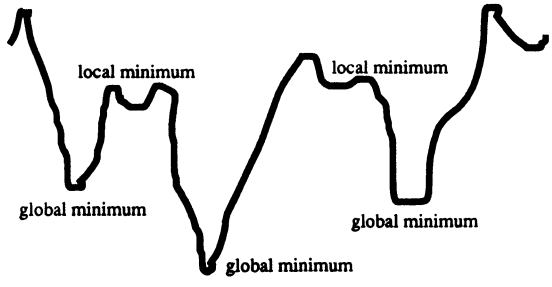
従来の研究により、連想記憶モデルは次のステップを踏んで、記憶と連想が行なわれることが明らかになっている[2]。

1）記憶時に「［全ユニット数］次元」のエネルギー曲面が形成され、記憶パターンは、その谷底（グローバルミニマム）に存在する（Fig.1a）。

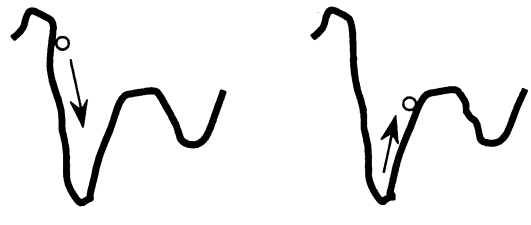
2）連想時に探索点は谷底へ向かって進み（最急降下法）、谷底に達した時点で連想が終了する（Fig.1b）。

しかし連想終了後、探索点が再び谷底を這い上がることができれば、「近傍」に存在する別の谷へ向かうことも可能と思われる。そこで、連想が収束した時点で（i.e.谷底に達したら）、任意のユニットの出力値を反転させる。すなわち出力が「1」ならば「-1」に、「-1」ならば「1」にする。この操作によって、探索点は谷底を登ると、我々は考えた（山登りによる曲面探索、Fig.1c）。

しかし、探索空間は「［全ユニット数］次元」という多次



a. Global and local minimum in energy space.



b. Association.　c. Climbing.

Fig.1. Association and climbing process in energy space.

元空間である。そのため、「どの程度斜面を登れば、次の谷へと転げ落ちることが可能か？」という問題の解を解析的に求めることは、非常に困難である。反転させるユニット数に対して、山登りの程度は比例するとも考えられる。しかし、任意のユニットを反転させるため、かつ探索空間が多次元空間のため、必ずしも反転させるユニット数は、山登りの程度に比例するとは限らない。さらに、我々は直接、エネルギー曲面上の探索点そのものの移動を、観測できるわけではない。そこで、多数回の試行を計算機シミュレーションで行ない、「連想結果」を観測することにより、間接的に、かつ統計的に探索点移動の様子を観察することにした。

3 シミュレーション結果

学習が完了したネットワークに対して、前述の山登り探索を適用し、記憶パターンの一つから、どのようなパターンが次に連想されるかを調べた。まず第一に、探索点が、エネルギー曲面の谷底に位置していることを確認するために、ユニットを強制的には反転させずに、記憶パターンそのものから、通常の連想を行なった。そしてパターンが変化しないことを確認した。次に、ユニットをランダムに選び、その出力値を反転させた後に、通常の連想を行なった。すると収束パターンは次のような３つの場合に弁別された。

ケース１：山登り開始時の記憶パターン
ケース２：別の記憶パターン
ケース３：どの記憶パターンとも一致しないパターン

「ケース１」は、反転させるユニット数が比較的少ないとき（１～数十個）に多く生じた。一方、「ケース２」「ケース３」は、反転ユニットの個数が２０個以内では、全く生じなかった。この結果から、エネルギー曲面の斜面を登るには、反転パターンの個数がある程度多くなければ、生じないことがわかる。そして、「ケース３」が示しているように、グローバルミニマムの近辺には、ローカルミニマムが存在する場合があることも、確認された。我々にとって重要なのは、上記の「ケース２」である。そこで、「ケース２」について、どのような記憶パターンに収束したのかを分類した。表1aは、山登り開始時の記憶パターンが「S」、表1bは、同パターンが「Z」の時の結果である。各々、92例、55例の結果を表にまとめた。

表1の結果が示すように、各々の山登り開始時の記憶パターンに対し、連想されやすいパターンが存在する可能性が示唆される。シミュレーション結果全てについて、最も頻繁に連想されたパターンが連想される確率を求めたところ、平均0.18という結果になった。この数字は、全てのパターンが一様に連想される確率（0.025）に比べて高い確率であることから、連想パターンに偏りがあると考えてよいだろう。

このシミュレーション結果から、山登り探索を開始した際の記憶パターンに、比較的形状が類似している記憶パターンが、連想されやすいのでは、と我々は考えた。ところが、山登り開始時の記憶パターンと、連想された記憶パターンとの「類似度」[4]と、連想されたパターンの「頻度」との間の相関は0.45、共分散は0.02という値であった。つまり、それほど相関が高いわけでもないことが判明した。以上から、必ずしも類似したパターンが、山登り開始時の記憶パターンが形成するグローバルミニマム近傍に存在するわけではない。しかし、特定のパターンが、その近傍に別のグローバルミニマムを形成していることが明らかになった。

Tabel 1. Frequency on associated patterns.

a. Initial pattern "S".

Pattern	Frequency
Z	10
5	6
B, F, N	5
O(zero), P, R, X	4
L, O, T, U, Y, 1, 4	3
C, E, G, H, I, 6, 7, spade	2
V, W, 3, 8, 9, club, diamond, heart	1

b. Initial pattern "Z".

Pattern	Frequency
J	8
S, 0(zero)	7
E, H, L	5
O, W, Y	4

4 「回想」実現のための手法の検討

現在、我々は次の３つの手法、「カオス探索」「ランダム探索」「山登り探索」について、計算機シミュレーションにより「回想」実現の検討を進めている。しかし前述のエネルギー曲面の解析が進まないため、手法の考案は困難をきわめている。

「カオス探索」の手法は、初期値を中心に振動しながら、エネルギー曲面の谷底へ次第に降下していく手法である[3]。これまでの実験結果より、パラメータ設定次第で、谷底を登って別の谷へ向かうことも可能であることが判った。しかし問題は、エネルギー曲面の形状が不明であるため、その形状に合わせたパラメータの設定ができないことである。一方、ランダム探索は、谷底に達した後に、全くランダムに次の探索開始点を決め、そこから最急降下方法によって別の谷を探索する手法である。この手法では、多数の谷を短時間に発見できるが、連想されるパターン間には何ら相関がないため、「回想」が実現されていない。最後に「山登り探索」は、くまなくエネルギー曲面上を探索できるが、問題点は前章にて述べた点と、時間がかかることである。

5 おわりに

種々の探索手法を用いて、「回想」を実現しようと試みているが、今のところ実現できていない。その理由として、一つにはエネルギー曲面の構造解析が進まないことが挙げられる。現在までに判明した実験事実に基づき、今後、新たな解析手法を考案していく。また、各々の探索手法を組み合わせることにより、「回想」実現のための土台造りも同時に進めていく。

参考文献

(1) 甘利俊一、"神経回路網モデルとコネクショニズム," 東京大学出版会
(2) J.J.Hopfield and D.W.Tank, "Neural computation of decisions in optimization problems," Bio. Cybern. 52, pp.141-152, 1985.
(3) 谷　淳、"カオス的最急降下法を適用したニューラルネットにおける学習および記憶想起の動特性について," 電子情報通信学会論文誌、A, Vol. J74-A, No.8, pp.1208-1215, 1991
(4) 中野馨、"アソシアトロン," 昭晃堂

FE2-4

連想記憶とカオス的想起に基づく知的ロボット

Intelligent Robot based on Associative Memory and on Chaotic Retrieval

吉原道宏* 佐藤友彦** 山口亨*
Michihiro YOSHIHARA Tomohiko SATO Toru YAMAGUCHI
* 宇都宮大学 工学部 情報工学科
Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utsunomiya University
** 山武ハネウエル株式会社
Yamatake-Honeywell Co., Ltd.

abstract

This paper proposes a self organization method based on chaotic retrieval which can realize human creativity. We apply the proposed method to a moving robot which avoids obstacles. By using the proposed method, when environment changes, a robot can search a right way by itself and can learn a new control rule. We show proposed method usefulness from simulation results.

1 はじめに

最近カオスが柔軟な情報処理機構の要素技術として、注目されている。このカオスを知識情報処理に利用するためには、カオスが持つ複雑な数値情報を人間が理解しやすい親和性の高い表現に変換可能なファジィのようなパラダイムを利用する必要がある。このようにカオスとファジィを融合することで人間が持つ発想能力を実現できる。佐藤らは、ファジィ連想記憶システム [1][2] 上にカオス的想起を応用したカオスファジィ連想記憶システムを提案し、既存の知識を使って新たな知識を生成できることを示した [3][4]。

ファジィ連想記憶システムはファジィ知識を連想記憶上に構築したものであり、親和性の高い明解な知識表現を持ち、経験に基づく学習が可能である。また、このシステムでは知識はネットワーク上に分散表現されており、かつ上位層で行なわれるマクロな知識処理と下位層で行なわれるミクロな知識処理を融合しているため、異なるセンサ情報をマクロレベルで同じ概念として想起したり、代替案の想起と評価を瞬間的に行なうことができる。

本稿では、人間が持つ発想能力を実現することを目的とし、ファジィ連想記憶上でのカオス的想起に基づく自己組織化手法を提案し、自律移動ロボットの障害物回避に応用する。本手法ではまず、ある環境におけるスタートからゴールまでの障害物回避用の制御ルールの知識と、環境に関する知識をモデルとしてロボットに与える。そして、環境が変化した場合に、既存の制御ルール知識を基にカオス的想起を行ない、回避方向の候補を想起する。次に、各候補に対して環境モデルによりゴールまでのパスを予測し評価する。そして、評価が高い方向へ動きその知識を学習する。以上の方法により、環境の変化に適応する自律移動ロボットが構築できる。

以下、第 2章において、発想機能を実現するために用いたファジィ連想記憶システムとカオスファジィ連想記憶システムについて説明する。第 3章では、カオス的想起に基づく自己組織化手法を提案する。第 4章では、提案の手法の有効性を実験結果により示す。

2 ファジィ連想記憶システムとカオス的想起

2.1 ファジィ連想記憶システム

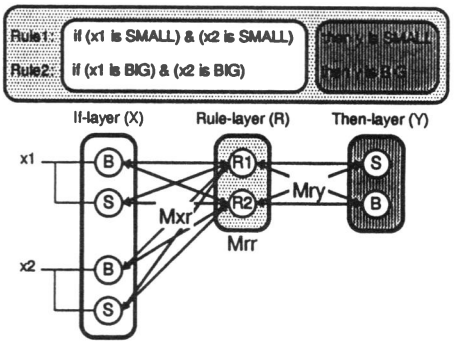


図 1: ファジィ連想記憶システムの構造とファジィルール

ファジィ連想記憶システムは、ファジィ知識を連想記憶上に構築することにより、ファジィ連想推論を実現したシステムである。ファジィ知識としてファジィルールを用いる場合、ファジィ連想記憶システムは図 1のように構成される。ファジィ連想記憶システムでは、連想記憶ネットワークとして BAM(Bidirectional Associative Memory)[5] を用いているため、双方向の想起が可能であり、活性値の伝搬によるボトムアップ・トップダウン処理により入力条件に最もマッチしたパターンを想起できる (BAM の連想マトリクスとして、正規化連想マトリクス [2] を用いている)。また、親和性の高い明示的な知識表現を有しているため、反響動作後のネットワークの活性値から知識を抽出することができる。ファジィ連想記憶システム上で実行される連想推論は以下の特徴を持つ。

- 言語表現と画像などの特徴量パターンを相互変換できる。

- マクロな要素をミクロな要素に分解できる。

2.2 カオスファジィ連想記憶システム

カオスファジィ連想記憶システムは、ファジィ連想記憶システムの記憶の想起過程にカオス的想起を応用したシステムである。カオス的想起手法としては、カオス的最急降下法 [6] を用いている。

カオスファジィ連想記憶システムは、a) 記憶させたパターンの中で入力パターンに近い範囲にある記憶パターンを動的に想起する、b) 記憶させていないが意味的に有効である新たなパターンを想起する、という 2 つの機能を有している [3]。機能 b) は、カオス的な記憶の探索では記憶させていないパターンが多数想起されるが、その中に意味的に有効なパターンが含まれている可能性があるということである。これは、カオスファジィ連想記憶システムでは、ネットワークの各ノードにファジィラベルで表現される意味を持たせることで知識を明示的に表現しているため、想起されたパターンが有効かどうか判断できるからである。

以上のような機能により、カオスファジィ連想記憶システムは連想メモリ上に記憶した既存の知識を用いて新たな知識を生成できるという特徴を持つ。このため、カオスファジィ連想記憶システムを用いて発想 (支援) が可能である [4]。

3 カオス的想起に基づく自己組織化

ここでは、自律移動ロボットの障害物回避を例に取り、発想能力を実現する方法として、カオスファジィ連想記憶システムを用いたパスプランニングと自己組織化の方法を提案する。

3.1 自律移動ロボットの障害物回避

システムはセンサ情報計算部、ロボット制御部から構成する。センサ情報計算部は、図 2に示すようなロボットのカメラに写ると推定されるセンサイメージ情報を障害物の面積値として計算する。また、ファジィラベルで表現されるロボットからゴールまでの大まかな距離と方向を同時に計算する。ロボット制御部では、センサ情報計算部から出力されるセンサイメージデータとロボットからゴールまでの大まかな距離と方向から、次に進むべき方向を決定し、ロボットはその方向に動く。

ロボット制御部では、進行方向を決定するために次の 3 つの知識を持っている。

1. 下位の知識：
   センサイメージを使って分岐かどうかの判定を行う分岐判定ルールと、次に進む方向を決定する制御ルールを持つ。ここで、制御ルールはセンサ

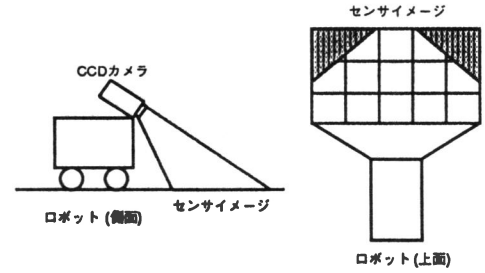


図 2: センサイメージ

メージの開いている方向の重心を計算する。また、分岐判定ルールは、(1) 道が 2 通りにわかれた場合、(2) 急に目の前が開けた場合、(3) 視界が障害物でうまった場合に分岐であると判定する。

2. 上位の制御ルール知識：
   このルールにより、分岐において次に進む方向を決定する。この知識は、図 3のようにカオスファジィ連想記憶システムを用いて実現する。以下、このネットワークを上位ネットワークと呼ぶ。

3. 外部環境に関する知識：
   この知識を用いて次の分岐を予測する。この知識は図 3のようにファジィ連想記憶システムを用いて実現する。以下、このネットワークを予測ネットワークと呼ぶ。

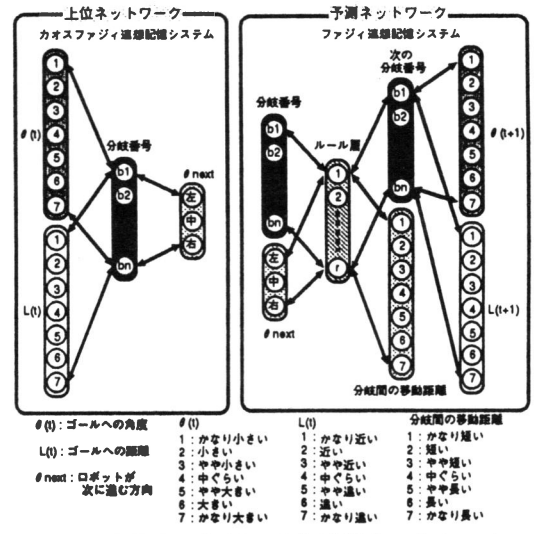


図 3: 上位ネットワークと予測ネットワーク

ロボット制御部の流れは、まず分岐判定ルールを用いて、分岐かどうかを判定する。分岐でない場合は下位の制御ルールに従って障害物のない方向に進む。分岐の場合、その分岐を記憶しているか、上位ネットワークを用いて調べる。分岐として記憶していなければ、環境が変化したと判断し停止する。記憶していれば、予

測ネットワークで予測された分岐と同じであるか比較する。予測した分岐と異なった分岐であれば、環境が変化したと判断し停止する。予測した分岐と同じであれば、その分岐で動く方向を記憶しているか上位ネットワークを用いて調べる。記憶していればその方向に進む。記憶していなければそこで停止する。

3.2 カオスファジィ連想記憶システムを用いたパスプランニングと自己組織化

ロボット制御部において環境が変化したと判断された場合、上位ネットワーク上でカオス的想起を行い回避方向を想起する。ただし、予測した分岐とは異なる既知の分岐に到達した場合は、この地点でカオス的想起を行い、予測した分岐とは異なる新たな分岐が発生した場合は、前の分岐まで戻ってカオス的想起を行う。以下にカオスファジィ連想記憶システムを用いたパスプランニングの方法を示す。

1) 変化した状況を予測ネットワークに組み込む。
2) 上位ネットワークでカオス的想起を行い、回避方向の候補を想起する。
3)2) で得られた方向を予測ネットワークに入力し、次の分岐を予測する。
4)3) で予測された次の分岐ではゴールに近い方向に進むものとし、更に次の分岐を予測ネットワークを使って予測する。
5)4) をゴールが予測されるまで続ける。ここで、各分岐間でロボットが進む距離とゴールへの到達度を評価値として計算する。
6)3) から 5) までを 2) で想起された方向の候補に対して行う。
7)3) から 6) までで得られたゴールまでのパスの中で、最も評価が高いパスを選択する。
8) 現在の分岐で 7) のパスに対応する方向に進んだ場合の次の分岐を、予測ネットワークで予測する。
9)8) で予測がゴールに到達したら 10) へ進む。到達していないなら、2) から 8) まで繰り返す。
10) 最終的に残ったパスが、進むべきパスである。そこで、ロボットは実際にこのパスの方向に進む。
11) 実際に動いたパスに対応するルールを新たな制御ルールとして、これを用いて上位ネットワークを洗練する。

ここで、1) において予測ネットワークの修正ができるのは、図 3のように知識を明示的に表現しているからである。2) で回避方向をいろいろと想起するのは発散的思考 [7] である。また、7) で評価が高かったものを選択することで、パスの探索範囲を狭めることができる。これは、収束的思考 [7] である。このように、本手法では、発散的思考と収束的思考の両方を備えた発想を実現することができる。また、発想の結果を用いて自律的に知識を洗練するため、本手法は自己組織化機能を有している。更に、11) に続いて以下の 12) を行うことで、環境変化後のスタートからゴールまでの最も評価が高い経路を探索できると予想される。

12) スタート地点で、2) から 9) までを繰り返す。

4 シミュレーション

本手法の有効性を検証するため、図 4のような環境 (障害物、スタート、ゴール) を用いて、前章に示した手順に従ってシミュレーションを行なった。ここで、環境、ロボットと視界の大きさは以下の数値を用いた。

環境：横、縦方向ともに (-1000,1000)
ロボットの大きさ：縦 150×横 100
ロボットの視界：縦 300×横 500(3×5 のブロックに分割)

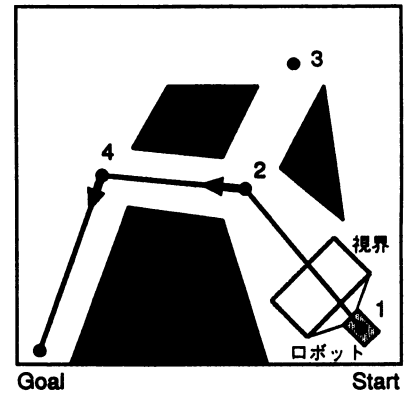


図 4: 外部環境

また、上位の制御知識として図 4に示したようなパスを記憶させた。図 4のような状況では、下位の制御ルールと上位ネットワークを用いることで、ゴールまで到達することができる。ここで、障害物の変化として、次の 2 つの場合を考える。

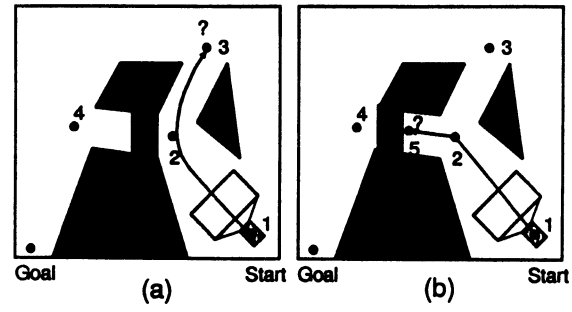


図 5: 外部環境の変化

1. 図 5の (a) のように障害物を加えた場合：
   分岐 1 の次は分岐 2 へ行くはずであるが、予測

した分岐とは異なる分岐3に到達した。この場合、分岐3でカオス的想起を行なう。

2. 図5の(b)のように障害物を加えた場合：
分岐2の次は分岐4へ行くはずであるが、新たな分岐5に到達した。この場合、分岐2に戻って、カオス的想起を行なう。

このような条件の下で、シミュレーションを行なった場合のロボットの軌跡を図6、図7に示す。これらの図のように、本手法により自律的に環境変化に対応したパスをプランニングできた。また、スタート地点でカオス的想起を行なうと、図8のようなルートも発見できた。

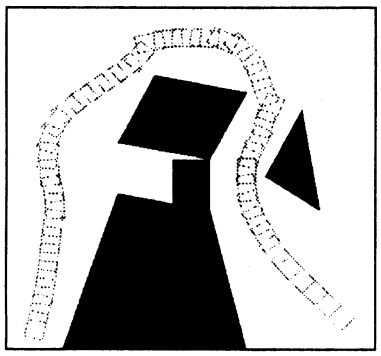


図6: シミュレーション結果1

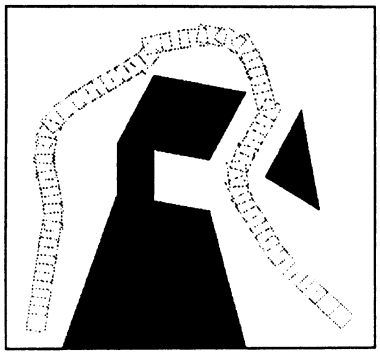


図7: シミュレーション結果2

5 おわりに

本稿では、人間の持つ発想能力を実現する手法として、自律移動ロボットの障害物回避を例にとり挙げ、カオス的想起に基づく自己組織化手法を提案した。提案の手法では、障害物が変化した場合でも、ロボットは自律的に回避方向を探索し、新たな制御ルールを自己組織化できる。

シミュレーションの結果から提案のカオス的想起に基づく自己組織化手法の有効性を検証した。

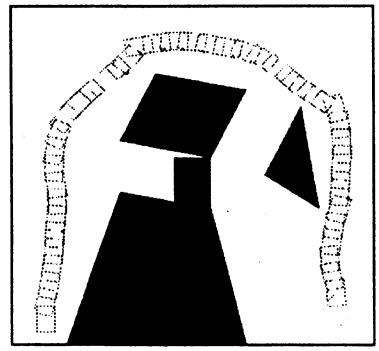


図8: シミュレーション結果3

参考文献

[1] 山口亨：ファジィ連想記憶システム, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.2, 245-260 (1993).

[2] 山口、関根、D.Montgomery、遠藤：ファジー連想推論に基づく知的インターフェースとそのコマンドスペル修正器への適用, 電気学会論文誌C, 113巻9号, 709-718 (1993).

[3] 佐藤、牛田、山口、井村、高木：ファジィ連想記憶システムにおけるカオス的記憶探索, 日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.4, 765-774 (1994).

[4] 佐藤、牛田、山口：連想記憶におけるカオス的想起に基づく表情画像の生成, 電気学会論文誌C, Vol.115-C, No.3 (1995) 掲載予定.

[5] B.Kosko : Adaptive Bidirectional Assosiative Memories, Applied Optics, Vol.26, No.23, 4947-4960 (1987).

[6] 谷淳：カオス的最急降下法を適用したニューラルネットにおける学習および記憶想起の動特性について, 電子情報通信学会論文誌A, Vol.J74-A, No.8, 1208-1215 (1991).

[7] 國藤進：発想支援システムの研究開発動向とその課題, 人工知能学会誌, Vol.8, No.5, 552-559 (1993).

[問い合わせ先]

〒321 宇都宮市石井町2753
宇都宮大学 工学部 情報工学科 山口研究室
吉原 道宏
TEL: 0286-89-6259
E-mail: michi@sophy.infor.utsunomiya-u.ac.jp

FE3-1

クリーンルームのファジィ恒温恒湿制御 その1 -ファジィ制御パラメータの自動調整の試み

Fuzzy Control for Stabilizing Temperature and Humidity in a Clean Room (Part 1) - Attempt to Do Automatic-tuning to the System Parameters

外山 薫* 鳶 敏和*
Kaoru TOYAMA* Toshikazu TOBI*

田中 一男**
Kazuo TANAKA**

*ダイダン株式会社 技術研究所
*Technical Research Laboratory, DAI-DAN Co., Ltd.

**金沢大学工学部機械システム工学科
**Dept. of Mechanical Systems Eng., Kanazawa University

Abstract : Air-conditioning system has various types to make comfortable space for human. In recent years, that is demanded to create of high quality environment as industrial develpment at the center of semiconductor. The Clean Room and the Countermeasure for Biohazard, etc. are the typical examples. In the thermal environment of these equipment, there are a lot of things that the constant temperature and humidity is required. For the present, air-conditioning control system takes time to a local adjustment of various system parameters when the system is introduced. If the self adjustment of the system parameter become possible, the adjustment work in the local can be reduced.

We attempted to make automatic-tuning of the system parameters of fuzzy control to achieve constant temperature and humidity by using the adaptive control algorithm for a clean room at this time. And we report to acquired satisfactory for result.

1. はじめに

より快適な生活環境や作業環境を生み出すために，今や空調制御は無くてはならないシステムとなった。近年の半導体を中心とする産業の発展にも，高度な環境整備の必要性から，空調システムは大きな関わりを持っている。その代表的な例として，クリーンルームやバイオハザード対策等が挙げられる。半導体生産ラインにおいては製品の品質を保つために適度な乾燥が必要となり，年間を通じて常に一定の温度と湿度を得るために恒温恒湿制御を用いている。これは従来，V型温湿度制御法と露点温度制御法の2種類に大別されていた。しかしこれらの制御法は欠点も持ち合わせている。

我々は，その欠点を補う新しい手法としてファジィ推論を導入し，ファジィ恒温恒湿制御器を開発した[1,2]。しかしファジィ制御では，専門家の経験に基づくスキルを容易に反映させることが出来るが，反面，専門家が元々いないケースなどでは導入が困難になる。また各種パラメータに対しては，現状では手作業での調整が主流となっているため適用が簡単な対象に限られてしまう。もし制御パラメータを自動調整することが出来れば，現場レベルでの試行錯誤的な調整の手間を軽減することが可能となる。

本稿では，クリーンルームを対象として，適応制御アルゴリズムを用い，ファジィ恒温恒湿制御器の制御パラメータの自動調整を試みたので，実証実験の結果と共に報告する。

2. 従来型制御法とその欠点[3]

V型温湿度制御法は経済的で，湿度の変動が比較的少ない制御を望むケースに採用されることが多い。V型温湿度制御装置は，入力の数に合わせた二つの閉ループを構成するため，室内温度調節計および室内湿度調節計の二つの調節計を持っており，室内温湿度からPID制御動作によって，操作量を決定する。この制御法では二入力(温度，湿度)三出力(冷水バルブ，温水バルブ，加湿バルブ)の変則的な制御系を一入力一出力に分割することによって制御し易くしており，それにより一つのバルブは必ず閉じているため経済的であるが，冷却および除湿の要求が重複するケースでは外乱に対する応答性が悪くなる可能性がある。

また露点温度制御は，恒温恒湿装置において，より正確に相対湿度を制御するため，一旦所定の室内温湿度に対応する露点温度になるよう制御し，室内の顕熱負荷の不足分は再加熱で，潜熱負荷の不足分は再加湿で調節する制御法である。この制御法では二入力三出力の変則的な制御系を一入力一出力の三つの制御系に分割することによって制御し易くしている。しかし外気が室内環境に近い中間期(春や秋)では，再加熱や再加湿が生じ，経済性を著しく損なうことがある。

3. ファジィ恒温恒湿制御

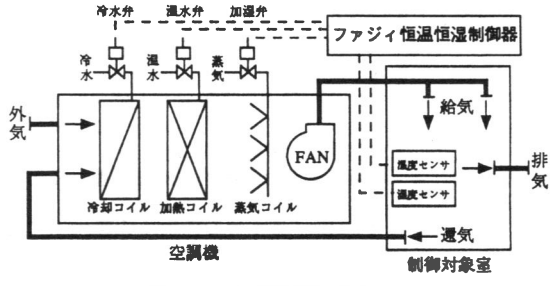


図1. ファジィ恒温恒湿制御システム
Figure 1. Outline of the fuzzy control system

一般にファジィ理論の制御への応用は，熟練者の経験に基づき制御の自動化を図るというものである。しかし，恒温恒湿制御の自動化は，既に従来型制御法で実現されているため，ファジィ技術を用いることで，従来型制御法なみのコストで制御精度や経済性の向上を狙うことが目標となる。

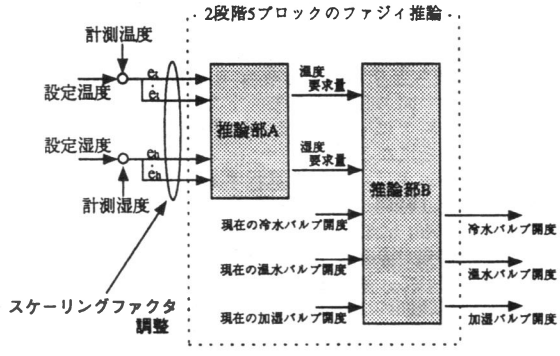


図2. ファジィ恒温恒湿適応制御システム
Figure2. System of the fuzzy control by using the adaptive control algorithm

ここで扱うファジィ推論機構は，2段階5ブロックで構成されたもの(図2参照)で，第一段階では，制御量である室内温湿度を目標値に一致させるための温度要求量及び湿度要求量を推論する。また第二段階では，第一段階で得られた要求量に基づき，三つのバルブの開度から三つのバルブの

増減操作量を推論する。

4. ファジィ恒温恒湿適応制御器

パラメータの自動調整を試みるに当たり，適応制御アルゴリズムを用いることにした。ただしここで扱うパラメータとは，ファジィ集合を規定するスケーリングファクタのことである。

4.1. 適応制御アルゴリズム

ここで用いる適応制御アルゴリズムは，温度と湿度の動特性を観察することによってパラメータを変更していくアルゴリズムである。以下に手順を示す。

[step 1] 温度及び湿度が設定値に安定したら，任意に設定温湿度を変更する。
[step 2] 現在の温湿度からの追従性を監視することによって立ち上り時間とオーバーシュート量を検出する。
[step 3] 立ち上り時間とオーバーシュート量を判断し，任意の係数(α,β)を自動調整が必要なパラメータに掛け合わせ，パラメータを変化させる。
[step 4] 再度設定値を変更し，追従性を確認する。
[step 5] step2～4を繰り返し最適なパラメータを検索する。

実際に自動調整するパラメータ(スケーリングファクタ)は，温度偏差(e_t)・温度偏差変化率($\dot{e}_t$)・湿度偏差(e_h)・湿度偏差変化率($\dot{e}_h$)の四種類である(図2参照)。シミュレーションを行った結果，オーバーシュートを改善したければ偏差のスケーリングファクタ(以下，スケーリングファクタをSFと呼ぶ)を大きくするか，或いは偏差変化率のSFを小さくすればよく，逆に立ち上り時間を改善したければ偏差のSFを小さくするか，或いは偏差変化率のSFを大きくすればよいことが分かっている。

調整は，ハードウェアの精度を考慮した上でパラメータの上限値と下限値を設定し，その範囲内で行うことにしている。今回は，まず偏差変化率のSFを調整していき，それが上限値或いは下限値に達したら偏差のSFを調整するという方法をとった。

また，パラメータに掛け合わせる任意の係数αおよびβは，以下の条件を満たさなくてはならない。

$$\alpha > 1.00,\ \beta < 1.00,\ \alpha * \beta \neq 1.00$$

これらの条件は，適応制御アルゴリズムを正しく機能させるためと，制御対象のハンチングを防止するために考慮されたものである。

4.2. 適応制御モード

適応制御システムには，温度と湿度それぞれに対して，パスモード・自動調整モード・オーバーシュート改善モード・立ち上り時間改善モードの四つが用意されている。(図3参照)

パスモードはオーバーシュート量或いは立ち上り時間(制御でいう立ち上り時間とは異なると考えている)が正当に評価できない時に使用するモードである。例えばシステムの立ち上り時では立ち上り時間が評価できないため，これを用いることになる。

自動調整モードは，これを選択するとオーバーシュート量及び立ち上り時間を見て自動的にパラメータを変化させるモードである。このモードには三つのパターンがある。一つ目は，制御対象が立ち上り時間の許容範囲内に設定値まで到達していて，かつ制御対象のピークがオーバーシュート量の許容範囲内である場合で，この時はパラメータを変更する必要はないと見なされ調整は行なわれない。二つ目は，オーバーシュート量が許容範囲を越えてしまった場合で，この時はオーバーシュート改善の方向に調整される。三つ目は立ち上りが許容範囲を越えてしまった場合で，この時は立ち上り改善の方向に調整される。ただし今回のアルゴリズムでは，立ち上り時間よりオーバーシュート量に重点を置いているため，立ち上り時間が許容範囲内に設定値に到達しなくて，かつその後オーバーシュート量が許容範囲を越えた場合は，オーバーシュート改善機能が動作することになっている。

オーバーシュート改善モードと立ち上り時間改善モードは，制御対象の挙動に関わらずマニュアルで操作できるモードである。これらのモードは，自動調整モードの二つ目のパターンまたは三つ目のパターンと同等である。

なお制御対象のピークは，制御を開始した時点から新たに適応制御をかけるまでの制御量の移動平均処理から求めている。

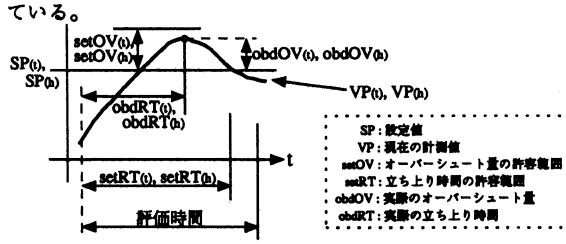


図3. 動特性評価

Figure 3. Estimate of the behavior characteristic

4.3. 実証実験

適応制御アルゴリズムに基づいて設定値を変化させ，その追従を見ながら自動調整を試みた。下記の条件は，以前行ったファジィ恒温恒湿制御器性能評価の実証実験データを参考にして決定したものである。

オーバーシュート量の許容範囲 = 0.2度, 1.0%
立ち上り時間の許容範囲 = 1200sec.
評価時間 = 60min.

実験は，$6.5^{W} * 4.5^{D} * 2.7^{H}(m^3)$のスーパークリーンルームで約二週間実施した。真冬に実験したため，加熱と加湿を中心とする制御となり，つまり温水バルブと加湿バルブが重点的に操作された。

4.4. 実験結果

適応制御を用いる前の段階では，温水バルブも加湿バルブも開閉が激しく，そのため温度も湿度も設定値に到達しても振幅が収まらず(温度では±0.5度以上，湿度では±3.0%以上)安定したとは言えない状態が見られたが，自動調整モードにて適応制御を適用していくに従って，各バルブの動作も徐々に安定していき，それに従って温湿度共に安定していくことが確認できた。

5. おわりに

実際には人間がシステムの挙動をみて，適応制御を適用するかしないか見極めなくてはならないため，半自動と言った方が適切であるかも知れないが，制御対象に関しての知識があるだけで(つまりファジィの知識がなくても)パラメータを変更でき，制御対象物を安定させられることが示唆できたと考えている。

参考文献

[1] T.Tobi and T.Hanafusa, "A Practical Application of Fuzzy Control System for Air-conditioning System," Proc. of International Workshop on Fuzzy System Applications, pp.271-272,1988.
[2] T.Tobi and T.Hanafusa, "A Practical Application of Fuzzy Control System for an Air-conditioning System, "International Journal of Approximate Reasoning,vol.5,no.3,pp.331-348,1991.
[3] 空気調和衛生工学便覧II (空調設備篇), 空気調和・衛生工学会, 1989.
[4] 田中:アドバンストファジィ制御, 共立出版, 1994.

問い合せ先: 〒354 埼玉県入間郡三芳町北永井390
ダイダン株式会社技術研究所　外山 薫
Tel. 0492-58-1511 Fax. 0492-58-7601
E-mail : toyama@lab.daidan.co.jp

FE3-2

クリーンルームのファジィ恒温恒湿制御 その2 - 階層的ファジィモデルの実行可能性の評価

Fuzzy Control for Stabilizing Temperature and Humidity in a Clean Room. (Part2) - Feasibility Study of Hierarchical Fuzzy Model.

鳶 敏和* 外山 薫*
Toshikazu Tobi* Kaoru Toyama*

市橋 秀友**
Hidetomo Ichihashi**

*ダイダン株式会社技術研究所
*Technical Research Laboratory, DAI-DAN Co., Ltd.

**大阪府立大学工学部
**College of Engineering, University of Osaka Prefecture.

Abstract: Because of the recent industrial growth, the requirement for high grade and high quality control of air-conditioning systems is increasing.

Especially those facilities such as the clean room and the biohazard for semiconductor production require constant maintenance against uncertain changes of sensors and actuators caused by any environmental changes.

The maintenance activities by trial and error after installing a control system need substantial effort for engineers. In this paper the feasibility of a hierarchical fuzzy model for adaptive learning controller of temperature and humidity in the clean room is discussed and the results of simulation studies are reviewed.

1.はじめに

クリーンルームやバイオハザード施設の熱環境には，恒温恒湿性を要求されることが多い。われわれは，その制御器に，運転に関するオペレータの思考パターンや行動パターンを分析し，ある局面でのオペレータの意志決定，すなわちオペレータの基本的な制御動作を積極的に活用してきた[1,2]。応用の経験から，ファジィ推論には推論能力を改善するための各種パラメータの試行錯誤的な調整手続きに，直観的な判断が反映されるような，定式化が本来的に備わっている面を窺わせた。ただし，制御規則の獲得や制御パラメータの調整に関しては，いくつかの問題点が指摘されている。まず，元々専門家が存在しないケースでは，制御規則が得られない。また，繁雑なパラメータ調整を手作業に頼るだけでは，適用が簡単な対象に限られる。さらに，空調設備は，時間の経過により，対象や環境の特性が変化していく，時変システムである。特性の変化は，センサおよびアクチュエータの劣化，制御対象室内の機器レイアウト変更による熱負荷の増減等に起因する。制御システムにおいては，システム導入後の保全作業に手間が掛かっており，システムの変化に追従して自動的に制御アルゴリズムを記述することができれば，現場レベルでの試行錯誤的な調整の手間が軽減できる。

本文では，クリーンルームの恒温恒湿制御の制御アルゴリズム獲得について，階層的ファジィモデルの実行可能性を評価した結果を報告する。

2.ニューロ・ファジィ恒温恒湿制御システム

制御器には，市橋らの階層的ファジィモデル[3]を採用した。図1は，用いた階層的ファジィモデルに基づく，恒温恒湿制御器の構成を示している。

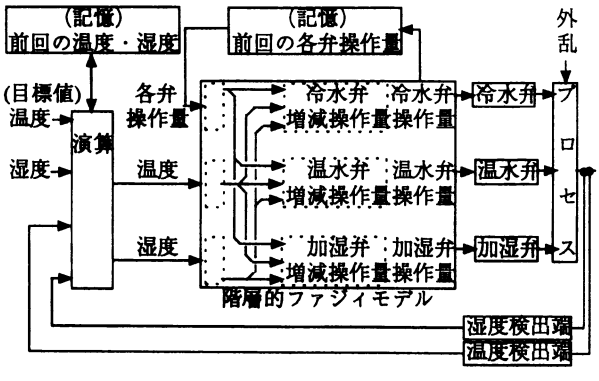


図1.階層的ファジィモデルに基づくファジィ制御器の構成
Figure 1 - Structure of fuzzy controllers based on fuzzy models.

階層的ファジィモデルは，従来からのファジィ恒温恒湿制御システムで扱った2段階5ブロック(ファジィ中間推論，ファジィ最終推論)のファジィ推論機構を構成する。ファジィ中間推論では，制御量である温湿度を目標値に一致させるため，制御偏差，制御偏差の変化を捕らえ，制御量を上昇させるのか，下降させるのか，何もしないのかの要求量を求めた。

また，ファジィ最終推論で用いたファジィルールは，以下のオペレータの基本的な制御動作に基づく。

[Rule 1]
もし，温度を上昇させたいならば，冷水弁を閉める方法か，または温水弁を開ける方法がある。ただし，温水弁を開ける方法よりも，冷水弁を閉める方法の方が経済的である。しかし，冷水弁が既に全閉であるか，もしくは冷却コイルが減湿器の働きを行っていれば，温水弁を開ける方法を選ばざるを得ない。

[Rule 2]
もし，温度を下降させたいならば，冷水弁を開ける方法か，または温水弁を閉める方法がある。ただし，冷水弁を開ける方法よりも，温水弁を閉める方法の方が経済的である。しかし，温水弁が既に全閉であれば，冷水弁を開ける方法を選ばざるを得ない。

[Rule 3]
もし，湿度を上昇させたいならば，冷水弁を閉める方法か，または加湿弁を開ける方法がある。ただし，加湿弁を開ける方法よりも，冷水弁を閉める方法の方が経済的である。しかし，冷水弁が既に全閉であるか，もしくは冷却コイルが冷却器の働きを行っていれば，加湿弁を開ける方法を選ばざるを得ない。

[Rule 4]
もし，湿度を下降させたいならば，冷水弁を開ける方法か，または加湿弁を閉める方法がある。ただし，冷水弁を開ける方法よりも，加湿弁を閉める方法の方が経済的である。しかし，加湿弁が既に全閉であれば，冷水弁を開ける方法を選ばざるを得ない。

[Rule 5]
もし，三つの弁が開いているならば，三つの弁を少しずつ閉めていく。

3.階層的ファジィモデル

学習型ファジィ推論法には，学習型簡略ファジィ制御器[4,5]やSOFIA法[6]がよく知られている。学習則は，複数の理想的な入出力データをあらかじめ与えられたファジィモデルに与え，モデルからの出力データと理想的な出力データとの差を捕らえ，最急降下法に基づき逐次学習することによって，理想的なモデルを獲得するものである。基本的な推論機構は簡略ファジィ推論[7]であるが，Mamdani型推論[8]の結論部に差

異がある。学習型簡略ファジィ制御器では，結論部にファジィ集合ではなく，実数値を用いている。　学習型簡略ファジィ制御器は，問題が大規模になると，規則の総数が膨大になって，適用が難しくなる。そこで，ファジィモデルを階層構造にすると，パラメータ数が減って，大規模な問題に適用できるようになる。しかも，ニューラルネットワークにおける階層結合型ネットワークの構造や学習則は，階層的ファジィモデルに置き換えられる。

ここでは，入力変数が$\{x_i \mid i=1,\cdots,n\}$，出力変数が$\{y_r \mid r=1,\cdots,s\}$，おのおのの入力変数に対するファジィ分割数が$\{m_i \mid i=1,\cdots,n\}$のn入力s出力の3層ファジィモデルを考慮する。ただし，ファジィ集合は，簡単のため，図2の三角形の所属度関数で特性付ける。

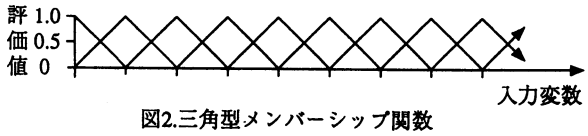


図2.三角型メンバーシップ関数
Figure 2 - Triangular membership functions.

第p層における第uモデルの第k番目の規則の第i番目のファジィ集合を$A_{u,k}^{p-1,i}$で表す。第p層における第uモデルの第k番目の規則の第i番目の入力変数x_iに対する確定入力値x_i^*の適合度を$\mu A_{u,k}^{p-1,i}(x_i^{p-1*})$で表す。また，第p層における第uモデルの第k番目の規則の結論部の実数値を$w_{u,k}^{p-1}$で表す。第p層における第uモデルの出力x_u^pは式(1)のように示される。

$$x_u^p = \sum_{k=1}^{m} \prod_{i=1}^{n} \mu A_{u,k}^{p-1,i}(x_i^{p-1*}) \cdot w_{u,k}^{p-1} \quad (1)$$

第p層における第uモデルの第k番目の規則の前件部適合度$C_{u,k}^{p-1}$は，式(2)で求められる。

$$\begin{aligned} C_{u,k}^{p-1} &= \prod_{i=1}^{n} \mu A_{u,k}^{p-1,i}(x_i^{p-1*}) \\ &= \mu A_{u,k}^{p-1,1}(x_1^{p-1*}) \cdot \cdots \cdot \mu A_{u,k}^{p-1,n}(x_n^{p-1*}) \end{aligned} \quad (2)$$

学習アルゴリズムは，簡単のため，図3の7入力3出力の3層ファジィモデルを考慮する。

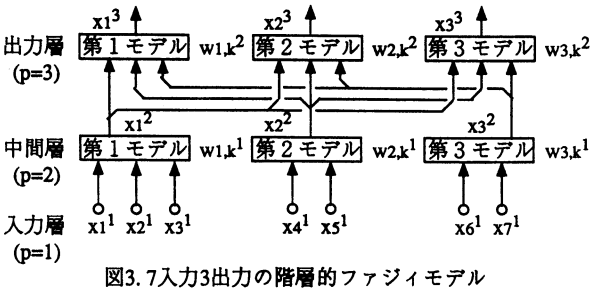


図3. 7入力3出力の階層的ファジィモデル
Figure 3 - 7-input and 3-output hierarchical fuzzy models.

入力変数に対するファジィ分割数は，おのおの最少の2個を定義する。階層的ファジィモデルにおける規則の結論部の実数値$w_{u,k}^{p-1}$を最急降下法を用いて調整する方法は，既に提案されている[3]。ここで，第r番目の理想出力を出力層における第uモデルの出力に対応させる。評価関数は，式(3)の一つの入力ベクトル$\{x_1^{1*},x_2^{1*},x_3^{1*},x_4^{1*},x_5^{1*},x_6^{1*},x_7^{1*}\}$に対する出力層における第uモデル(第u番目)の出力$\{x_u^3\}$と理想出力$\{y_u^*\}$の差の2乗和で定義される。

$$E = \{\sum_{u=1}^{s} (y_u^* - x_u^3)^2\}/2 \quad (3)$$

式(3)の評価関数から式(4)の誤差逆伝播学習則が導かれる。p=2,3，u=1,2,3，m=4,8である。

$$\begin{aligned} \partial E/\partial w_{u,k}^{p-1} &= \partial E/\partial x_u^p \cdot \partial x_u^p/\partial w_{u,k}^{p-1} \\ &= \partial E/\partial x_u^p \cdot \partial(\sum_{k=1}^{m} C_{u,k}^{p-1} \cdot w_{u,k}^{p-1})/\partial w_{u,k}^{p-1} \\ &= (\partial E/\partial x_u^p) \cdot C_{u,k}^{p-1} \end{aligned} \quad (4)$$

入出力データ$\{x_1^{1*},x_2^{1*},x_3^{1*},x_4^{1*},x_5^{1*},x_6^{1*},x_7^{1*},y_1^*,y_2^*,y_3^*\}$を，図3のファジィモデルに与える。入力データに対するモデルの出力x_u^3と理想出力y_u^*の差δu^3は，式(5)で示される。

$$\delta u^3 = y_u^* - x_u^3 \quad (5)$$

p=3，すなわち出力層では，$w_{u,k}^2$の学習則は，式(6)から式(7)のようになる。なお，αwは学習係数を，tは離散時間を表している。また，式(7)では，中間層と区別する意味で，出力層における第uモデルの出力を第r番目の理想出力に対応付けるため，変数uをrに置き換えている。

$$\begin{aligned} \partial E/\partial w_{u,k}^2 &= (\partial E/\partial x_u^3) \cdot C_{u,k}^2 \\ &= -(y_u^* - x_u^3) \cdot C_{u,k}^2 = -\delta u^3 \cdot C_{u,k}^2 \quad u=1,\cdots,3 \end{aligned} \quad (6)$$

$$w_{r,k}^2(t+1) = w_{r,k}^2(t) + \alpha w \cdot \delta r^3 \cdot \prod_{i=1}^{n} \mu A_{r,k}^{2,i}(x_i^2) \quad (7)$$

中間層（p=2）では，式(8)および式(9)の誤差逆伝播学習則が導かれる。なお，式(9)における偏微分項は，第1モデルが式(10)および式(11)で，第2モデルが式(12)および式(13)で，第3モデルが式(14)および式(15)で示される。さらに，式(9)の誤差δu^2は，中間層の第uモデルについて，それぞれ式(16)，式(17)および式(18)で示される。したがって，$w_{u,k}^1$の学習則は，式(19)，式(20)および式(21)のようになる。

$$\begin{aligned} \partial E/\partial w_{u,k}^1 &= (\partial E/\partial x_u^2) \cdot C_{u,k}^1 = \partial E/\partial x_r^3 \cdot \partial x_r^3/\partial x_u^2 \cdot C_{u,k}^1 \\ &= -\sum_{r=1}^{s} \delta r^3 \cdot \partial x_r^3/\partial x_u^2 \cdot C_{u,k} \end{aligned} \quad (8)$$

$$-\sum_{r=1}^{s} \delta r^3 \cdot \partial x_r^3/\partial x_u^2 \cdot C_{u,k}^1 = -\sum_{r=1}^{s} \delta r^3 \cdot \sum_{k=1}^{m} \partial C_{r,k}^2/\partial x_u^2 \cdot w_{r,k}^2 \cdot C_{u,k}^1 = -\delta u \cdot C_{u,k}^1 \quad (9)$$

$$\partial C_{r,k}^2/\partial x_1^2 = [\partial\{\mu A_{r,k}^{2,1}(x_1^2)\}/\partial x_1^2] \cdot \mu A_{r,k}^{2,2}(x_2^2) \cdot \mu A_{r,k}^{2,3}(x_3^2) \quad (10)$$

$$\partial\{\mu A_{r,k}^{2,1}(x_1^2)\}/\partial x_1^2 = \begin{cases} 1/b_{r,k}^{2,1} & a_{r,k}^{2,1} - b_{r,k}^{2,1} =< x_1^2 < a_{r,k}^{2,1} \\ 0 & x_1^2 = a_{r,k}^{2,1} \\ -1/b_{r,k}^{2,1} & a_{r,k}^{2,1} < x_1^2 =< a_{r,k}^{2,1} + b_{r,k}^{2,1} \end{cases} \quad (11)$$

$$\partial C_{r,k}^2/\partial x_2^2 = [\partial\{\mu A_{r,k}^{2,2}(x_2^2)\}/\partial x_2^2] \cdot \mu A_{r,k}^{2,1}(x_1^2) \cdot \mu A_{r,k}^{2,3}(x_3^2) \quad (12)$$

$$\partial\{\mu A_{r,k}^{2,2}(x_2^2)\}/\partial x_2^2 = \begin{cases} 1/b_{r,k}^{2,2} & a_{r,k}^{2,2} - b_{r,k}^{2,2} =< x_2^2 < a_{r,k}^{2,2} \\ 0 & x_2^2 = a_{r,k}^{2,2} \\ -1/b_{r,k}^{2,2} & a_{r,k}^{2,2} < x_2^2 =< a_{r,k}^{2,2} + b_{r,k}^{2,2} \end{cases} \quad (13)$$

$$\partial C_{r,k}^2/\partial x_3^2 = [\partial\{\mu A_{r,k}^{2,3}(x_3^2)\}/\partial x_3^2] \cdot \mu A_{r,k}^{2,1}(x_1^2) \cdot \mu A_{r,k}^{2,2}(x_2^2) \quad (14)$$

$$\partial\{\mu A_{r,k}^{2,3}(x_3^2)\}/\partial x_3^2 = \begin{cases} 1/b_{r,k}^{2,3} & a_{r,k}^{2,3} - b_{r,k}^{2,3} =< x_3^2 < a_{r,k}^{2,3} \\ 0 & x_3^2 = a_{r,k}^{2,3} \\ -1/b_{r,k}^{2,3} & a_{r,k}^{2,3} < x_3^2 =< a_{r,k}^{2,3} + b_{r,k}^{2,3} \end{cases} \quad (15)$$

$$\delta 1^2 = \sum_{r=1}^{s} \delta r^3 \cdot \sum_{k=1}^{m} \partial\{\mu A_{r,k}^{2,1}(x_1^2)\}/\partial x_1^2 \cdot \mu A_{r,k}^{2,2}(x_2^2) \cdot \mu A_{r,k}^{2,3}(x_3^2) \cdot w_{r,k}^2 \quad (16)$$

$$\delta 2^2 = \sum_{r=1}^{s} \delta r^3 \cdot \sum_{k=1}^{m} \partial\{\mu A_{r,k}^{2,2}(x_2^2)\}/\partial x_2^2 \cdot \mu A_{r,k}^{2,1}(x_1^2) \cdot \mu A_{r,k}^{2,3}(x_3^2) \cdot w_{r,k}^2 \quad (17)$$

$$\delta 3^2 = \sum_{r=1}^{s} \delta r^3 \cdot \sum_{k=1}^{m} \partial\{\mu A_{r,k}^{2,3}(x_3^2)\}/\partial x_3^2 \cdot \mu A_{r,k}^{2,1}(x_1^2) \cdot \mu A_{r,k}^{2,2}(x_2^2) \cdot w_{r,k}^2 \quad (18)$$

$$w1_{,k}^1(t+1) = w1_{,k}^1(t) + \alpha w \cdot \delta 1^2 \cdot \prod_{i=1}^{n} \mu A1_{,k}^{1,i}(x_i^{1*}) \quad (19)$$

$$w2_{,k}^1(t+1) = w2_{,k}^1(t) + \alpha w \cdot \delta 2^2 \cdot \prod_{i=1}^{n} \mu A2_{,k}^{1,i}(x_{i+3}^{1*}) \quad (20)$$

$$w3_{,k}^1(t+1) = w3_{,k}^1(t) + \alpha w \cdot \delta 3^2 \cdot \prod_{i=1}^{n} \mu A3_{,k}^{1,i}(x_{i+5}^{1*}) \quad (21)$$

4.制御アルゴリズムの獲得

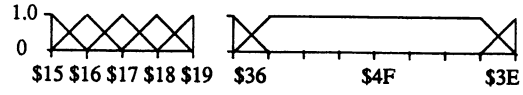
ニューロ・ファジィ恒温恒湿制御システムは，実際の恒温恒湿制御における監視パラメータおよび制御パラメータに関する時系列データ，すなわち運転データを階層的ファジィモデルに与え，その学習則に基づき，制御アルゴリズムを構築するものである。

4.1.階層的ファジィモデルの設定

制御モデルのパラダイムは，図3の7入力3出力の3層ファジィモデルを用いる。したがって，中間層は，3入力1出力のモデルを一つ，2入力1出力のモデルを二つ用意する。また，出力層は，3入力1出力のモデルを三つ用意する。7個ある入力変数は，第1モデルに冷水弁開度CV(t-1)，温水弁開度HV(t-1)および加湿弁開度SV(t-1)を，第2モデルに温度偏差eT(t)および温度偏差の変化deT(t)を，第3モデルに湿度偏差eH(t)および湿度偏差の変化deH(t)を設定する。おのおのの入力変数に対するフ

ファジィ分割数は，CV(t-1)が3個，HV(t-1)が3個，SV(t-1)が3個，e_Tが5個，de_Tが5個，e_Hが5個，de_Hが5個である。弁開度に対するファジィ分割は，ユニークである。表1は，三角形や台形でファジィ集合を特性付けた所属度関数の一例を示している。表中のおのおのの関数表では，横軸は有効な全体集合を，縦軸は適合度を表している。

表1.所属度関数の定義の一例
Table 1 - examples of membership functions.



一方，出力変数は，冷水弁増減操作量dCV(t)，温水弁増減操作量dHV(t)および加湿弁増減操作量dSV(t)の3個を設定する。実際の弁操作量は，冷水弁が$CV(t)=CV(t-1)+dCV(t)$，温水弁が$HV(t)=HV(t-1)+dHV(t)$，加湿弁が$SV(t)=SV(t-1)+dSV(t)$になる。tは，離散時間を意味する。

4.1.1.中間層の第1モデル

中間層の第1モデルは，3入力1出力の学習型簡略ファジィ制御器を用いる。入力変数は，冷水弁開度CV(t-1)，温水弁開度HV(t-1)，加湿弁開度SV(t-1)を設定する。スケーリングファクタは，4～20mAである。なお，4～20mAは，弁開度0～100%に対応する。おのおのの入力変数に対するファジィ分割数は，CV(t-1)が3個，HV(t-1)が3個，SV(t-1)が3個である。規則は，27個で構成する。また，規則の結論部実数値は，乱数で初期化する。表2は，16進数表記数字で，規則の条件部の所属度関数を修飾したラベルの索引集合を表している。

表2.所属度関数を修飾したラベルの索引集合
Table 2 - Hexadecimal representation of the membership functions.

	条件部				条件部				条件部		
rule	1	2	3	rule	1	2	3	rule	1	2	3
1h01	$36	$36	$36	1h02	$4F	$36	$36	1h03	$3E	$36	$36
1h04	$36	$4F	$36	1h05	$4F	$4F	$36	1h06	$3E	$4F	$36
1h07	$36	$3E	$36	1h08	$4F	$3E	$36	1h09	$3E	$3E	$36
1h10	$36	$36	$4F	1h11	$4F	$36	$4F	1h12	$3E	$36	$4F
1h13	$36	$4F	$4F	1h14	$4F	$4F	$4F	1h15	$3E	$4F	$4F
1h16	$36	$3E	$4F	1h17	$4F	$3E	$4F	1h18	$3E	$3E	$4F
1h19	$36	$36	$3E	1h20	$4F	$36	$3E	1h21	$3E	$36	$3E
1h22	$36	$4F	$3E	1h23	$4F	$4F	$3E	1h24	$3E	$4F	$3E
1h25	$36	$3E	$3E	1h26	$4F	$3E	$3E	1h27	$3E	$3E	$3E

4.1.2.中間層の第2モデル

中間層の第2モデルは，2入力1出力のモデルを用いる。入力変数は，温度偏差$e_T(t)$，温度偏差の変化$de_T(t)$を設定する。入力変数に対するファジィ分割数は，いずれも5個である。規則は，25個で構成する。また，規則の結論部実数値は，乱数で初期化する。表3は，16進数表記数字で，規則の条件部の所属度関数を修飾したラベルの索引集合を表している。

表3.所属度関数を修飾したラベルの索引集合
Table 3 - Hexadecimal representation of the membership functions.

	条件部			条件部			条件部			条件部	
rule	1	2	rule	1	2	rule	1	2	rule	1	2
2h01	$15	$15	2h02	$16	$15	2h03	$17	$15	2h04	$18	$15
2h05	$19	$15	2h06	$15	$16	2h07	$16	$16	2h08	$17	$16
2h09	$18	$16	2h10	$19	$16	2h11	$15	$17	2h12	$16	$17
2h13	$17	$17	2h14	$18	$17	2h15	$19	$17	2h16	$15	$18
2h17	$16	$18	2h18	$17	$18	2h19	$18	$18	2h20	$19	$18
2h21	$15	$19	2h22	$16	$19	2h23	$17	$19	2h24	$18	$19
2h25	$19	$19									

4.1.3.中間層の第3モデル

中間層の第3モデルは，2入力1出力のモデルを用いる。入力変数は，湿度偏差$e_H(t)$，湿度偏差の変化$de_H(t)$を設定する。入力変数に対するファジィ分割数は，いずれも5個である。規則は，25個で構成する。また，規則の結論部実数値は，乱数で初期化する。表4は，16進数表記数字で，規則の条件部の所属度関数を修飾したラベルの索引集合を表している。

表4.所属度関数を修飾したラベルの索引集合
Table 4 - Hexadecimal representation of the membership functions.

	条件部			条件部			条件部			条件部	
rule	1	2	rule	1	2	rule	1	2	rule	1	2
3h01	$15	$15	3h02	$16	$15	3h03	$17	$15	3h04	$18	$15
3h05	$19	$15	3h06	$15	$16	3h07	$16	$16	3h08	$17	$16
3h09	$18	$16	3h10	$19	$16	3h11	$15	$17	3h12	$16	$17
3h13	$17	$17	3h14	$18	$17	3h15	$19	$17	3h16	$15	$18
3h17	$16	$18	3h18	$17	$18	3h19	$18	$18	3h20	$19	$18
3h21	$15	$19	3h22	$16	$19	3h23	$17	$19	3h24	$18	$19
3h25	$19	$19									

4.1.4.出力層のモデル

出力層の三つのモデルは，おのおの3入力1出力の学習型簡略ファジィ制御器を用いる。入力変数に対するファジィ分割数は，第1入力が3個，第2入力および第3入力が5個である。モデルは，おのおの75個の規則で構成する。入力変数に対するスケーリングファクタは任意に決めるが，中間層の三つのモデルからの出力に対応付ける必要がある。また，規則の結論部実数値は，乱数で初期化する。出力変数は，冷水弁増減操作量dCV(t)，温水弁増減操作量dHV(t)および加湿弁増減操作量dSV(t)の3個を設定する。実際の弁操作量は，冷水弁が$CV(t)=CV(t-1)+dCV(t)$，温水弁が$HV(t)=HV(t-1)+dHV(t)$，加湿弁が$SV(t)=SV(t-1)+dSV(t)$になる。結論部実数値に対するスケーリングファクタは，設計条件や経験に基づき初期値が与えられる。表5は，16進数表記数字で，第rモデルの規則の条件部の所属度関数を修飾したラベルの索引集合を表している。

表5.所属度関数を修飾したラベルの索引集合
Table 5 - Hexadecimal representation of the membership functions.

	条件部				条件部				条件部		
rule	1	2	3	rule	1	2	3	rule	1	2	3
ro01	$36	$15	$15	ro02	$4F	$15	$15	ro03	$3E	$15	$15
ro04	$36	$16	$15	ro05	$4F	$16	$15	ro06	$3E	$16	$15
ro07	$36	$17	$15	ro08	$4F	$17	$15	ro09	$3E	$17	$15
ro10	$36	$18	$15	ro11	$4F	$18	$15	ro12	$3E	$18	$15
ro13	$36	$19	$15	ro14	$4F	$19	$15	ro15	$3E	$19	$15
ro16	$36	$15	$16	ro17	$4F	$15	$16	ro18	$3E	$15	$16
ro19	$36	$16	$16	ro20	$4F	$16	$16	ro21	$3E	$16	$16
ro22	$36	$17	$16	ro23	$4F	$17	$16	ro24	$3E	$17	$16
ro25	$36	$18	$16	ro26	$4F	$18	$16	ro27	$3E	$18	$16
ro28	$36	$19	$16	ro29	$4F	$19	$16	ro30	$3E	$19	$16
ro31	$36	$15	$17	ro32	$4F	$15	$17	ro33	$3E	$15	$17
ro34	$36	$16	$17	ro35	$4F	$16	$17	ro36	$3E	$16	$17
ro37	$36	$17	$17	ro38	$4F	$17	$17	ro39	$3E	$17	$17
ro40	$36	$18	$17	ro41	$4F	$18	$17	ro42	$3E	$18	$17
ro43	$36	$19	$17	ro44	$4F	$19	$17	ro45	$3E	$19	$17
ro46	$36	$15	$18	ro47	$4F	$15	$18	ro48	$3E	$15	$18
ro49	$36	$16	$18	ro50	$4F	$16	$18	ro51	$3E	$16	$18
ro52	$36	$17	$18	ro53	$4F	$17	$18	ro54	$3E	$17	$18
ro55	$36	$18	$18	ro56	$4F	$18	$18	ro57	$3E	$18	$18
ro58	$36	$19	$18	ro59	$4F	$19	$18	ro60	$3E	$19	$18
ro61	$36	$15	$19	ro62	$4F	$15	$19	ro63	$3E	$15	$19
ro64	$36	$16	$19	ro65	$4F	$16	$19	ro66	$3E	$16	$19
ro67	$36	$17	$19	ro68	$4F	$17	$19	ro69	$3E	$17	$19
ro70	$36	$18	$19	ro71	$4F	$18	$19	ro72	$3E	$18	$19
ro73	$36	$19	$19	ro74	$4F	$19	$19	ro75	$3E	$19	$19

4.2.従来のファジィモデルの制御アルゴリズムの継承

新しいファジィモデルの準備段階では，少なくとも従来のファジィモデルで得られた熟練者の経験則を継承しておく必

要がある。また，実際の運転データを基に，熟練者の経験則をチューニングすることは，制御規則間の妥当性や制御規則群の冗長性を評価する上でも重要な課題である。継承の手順を次に解説する。

[step 1]
コンピュータシステムから区間[0,1]の乱数を発生させ，乱数の集合R={ri | i=0,…, 16,880}を得る。次に，Rの先頭から順に，かつ連鎖的に割り当てられた乱数7個よりなる入力データの集合X={x1j,x2j,…,x6j,x7j | j=1,…, 16,875}を得る。
[step 2]
入力データをXの先頭から順番に，従来のファジィモデルに与え，Max-Min合成重心法による推論結果を得る。さらに，入力データおよび出力データ間に対応のある入出力データの集合T={x1j,x2j,…,x6j,x7j,y1j,y2j,y3j | j=1,…, 16,875}を作成する。16,875個よりなるTが対象の新しいファジィモデルへの訓練データになる。
[step 3]
以降，新しいファジィモデルについて，[step 4]から[step 9]の操作を繰り返す。
[step 4]
一つの入出力データ{x1j,x2j,…,x6j,x7j,y1j,y2j,y3j}を新しいファジィモデルに与える。jは，16,875個の入出力データの中から選んだ第j番目を意味する。
[step 5]
中間層の簡略ファジィ推論を実行する。実行過程では，第u番目のファジィモデルの第k番目の規則の条件部適合度Cu,k^1，第u番目のファジィモデルからの出力データxu^2を求める。なお，xu^2の演算は，既に式(1)で定義している。
[step 6]
中間層の各ファジィモデルからの出力データ{$x1^2$,$x2^2$,$x3^2$}を，出力層の各ファジィモデルに与え，出力層の簡略ファジィ推論を実行する。実行過程では，第r番目のファジィモデルの第k番目の規則の条件部適合度Cr,k^2，第r番目のファジィモデルからの出力データxr^3を求める。式(1)では，uをrに読み換える。
[step 7]
第j番目の出力データ yrjおよびxr^3の誤差δr^3やCr,k^2から式(7)を用い，規則の結論部実数値wr,k^2を更新する。それを全規則および全モデルについて同様に行う。
[step 8]
δr^3，Cu,k^1，wr,k^2およびxu^2から(式(8)～(18)を基に)式(19)～(21)を用い，規則の結論部実数値wu,k^1を更新する。それを全規則および全モデルについて同様に行う。
[step 9]
入出力データの集合Tの16,875個の全てについて，[step 4]～[step 8]の操作を繰り返す。それを1学習サイクルとする。学習終了の指標は，50学習サイクルである。

4.3.学習の経過
学習係数は，中間層の各モデルに0.03，出力層の各モデルに0.05を採用した。学習前の評価関数値(最大誤差を1とする，誤差の2乗和)は6,119.4820であった。また，学習後の評価関数値は，233.3857であった。

5.ニューロ・ファジィ恒温恒湿制御システムの性能評価
計算機評価システムを用いた，性能評価は，制御性をベースに，従来のファジィ恒温恒湿制御システムとの定性的な比較を行った。

5.1.計算機評価システム
空調設備の設定条件は，空調ダクト(風道)を1本の直線と考え，1次元のメッシュ分割による非定常シミュレーションを用いた。また，評価システムでは，簡便で，かつ効果的な性能評価ができるように，五つの条件を設定した。1).室内の温度拡散は，瞬時完全拡散モデルを採用した。2).冷却コイルや加熱コイルおよび蒸気スプレの能力はおのおのの弁の特性によって左右されるが，冷水弁や温水弁および加湿弁は能力リニア特性の使用を考慮した。3).ダクト内の熱の拡散や発生および通過は，無視した。4).室内の壁面は，一定の熱通過率で外気に接するものとした。5).検出器の検出遅れは，パッキングによる熱通過の遅れを取り扱った。
空調の温湿度制御系は，2次の時間遅れ系である。したがって，検出器の検出遅れは無視できない。なお，シミュレーションに与える外乱は，外気温度および外気湿度を選定した。取り扱った空調設備の概要は，参考文献[2]を参照されたい。

5.2.性能評価
ここでは，外気温度33.2度，外気湿度62.6%を設定し，夏季の一般的動作である減湿・再熱の運転状態を想定した。評価は，外乱の代わりに，温度および湿度の目標値を変更し，制御偏差を生じさせ，その動特性を比較した。1).23度50%から25度50%への変更では，温度の定常偏差-0.1度が残った。また，25度50%から23度50%への変更では，従来型よりも立ち上り時間が長くなった。2).25度50%から25度60%への変更では，湿度の定常偏差-0.4%が残った。また，25度60%から25度50%への変更では，湿度の定常偏差-0.6%が残った。3).23度50%から25度60%への変更では，温度のオーバーシュート量4.3度，湿度の定常偏差-0.6%を観測した。また，25度60%から23度50%への変更では，温度湿度共に従来型よりも立ち上り時間が長くなり，しかも湿度の定常偏差-0.7%が残った。

6.おわりに
空調設備は，時間の経過により，対象や環境の特性が変化していく，時変システムである。もし，システムの変化に応じて自動的に制御アルゴリズムが記述できるなら，現場での試行錯誤的な調整の手間が軽減される。ここでは，クリーンルームの恒温恒湿制御の制御アルゴリズム獲得について，階層的ファジィモデルの実行可能性を評価した。
7入力3出力形式3層構造の階層的ファジィモデルを用い，恒温恒湿制御動作をモデル化した所，ほぼ実用に耐え得ることが分かった。現時点では，あらかじめ設定されたモデルの能力に依存するが，実際の運転データを基に，システムを新しい環境に適応させる準備ができた，と考えている。
ただし，実用的には，"理想的でない運転データ"を"理想的である運転データ"に変換し訓練データを得る方法や，システムの変化に応じてモデルを再構成する方法が必要であり，それらが今後の研究課題である。

参考文献

[1] T.Tobi and T.Hanafusa,"A Practical Application of Fuzzy Control System for Air-conditioning System,"Proc.of International Workshop on Fuzzy System Applications,pp.271-272,(1988).
[2] T.Tobi and T.Hanafusa,"A Practical Application of Fuzzy Control for an Air-conditioning System,"International Journal of Approximate Reasoning,vol.5,no.3,pp.331-348,(1991).
[3] 市橋,et al.,"階層的ファジィモデルによる誤差逆伝播学習," 計測自動制御学会関西支部シンポジウム「第2回知的システム構築の実践と将来」講演論文集,pp.131-136,(1990).
[4] 渡辺,市橋,"フィードバック誤差学習によるロボット・マニピュレータのファジィ制御,"システム制御情報学会論文誌,3,7,pp.212-217,(1990).
[5] 市橋,渡辺,"簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御,"日本ファジィ学会誌,第2巻,第3号,pp.429-437,(1990).
[6] 田中,et al.,"ニューロ学習則を用いた都市ゴミ焼却炉のファジィモデリング,"日本ファジィ学会,第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.361-364,(1992).
[7] M.Braae and D.A.Rutherford,"Fuzzy Relations in a Control Setting,"Kybernetes,7,pp.185-188,(1978).
[8] E.H.Mamdani,"Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant,"Proceedings of IEEE,121,12,pp.1585-1588,(1974).

問い合せ先: 〒354　埼玉県入間郡三芳町北永井390
ダイダン株式会社技術研究所　鳶 敏和
Tel: 0492-58-1511　Fax: 0492-58-7601
E-mail: tobi@lab.daidan.co.jp

FE3-3

言語指示による制御規則調整方法

Adjusting Method of Control Rules by Linguistic Instructions

宮本　章広† 伊藤　修† 後藤　賢治† 菅野　道夫††
Akihiro Miyamoto Osamu Itoh Kenji Goto Michio Sugeno

†富士ファコム制御株式会社 ††東京工業大学
†FUJI FACOM CORPORATION ††Tokyo Institute of Technology

Abstract－An adjusting method of control rules by linguistic instructions is proposed in this paper. The use of the language is an excellent method for learning for human. Man connects the given instruction to knowledge which have been obtained up to the present through the learning by the language. In order to achieve this learning function, control rules are adjusted by a qualitative model, background knowledge, and linguistic instructions. We applied the proposed algorithm to a chemical reaction system and confirmed its effectiveness by the simulation.

1　はじめに

人間がもっとも使うコミュニケーション手段は言語であり、人間の優れた学習法は言語を用いることにある。言語による学習とは、与えられた指示により、いままで持っている知識と結び付けて学習を行うものである。この学習機能を実現するために、制御対象の言語モデル（定性モデル）、言語ヘッジ（言語の持つ強弱）、背景知識（規則変更方法や言語の持つ意味）と、オペレータが制御対象の動きを見て発する言語指示に基づいて、制御規則の調整を行う。[1][2] この手法を、化学反応系に適用し、シミュレーションでその有効性を確認したので報告する。

2　言語指示学習の概要

言語指示学習はオペレータの言語指示により、ファジィ制御で使う制御規則を調整するための手法であり、その概要を図1に示す。言語指示学習は大きく分けて、オペレータの指示を受け入れたり学習内容を表示する、表示・説明・対話部、指示内容を解釈する指示解釈部、背景知識部、学習部の4つから構成される。それぞれについて以下に示す。

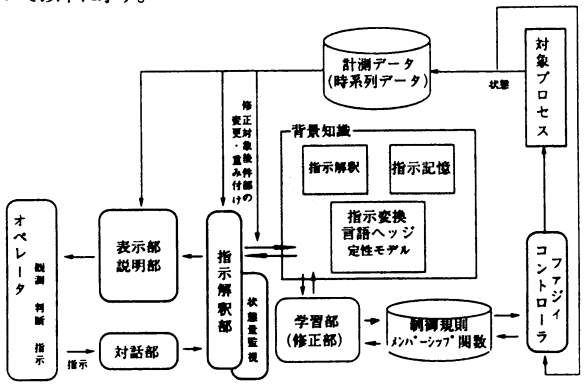


図1　言語指示学習の概要

2．1　表示・説明・対話部

表示部および説明部は、プロセス計測値やファジィ推論値を表示する部分である。オペレータが言語指示を行うための情報としてプロセス計測値やファジィ推論値を確認することができる。対話部は、説明部で得た情報を元にオペレータが提案する言語指示を受け取る。受け取った言語指示は指示解釈部に送られ、そこでオペレータが意図することを判定し、その内容を対話部に送り返してオペレータに対して確認を促す。オペレータは対話部に表示された内容に関して"その通りである"、"その逆である"、"関係なし" のいずれかの指示を与える。

2．2　指示解釈部

指示解釈部は、対話部においてオペレータが入力した指示を受け取って、それを背景知識を用い解釈する。解釈されたものは対話部に送り返して、オペレータの確認を受けてからその情報を学習部に送る。図2は指示解釈部のフローである。実際の例を用いて説明すると次のようになる。オペレータは対話部に対して"もっと早く追従せよ"と指示を入力した。この指示を受けとり指示解釈部では背景知識部にある、意味素集合を用いて探索を行い、言語指示をいくつかの意味素に分解する。ここでは、"もっと"、"早く"、"追従せよ"の3つの意味素に分解された。次に、言語指示知識ベースによりそれぞれの意味素が持つルール学習用の情報を探索すると、"もっと"は操作量の調整量を表す言語ヘッジ、"早く"はゲートを操作すること、またはゲートの開閉速度を表す原始名辞、"追従せよ"はゲートの操作をプラス方向に修正する補助辞であることが探索される。その結果、指示解釈部はオペレータの指示を、"ゲートの操作量をプラスに大きく"と判断、対話部に表示しオペレータの確認を仰ぐ。この時オペレータが意図していることと一致している場合は、そのまま学習部にその情報を送る。また、逆である場合は補助辞の意味している逆の情報を送る。関係がないと判断した場合は新たに探索を行う。いくつかの、解釈結果がすべて関係なしと判断された場合、オペレータは新たに背景知識を追加する。

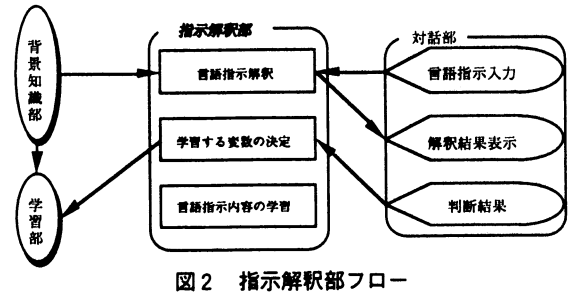


図2　指示解釈部フロー

2．3　背景知識部

背景知識部は、大きく分けて、（1）指示解釈に必要な知識、（2）解釈された指示を実際のルール学習に用いる知識、（3）オペレータの負担軽減のために用いる指示言語記憶用知識の3つの知識ベースに分けることができる。背景知識部の知識は、オペレータの指示について指示解釈部が理解するために用いられる。

2．4　学習部

学習部では、指示解釈部によって探索された調整するファジィ変数とその方向、言語ヘッジによる調整度合い、定性モデルによって得られた変数の重み付け度合いを用いて後件部メンバーシップ関数を調整する。図3にその流れを示す。

3　シミュレーション

3．1　使用したモデル

言語指示学習の例として、図4に示す化学反応系のタンクモデルを使用する。以下にモデル式を示す。

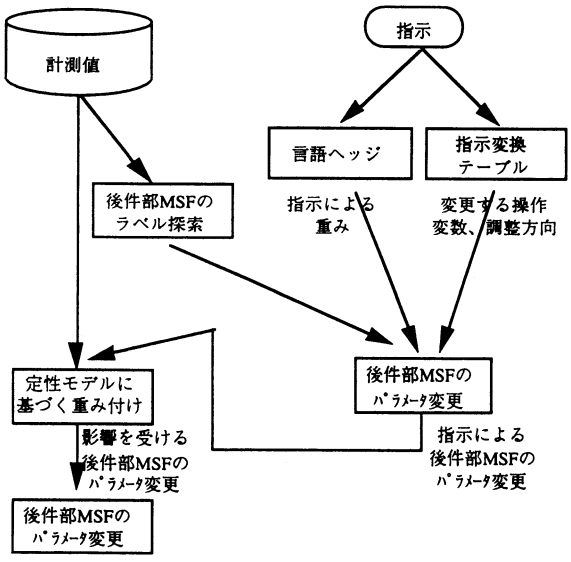
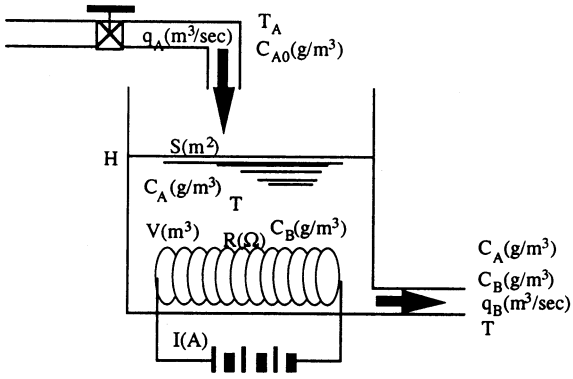


図3　学習の方法



T:タンク内温度 H:水位 S:タンク断面積 q_A:流入量 q_B:流出量
T_A:原料温度 C_A:タンク内原料濃度 C_{A0}:流入原料濃度
C_B:タンク内生成物濃度 V:タンク内物質量 I:電流量 R:抵抗

図4　モデル概要

タンク内の物質量Vは、タンクの水位Hとタンク断面積Sを乗じたものである。

$$V=S\cdot H$$

タンク内温度Tは、熱量の収支から次式にて表される。

$$\frac{dV\cdot T}{dt}=q_A\cdot T_A+I^2R-q_B\cdot T$$

流出量q_Bはタンクの水位とタンク内物質の粘性係数（温度の関数）で表される。

$$q_B=\alpha_1\cdot\sqrt{H}\qquad(\because \alpha_1=aT+b)$$

タンク内物質の反応は、タンク内の原料Aの濃度C_Aと生成物Bの濃度C_Bと温度によって表される。

$$\frac{dC_B}{dt}=\alpha_2\cdot(T^2\cdot\varepsilon^{\frac{-\beta}{T}})\cdot C_A-\alpha_3\cdot C_B$$

式内のα_2、α_3、βは定数

3．2　シミュレーション結果

シミュレーションは、前項のモデルを使用し学習を行なう。ファジィ推論法は、MAX-PRODUCT重心法を使い、入力には生成物量、生成物量の変化速度、タンクの水位、タンク内温度の４点、操作出力には、電流量、原料投入量の２点を使用して制御を行なった。制御規則は５４ルールである。図５は学習前の制御規則によって行なった結果である。図6は、指示に”もっとオーバーシュートを減らせ。”を与えて３回学習させた後の結果で、図7は、指示に”少しオーバーシュートを減らせ。”を、図６の次に２回与えたときの結果である。図からも解かるように、オペレータの指示通りにオーバーシュートが減少している。

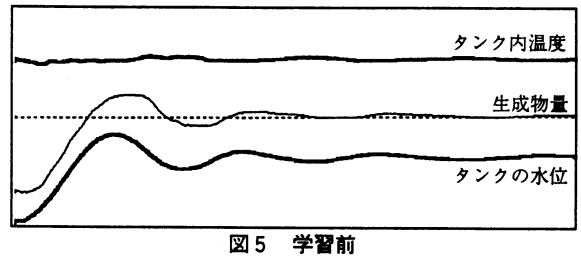


図5　学習前

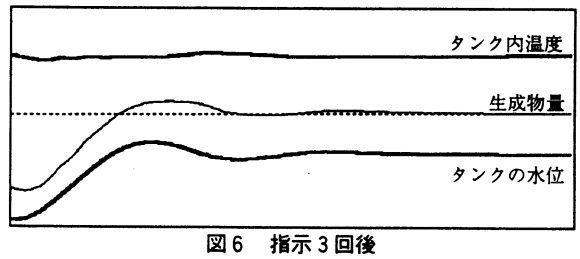


図6　指示３回後

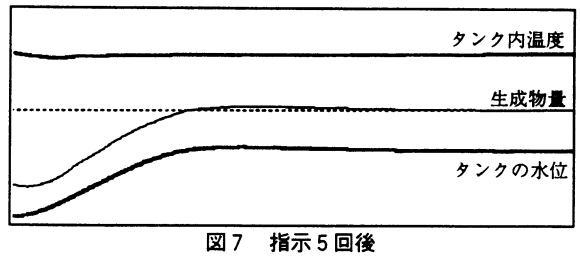


図7　指示５回後

4　おわりに

化学反応系のタンクモデルを使用し、定性モデルを用いた言語指示学習を行なって良好な結果が得られた。これにより、言語指示学習の有効性が確認できた。さらに、現在のプロセス計測値から状況を判断することによる制御性の向上および、繰り返し指示に対する強弱調整による指示回数の削減を確認している。今後は、より複雑なモデルを適用し、アルゴリズムの拡張を行なう予定である。

参考文献

［1］朴、菅野：言語指示によるファジィ学習制御、第7回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.619-622

［2］朴、菅野：ファジィ理論を用いた言語指示による学習、第８回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.561-564

問い合わせ先

〒１９１　東京都日野市富士町１
富士ファコム制御株式会社
システム生産技術部開発プロジェクト室
宮本　章広
TEL　０４２５－８５－１２９４　EXT　４５１２
FAX　０４２５－８６－９５３８

FE4-1

状態予測時間の実時間調整によるファジィ予測制御

Fuzzy Control based on Prediction of Control State at preset future time

前田幹夫 Mikio Maeda
松川英夫 Hideo Matsukawa
村上周太 Shuta Murakami

九州工業大学工学部
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract — In this paper, we propose Fuzzy Control based on Prediction of Control State at preset future time. This algorithm is such that at first, our system modify the model in real time. Secondly our system get a fuzzy predicted control response by the fuzzy model of object. Thirdly, the forecast time is tuned by evaluation of response by predicted control in real time. Finally from simulations, we discuss the usefulness of our method.

1. はじめに

ファジィ制御では，制御アルゴリズムをIF-THEN形式の言語的な制御ルールとして表現し，ファジィ推論を用いて操作量の決定を行っている．ファジィ理論を用いることによって，熟練オペレータの持っている定性的な制御知識を制御ルールとして表すことが可能である．しかし，制御ルールが制御アルゴリズムを表していることから，制御成績の良否が制御ルールの定義によって大きく左右されることになる．そのため，熟練オペレータの持っている制御知識を対話によって獲得する方法や，熟練オペレータの実際の制御動作をモデル化する方法など，さまざまな提案がなされている．しかし，実際には試行錯誤によってヒューリスティックに決めている場合が多い．また，制御対象の動特性が時間経過や他の何らかの要因によって変化するような場合などにおいては，適切な制御ルールをあらかじめ定義することは極めて困難である．それゆえ，制御動作の経験をもとに制御ルールを自動的に生成する方法や，各種パラメータを自動的に最適調整する方法など，学習制御的な考えを取り入れた研究が数多くなされている[1]．

学習制御的な手法の場合，制御対象の動特性ごとに学習された制御ルールを持つ必要がある．つまり，制御対象の動特性が実時間で変化するような場合，動特性が変化するたびに学習処理を行う必要がある．また，その学習処理には多くの学習回数が必要となるため，実時間での制御にはあまり適していない．そこでこのような問題に対処するため，制御ルールテーブルを回転する方法[2]や，スケーリングファクタを実時間で変化させる方法が提案されている[3]．また，予測される将来の状態を現時刻の状態として推論を行い，制御する状態予測制御も提案されている[4]．

状態予測制御方法では，予測される何時間先の状態を現在の操作量の決定に反映させるかが重要なポイントである．この状態予測時間の最適値は，制御対象の時定数や無駄時間などに依存すると考えられるが，その関係を厳密に定式化することは困難である．また，同じ制御対象であっても，制御対象の状態，最適な状態予測時間は実時間で変化していると考えられる．

本研究ではこのような問題に対処するため，予測される制御応答の評価結果により実時間で状態予測時間を決定する，いわゆる動的ファジィ予測制御を提案する．この手法では，制御ルールを調整することなく，制御応答を改善することが可能である．また，制御対象の動特性が動的に変化する場合にも，有効な手法であると考えられる．提案手法を用いた制御システムを構築し，シミュレーションによる実験を行い，最後に提案手法の有効性を検討する．

2. 動的ファジィ予測制御

2.1 動的ファジィ予測制御システムの構成

提案手法を用いた動的ファジィ予測制御システムの構成を図2.1に示す．図2.1においてSe，Sdeはスケーリングファクタ(規格化定数)を示す．

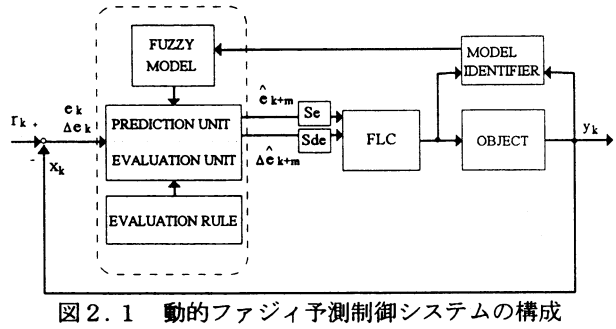


図2.1 動的ファジィ予測制御システムの構成

制御システムを構成している各部は，それぞれ以下に示すような機能を持っている．

ファジィ制御部(Fuzzy Logic Controller)

IF-THEN形式で記述された制御ルールを用いてファジィ推論を行ない，制御対象に対する操作量を決定する．

モデル同定部(Model Identifier)

過去の制御対象の入出力データによって，現在の制御対象の動特性を表すファジィ予測用モデルを同定する．

ファジィ予測モデル(Fuzzy Model)

ファジィ量のパラメータを用いて，現在の制御対象の動特性を記述したモデル．

仮想予測部(Prediction Unit)

現在の予測モデルとファジィ制御ルールを用いて，将来の制御応答をファジィ量で予測する．

予測応答評価部(Evaluation Unit)

仮想予測部によって得られる将来の予測応答を，予測応答評価ルール(Evaluation Rule)を用いて評価し，状態予測時間mを調整する．

予測応答評価ルール(Evaluation Rule)

ファジィ量で予測される予測応答を評価するための言語的な評価ルール．

2．2　ファジィ予測モデルの同定

制御対象の構造が全く未知(Black Box)である場合，モデリングは大変困難になる．しかし，制御対象の構造が完全に既知(White Box)である場合や，部分的に既知(Gray Box)である場合はモデリングは比較的容易になる．本研究では，制御対象の構造は部分的に既知であると仮定し，予測モデルのファジィモデリングを行う[5]．

予測モデルの同定を行う際，前提条件として制御対象についてどの程度既知であるのかが問題となる．本研究では制御対象の構造が部分的に線形であると仮定し，次式により同定を行う．

$$\tilde{X}_{(k+1)}=\tilde{p}\tilde{X}_{(k)}+\tilde{q}u_{(k)} \qquad (2.1)$$

ここで，$\tilde{X}(k)$は状態変数，$u(k)$は操作量，$\tilde{p},\tilde{q}$はパラメータである．～はファジィ量を示す．本研究での予測モデルの同定とは，計測された制御対象の入出力データにより，パラメータ$\tilde{p},\tilde{q}$を推定することである．パラメータの同定を行う際，計測誤差やノイズの発生によりパラメータの推定値に誤差が生じる．本研究の予測モデルは，パラメータをファジィ量で表現することにより，パラメータの推定誤差に対処する．

2．3　制御応答の予測

将来(n時刻先)の制御応答は，仮想予測部において，現時点のファジィ予測モデルと制御ルールを用いて仮想的にn時間先までフィードバック制御を行ないながら予測される．この仮想予測部の構成を図2．2に示す．

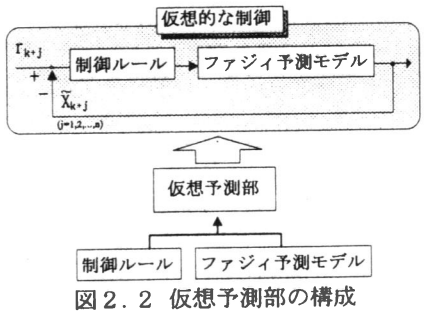


図2．2　仮想予測部の構成

本研究では予測モデルのパラメータがファジィ量であるため，予測応答にもその曖昧さが影響する．予測を行うことは，サンプリング時間ごとの制御状態の時系列を得ることになる．現在の時刻をkとしたとき，予測を行うことにより次のように曖昧さを持った制御状態の時系列が得られる．

$$\tilde{X}_k,\tilde{X}_{k+1},\cdots,\tilde{X}_{k+n} \qquad (2.2)$$

ファジィ量の予測応答は，遠い将来になるほど曖昧さが広がることになる．予測応答の曖昧さの広がりの様子を図2．3に示す．

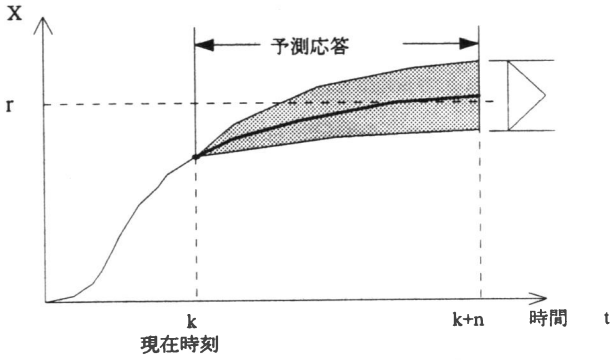


図2．3　ファジィ予測モデルによる予測応答の曖昧さ

2．4　予測応答評価ルール

ファジィ予測モデルは実際の入出力データの一部を用いて実時間で同定されているため，実際の制御対象と全く同じ動特性を持つとは限らない．ファジィ予測モデルはパラメータがファジィ量であるため，ファジィ予測モデルを用いて得られる予測応答も曖昧さを持って得られる．そのため，本研究での予測は将来の制御応答を厳密に予測したものではなく，将来の制御応答の傾向を予測したものである．そのため，予測応答について厳密な分析を行う必要はなく，その特徴の評価で十分である．

本研究では，予測応答の評価をIF-THEN形式のファジィルールを用いて行っている．本研究では制御応答の主な改善指針は，制御応答のオーバーシュート量の減少である．そこで本研究では，予測応答の評価基準として，以下のような予測応答の評価値ＥＶを用いる．

$$\text{予測評価値 EV}=\frac{\text{目標値到達部分}}{\text{予測応答の領域}} \qquad (2.3)$$

式(2.3)に示した予測応答の評価値ＥＶは，予測応答のうち制御目標値rを越える可能性を示すと考えられる．曖昧な広がりを持つ予測応答と制御目標値の到達部分の関係を図2．4に示す．予測応答は，図2．4に示すように制御目標値に到達する部分と到達しない部分とに分けられる．

ここで予測応答評価ルールの構成例を以下に示す．

If EV(k) is Big and EV(k-1) is Big then Δm is Neg　(2.4)

前件部は現時刻kの予測応答評価値ＥＶ(k)と時刻k-1の

予測応答評価値ＥＶ(k-1)，後件部は状態予測時間ｍの修正量Δｍである．

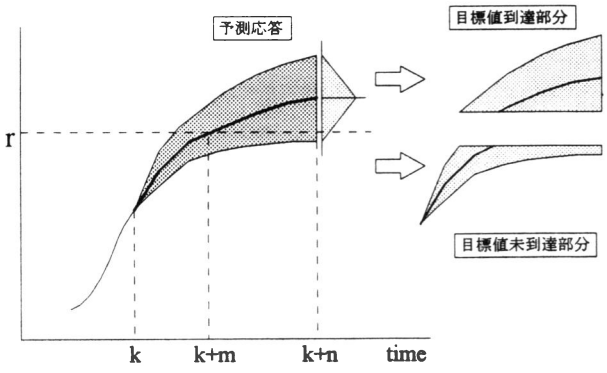


図２．４ 予測応答の評価

予測応答の評価値ＥＶと状態予測時間の修正量Δｍの関係をいくつか考えることにより，制御に必要な予測応答評価ルールを用意できる．

３． 制御シミュレーション

本シミュレーションでは，設定が異なる２つのシミュレーション実験(実験１，実験２)を行い，提案方法の有効性を検討する．

３．１ シミュレーション条件の設定

シミュレーション設定を以下のように実験１，実験２に分類し，その制御結果を検討する．

実験１：時刻 0.0[sec]から 50.0[sec]
実験２：時刻50.0[sec]から100.0[sec]

実験１，実験２では，制御ルール，予測応答評価ルール，ファジィ予測モデルは同じ設定を用いてシミュレーションを行い，制御対象の動特性だけが異なる設定とする．実験１，実験２のシミュレーションの目的と設定について，以下に示す．

[実験１]…時刻 0.0[sec]～ 50.0[sec]
状態予測時間の実時間調整によって，反復制御を行わない場合での制御応答改善の効果を調べることに重点を置く．そのため，制御対象の動特性は変化させずにシミュレーションを行う．

[実験２]…時刻 50.0[sec]～100.0[sec]
制御対象の動特性が変化する状況に対する提案手法の有効性を検討することに重点を置く．そのため，制御対象の動特性を実時間で変化させ，そのときの制御応答を調べる．

実験１では式(3.1)に示すような二次遅れ系を用いる．ただし，式(3.2)は式(3.1)の伝達関数である．

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} V \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.0343 & -0.6374 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V \\ A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.227 \end{bmatrix} u \quad (3.1)$$

$$G(s) = \frac{35.78}{(1.73s+1)(16.85s+1)} \quad [km/h/V] \quad (3.2)$$

実験２で用いる制御対象は，実験１で用いる制御対象と基本的な構造は同じ設定とし，制御対象のゲイン係数を周期的に変化させることにより，動特性が動的に変化していると考える．ゲイン係数は時刻50.0[sec]まで(実験１)は一定値(35.78)である．時刻50.0[sec]以後(実験２)は，１周期40.0[sec]としてゲイン係数を±90.0%の範囲で周期的に変化させる．ただし，ゲイン係数の変化は１周期だけとし，時刻90.0[sec]から100.0[sec]の間は再びゲイン係数を一定値(35.78)にする．実験２で用いる制御対象のゲイン係数は次式によって変化する．

$$35.78 \times (1.0 - 0.9 \times \sin(2\pi \times (t-50.0)/40.0)) \quad (3.3)$$
$$(t=50.0 \sim 90.0[sec])$$

実験１，実験２で用いる制御ルールを表３．１に示す．

表３．１ 制御ルール

Δu		e				
		NB	NS	ZO	PS	PB
Δe	NB	-1.0	-1.0	-1.0	-0.5	0.0
	NS	-1.0	-0.5	-0.5	0.0	0.5
	ZO	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
	PS	-0.5	0.0	0.5	0.5	1.0
	PB	0.0	0.5	1.0	1.0	1.0

(NB:NegativeBig, NS:NegativeSmall, ZO:Zero, PS:PositiveSmall, PB:PositiveBig)

シミュレーションで用いる予測モデル以下に示す．

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{k+1} \\ \tilde{A}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{p}_{11} & \tilde{p}_{12} \\ \tilde{p}_{21} & \tilde{p}_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tilde{V}_k \\ \tilde{A}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{q}_1 \\ \tilde{q}_2 \end{bmatrix} u_k \quad (3.4)$$

本シミュレーションで用いる予測応答評価ルールの主な制御応答改善指針は，制御応答のオーバーシュート量の減少であるとともに，なるべく制御量の目標値到達時間を短くすることも考慮する．シミュレーションで使用する予測応答評価ルールを表３．２に示す．

表３．２ 予測応答評価ルール

Δm		EV(k)		
		Small	Midium	Big
EV(k-1)	Small	0.1	0.1	0.0
	Midium	0.1	0.1	0.0
	Big	-0.1	-0.1	-0.1

３．２ 実験結果

<u>実験１(動特性が変化しない場合)</u>

シミュレーション結果を図３．１と表３．３に示す．こ

のときの制御誤差，オーバーシュート量を表３．３に示す．

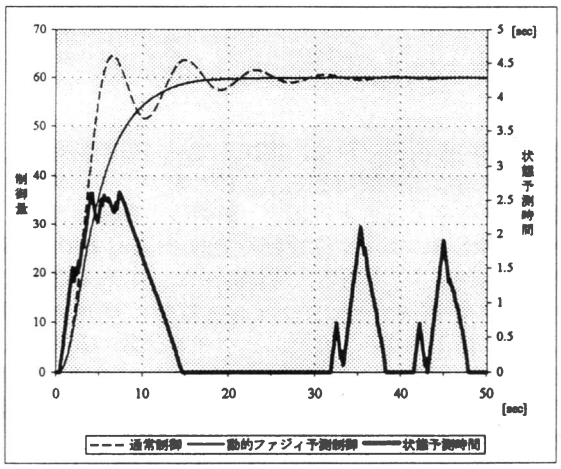


図３．１ 動特性が変化しない場合の制御応答(実験１)

表３．３ 制御結果(0.0～50.0[sec])

	時刻０～５０	
	制御誤差面積	オーバーシュート(%)
予測なし	251.66	7.43
動的ファジィ予測制御	279.56	0.0

提案手法を用いた場合，まず最初に状態予測時間が急激に大きくなり，なるべく遠い将来の状態を用いて制御を行おうとしている．そのため，このままならば生じると予測されるオーバーシュートの状態を，現時点の状態として推論できている．この結果，生じるはずのオーバーシュートがほとんどなくなり(表３．３参照)，制御応答を大きく改善していることがわかる．

実験２(動特性が実時間で変化する場合)

シミュレーション結果を図３．２に示す．このときの制御誤差，オーバーシュート量を表３．４に示す．

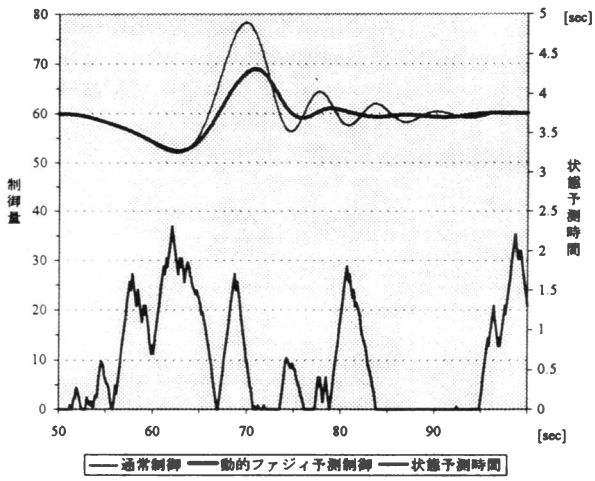


図３．２ 動特性が変化する場合の制御応答(実験２)

表３．４ 制御結果(50.0～100.0[sec])

	時刻５０～１００	
	制御誤差面積	オーバーシュート(%)
予測なし	168.21	30.5
動的ファジィ予測制御	118.11	14.9

提案手法を用いずにファジィ制御を行った場合，オーバーシュートが29.7%も発生し，その後の制御応答もかなり振動していることが確認される．提案手法を用いた場合，オーバーシュートは14.9%となっている．また，オーバーシュート後の制御応答も短い時間で整定していることが確認される．これにより，提案手法を用いることで制御ルールのパラメータを調整せずに，制御応答を改善していることが確認できる．

４． おわりに

本研究では，制御対象の状態に応じて状態予測時間を実時間で決定する動的ファジィ予測制御を提案し，その有効性を検証するため，シミュレーションによる実験(実験１，実験２)を行った．また，状態予測時間を実時間での調整効果を調べるため，標準的に作成された制御ルールをそのまま用いた場合での制御応答との比較を行った．

実験１の結果，制御ルールのパラメータ調整を行わずに状態予測時間の実時間調整により制御応答が改善されていることが確認された．また，実験２の結果，制御対象の動特性が実時間で変化する場合でも，提案手法により制御応答を改善できることが分かる．本研究で行ったシミュレーションでは，制御ルールのパラメータ調整や，学習制御的な手法のように反復制御は行っていない．そのため，反復制御が困難であり，実時間での制御を目的とする場合，有効な手法であると考えられる．

本方式では制御対象の動特性が変化した場合，予測応答に変化が現れるまでの間，制御応答を改善するための対応策を決定することができない．このような問題へ対処するために，予測モデルの改良，例えば，予測モデルの構造を予め幾つか定義しておき，制御対象の動特性が変化したとき，現在の制御対象に適した予測モデルを選択することなどが考えられる．これにより，モデル同定の遅れを改善することができると考えられる．

参考文献

[1]山崎，菅野：自動学習ファジィコントローラ；計測自動制御学会論文集，Vol. 20. No. 8, pp. 720-726(1984)

[2]菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社(1988)

[3]前田幹夫，佐藤武雄，予見学習ファジィ制御；第7回ファジィシステムシンポジウム，pp. 639-642(1991)

[4]松川英夫，前田幹夫，村上周太，動的ファジィ予測制御；第36回自動制御連合講演会，pp. 69-70, 1993

[5]松川英夫，前田幹夫，村上周太，ファジィ予測モデルによる学習型ファジィ制御；第12回計測自動制御学会，pp. 39-42, 1993

連絡先

〒804 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1　九州工業大学　前田幹夫

TEL 093-884-3249

FAX 093-871-5835

FE4-2

ファジィコントローラ設計支援システム

A Design Support System for Fuzzy Logic Controller

神酒　勤　　川口　将顧　　山川　烈

Tsutomu MIKI　　Yukimi KAWAGUCHI　　Takeshi YAMAKAWA

九州工業大学情報工学部

Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract A hardware-oriented design support system is usually peculiar to the hardware, the specification of which is confirmed. The constraints on the design support system, however, can be diminished by the flexibility of the hardware. The flexibility can be realized by a reconfigurable hardware system. This paper describes a hardware-oriented design support system for fuzzy logic controllers, which are reconfigurable by employing FPGAs (Field Programmable Gate Arrays). The software macro cells with same behavior as the hardware are introduced. The support system acts as not only a fuzzy rule editor but also a hardware emulator.

1　はじめに

ファジィ制御は,実用化技術として広く応用されている.効果的なファジィ応用システムを構築するには,ファジィ制御機構のハードウェア化が必要である.また,ファジィシステムはアプリケーション依存性が強く,システム毎に応用のハードウェアを作ることが望ましい.そこで筆者らは,書き換え可能なゲートアレイであるFPGAを用いたフレキシブルなファジィコントローラを試作した[1].

一方,ファジィシステムはルールベースシステムであるため,メンバーシップ関数の設定やルールの作成がシステムの性能を左右する.そこで,これらを効率良く行なうためのツールが開発されている[2]-[6].これらの多くは,理論的な検証に重点をおいた汎用的なツールであり,応用の際のハードウェアには依存しない形となっている.しかし,最良のシステム構築にはハードウェアとソフトウェアの連繋が重要であると考える.

そこで本論文ではハードウェアと一対一の対応をもつファジィシステム設計支援ツールを作成する.ハードウェアとしてFPGAを用いたフレキシブル・ファジィコントローラを使用することで,システムの汎用性を実現する.

2　ソフトウェアライブラリ

本システムはFPGAを用いたフレキシブルなファジィコントローラの開発を支援対象とする.ここでは,ファジィ基本ブロック(min演算,max演算等)をマイクロセル化した回路ライブラリを使用している(図1).

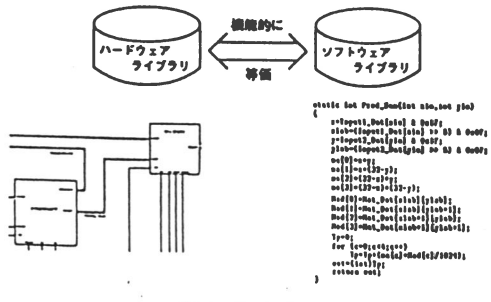


図1: ライブラリ

本研究では,このハードウェア・ライブラリと一対一の対応を持つソフトウェア・ライブラリを作成する.データ形式,処理過程をハードウェアと一致させることにより,ハードウェアと同一の性能,特性を模倣することができる.

3　ファジィコントローラ設計支援システム

3.1　仕様と支援機能

本設計支援システムの仕様は以下のとおりである.

項目	仕様
プログラミング言語	GUI環境により プログラミング言語不要
前件部メンバーシップ関数	コンプリメンタリ7ラベル以下
後件部メンバーシップ関数	シングルトン7ラベル以下
入出力変数の数	入力: 3以下, 出力: 1
ファジィ推論法	min-sum法,product-sum法
動作環境	MS-Windous3.1

また,本ツールの支援機能は,1) ファジィルールの作成, 2) ルールの評価, 3) ルールの編集に分けられる.

1) ファジィルールの作成
- ・入出力数の設定　・ラベル数の設定
- ・メンバーシップ関数の設定　・推論方式の選択

2) ルールの評価
- ・制御面のグラフック表示　・動作シミュレーション

3) ルールの編集

すべての作業は,図3に示すようにグラフィカルに行なう.例えばメンバーシップ関数の設定は図2に示すように,対象となる関数の頂点を移動させることによって設定ができる.

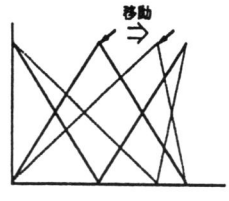


図2: メンバーシップ関数の設定

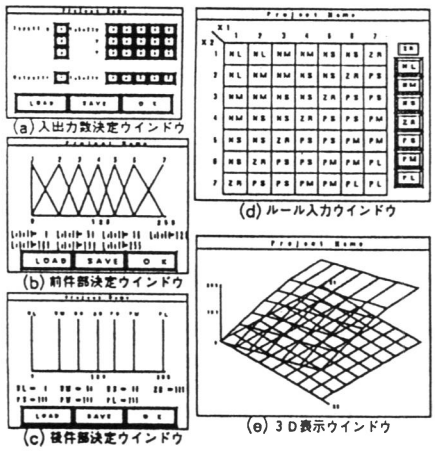


図 3: 設計支援システム

3.2 制御面編集機能

本ツールでは, 制御面を直接編集し, ファジィルールの編集を行なうことができる. 後件部変数を, ラベルの代わりに実数値で設定を行ない, よりきめ細かな制御面の作成を可能にした. この場合, 制御面の編集結果は直接ルールに反映される. また, この機能は制御面からルールを作成するので, 人間エキスパートからのファジィルール抽出にも利用できる.

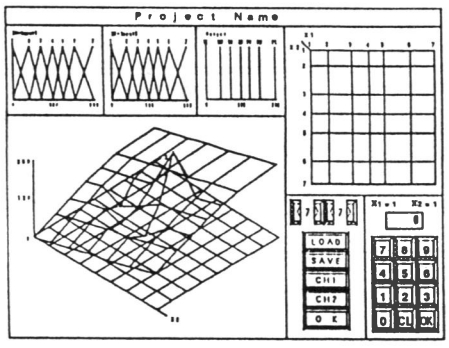


図 4: 制御面編集ウィンドウ

3.3 ルール再合成機能

ルール再合成機能とは, 既存のシステムを制約のある別のハードウェアに移植する場合に使用する. ハードウェアの制約 (分解能, ラベル数等) に対して, チューニングの支援機能および, 類似したルールをまとめシステムをコンパクトにする機能を持つ.

3.4 エミュレーション機能

本支援システムは, ハードウェアと同一の動きをすることから, ファジィコントローラのエミュレータとして機能する (図 5(a)). 高速のプラントに対しては図 5(b) のように,FPGA を搭載したアクセラレータボードを介することにより対応する. プラントの動作モデルの作成が難しい場合, ルールのチューニング等に有効な手段となる.

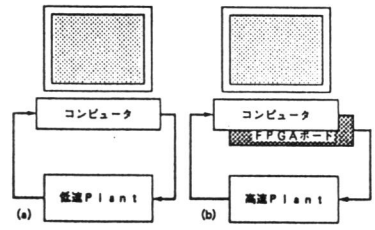


図 5: ハードウェアエミュレータ

4 おわりに

ハードウェアとの互換性を持つファジィシステム開発支援ツールを試作した. 本システムの特長は次のとおりである.

1) ハードウェアの動作を忠実に再現しているので, シミュレーションにより最適なチューニングが可能.
2) ハードウェアのデバッガとしての機能を持つ.
3) 制御平面を直接制御することにより, きめ細かなルールの作成を容易にした.
4) ハードウェアのエミュレータとして使用可能である.
5) 人間エキスパートのルール抽出に利用できる.

今後は, ルールの自動生成および, ハードウェアへの自動フィッテイングの機能を組み込む.

参考文献

[1] 神酒 勤, 渡部 英生, 山川 烈:FPGA を用いたリコンフィギャブル・ファジィロジックコントローラの設計, 第 11 回ファジィシステムシンポジウム,1995.

[2] [特集] ファジィ応用製品・技術, 日本ファジィ学会誌,Vol.3, No.2,pp.192-201,1991.

[3] 染谷 隆子, 安倍 誠二: エキスパートシステム構築ツール ES/KERNEL/W のファジィ推論, 日本ファジィ学会誌,Vol.2,No.2,pp.125-132,1990.

[4] 有川 晴彦: 研究実習用ファジィ制御ソフト「方舟」, 日本ファジィ学会誌,Vol.4,No.2,pp.272-274.1992.

[5] 伊藤 正満, 右田 博久, 宮本 章広, 伊藤 修: ファジィ制御用設計・調整支援ツール, 第 9 回ファジィシステムシンポジウム予稿集,pp.269-272,1993.

[6] 易 健強, 満田 章道:CAI「実践ファジィ・AI・ニューロ」—倒立振子システムの安定化制御—, 日本ファジィ学会誌, Vol.5,No.5,pp.1077-1080,1993.

[問い合わせ先]
〒 820 福岡県飯塚市川津 680-4
九州工業大学情報工学部制御システム工学科
神酒 勤
Phone: 0948-29-7732
Fax: 0948-29-7709
E-mail: miki@ces.kyutech.ac.jp

FE4-3

非線形システムに対するロバストファジィ制御器の設計法

- 二次安定性・H∞制御理論・Linear Matrix Inequalitiesの観点から -

田中　一男[1]　　Hua Wang[2]　　Mike Griffin[2]

1　金沢大学工学部機械システム工学科
2　United Technologies Research Center

Abstracts : This paper presents stability analysis for a class of nonlinear systems and a design method of fuzzy controllers to stabilize the nonlinear systems. First, a stability condition is introduced in terms of Lyapunov stability theory. Next, stability conditions for a class of uncertain systems are given from the viewpoints of quadratic stabilization, H∞ control theory and Linear Matrix Inequalities. Furthermore, some stability conditions are derived for a generalized class of uncertain systems. The derived stability conditions for a generalized class are used to analyze stability of nonlinear control systems designed via parallel distributed compensation. Some important issues for the stability analysis are remarked. Finally, we demonstrates controller design examples. It is pointed out in the examples that a conservative result of stability analysis can be avoid by introducing the singular value decomposition.

Key words :fuzzy control, Takagi-Sugeno's fuzzy model, parallel distributed compensation, stabilization, nonlinear systems

1　はじめに

制御システムの解析と設計において重要な概念は安定性である。ファジィ制御系の安定解析は80年代後半まで、ほとんど報告されることがなかった。その理由は、応用、適用に関する研究が精力的に進められたことと、ファジィ制御系が本質的に非線形であるため、その解析が簡単でなかったためである。その後、非線形システムの安定論を適用することにより、ファジィシステムの安定解析[1,7,8]がなされた。しかし、二次安定性やH∞制御理論、LMIといったロバスト安定の概念[9]を導入するには至らなかった。本論文では、二次安定性の観点に立って、ファジィ制御による非線形システムの安定化に関する条件を導き、H∞制御、線形行列不等式(LMI)[10,11]の観点からも考察を加える。

本論文の構成は次の通りである。2章では、二次安定性、H∞制御、LMIと安定条件について簡単に述べる。3章では、ある不確かさを有するシステムに対する安定条件を導く。4章では、並列分散的補償による非線形システムの安定化について述べる。メンバーシップ関数の最大値が既知であることを利用して、安定解析の保守的な結果を防ぐ工夫を行う。また、並列分散的補償[12,13]で重要な役割を演じる高木、菅野のファジィモデル[16]についても述べる。さらに、ファジィモデルが共通のB行列を持つ場合、並列分散的補償によって、そのフィードバック系が線形化できる条件を明らかにする。5章では、簡単な解析・設計例を示し、特異値分解を導入することによっても、保守的な結果を防ぐことができることを示す。

2　2次安定性、H∞制御、LMIと安定条件

(1)式のような不確かさを有するシステムを考える。

$$\dot{x}(t)=\{A_0+DF(t)E\}\,x(t) \qquad (1)$$

ここで、D、Eは既知の実行列であり、

$$|F(t)|\le 1 \qquad (2)$$

である。Khargonekarらは次のような定理を与えている。

[定理2.1][17]　(1)式のシステムが2次安定であるための必要十分条件は以下のように与えられる。

(C1)A_0が安定行列で、

$$\left\| E(sI-A_0)^{-1}D \right\|_\infty < 1$$

一方、Zhouらは(C1)と等価な次のような条件を与えている。

[定理2.2][18]　以下の条件は互いに等価であり、(C1)の条件が成り立つための必要十分条件である。

(C2)以下のRiccati方程式が正定解$P>0$をもつ。

$$PA+A^TP+PDD^TP+E^TE<0$$

(C3)以下の行列Hの固有値の実部がすべてゼロでない。

$$H=\begin{bmatrix} A & -DD^T \\ E^TE & -A^T \end{bmatrix}$$

一方、以下の条件はLMIにおいてよく知られている。

[定理2.3]　以下の条件は互いに等価である。

(C4)以下の条件を満たす正定解$P>0$が存在する。

$$PA+A^TP+C^TC+(PB+C^TD)(\gamma^2I-D^TD)^{-1}(B^TP+D^TC)<0$$

ここで、$(\gamma^2I-D^TD)>0$である。

(C5)以下の条件を満たす正定解$P>0$が存在する。

$$\begin{bmatrix} PA+A^TP+C^TC & PB+C^TD \\ B^TP+D^TC & -\gamma^2I+D^TD \end{bmatrix}<0$$

(C6)以下の条件を満たす正定解$P>0$が存在する。

$$\begin{bmatrix} PA+A^TP & PB & C^T \\ B^TP & -\gamma^2I & D^T \\ C & D & -I \end{bmatrix}<0$$

(C4)において、B=D、C=E、$D=0^*$、$\gamma=1$のとき、(C4)は(C2)と等価である。ここで、0^*はすべての要素がゼロの零行列である。(1)式の安定性を解析するために、(C1)～(C6)の条件の一つを適用できる。(C1)に対しては、H∞ノルムを、(C3)対しては固有値を計算するだけで、安定判別ができる。また、(C5)、(C6)に対しては、最近、効果的なLMIの解法[10,11]が開発されている。

3　ある不確かなシステムに対する安定条件の導出

2で述べた安定条件は、(1)式で表現されるシステムに対して有効である。しかし、

$$|F(t)|\le 1$$

の条件を満たさない場合については適用できない。本章では、この制約を取り除き、より広いクラスの安定性の条件を導く。

次のような不確かさを有するシステムを考える。

$$\dot{x}(t)=\{A_0 + D\Delta(t)E\}\, x(t) \qquad (3)$$

ここで、

$$\Delta(t) = \mathrm{diag}[g_1(t)\ g_2(t)\ \cdots\ g_s(t)]$$

である。$g_i(t)$ (i = 1, 2, ⋯ ,s) は正の値でも負の値でもよく、次の条件を満たすものとする。

$$\alpha_i \le g_i(t) \le \beta_i$$

(1)式との大きな違いは、(3)式では、

$$|\Delta(t)| \le 1$$

を要求しない点である。

この一般化したシステムに対して、次のような定理を導出する（証明は文献 19) 20) を参照）。

[定理3.1] (3)式のシステムが２次安定であるための必要十分条件は、以下の等価な条件の一つが成り立つことである。

(C7)A_0+DMEが安定行列で、

$$\left\| E\,(sI - A_0 - DME)^{-1}\,DN \right\|_\infty < 1$$

(C8)以下のRiccati方程式が正定解P>0をもつ。

$$P(A_0 + DME) + (A_0 + DME)^T P + PDNN^T D^T P + E^T E < 0$$

(C9)以下の行列Hの固有値の実部がすべてゼロでない。

$$H = \begin{bmatrix} (A_0 + DME) & -DNN^T D^T \\ E^T E & -(A_0 + DME)^T \end{bmatrix}$$

(C10)以下の条件を満たす正定解P>0が存在する。

$$\begin{bmatrix} \Gamma + E^T E & PDN \\ N^T D^T P & -I \end{bmatrix} < 0$$

ここで、$\Gamma = P(A_0 + DME) + (A_0 + DME)^T P$である。

(C11)以下の条件を満たす正定解P>0が存在する。

$$\begin{bmatrix} \Gamma & PDN & E^T \\ ND^T P & -I & 0 \\ E & 0 & -I \end{bmatrix} < 0$$

定理3.1において、

$$M = \mathrm{diag}\left[\frac{\beta_1+\alpha_1}{2}\ \frac{\beta_2+\alpha_2}{2}\ \cdots\ \frac{\beta_s+\alpha_s}{2}\right] \qquad (4)$$

$$N = \mathrm{diag}\left[\frac{\beta_1-\alpha_1}{2}\ \frac{\beta_2-\alpha_2}{2}\ \cdots\ \frac{\beta_s-\alpha_s}{2}\right] \qquad (5)$$

である。

4 並列分散的補償による非線形システムの安定化

4.1 高木・菅野のファジィモデルと並列分散的補償

制御対象が次のようなｒ個の規則からなる高木・菅野のファジィモデル[16]で表現されていると仮定する。

規則i If $z_1(t)$ is M_{i1} and ⋯ and $z_g(t)$ is M_{ig}
Then $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t)$ i = 1, 2, ⋯ , r

ここで、rは規則数、

$$x(t) = [x_1(t)\ x_2(t)\ \cdots\ x_n(t)]^T$$

である。$z_1(t)$～$z_g(t)$は前件部変数であり、入力変数u(t)に依存しない変数であると仮定する。もし、前件部変数が入力変数に依存すると、ファジィ制御器の非ファジィ化計算が複雑になる[15]ので、ここでは扱わない。ただし、本論文で述べる安定解析は、前件部変数が入力変数に依存した場合にも適用できる。

上記のファジィモデルは次のように表現できる。

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{r} w_i(t)\,\{A_i x(t) + B_i u(t)\} \,/\, \sum_{i=1}^{r} w_i(t) \qquad (6)$$

ここで、

$$A_i \in R^{n\times n},\ B_i \in R^{n\times m},\ x(t) \in R^n,\ u(t) \in R^m$$

$$w_i(t) = \prod_{j=1}^{g} M_{ij}(z_j(t))$$

である。$w_i(t)$は各規則の適合度であり、各時刻tで次の条件を満たすものとする。

$$w_i(t) \ge 0 \quad i = 1, 2, \cdots, r \qquad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{r} w_i(t) > 0 \qquad (8)$$

この制御対象のファジィモデルに対して、並列分散的補償[12][13]の概念を用いてファジィ制御器を次のように設計する。

制御規則i If $z_1(t)$ is M_{i1} and ⋯ and $z_g(t)$ is M_{ig}
Then $u(t) = -K_i x(t)$

制御規則iは制御対象のファジィモデルの規則iを補償するためのものであるので、制御規則iの前件部は制御対象を表現するファジィモデルの規則iの前件部と同じものを用いる。従って、制御規則の数は制御対象を表現するファジィモデルの規則数と同じになる。制御器の設計は、後件部のフィードバックゲインベクトルK_iを決定することである。最終的な操作量u(t)は

$$u(t) = -\sum_{i=1}^{r} w_i(t) K_i x(t) \,/\, \sum_{i=1}^{r} w_i(t) \qquad (9)$$

で計算できる。ここで、$w_i(t)$はi番目の規則(i = 1, 2 ,⋯, r)の前件部の適合度である。

4.2 安定条件の導出

(9)式を(6)式に代入してまとめると、(10)式を得る。なお、(6)式の（A_i, B_i）はすべてのiに対して可制御であるとする。

$$\dot{x}(t) = Gx(t) + \sum_{i=1}^{r} h_i(t)\, h_i(t)\, \Delta G_{ii}\, x(t) + \sum_{i<j}^{r} h_i(t)\, h_j(t)\, \Delta T_{ij}\, x(t) \qquad (10)$$

ここで、

$$\Delta G_{ij} = A_i - B_i K_j - G,\quad \Delta T_{ij} = \Delta G_{ij} + \Delta G_j \qquad (11)$$

$$h_i(t) = w_i(t) \,/\, \sum_{i=1}^{r} w_i(t) \qquad (12)$$

であり、$h_i(t)$は次の条件を満たす。

$$h_i(t) \ge 0,\ \sum_{i=1}^{r} h_i(t) = 1 \qquad (13)$$

[Remark 4.1]
高木、菅野のファジィモデルはポリトープ型の線形システムとみなすことができる。大きな違いは、メンバーシップ値$h_i(t)$が既知であるという点である。この点をふまえて、安定解析の保守的な結果を避ける工夫を行う（詳しくは、文献19) 20)を参照）。

行列Gは望ましい固有値をもつものとする。たとえば、行列Gの一つの候補として、

$$G = \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r} (A_i - B_i K_i) \qquad (14)$$

を選ぶことができる。

次に、安定解析において保守的な結果を防ぐために特異値分解を導入する。この効果については、例題で具体的に示す。(11)式を次のように特異値分解する。

$$\Delta G_{ii} = U_{ii} S_{ii} V_{ii},\quad \Delta T_{ij} = U_{ij} S_{ij} V_{ij} \qquad (15)$$

定理3.1から、ファジィ制御システムに対する安定条件を定理4.1のように導くことができる。証明は付録に記す。定理4.1の証明では、特異値分解を導入した場合(これを定式化１とする)と導入しない場合（これを定式化２とする）について示す。

[定理4.1]
(10)式のシステムが２次安定であるための必要十分条件は、以下の等価な条件の一つが成り立つことである。

(C12)G+DMEが安定行列で、

$$\left\| E\,(sI - G - DME)^{-1}\,DN \right\|_\infty < 1$$

(C13)以下のRiccati方程式が正定解P>0をもつ。

$$P(G + DME) + (G + DME)^T P + PDNN^T D^T P + E^T E < 0$$

(C14)以下の行列Hの固有値の実部がすべてゼロでない。

$$H = \begin{bmatrix} (G + DME) & -DNN^T D^T \\ E^T E & -(G + DME)^T \end{bmatrix}$$

(C15)以下の条件を満たす正定解$P>0$が存在する。

$$\begin{bmatrix} \Gamma + E^T E & PDN \\ N^T D^T P & -I \end{bmatrix} < 0$$

ここで、$\Gamma = P(G + DME) + (G + DME)^T P$である。

(C16)以下の条件を満たす正定解$P>0$が存在する。

$$\begin{bmatrix} \Gamma & PDN & E^T \\ ND^T P & -I & 0 \\ E & 0 & -I \end{bmatrix} < 0$$

定理4.1において使われている**D**、**E**、**M**、**N**の行列の具体的な要素については付録に示す。

付録の定理4.1の証明に示した不確かさを含む行列$\Delta(t)$の対角要素のうち、ゼロでない要素の数を減らすことによって、安定解析の保守的な結果を避けることが期待できる。具体的な効果については、5の解析・設計例で述べる。もし、

$$\mathrm{rank}(\Delta G_{ii}) = f_{ii} < n, \quad \mathrm{rank}(\Delta T_{ij}) = f_{ij} < n$$

すなわち、これらの行列のうち1つでもフルランクでないものが存在するとき、付録で示した（定式化1）で定められた行列$\Delta(t)$の対角要素のうち、ゼロでない要素の数を減らすことができる。

[Remark 4.2]

(6)式の制御対象を表現するファジィモデルの**B**行列が共通の場合、ある条件を満たすことで、フィードバック系全体がファジィ制御器によって線形化可能であることを示されている[12)19)20)]。**B**行列が共通とは

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \cdots = \mathbf{B}_r = \mathbf{B}$$

である。また、すべてのiに対して（$\mathbf{A}_i$, **B**）は可制御であるとする。このとき、すべてのi (i = 1, 2,…, r) に対して、

$$\mathbf{A}_i - \mathbf{B}\mathbf{K}_i = \mathbf{G}$$

なる$\mathbf{K}_i$を選ぶことができる（**G**は安定行列かつ望ましい固有値をもつ）ならば、すべてのi,jに対して、$\Delta \mathbf{G}_{ii}=0$、$\Delta \mathbf{T}_{ij}=0$となる。それゆえ、そのフィードバックシステムは線形システム

$$\dot{x}(t) = \mathbf{G}x(t)$$

に帰着する。少なくとも、**G**は安定行列であるので、共通の**B**行列の場合、定理4.1の安定条件をチャックする必要はなく、もちろん、フィードバック系の安定性が保証される。このとき、(C14)の行列**H**は

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathrm{zeros}(n) \\ \frac{r \times (r+1)}{2} \mathbf{I}_n & -\mathbf{G}^T \end{bmatrix}$$

となり、その固有値は

$$\lambda_i(\mathbf{G}), \ -\lambda_i(\mathbf{G}) \qquad i = 1, 2, \cdots, n$$

となる。ここで、zeron(n)はn×nの零行列である。**G**は少なくとも安定であるから、

$$\mathrm{Re}\,\lambda_i(\mathbf{G}) \neq 0 \qquad i = 1, 2, \cdots, n$$

である。

5 解析・設計例

次のような非線形システムを安定化するファジィ制御器を設計することを試みる。

$$\dot{x}(t) = \dot{x}(t) + \sin(x(t)) + (5.0 + \dot{x}(t))\, u(t) \qquad (16)$$

ここで、

$$\dot{x}(t) \in [-a \ \ a] \qquad (17)$$

であると仮定する。aは正の値である。この値が大きいほど非線形性が強くなる。

川本らの方法[14)]を使うことによって、(16)式の非線形モデルは、(17)式の制約のもと、次のような4つの規則からなるファジィモデルで厳密に表現できる。より、具体的なファジィモデル化の方法は、たとえば、文献19) 20)を参照されたい。

規則1 : If $x(t)$ is M_1 and $\dot{x}(t)$ is N_1
then $\dot{x}(t) = \mathbf{A}_1 x(t) + \mathbf{b}_1 u(t)$

規則2 : If $x(t)$ is M_1 and $\dot{x}(t)$ is N_2
then $\dot{x}(t) = \mathbf{A}_2 x(t) + \mathbf{b}_2 u(t)$

規則3 : If $x(t)$ is M_2 and $\dot{x}(t)$ is N_1
then $\dot{x}(t) = \mathbf{A}_1 x(t) + \mathbf{b}_1 u(t)$

規則4 : If $x(t)$ is M_2 and $\dot{x}(t)$ is N_2
then $\dot{x}(t) = \mathbf{A}_2 x(t) + \mathbf{b}_2 u(t)$

ここで、

$$x(t) = [\dot{x}(t) \quad x(t)]^T$$

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \ \mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{b}_1 = \mathbf{b}_3 = \begin{bmatrix} 5-a \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{b}_2 = \mathbf{b}_4 = \begin{bmatrix} 5+a \\ 0 \end{bmatrix}$$

である。また、メンバーシップ関数は

$$M_1(x(t)) = \frac{\sin(x(t))}{x(t)} \qquad M_2(x(t)) = 1 - \frac{\sin(x(t))}{x(t)}$$

$$N_1(\dot{x}(t)) = 0.5 - \frac{\dot{x}(t)}{2a} \qquad N_2(\dot{x}(t)) = 0.5 + \frac{\dot{x}(t)}{2a}$$

である。

付録の定理4.1の証明において述べる（定式化1）と（定式化2）の方法を適用し、（定式化1）で導入する特異値分解により、保守的な結果を防ぐことができることを示す。保守的な結果をどの程度防げるかは、(14)式のaの値をどのくらい大きくとっても安定条件を満足するかで判断することにする。なお、並列分散的補償によりファジィ制御器を設計するときには、どちらの場合も、$\mathbf{A}_i - \mathbf{b}_i \mathbf{K}_i$ (i = 1, 2, 3, 4) に対して、閉ループ系の固有値が[-2,-2]になるようにフィードバックゲインを選んだ。

ここでは、(C14)の**H**の行列のすべての固有値の実部がゼロとはならない最大のaの値を求めてみた。その結果は以下の通りである。なお、小数点以下、第2の位まで考慮してある。

（定式化1） a=2.57。このときの行列**H**は

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -6.2441 & -6.0197 & -3.1191 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 6.2241 & -1 \\ 0 & 10 & 6.0197 & 0 \end{bmatrix}$$

となり、その固有値は-0.2505 ± 1.477i、-0.2505 ± 1.477iとなった。

（定式化2） a=1.18。このときの行列**H**は

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -4.3686 & -4.3318 & -0.0462 & -0.0416 \\ 1 & 0 & -0.0416 & -0.0383 \\ 10 & 0 & 4.3686 & -1 \\ 0 & 10 & 4.3318 & 0 \end{bmatrix}$$

となり、その固有値は±3.0918、±0.1291となった。

（定式化1）の場合には、aの値を2倍以上大きくとっても、安定条件を満たした。

6 まとめ

本論文では、ファジィ制御による非線形システムの2次安定化条件を導出し、並列分散的補償という考え方を用いて、非線形システムを安定化するファジィ制御器の設計についても言及した。2次安定性、H^∞制御、線形行列不等式（LMI）の観点から、ある不確かさを有するシステムに対する安定条件を導いた。並列分散的補償によるファジィ制御器の設計法を述べ、このフィードバック系の安定解析に導出した安定条件を適用した。この安定解析において、重要な性質を明らかにした。最後に、安定解析の簡単な例題を示し、とくに、特異値分解を導入することにより、安定解析の保守的な結果を避けることができることを示した。

参考文献

1)K.Tanaka and M.Sugeno, Stability Analysis of Fuzzy Control Systems Using Lyapunov's Direct method, Proceedings of NAFIPS'90, pp.133-

136 (1990)
2)北條、寺野、増井、ファジィ制御系の安定問題、第6回ファジィシステムシンポジウム、pp.357-360 (1990)
3)北條、寺野、増井、位相面によるファジィ制御系の安定解析、日本ファジィ学会論文集、Vol.4、No.6、pp.893-905 (1992)
4)前田、村上、稲毛、ファジィ制御系の安定性、第5回ファジィシステムシンポジウム、pp.493-498(1989)
5)K. Tanaka and M. Sugeno, Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems, FUZZY SETS AND SYSTEMS, Vol.45, No.2, pp.135-156 (1992)
6)S. Kitamura and T. Kurozumi, Extended Circle Criterion and Stability Analysis of Fuzzy Control Systems, in Proc. of the International Fuzzy Eng. Symp.'91, vol.2, (1991) 634- 643.
7)R. Katoh et al.,"Graphical Stability Analysis of a Fuzzy Control System", Proceedings of IEEE Int. Conference on IECON'93, vol.1 (1993) pp.248-253.
8)井ノ口、村上、間接法によるファジィ制御の安定解析、第9回ファジィシステムシンポジウム、pp.9-12 (1993)
9)木村、藤井、森、ロバスト制御、コロナ社 (1994)
10)S. Boyd et. al., "Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory", SIAM, Philadelphia, 1994.
11)S. Boyd et. al., "Control System Analysis and Design via Linear Matrix Inequalities", MOVIC Tutorial Workshop Notes (1994).
12)H. Wang, K. Tanaka and M. Griffin, Paralell Distributed Compenmsation of Nonlinear Systems via Takagi-Sugeno Fuzzy model, Proceddings of FUZZ-IEEE'95, To appear (1995)
13)田中、アドバンストファジィ制御、共立出版 (1994)
14)川本ほか、非線形システムの厳密なファジィシステム構成と安定性解析、第8回ファジィシステムシンポジウム、pp.517-520 (1992)
15)菅野,ファジィ制御、日刊工業新聞社、
16)T. Takagi and M. Sugeno, Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control, IEEE SMC-15, pp.116-132 (1985)
17)P. P. Khargonekar, I. R. Petersen and K. Zhou,"Robust Stabilization of Uncertainty Linear Systems: Quadratic Stabilizability and control Theory," IEEE Trans. Automatic Control, Vol.35, No.3, pp.356-361, 1990.
18)K. Zhou and P. P. Khargonekar,"An algebraic Riccati equation approach to optimization, Systems and Control Letters, vol.11 (1988) pp.85-91
19)K. Tanaka, T. Ikeda and H. Wang,"Fuzzy Controller Design for Stabilization of a Class of Nonlinear Systems, IEEE Conf. on CDC'95 (To be submitted).
20)田中ほか、ファジィ制御による非線形システムの二次安定化条件について、計測自動制御学会、(To be submitted)

[問い合わせ先]
〒920 金沢市小立野2-40-20
金沢大学工学部機械システム工学科
田中 --男
Tel & Fax 0762-34-4736
Email tanaka@kicews2.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

付録 [定理4.1 の証明]

ここでは、(10)式のフィードバック系を(3)式の形に表現する。(3)式の形に表現するためには、D、E、Δ(t)をどのように定めるかを決定しなければならない。なお、M、Nは Δ(t)を定めることにより必然的に決まる。ここでは、行列D、E、Δ(t)の定め方によって、２つの定式化を試みる。（定式化１）は特異値分解(15)、(16)式を導入したもの、（定式化２）は特異値分解(15)、(16)式を導入する前の(12)、(13)式を用いるものである。D、E、Δ(t)の値が定まれば、定理3.1を適用することで、定理4.1の条件が求まる。

[定式化１]
(15)式、(16)式で導入した特異値分解のU、S、Vの行列を用いると、行列$\mathbf{D}\in R^{n\times v}$、$\mathbf{E}\in R^{v\times n}$、$\Delta(t)\in R^{v\times v}$、$\mathbf{M}\in R^{v\times v}$、$\mathbf{N}\in R^{v\times v}$を次のように定めることができる。ここで、$v = \{ n\times r \times(r+1) \}/2$ である。

$$\mathbf{D} = [\mathbf{U}_{11}\ \mathbf{U}_{12}\cdots\mathbf{U}_{1r}\ \mathbf{U}_{22}\ \mathbf{U}_{23}\cdots\mathbf{U}_{2r}\ \cdots\ \mathbf{U}_{r\,r-1}\ \mathbf{U}_{rr}\ \mathbf{U}_{rr}]$$

$$\mathbf{E} = [\mathbf{V}_{11}\ \mathbf{V}_{12}\cdots\mathbf{V}_{1r}\ \mathbf{V}_{22}\ \mathbf{V}_{23}\cdots\mathbf{V}_{2r}\ \cdots\ \mathbf{V}_{r\,r-1}\ \mathbf{V}_{rr}\ \mathbf{V}_{rr}]^T$$

$$\Delta(t) = \text{block-diag}[\mathbf{L}_{11}(z(t))\ \mathbf{L}_{12}(z(t))\cdots\mathbf{L}_{1r}(z(t))\ \mathbf{L}_{22}(z(t))\ \mathbf{L}_{23}(z(t))\cdots\mathbf{L}_{2r}(z(t))\ \cdots\ \mathbf{L}_{r\,r-1}(z(t))\ \mathbf{L}_{rr}(z(t))\ \mathbf{L}_{rr}(z(t))]$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{N} = \text{block-diag}[\frac{d_{11}}{2}\mathbf{S}_{11}\ \frac{d_{12}}{2}\mathbf{S}_{12}\cdots\frac{d_{1r}}{2}\mathbf{S}_{1r}\ \frac{d_{22}}{2}\mathbf{S}_{22}\ \frac{d_{23}}{2}\mathbf{S}_{23}\cdots\frac{d_{2r}}{2}\mathbf{S}_{2r}\ \cdots\ \frac{d_{r\,r-1}}{2}\mathbf{S}_{r\,r-1}\ \frac{d_{rr}}{2}\mathbf{S}_{rr}\ \frac{d_{rr}}{2}\mathbf{S}_{rr}]$$

ここで、

$$\mathbf{L}_{ij}(z(t)) = h_i(z(t))\,h_j(z(t))\,\mathbf{S}_{ij}$$
$$d_{ij} = \max_{z(t)} h_i(z(t))\,h_j(z(t))$$

である。

[定式化２]
特異値分解導入前の(12)、(13)式の$\Delta\mathbf{G}_{ij}$、$\Delta\mathbf{T}_{ij}$の行列を用いると、行列$\mathbf{D}\in R^{n\times v}$、$\mathbf{E}\in R^{v\times n}$、$\Delta(t)\in R^{v\times v}$、$\mathbf{M}\in R^{v\times v}$、$\mathbf{N}\in R^{v\times v}$を次のように定めることができる。ここで、$v = \{ n\times r \times(r+1) \}/2$ である。

$$\mathbf{D} = [\Delta\mathbf{G}_{11}\ \Delta\mathbf{T}_{12}\cdots\Delta\mathbf{T}_{1r}\ \Delta\mathbf{G}_{22}\ \Delta\mathbf{T}_{23}\cdots\Delta\mathbf{T}_{2r}\ \cdots\ \Delta\mathbf{G}_{r\,r-1}\ \Delta\mathbf{T}_{rr}\ \Delta\mathbf{G}_{rr}]$$

$$\mathbf{E} = [\mathbf{I}_n\ \mathbf{I}_n\cdots\mathbf{I}_n]^T$$

$$\Delta(t) = \text{block-diag}[\mathbf{L}_{11}(z(t))\ \mathbf{L}_{12}(z(t))\cdots\mathbf{L}_{1r}(z(t))\ \mathbf{L}_{22}(z(t))\ \mathbf{L}_{23}(z(t))\cdots\mathbf{L}_{2r}(z(t))\ \cdots\ \mathbf{L}_{r\,r-1}(z(t))\ \mathbf{L}_{rr}(z(t))\ \mathbf{L}_{rr}(z(t))]$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{N} = \text{block-diag}[\frac{d_{11}}{2}\mathbf{I}_n\ \frac{d_{12}}{2}\mathbf{I}_n\cdots\frac{d_{1r}}{2}\mathbf{I}_n\ \frac{d_{22}}{2}\mathbf{I}_n\ \frac{d_{23}}{2}\mathbf{I}_n\cdots\frac{d_{2r}}{2}\mathbf{I}_n\ \cdots\ \frac{d_{r\,r-1}}{2}\mathbf{I}_n\ \frac{d_{rr}}{2}\mathbf{I}_n\ \frac{d_{rr}}{2}\mathbf{I}_n]$$

ここで、

$$\mathbf{L}_{ij}(z(t)) = h_i(z(t))\,h_j(z(t))\,\mathbf{I}_n$$
$$d_{ij} = \max_{z(t)} h_i(z(t))\,h_j(z(t))$$

である。

FE5-1

ファジィモデリングの蒸留塔制御への適用

An Application of Fuzzy Modeling to Distillation Control

山崎　束（日揮株式会社）
Tsukasa Yamazaki (JGC Corporation)

ABSTRACT - One of recent trend in fuzzy control research is a shift from the use of fuzzy control rules to the utilization of fuzzy models for controller design.
In this study, modeling of a distillation column is investigated by applying an unique representation of fuzzy model rules, which was proposed for formulation of a simple fuzzy model tuning predictive controller(FMTPC) for MIMO systems in a recent paper.
Through simulation studies, it is concluded that prposed modeling method is adequate for the FMTPC, and its performance is satisfactory.

1．はじめに

制御対象モデルの存在は、制御系設計において種々の自由度および有用な情報を提供する。また、制御系の安定解析には不可欠であると同時に、最適化制御への検討ツールともなり、モデリング問題は制御では重要なテーマであるのは周知の事実である。ファジィ制御においても、ファジィモデルをコントローラ設計に応用する試みは1970年代後半から始まり、現在までR.M. TONG[1]、戸貝[2]、菅野と高木[4,5]、鈴木[8]、W.Pedrycz[7]などが貴重な成果を発表してきている。
前報[14]では、制御動作とプロセス応答との動的関係を陽に表現するユニークなルール形式 [10,13] を用いて、MIMOシステム用簡易ファジィモデル予測コントローラ(FMTPC)の定式化を提案した。このモデル化手法はザデーの提案するグラニュエーション(Granulation)によるデータ圧縮の一方法、つまり数値関数である有限インパルス応答モデルを言語ルールの集合体としてのファジィグラフへの変換とも考えられる。このモデル化手法により、同定対象パラメータ数が最小化され、多変数システムに対しても特別な入力列を用いることなく、パソコンでも無理なくオンライン同定が可能となった。本報では、提案したルール形式でのモデリングを蒸留塔に適用し、その妥当性を検証すると同時に、FMTPCでの性能検討を行ったので報告する。

2．モデルと同定

2．1　モデルルール

ファジィ論理は、一般の論理と同様、時制の要素を扱わない。従って時間的に変化する動的システムを表現するにはファジィルールに工夫が必要である。そこで、筆者はオペレータがプロセスの動的挙動を言語的に理解している感覚を模倣したユニークなルール表現を提案した[10]。ルール形式は、制御動作とプロセス応答の関係を陽に表現し、しかも、制御動作を長期的、中期的、短期的過去に区分し、制御対象の挙動を記述する。
更に、MIMOシステムの場合、ルール数の爆発的増大を防ぐため、システムの入力・出力1対に対しての部分的ペアリングによるルール表現形式を採用する。
ルール形式規定のため、以下の準備を行う。
（1）ファジィ変数として、j-th制御動作の(n+1)時点および過去の変化量を$U_j[n+1]$、$Z_j[n]$とし、この制御動作による k-thプロセス出力の予測変化量を$Y_{j,k}[n+1|n]$とする。なお、[n]は時点nの値を表わし、[n+1|n]は時点n に於ける1サンプリング先の予測値を意味する。
（2）Q^iを台集合 Y={y}上で、(A^i, B^i, C^i)を台集合 Z={z}上で規定される規格化されたファジィラベル(FIG-1参照)とする。なお、ファジィラベル $Q^i_{j,k}$と(A^i, B^i, C^i)の間に線形関係を仮定する。
（3）過去の制御動作は FIG-2 に示す時間のファジィラベル T_i(T_1=S, T_2=M, T_3=L)により、長期的、中期的、短期的過去の3区分に集約してZ^L、Z^M、Z^Sで表現する。　時点n における過去制御動作 $z_{Ti}[n]$は、各々の時間ラベルT_iに対応して次式で定義する。

$$z_{Ti}{}^{o}[n] = \sum_{m=0}^{M} u[(n-m)] \cdot \mu_{Ti}(m) \Big/ \sum_{m=0}^{M} \mu_{Ti}(m) \qquad (1)$$

（4）今回制御動作変化量 U[n+1]を過去出力 $Z^S[n]$に取り込み、$Z^S[n+1]$とする。

以上により、j-th制御動作とk-thプロセス出力（以降の記述では、システム側から見た表現で、" j-th入力・k-th出力" と呼ぶ）に関するシステムの挙動を、式(2)によりi番目モデルルールを規定する。

$$R^i_{(j,k)}: (Z_j{}^L[n+1]=A^i_j \ \&\ Z_j{}^M[n+1]=B^i_j \ \&\ Z_j{}^S[n+1]=C^i_j) \Rightarrow Y_{j,k}[n+1|n]= Q^i_{j,k} \qquad (2)$$

$$Q^i_{j,k}= {}^{L}G^i_{j,k} \underset{\sim}{\times} A^i_j \underset{\sim}{+} {}^{M}G^i_{j,k} \underset{\sim}{\times} B^i_j \underset{\sim}{+} {}^{S}G^i_{j,k} \underset{\sim}{\times} C^i_j \qquad (3)$$

ここで、${}^{L}G^i_{j,k}$, ${}^{M}G^i_{j,k}$, ${}^{S}G^i_{j,k}$はスカラー数、記号$\underset{\sim}{+}$はファジィ加算、$\underset{\sim}{\times}$はファジィ乗算とする。
(3)式をベクトル表現（太字で表わす）すると、

$$Q^i_{j,k} = G^i_{j,k} \underset{\sim}{\cdot} \underset{\sim}{+} X^i_j \qquad (4)$$

$$G^i_{j,k}= \{{}^{L}G^i_{j,k}, {}^{M}G^i_{j,k}, {}^{S}G^i_{j,k}\},$$
$$X^i_j= \{ A^i_j , B^i_j , C^i_j \}$$

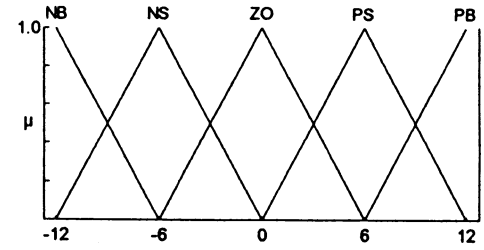


FIG-1　A_i, B_i, C_i, Q_iのメンバーシップ関数

一方、上記モデルルールで表現されたプロセスの出力は、菅野[4]の簡略法を使用して次の要領で求める。
過去の制御動作として$A_j{}^o[n+1], B_j{}^o[n+1], C_j{}^o[n+1]$を与えると、j-th入力・k-th出力に関するi番目ルールから、プロセス予測変化量 $Y^i_{j,k}{}^o$ が式(5)で計算できる。

$$Q^i_{j,k}{}^o[n+1|n] = G^i_{j,k} \underset{\sim}{\cdot} \underset{\sim}{+} X_j{}^o[n+1] \qquad (5)$$

i番目ルールの適合度は次式で与えられる。

$\mu X^{i}_{j}[n]$ =
$\min\{\mu A^{i}_{j}(z^{j}_{L}{}^{o}[n]),\ \mu B^{i}_{j}(z^{j}_{M}{}^{o}[n]),\ \mu C^{i}_{j}(z^{j}_{S}{}^{o}[n])\}$ (6)

また、j-th入力・k-th出力に関する全ルール（N_R個と仮定）から推論されるプロセス予測変化量は式(7)で求める。

$$Y_{j,k}{}^{o}[n+1|n]=\sum_{i=1}^{N_R}\{Q^{i}_{j,k}{}^{o}\cdot\mu X^{i}_{j}[n]\}\ /\ \sum_{i=1}^{N_R}\{\mu X^{i}_{j}[n]\} \quad (7)$$

更に、対象となるシステムは Z_jの限定されたファジィ領域では線形で且つ線形重ね合わせが成立すると単純化すると、すべてのJ個制御動作による k-thプロセス出力 $Y_k[n+1|n]$ は下記の式で計算される。

$$Y_k[n+1|n]=Y_{1,k}[n+1|n]+Y_{2,k}[n+1|n]+\ldots.+Y_{J,k}[n+1|n] \quad (8)$$

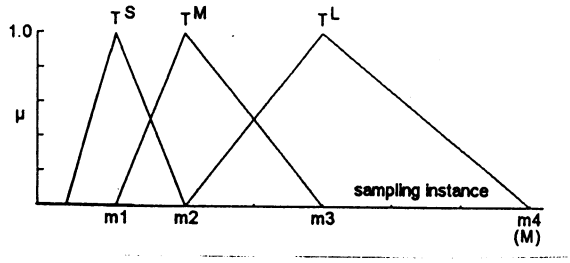


FIG-2 時間T_i(S,M,L)のメンバーシップ関数

2．2 同定

モデルの同定は、第1ステップの線形同定と第2ステップのファジィ区分同定に分離する。

＜第1ステップの同定＞

このステップはモデルの初期化であり、コントローラを開ループ状態での実施を前提としている。要領としては、Z^L、Z^M、Z^Sによるファジィ区分を省略して、全領域において1つのファジィルールで表現する。さらに、制御動作は確定値なのでファジィラベル$A_j{}^o$, $B_j{}^o$, $C_j{}^o$のピーク値(Centroid)に注目し、シングルトンとして単純化すると、式(3)の計算を次のスカラ式で単純化する。

$$y_{j,k}[n+1|n] = {}^{L}G_{j,k}\cdot z^{j}_{L}[n+1]+{}^{M}G_{j,k}\cdot z^{j}_{M}[n+1]+{}^{S}G_{j,k}\cdot z^{j}_{S}[n+1] \quad (9)$$

ここで、$y_{j,k}$, z^j_L, z^j_M, z^j_Sは、ファジィラベル $Q_{j,k}$, A_j, B_j, C_j各々のCentroidを表す。

上記の単純化により、推定すべきモデルパラメータの数はシステムの入力・出力1対に対して ${}^{L}G_{j,k}$, ${}^{M}G_{j,k}$, ${}^{S}G_{j,k}$の3個となる。J個入力・K個出力システムでも(J x K x 3)個のパラメータが求める対象となるため、オンライン同定手法である逐次最小2乗法(RLS法)により、無理なくパソコンなどで全パラメータを同時に同定できる。この事はモデル予測制御で一般的に行っている、入力・出力1対毎の同定作業を省略出来る事を意味する。

＜第2ステップの同定＞

このステップは、前報[14]で採用したモデルチューニング法と同じであり、制御を実施しながらプロセス出力の予測値と実データとに許容範囲以上に誤差が生じた時、ファジィ区分領域毎のモデルを修正していく。従い、Z^L、Z^M、Z^Sのファジィラベルによるファジィ分割を実施する。区分の数としては、ラベル数を N_Lとすると(N_L x N_L x N_L)個に全領域を区分にして表現する。モデルパラメータの修正アルゴリズムに関しては後節3．2で述べる。

2．3 シュミレーション検討

本報で導入した第1ステップの線形同定の性能を検証する目的で、対象プロセスとして R.K.Wood & M.W.Berry[15]の蒸留塔シュミレーションモデルを使用する。蒸留塔のスキーム図は FIG-3に示す通りで、塔頂液と塔底液での製品濃度（%）をx_D と x_B 、塔頂環流液流量と塔底リボイラへの蒸気流量をRとS で表す。それらプロセス変数間には相互干渉があり制御の難しい対象と考えられており、これらの伝達関数は式(8)で与えられる。

$$\begin{vmatrix} x_D(s) \\ x_B(s) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} R(s) \\ S(s) \end{vmatrix} \quad (10)$$

$P_{11}(s) = 12.8\ e^{-1*}/(16.7s+1)$
$P_{12}(s) = -18.9\ e^{-3*}/(21.06s+1)$
$P_{21}(s) = 6.6\ e^{-7*}/(10.9s+1)$
$P_{22}(s) = -19.4\ e^{-3*}/(14.4s+1)$

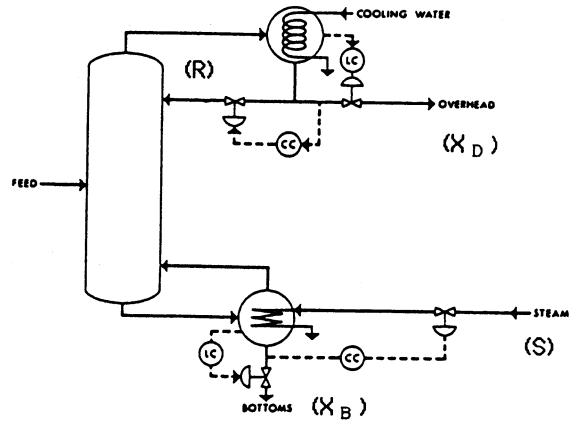


FIG-3 蒸留塔スキーム

シュミレーションの目的は、（1）過去の制御動作を3区分する時間のファジィラベル T_i(T_1=S, T_2=M, T_3=L)を使用する手法で、時定数およびムダ時間の異なる多変数システムを一括でモデリング可能であるか否か、（2）時間のファジィラベル自体の定義がモデリングに与える影響がどのようなものであるか、（3）同定されたモデルがFMTPCに使用可能かを検証する事である。従って、シュミレーション条件を厳しくするため、塔頂環流液流量と塔底リボイラ蒸気流量を同時に変更、また時間ラベルに関しては(a)任意の設定と、(b)応答を見ながら調整した2つのケースを検討した。シュミレーションは、時間0分から時間280分まで60分毎にプロセス入力に±5～10%のステップ変化を与えた。使用した時間のファジィラベル T_iの Centroidの数値をTable-1a,bに示す。

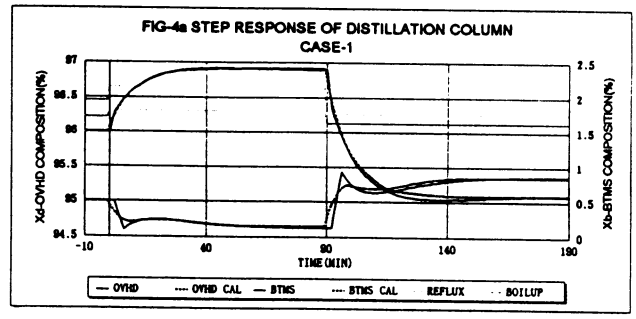
CASE -1	入力 ／出力			
	R/x_D	R/x_B	S/x_D	S/x_B
T1	0	0	0	0
T2	10	10	10	10
T3	30	30	30	30

Table-1a 時間ラベルが任意の設定

CASE -2	入力 ／出力			
	R/x_D	R/x_B	S/x_D	S/x_B
T1	2	4	8	4
T2	10	12	12	10
T3	30	30	22	30

Table-1b 応答情報を利用した設定

また、上記２ケースの時間ファジィラベル設定に対して求められたモデルパラメータ$G_{j,k}$の値をTable-2に示す。
ケース－１では、$^{S}G_{1,2}$が負となっているが、プロセスの特性から正となるべきである。よって、入力S－出力x_Dに対する時間パラメータT1を増加させると同時に、他のパラメータもモデルパラメータのお互いの比が1/3以内となるよう調整をしたのがケース－２となっている。
いずれのケースも2回目のステップ変化後つまり120分後にはパラメータが収斂した。従って、提案したモデリング手法により、時定数およびムダ時間の異なる多変数システムを一括でオンラインモデリングが可能である事が確認された。
時間ラベルのパラメータ設定が、モデリングの精度に与える影響がどのようなものであるかを検討するため、ステップ応答を求めた。その結果を FIG-4a,b に示す。ケース－１のFIG-4aでは、変数同士の時定数、ムダ時間の違いなどによる特徴あるステップ変化初期の挙動が十分にモデリングされていないが、FIG-4bでは時間ラベルを調整したケースであるため、満足のゆくモデリング結果となっている。整定状態に関しては、両ケースとも良好な結果となっている。
モデル予測制御はモデル誤差にロバスト性を有するので、ケース－１で同定されたラフモデルが提案したFMTPCに使用可能かを次節で検証する。



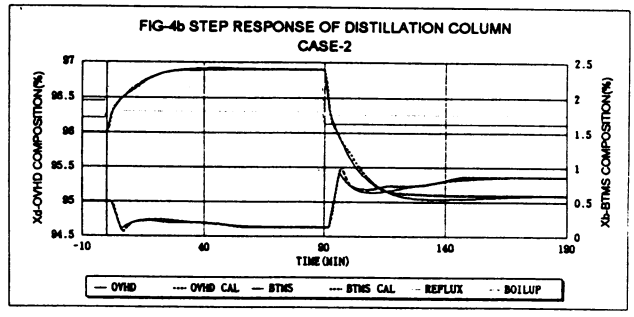


FIG-4　モデルルールによる応答

	$^{L}G_{1,1}$	$^{M}G_{1,1}$	$^{S}G_{1,1}$	$^{L}G_{2,1}$	$^{M}G_{2,1}$	$^{S}G_{2,1}$	$^{L}G_{1,2}$	$^{M}G_{1,2}$	$^{S}G_{1,2}$	$^{L}G_{2,2}$	$^{M}G_{2,2}$	$^{S}G_{2,2}$
CASE-1	.376	.975	.453	-.760	-1.53	-.223	.123	.912	-.085	-.464	-1.95	-.357
CASE-2	.345	.909	.669	-.712	-1.13	-.968	.434	.314	.276	-.862	-1.23	-.889

Table-2　同定されたモデルパラメータ値

3．FMTPCの制御アルゴリズム

3．1　コントローラの構成

モデルチューニング機能付き簡易ファジィモデル予測コントローラは５つの主モジュールで構成される。詳細は前報[13]を参照のこと。

（１）モデルルール部(MODEL RULES)
（２）参照軌跡演算部(REFERENCE TRAJECTORY)
（３）制御出力演算部(CALCULATION OF OUTPUT)
（４）モデル修正部(MODEL RULE MODIFICATION)
（５）データ保存部(DATA STORAGE)

コントローラの基本アルゴリズムのうち、モデル修正および参照軌跡について簡単に説明する。

3．2　モデルルール修正

実際の制御問題特にプロセスが極端に非線形な場合、第１ステップのファジィ線形同定ではプロセスの特徴を抽出できず、満足なモデルが得られない場合も考えられる。この様な状況での改善策として、初期モデルルールを Z^L、Z^M、Z^Sのファジィラベルによるファジィ分割を行い、ルール数を増加させてモデリング精度を徐々に向上させるオンラインチューニング機能を組み込む。

本コントローラで採用するルール修正の手法は、ＳＯＣ(Self-Organising Fuzzy Controller)[3]で妥当な学習効率を有する事が確認されている補強型(REINFORCEMENT TYPE)学習法とした。時点p の q-thプロセス予測変化量 Yq[p|p-1]（つまり$Y_{1,q}, Y_{2,q}, \cdots, Y_{J,q}$）を推論した時の最も責任のある（すなわち、$Z^L, Z^M, Z^S$ のファジィラベルによるファジィ分割空間に属する）ルール群を、記号"＊"をもちいて$R^*_{(j,q)}$, (j=1, 2, ..., J) とし次式で表わす。

$$R^*_{(1,q)}: (Z_1{}^L[p]=A_1{}^* \ \& \ Z_1{}^M[p]=B_1{}^* \ \& \ Z_1{}^S[p]=C_1{}^*) \quad (11)$$
$$\Rightarrow Y_{1,q}[p|p-1]=Q_{1,q}{}^*$$
$$R^*_{(2,q)}: (Z_2{}^L[p]=A_2{}^* \ \& \ Z_2{}^M[p]=B_2{}^* \ \& \ Z_2{}^S[p]=C_2{}^*)$$
$$\Rightarrow Y_{2,q}[p|p-1]=Q_{2,q}{}^*$$
$$\vdots$$
$$R^*_{(J,q)}: (Z_J{}^L[p]=A_J{}^* \ \& \ Z_J{}^M[p]=B_J{}^* \ \& \ Z_J{}^S[p]=C_J{}^*)$$
$$\Rightarrow Y_{J,q}[p|p-1]=Q_{J,q}{}^*$$

但し、$Q_{J,q}{}^* = G^*_{J,q} \underset{\sim}{X} \pm X_J{}^*$ (12)

上記ルールの $Q_{J,q}{}^*$ つまり、$G^*_{J,q}$ がチューニングの対象となる。　方法は次式で表される様に単純で、該当のファジィ分割空間に属するデータ（データ数をN_dとする）をヒストリカルデータベースから選択し、最小自乗法を適用し、新規の$G^{mod}_{J,q}$, (j=1, 2, ..., J)を求める。

$$J=\sum_{m=0}^{N_d} \{(\underset{\sim}{Y}_q[p-m]-Y_q[*]) \cdot \mu X^*[p-m]\}^2 \quad (13)$$

ここで、[*]=[p-m|p-m-1], $\underset{\sim}{Y}_q[p-m]$は実測値、
$\mu X^*[p-m]=\min\{\mu X^*_1[p-m], \mu X^*_2[p-m], \ldots, \mu X^*_J[p-m]\}$
$Y_q[*]= Y_{1,q}[*]+ Y_{2,q}[*]+ \ldots +Y_{J,q}[*]$

補強型学習法による修正は次の式で表される。

If $\delta[p] > \varepsilon^{limit}$ then
$G^{mod}_{J,q}= (1- C_L)G^*_{J,q} + C_L \times G^{mod}_{J,q}$ (14)

なお、$\delta[p]=\{\underline{Y}_s[p]-Y_s[p|p-1]\}$，また、$C_L$は学習係数で0.1と設定。

3．3 参照軌跡（Reference Trajectory）

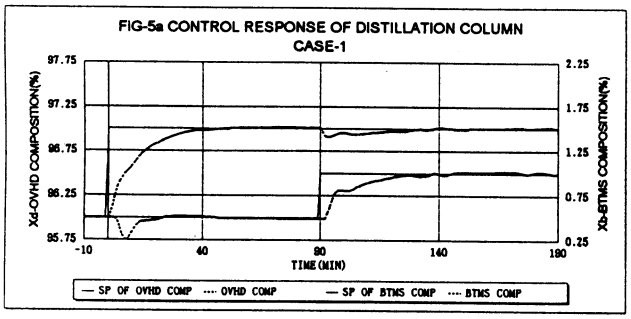
モデル予測制御[6,9]では、プロセス値を所定の軌跡で所望状態へ誘導するための参照軌跡を一般的に導入し、一致ホライゾン（参照軌跡との一致を評価する期間）での評価関数の最適化に基ずく制御動作の決定が一般的である。この手法を本コントローラにも採用し、希望値$Q^R(y)$を規定する。$Q^R(y)$をA^o，B^o，C^oなどと同様に、シングルトンとして扱い、次の簡単な式で参照軌跡を与える。

$$Y^R{}_k[n+m|n] = (1-\exp(-\tau\cdot m/T_k p))\cdot(-E_k[n]) \qquad (15)$$

ここで、$E_k[n]$は制御偏差、τは制御周期、$T_k p$は一次遅れ系で表現した時の応答における望ましい時定数を表す。
本研究では、SMPC(Simplified Model Predictive Control)と同様に予測範囲を数サンプリング先とし、そのプロセス予測変化量を参照軌跡に一致させる制御動作を求める簡易型とした。
従って、予測範囲をLサンプリング先とすると、(16)式で表せる評価関数JJを最適化する制御動作を求める。

$$JJ = \sum_{m=0}^{L-1} \{Y^R{}_k[n+m+1|n]-(\sum_{i=0}^{m} Y_k[n+i+1|n+i])\}^2 \qquad (16)$$

上式を最適化する際に、制御出力の上下限リミット、変化率リミットなど適当な制限条件を付加し、制御動作 u[n+1]を求める。



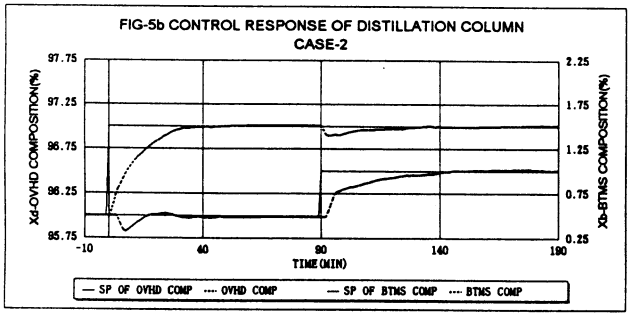


FIG-5 制御応答

3．4 制御応答

前節2.3で同定された２ケースのモデルルールをFMTPCに組み込み設定値にステップを与えた時の応答をFIG-5a,bに示す。
ケース－２で獲得されたモデルルールによる応答がケース－１に比べて、若干ながら相互干渉が抑えられ整定時間が短い。しかしステップ応答で見られたモデリング精度の差異ほどの制御性能に違いが観察されない。
この理由としては、FMTPCは数サンプリング先を予測範囲としているため、外乱初期の挙動のモデリング誤差が許容されたと考えられる。

4．まとめ

制御動作とプロセス応答との動的関係を陽に表現するユニークなルール形式を用いて、同定対象パラメータ数を最小化し、多変数システムに対しても特別な入力列を用いることなく、オンライン同定する手法を検討した。
そのモデリングを時定数およびムダ時間の異なる蒸留塔に適用し、モデリング精度をシュミレーションによって検証すると同時に、FMTPCでの性能検討において、このファジィモデリングが第２ステップのチューニング無しに、FMTPCには十分に実用性があることが結論づけられた。

参照文献

[1]R.M Tong: The Construction and Evaluation of Fuzzy Models: in Advances in Fuzzy Set Theory and Applications(M.M.Guputa et al Eds.), North-Holland(1979)
[2]M.Togai et al: Application of Fuzzy Inverse Relations to Synthesis of a Fuzzy Controller for Dynamic Systems; 23rd IEEE Conf.on Decision and Control, Las Vegas(1984)
[3]山崎、他：自動学習ファジィコントローラ；計測自動制御学会論文集、vol.20, No.8(1984)
[4]T.Takagi, et al: Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control; IEEE Trans. SMC-15, No.1, pp.116/132(1985)
[5]M.Sugeno, et al: Fuzzy Modelling and Control of Multilayer Incinerator; Fuzzy Sets and Systems, vol.18, pp.329/346(1986)
[6]P.R.Maurath, D.A.Mellichamp, D.E.Seborg: Predictive Controller Design for Single-Input/Single-Output(SISO) Systems; Ind.Eng.Chem.Res. vol.27, pp.956/963(1988)
[7]W.Pedrycz:Puzzy Control and Fuzzy Systems ;(research Studies Press, 1989)
[8]鈴木、他：ファジィ予測モデルによるプロセス 制御；第６回ＦＳＳ(1990)
[9]大嶋：モデル予測制御に関する研究；化学工学、vol.55、No.6(1991)
[10] T.Yamazaki: The Formulation of A Simple Fuzzy Predictive Controller with Fuzzy Model Tuning; Proc. of 1st Asian Fuzzy Systems Symposium, Singapore(1993)
[11] 山崎：各種合成演算の簡易ファジィモデル予測型制御器への影響；第１０回ＦＳＳ予稿集、大阪(1994)
[12] T.yamazaki, et al: Effects of Composition Method on the Performance of a Fuzzy Model Tuning Predictive Controller; Proc. of Japan - USA Sympo. on Flexible Automation, Kobe(1994)
[13]山崎：モデル修正機能をもつ１入力１出力ファジィ予測型制御器の設計；日本ファジィ学会誌、vol.6, No.3, pp562/569(1994)
[14] T.Yamazaki: The Formulation of a Simple fuzzy Model tuning Predictive Controller for MIMO Systems; Proc. of 3rd IEEE International Conference on Fuzzy System, Orlando, USA(1994)
[15] R.K.Wood and M.W.Berry: Thermal Composition Control of a Binery Distillation Column; Chemical Eng. Science, vol.28, pp.1707/1717(1973)

連絡先：
〒232 横浜市南区別所1-14-1 日揮株式会社
国際事業本部 山崎 束
TEL：045-721-1111 FAX：045-721-7364

FE5-2

ファジィ制御を用いたLMSアルゴリズムによる伝達系の推定時間について

Estimation time of transfer system with LMS algorithm using fuzzy control

武藤憲司* 岡崎 崇** 柴山秀雄** 島田一雄*
Kenji Muto* Takashi Okazaki** Hideo Shibayama** Kazuo Shimada*

*東京都立航空工業高等専門学校
*Tokyo Metropolitan College of Aeronautical Engineering
**芝浦工業大学
**Shibaura Institute of Technology

Abstract — Little calculation steps and stable convergence are required in case of using an adaptive algorithm for estimation of coefficients of a digital filter. The least-mean-square (LMS) algorithm is applied for the adaptive processing in many algorithms, as the LMS algorithm has small calculation steps. Convergence parameter of the LMS algorithm influences estimating the coefficients of a digital filter for fast and high precision estimation. We proposed a fuzzy control which is applied estimation of convergence parameter, and the fuzzy rule is composed the relation between the convergence parameter and the square error of the adaptive system. As those results, fast calculation time and high precision estimation can be obtained.

1. 序論

コンピュータの発達とともに適応信号処理がいろいろな分野で着目されている．音響の分野での応用例としては適応ディジタルフィルタを用いた適応エコーキャンセラ，適応ノイズキャンセラ，適応等化器などがある．この適応ディジタルフィルタは先験的情報をあまり必要とせずに自動的にフィルタ特性を制御することが可能である．

適応アルゴリズムを用いてディジタルフィルタ係数の推定を行う場合，適応アルゴリズムには少ない演算量と優れた収束特性が要求される．その中で，二乗誤差に着目し，それが最小値に向かうようにフィルタ係数を絶えず調節するLMS(Least Mean Square) アルゴリズムがある [1]．LMSアルゴリズムは簡潔で実現が容易であるため多くの適応処理に用いられている．ディジタルフィルタ係数の推定にLMSアルゴリズムを用いた場合に生ずる問題の多くは，主にLMSアルゴリズムの推定時間に起因することが指摘されている [2]．

このLMSアルゴリズムの減衰係数の値は推定時間や推定精度に影響する重要なパラメータである．一般に，LMSアルゴリズムの減衰係数には固定値が用いられているため，高精度の推定を行うためには長い推定時間が必要である．そして，推定時間を短縮するためにさまざまな方法が提案されている [3],[4]．

本研究の目的はLMSアルゴリズムを改良して推定時間の短縮を図ることである．そのために，LMSアルゴリズムの減衰係数をフィルタ係数の推定中に修正する手法を用いる．その減衰係数は誤差情報をもとにファジィ制御 [5] を用いて修正する．その際に，二乗誤差の大きさと勾配と減衰係数の大きさをもとにファジィ規則により減衰係数の修正量を推定する．

これまでに，LMSアルゴリズムの減衰係数を正規化した場合についてファジィ制御を用いることで推定時間の短縮が図れることを報告した [6]．本論文では，LMSアルゴリズムの減衰係数を正規化しない場合でも正規化した場合と同様にファジィ制御を用いることで推定時間の短縮と推定精度の向上が図れることを示す．

2. LMSアルゴリズム

ディジタルフィルタの係数ベクトルを推定する方法として一般に平均二乗誤差に着目したLMSアルゴリズムが用いられている．ここではこのLMSアルゴリズムを用いてFIR(Finite Impulse Response) ディジタルフィルタを設計する方法を示す．

時刻 t におけるFIRフィルタ係数ベクトルを $\boldsymbol{w}(t) = [w_0(t), w_1(t), \cdots, w_l(t)]^T$，入力信号を $\boldsymbol{x}(t) = [x(t), x(t-1), \cdots, x(t-l)]^T$，出力信号を $y(t)$ とすると以下の関係が成り立つ．

$$y(t) = \sum_{i=0}^{l} w_i(t)x(t-i) \tag{1}$$

そして，フィルタ係数ベクトルを適応アルゴリズムを用いて更新する．

適応アルゴリズムの1つにWidrow-HoffのLMSアルゴリズムがある．時刻t+1の係数ベクトルの更新値は，

$$\boldsymbol{w}(t+1) = \boldsymbol{w}(t) + 2\mu\varepsilon(t)\boldsymbol{x}(t) \tag{2}$$

である．ただし，減衰係数μは毎回の繰り返しにおける補正の大きさを制御するパラメータである．また，$\varepsilon(t)$ は誤差信号，$\boldsymbol{x}(t)$ は入力信号である．このアルゴリズムの特長は計算が非常に簡単なことである．

ここで，$\varepsilon(t)$ は目的信号 $d(t)$ と出力信号 $y(t)$ によって次式で表される．

$$\varepsilon(t) = d(t) - y(t) \tag{3}$$

次に，これらの繰り返し演算による $\boldsymbol{w}(t)$ の収束条件は，タップ数を $(l+1)$，入力信号電力をσ^2とすると，次式で表される．

$$0 < \mu < \frac{1}{(l+1)\sigma^2} \tag{4}$$

式 (4) の範囲で適応アルゴリズムが安定し，任意の値を選択することができる．lはモデル推定時に赤池の情報量基準 [7] を用いて決定可能であり，σ^2は推定中に計算することが可能であるので，ここではl, σ^2は先験的情報として与えられているとして計算する．

3. ファジィ制御を用いたフィルタ係数の推定時間の短縮

3.1 ファジィ制御による減衰係数の修正法

LMS アルゴリズムにおいて減衰係数を固定値とする場合，減衰係数の値を小さくすることで精度の良い推定を行うことができるが推定に時間がかかってしまう．また，大きな値を用いることによって推定時間の短縮が可能となるが，精度の良い推定ができなくなる問題がある．この減衰係数をフィルタ係数の推定中に逐次修正することによってフィルタ係数の推定時間の短縮が可能になる．

減衰係数を逐次修正する LMS アルゴリズムによる時刻 t+1 の係数ベクトルの更新値は，

$$\boldsymbol{w}(t+1) = \boldsymbol{w}(t) + 2\mu(t)\varepsilon(t)\boldsymbol{x}(t) \qquad (5)$$

である．ここでは，LMS アルゴリズムの減衰係数を正規化しないためフィルタ係数の修正の計算が簡単になっている．

この方法は目的信号と出力信号の二乗誤差の大小とその勾配そして減衰係数の大きさに着目して減衰係数を修正する．すなわち，二乗誤差が減少している場合には減衰係数に大きな値を用いてディジタルフィルタ係数の推定を行う．また，ある程度推定し，二乗誤差が小さくなった場合，小さな値の減衰係数を用いて精度よく推定を行う．さらに，減衰係数が大きいため，二乗誤差が大きいのに減少しない場合には減衰係数を小さく，減衰係数が小さすぎるため，二乗誤差が大きいのに減少しない場合には減衰係数を大きくする．

ファジィ推論に用いる誤差情報として次の 3 つのパラメータ二乗誤差 $e(t)$，二乗誤差の傾き$\Delta e(t)$，減衰係数$\mu(t)$ を用いる．時刻 t の誤差信号$\varepsilon(t)$ を用いて，$e(t)$，$\Delta e(t)$ は次式で表される．

$$e(t) = 10\log\varepsilon(t)^2 \quad [\mathrm{dB}] \qquad (6)$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \quad [\mathrm{dB}] \qquad (7)$$

$e(t)$,$\Delta e(t)$,$\mu(t)$ で減衰係数$\mu(t)$ の操作量$\Delta\mu(t)$ を推定するファジィ規則を表 1に示す．

ファジィ制御で推定した$\Delta\mu(t)$ を用いて減衰係数$\mu(t)$ を以下の式によって修正する．

$$\mu(t+1) = \mu(t) + \Delta\mu(t) \qquad (8)$$

式 (6)～(8) の制御過程をブロック図で図 1に示す．これは LMS アルゴリズムによるパラメータ推定のシステムにファジィ制御による減衰係数の推定のシステムを組み合わせたものである．ファジィ制御処理と LMS アルゴリズムの処理を異なる処理装置で行うことで，LMS アルゴリズムによるフィルタ係数推定を行う処理装置の負荷が減少し，計

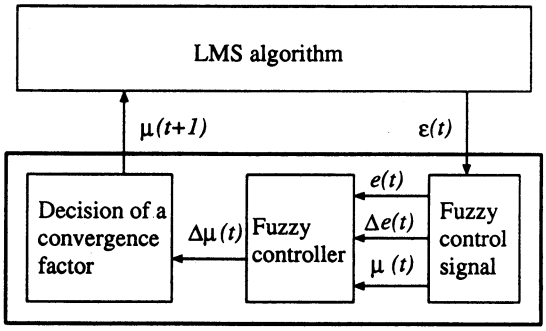


図 1 ファジィ制御を用いた減衰係数の修正方法

算回数を少なくすることが可能となる．また，ファジィ制御装置が停止しても，LMS アルゴリズム処理装置とは独立しているため，ディジタルフィルタ係数推定を続けることが可能である．

3.2 減衰係数をファジィ制御で修正する方法によるインパルス応答の推定

本実験では図 2に示すインパルス応答 $\boldsymbol{h}$ を推定するシステムを用い，FIR フィルタ係数ベクトル $\boldsymbol{w}(t)$ を LMS アルゴリズムで推定する [8]．

本実験の伝達系のインパルス応答を $\boldsymbol{h} = [h_0, h_1, \cdots, h_l]^T$ とした場合の LMS アルゴリズムの推定結果を示す．本実験では $\boldsymbol{h}$ の要素は式 (9) で与えられている．

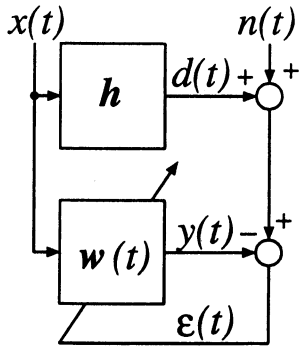


図 2 LMS アルゴリズムによるインパルス応答の推定

$$h_i = \frac{\sin\frac{i-60}{4}\pi}{\frac{i-60}{4}\pi} \quad (i = 0, 1, \cdots, 120) \qquad (9)$$

推定する係数ベクトル $\boldsymbol{w}(t)$ には 121 タップ数を有する FIR フィルタモデルを用いる．

ここでは LMS アルゴリズムを用いて伝達系を推定する場合の問題を把握するため，伝達系の誤差として，インパルス応答の推定精度の評価に次式で示される推定精度$\delta(t)$

表 1 $\Delta\mu(t)$ を推定するファジィ規則

if	$e(t)$ is Large	and	$\Delta e(t)$ is Zero	and	$\mu(t)$ is Large	then	$\Delta\mu(t)$ is Negative
or							
if	$e(t)$ is Large	and	$\Delta e(t)$ is Zero	and	$\mu(t)$ is Small	then	$\Delta\mu(t)$ is Positive
or							
if	$e(t)$ is Large	and	$\Delta e(t)$ is Increase			then	$\Delta\mu(t)$ is Negative
or							
if	$e(t)$ is Large	and	$\Delta e(t)$ is Decrease			then	$\Delta\mu(t)$ is Zero
or							
if	$e(t)$ is Small	and	$\Delta e(t)$ is Increase			then	$\Delta\mu(t)$ is Negative
or							
if	$e(t)$ is Small	and	$\Delta e(t)$ is Decrease			then	$\Delta\mu(t)$ is Zero
or							
if	$e(t)$ is Zero					then	$\Delta\mu(t)$ is Zero

を用いる．

$$\delta(t) = 10\log\frac{\sum_{i=0}^{l}\{h_i - w_i(t)\}^2}{\sum_{i=0}^{l}{h_i}^2} \quad [\mathrm{dB}] \qquad (10)$$

伝達系を推定するシステムを構築する場合，外部から目的信号を取り込む必要がある．実システムを構築する場合には，雑音が混入して目的信号を正確に得られない可能性がある．そこで，雑音のある場合についてシミュレーションを行う．入力信号の分散$\sigma_x^2 = 1.0$で雑音の分散$\sigma_n^2 = 0.01$とした場合，つまり目的信号 $d(t)$ と雑音 $n(t)$ の SN 比が 26[dB] の場合についてインパルス応答推定を行う．

また，減衰係数の初期値を$\mu(0)$ = 0.000083, 0.0041, 0.0083 とする．これらの初期値はそれぞれ式(4)の減衰係数の収束条件を $0 < \mu_N < 1$ に正規化した場合の$\mu_N = 0.01$, 0.5, 1 に相当する値である．正規化した LMS アルゴリズムは次式で表される．

$$\boldsymbol{w}(t+1) = \boldsymbol{w}(t) + \frac{2\mu_N\epsilon(t)\boldsymbol{x}(t)}{(l+1)\sigma^2} \qquad (11)$$

ファジィ制御の減衰係数の修正量の推定時間を，LMS アルゴリズムによるディジタルフィルタ係数の 121 回分の修正をする処理時間とする．ファジィ制御の入力信号は，二乗誤差を平滑化した値として，121 個の出力信号を加算平均したものを用いる．

そして，ファジィ推論は min-max-重心法を用いる．

3.2.1 減衰係数を固定値の場合のインパルス応答推定のシミュレーション結果

図 3は減衰係数を固定してインパルス応答の推定を行った場合の推定精度$\delta(t)$ の推移である．$\mu = 0.000083$ の場合，$\delta(t) = -20$[dB] に達する時間は $t = 15000$，$\delta(t) = -30$[dB] に達する時間は $t = 22000$ である．推定精度の良いインパルス応答の推定が行われているが，推定に時間がかかり過ぎている．$\mu = 0.0041$ の場合，$\delta(t) = -20$[dB] に達する時間は $t = 600$ と $\mu = 0.000083$ の場合に比べて短くなっているが，$\delta(t) = -30$[dB] まで推定ができない．$\mu = 0.0083$ の場合，発散してインパルス応答の推定ができていない．

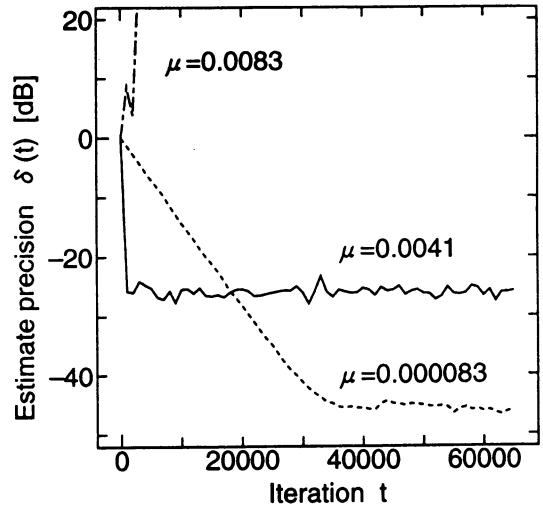


図 3 μ固定値の場合のインパルス応答推定の推定精度の推移

3.2.2 減衰係数をファジィ制御で修正する方法によるインパルス応答推定のシミュレーション結果

図 4は減衰係数をファジィ制御で修正する方法によるインパルス応答の推定を行った場合の推定精度$\delta(t)$ の推移である．$\mu = 0.000083$ の場合，$\delta(t) = -20$[dB] に達する時間は $t = 10000$，$\delta(t) = -30$[dB] に達する時間は $t = 14000$ である．$\mu = 0.0041$ の場合，$\delta(t) = -20$[dB] に達する時間は $t = 600$，$\delta(t) = -30$[dB] に達する時間は $t = 11000$ である．$\mu = 0.0083$ の場合，$\delta(t) = -20$[dB] に達する時間は $t = 18000$，$\delta(t) = -30$[dB] に達する時間は $t = 35000$ である．

図 5は減衰係数の初期値を変化させた場合について時刻 $t = 40000$ における推定精度を示したものである．減衰係

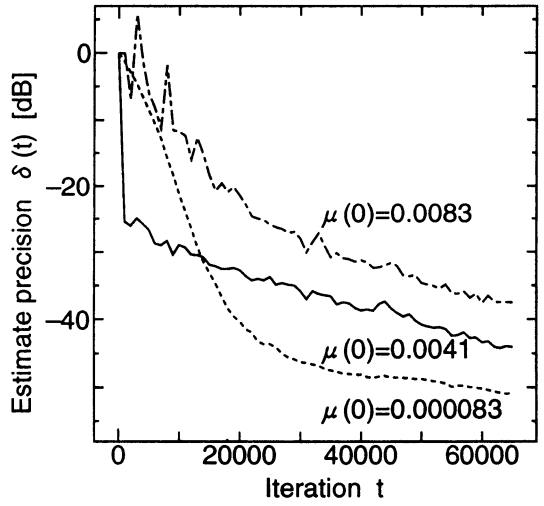


図 4 $\mu(t)$ をファジィ制御で修正する方法によるインパルス応答推定の推定精度の推移

数の初期値に関わらず，減衰係数を固定値とする場合と比べてファジィ制御で修正する方法が推定精度の向上が図れたことが分かる．

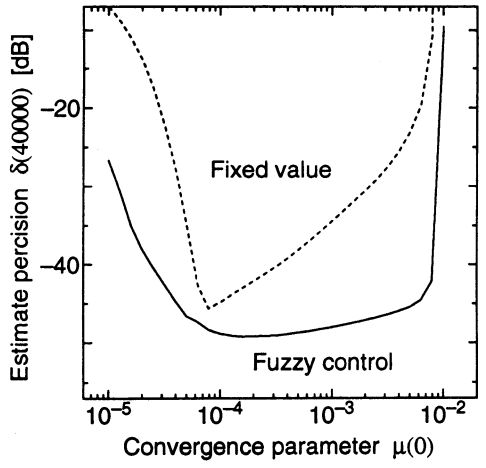


図 5 t=40000 における減衰係数と推定精度

以上のシミュレーション結果から，LMS アルゴリズムでインパルス応答推定中に減衰係数を修正する方法が有効であることが確かめられた．ここでは図示していないが $\mu(0)$ =0.007, 0.001, 0.0005 の場合でも減衰係数をファジィ制御で修正する方法によって推定時間の短縮と推定精度の向上が可能である．減衰係数の修正にファジィ制御を用いることで，減衰係数の値を切り換えるための二乗誤差の大小の判断の難しさを補うことができた．

減衰係数を固定する従来の方法に比べてファジィ制御を用いて減衰係数を修正することで推定時間の短縮ができた．さらに，$\mu(0)$ の値が収束条件より大きな値の場合でも減衰係数を小さな値に修正することでインパルス応答を推定できることが分かった．

以上のシミュレーション結果より，LMS アルゴリズムにおいて減衰係数の値は重要であり，減衰係数をファジィ制御を用いて修正すると，推定時間の短縮と推定精度の向上を同時に達成できることが分かった．

4. 結論

本論文では，ディジタルフィルタ係数の推定を行う際，減衰係数を固定値とする LMS アルゴリズムを用いる場合の減衰係数の影響について示した．その結果，減衰係数が固定値では推定時間の短縮と推定精度の向上を同時に求めることが困難であることが分かった．

そこで，LMS アルゴリズムの減衰係数をファジィ制御を用いて修正する方法を提案した．フィルタ係数推定中に減衰係数を修正することで推定時間の短縮と推定精度の向上を図ることができた．この方法は，LMS アルゴリズムの減衰係数を正規化しファジィ制御で修正する方法と同様の効果がある結果である．さらに，減衰係数の大小を判断するファジィ集合を必要とするが，入力信号の分散とフィルタのタップ数を用いた計算がなくなったため LMS アルゴリズムの計算が簡単になった．

今後の検討課題はここで用いられているファジィ集合の最適化である．

参考文献

[1] B. Widrow, S. D. Strarms:“Adaptive Signal Processing”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1985).

[2] 浜田：“アダプティブフィルタの基礎”，日本音響学会誌, Vol.45, pp.624-630, pp.731-738 (1989).

[3] R.W.Harris, D.M.Chabries, F.A.Bishop：“Variable Step (VS) Adaptive Filter Algorithm”, IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol.ASSP-34, No.2, pp.309-316 (1994).

[4] 岡崎, 武藤, 柴山:“伝達関数同定における適応アルゴリズムの減衰係数の制御法の一検討”, 信学技報, EA94-23, pp.29-35 (1994).

[5] L. A. Zadeh:“Fuzzy sets”, Information and control, No.8, pp.338-353 (1965).

[6] 武藤, 岡崎, 柴山, 島田:“適応システムにおける減衰係数の制御について”, 10th Fuzzy System Symposium, WE5-2, pp.141-144 (1994).

[7] 奥田：“AIC”, 日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.4, pp.633-635 (1986).

[8] 谷荻：“ディジタル信号処理 3”, コロナ社 (1986).

〒116 東京都荒川区南千住 8-52-1
東京都立航空工業高等専門学校
電子工学科
武藤憲司
TEL : 03-3801-0145
FAX : 03-3801-9898
E-mail : muto@comu1.kouku-k.ac.jp

FE5-3

実システムにおける最適性と安定性の妥協

The compromise of Optimality and Stability for Real System

増井　重弘　　寺野　寿郎　　関口　俊宏　　高椋　真司
Shigehiro Masui　Toshiro Terano　Toshihiro Sekiguchi　Shinji Takamuku

法政大学
Hosei Univ.

Abstract

There is trade-off relation between optimality and stability for fuzzy control. For example, the fuzzy feedback control rules which is designed by fuzzy dynamic programming, optimality has much priority to stability. Therefore, the oscillation of output continues for a long time around the goal. On the other hand, the controller which purpose is to solve the problem of stability doesn't oscillate around the goal, but it takes long time to reach the goal. Then, by switching the two controllers there could be possibility of getting a good control action. In this paper, I suggested the method for designing the controller which is a compromise between optimality and stability. This Fuzzy contoroller perform the good control result for real system.

1　はじめに

本研究では，制御ルールの設計における１つの手法として，ファジィ DP を用いると共に安定性を考慮した制御ルールの設計を試みた．

ファジィ DP をもとにしたコントローラは大胆な操作，安定性を重視したコントローラは収束を速める操作を行うので，この２つの制御ルールを切り替えることで

１つのコントローラとして設計していく．切り替え条件は，実システムである台車の位置制御装置を用いて，目標領域を変え検討することにより決定する．

この実験結果より，実システムへの最適性と安定性を同時に満足させるファジィコントローラ設計手法を提案する．

2　制御対象

本研究では，制御の目的が台車の位置制御であることから，制御対象を積分 + むだ時間要素としてシミュレーション実験を行い，そこで求められたコントローラによる台車の位置制御を行う．

制御系のブロック線図を図1に示す．図1において，τはサンプリング時間，G(S) は０次ホールドを含んだ制御対象の伝達関数，e(t) はファジィコントローラ (位置型) への入力 (ベクトル $[e, \Delta e]$) で，目標値 R (=一定値) と制御対象の出力 $x(t)$ より計算される偏差 $e(t)$ および偏差の変化分 $\Delta e(t)(= e(t) - e(t-1))$ であり，コントローラ出力を u(t) としている．

ここでの t は，離散値化したサンプリング時刻を示す整数である．また，制御対象の特性は，ファジィ制御系を離散時間系として扱うため，制御対象の伝達関数を z 変換により離散値化した式 (1) を状態方程式の形で求めて扱っていく．

$$G(z) = \frac{k/T \cdot \tau \cdot z^{-d}}{z-1} \tag{1}$$

ここで，k:ゲイン，T:積分時間，L:むだ時間，τ: サンプリング間隔，$d = L/\tau$(整数) である．

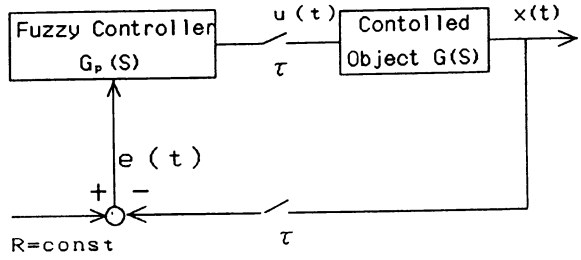


図 1: ファジィ制御系

3 最適性重視のコントローラ

3.1 ファジィ DP

ファジィ DP は，与えられたファジィ制約，ファジィ目標を満たす最適な時系列解を求めるものである．つまり制御系に適用すると，コントローラ出力 $u(t)$ が，与えられたファジイ制約 μ_c を満足し，かつ，制御対象の状態 $\mathbf{e}(t)$ が与えられたファジィ目標 μ_G にできるだけ短時間で到達させるコントローラ出力の時系列 $\mathbf{u}(t)$ が求められる．

これを求める指標となる目標到達ベクトル π の要素は，各状態 $\mathbf{e}_1,\ldots,\mathbf{e}_n$ における決定のメンバーシップ関数の値となっている．水本の方法に従った，ファジィ行列表現では，

$$\omega = B\omega \oplus \gamma \tag{2}$$

となる．ここで，$\oplus$ はファジィ行列和であり，ω は離散化した各状態 E の要素を示す．また，B は状態推移，γ はファジィ制約とファジィ目標によって決まる行列である．

行列の構成要素は以下のようにして求めている．

$$\omega = [\mu_D^{Max}(\mathbf{e}_1),\ldots,\mu_D^{Max}(\mathbf{e}_n)]^{\mathsf{T}}$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 0 \\ \bigvee_j \{\mu_c(\alpha_j) \wedge \mu_G(\mathbf{e}_i)\} \end{cases}$$

$$\gamma = [\gamma_1,\ldots,\gamma_n]^{\mathsf{T}}$$
$$\gamma_i = \bigvee_j \{\mu_c(\alpha_j) \wedge \mu_G(f(\sigma_i,\alpha_j))\}$$

初期状態 $\omega^0 = (0,\ldots,0)^{\mathsf{T}}$ を用いて，式 (2) は次式のように表される．

$$\omega^{k+1} = B\omega^k \oplus \gamma \tag{3}$$

式 (3) は，$\omega^k = (B^{k-1} \oplus B^{k-2} \oplus,\ldots,\oplus B \oplus I)\gamma$ と表され，$\omega^0,\omega^1,\ldots$ は，非単調減少であり，任意の k に対して $\omega^k \leq (1,\ldots,1)^{\mathsf{T}}$ である．式 (3) を繰り返し計算することによって，各状態における最適出力を求めることができる．

3.2 フィードバック制御系の構成

ファジィ DP で得られた結果を状態で置き換えることでフィードバック型の制御ルールの作成を行う．ファジィＤＰの結果より，有限個の状態における最適出力が求まるので，これを図 2 に示す設定をもとに変換を行った (a=3.0,b=6.0,c=9.0)．ここで，制御ルールの前件部に対する後件部の重複もあるが，μ_D の値が最も大きいルールを取り，後件部ファジィラベルとする．

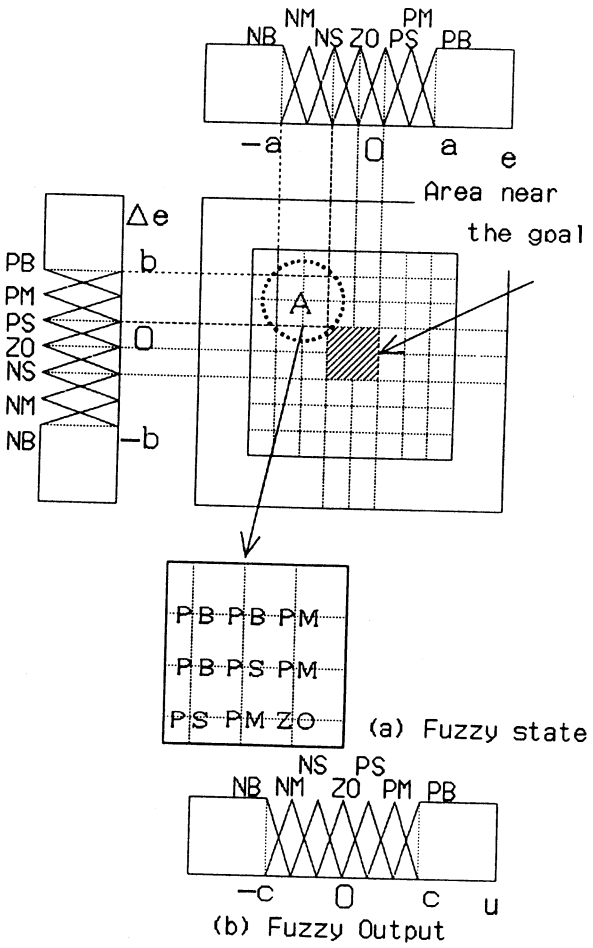


図 2: 制御ルールの生成

4 安定制重視のコントローラ

安定性重視のコントローラを位相面解析の結果を目安として構築する．ここで用いる位相面解析の方法は，ファジィコントローラが柔軟に機能する原点近傍の位相面を分割した各格子点ごとの特性方程式より安定判別を行うものである．安定判別は，離散時間系における安定判別の 1 つである Jury の判別法により行う．

5 制御ルールと制御結果

5.1 制御ルール

まず, 制御対象を k =1.0, L =0.07, T =0.14, τ =0.02 の数値とするシミュレーション実験を行った. この時用いるファジィ DP から求められた制御ルールを表 1に示す.

表 1: ファジィDP による制御ルール

		e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Δe	PB	NS	PB	PB	PB	PB	PB	PB
	PM	NS	PS	PB	PB	PB	PB	PB
	PS	NB	NS	ZO	PB	PB	PB	PB
	ZO	NB	NB	NS	ZO	PS	PB	PB
	NS	NB	NB	NB	NB	NS	PS	PB
	NM	NB	NB	NB	NB	NB	NS	PB
	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	PS

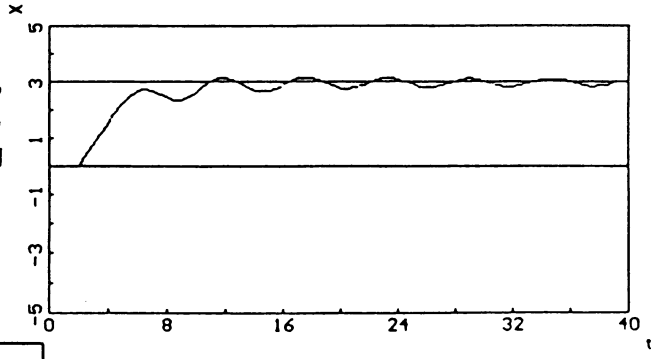


図 3: 制御結果 1

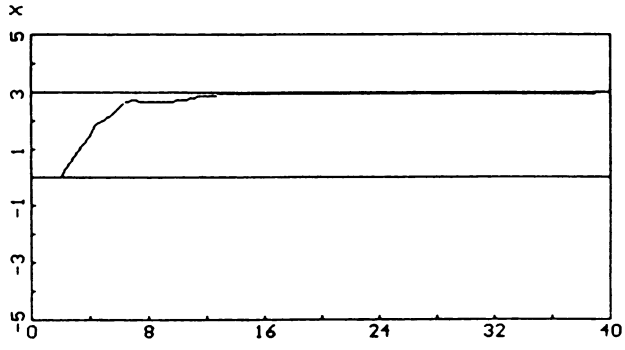


図 4: 制御結果 2

5.2 制御結果

ファジィ DP から得られた最適性重視のコントローラ, 更に安定性重視のコントローラへと切り替えた (DP の設定時における目標領域で) 制御結果を図 3, 4に示す. 切り替え後の前件部は, 目標領域の状態を更に分割したものを用いた. その結果, ファジィ DP から得られたコントローラは, 原点付近に向かって特に大きな操作量を加えるため, 立ち上がりは速いがそれを抑える操作もうまく働き, オーバーシュートを抑え込むが, 目標値付近での振動を残してしまっている.

目標領域での (図 2の斜線部分) コントローラの切り替えを行うと, 収束へ向かうが, 切り替えの条件としては目標領域はメンバシップ関数における (zo,zo) 領域, スケールにおける 1/3 にあたる領域で行ったときが一番良い結果が得られた. ここに示した例は, ファジィ DP の設計が良好に行われた結果と思われる.

シミュレーションでの結果をふまえて台車装置における位置制御実験を行った. その概略図を図 5に, 制御結果を 6に示す. シミュレーションより挙動が激しいが, 安定生を重視したコントローラが強く機能することで, 目標値への収束は良好であった.

6 むすび

コントローラ部の構築をファジィ DP を取り入れて行った. まずシミュレーション段階の結果として, 立ち上がりの速いルール構成 (最適性) が得られ, 安定重視の制御ルールとの組み合わせることで更に良好な結果が得られた. 切り替え条件はファジィ DP で設定した目標領域とすることで, 最もスムーズな制御動作を行うことが認められた. これは, ファジィ DP のルールが制御系の特性に適した形で設計された結果であると思われる. 実システムへの適

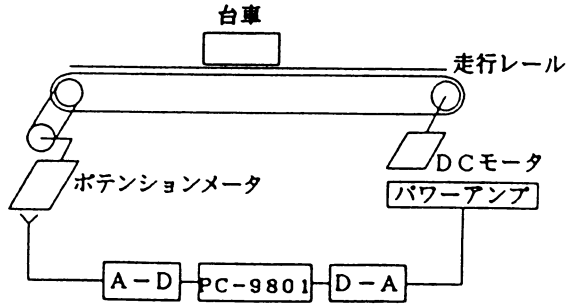


図 5: 台車装置の概略図

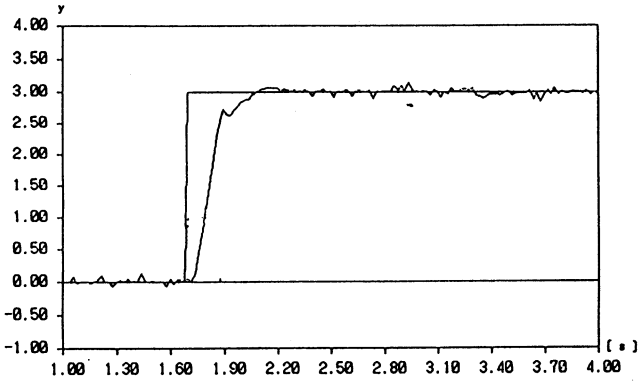


図 6: 制御結果

用として行った台車の位置制御装置でも，切り替えによる制御の有効性が見られた．今後，ファジイコントローラの設計方法として本提案による手法が，更に拡大、応用されていくことを期待する．

参考文献

[1] 藤本, 村上：ファジィ制御系（1次遅れ+むだ時間、積分系）におけるスケーリングファクタの最適調整, 8th Fuzzy System Symposium, pp.553 ～ 559, (1992)

[2] 水本：ファジィ理論とその応用, サイエンス社, pp.240 ～ 248, (1987)

[3] 北条, 寺野, 増井：位相面によるファジィ制御系の安定解析, 日本ファジィ学会誌, vol.4, No.6, pp.893 ～ 905, (1992)

[4] D. Filev, P. Angelov : Fuzzy optimal control, Fuzzy Sets and Systems 47, pp.151 ～ 156, (1992)

[5] R.palm : Sliding Mode Fuzzy Control, FUZZ-IEEE'92, pp.519 ～ 526. (1991)

連絡先

〒184 東京都小金井市梶野町 3-7-2
法政大学工学部システム制御工学科
TEL : 0423-87-6249
E-mail : masui@sghr.sc.hosei.ac.jp
増井　重弘 (Shigehiro Masui)

FF2-1

あいまいカテゴリの形成機構 ― モデル化の試み

Mechanism of Vague Category Formation - Attempt of modeling

中村和男
Kazuo Nakamura
長岡技術科学大学 計画・経営系
Dept. of Planning and Management, Nagaoka University of Technology

Abstract - For investigating semantic vagueness of linguistic categories fuzzy integral mechanism of relevant primitive features via fuzzy measures have been introduced in my preceding presentations. In this paper mechanism of composite category formation is proposed by aggregating fuzzy measures of the component vague categories, and mechanism of graded semantic relation, i.e., similarity and narrower relations, is formalized by comparing paired fuzzy measures of relevant categories.

1．はじめに

これまで、日常的なコミュニケーションや思考に用いられる言語カテゴリを対象にその意味的あいまい性の特質の定性的な検討を行い、内包的な視点からのその形成メカニズムのモデル化のための概念的考察を行ってきた[1)2)]。

そこでは言語のもつ意味的あいまいさとして、大別して三つの視点からとらえてきた。一つは、そのカテゴリが指示す対象（モノ、コト）の集合としてとらえるとき帰属の当否を明確にしがたい場合があること、一つはそれを他のカテゴリと識別するのに必要な示差的特徴の記述として表わしたいがそうした特徴を明確に定義できない場合があること、そして一つは他のカテゴリとの類義性、上位／下位性といった関係によってとらえるのにそうした関係に程度を考慮しなければならないことがあるというものである。

こうした日常言語カテゴリにおけるあいまいさに対する数理的アプローチとして、文献1)において第1の視点と第2の視点を結び付ける多面的特徴の柔軟な統合化モデルを提案した。さらに文献2)では、これを踏まえて日常的言語カテゴリの形成の様態を考察した。

ここでは、この特徴統合モデルにおいてカテゴリの意味の本質がいくつかの基本的特徴集合上のファジィ測度にあることに着目し、第一に複合的カテゴリの形成機構をモデル化し、つぎにカテゴリ間の類似関係、上位・下位関係といったあいまい関係の導出モデルについて述べ、最後に基本特徴の測度の形成機構について考察を加える。先ず対象の帰属度を多面的特徴の柔軟な統合によって規定するモデルの概要を述べる。

2．ファジィ特徴統合モデル

言語カテゴリ A の形成に係わる特徴群を $P=\{p1,p2,\cdots,pm\}$、対象 x のこれら特徴への適合度（$\in[0,1]$）を $f(p1;x)$, $f(p2;x)$, $\cdots$, $f(pm;x)$ としたとき、これら特徴の組合わせとしての P の各部分集合 Q に対してそのカテゴリ A の意味づけへの重要度としてファジィ測度 $\nu(Q)$ が導入できるとして、カテゴリ A への対象 x の帰属度 $\mu_A(x)$ が、$f(p;x)$ の ν によるショケ積分

$$\mu_A(x)=(c)\int f(p;x)\circ\nu \qquad (1)$$

として得られると考える。ここに $\nu(Q)$ は特徴の部分集合 Q に含まれる特徴群がカテゴリ A の意味を規定するのにどの程度寄与しているのかを表わしている。この構造を表わしたのが図1である。

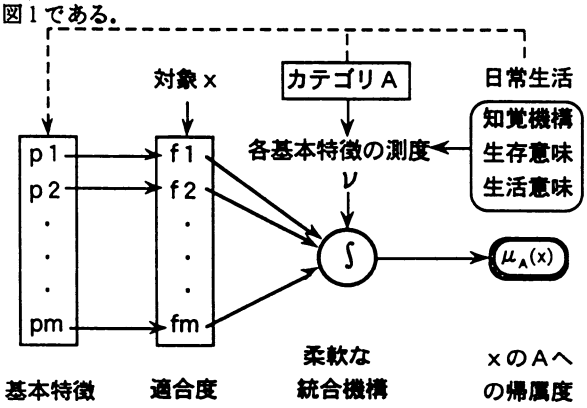


図1 ファジィ特徴統合モデルの構造

すなわちこの定式化では、特徴の部分集合の寄与度であるファジィ測度 ν の分布自体がカテゴリ A に関するプロトタイプの特徴空間上での表現であり、意味そのものである。

日常的な言語カテゴリ形成の様態を見るとき、ファジィ特徴統合モデルの具体的適応に当たって取り組むべき研究課題として以下のものが挙げられる。まず第一に複合的カテゴリの形成機構のモデル化である。現実には多くのカテゴリが基本のカテゴリや既存のカテゴリの複合によって形成される。赤と黄色の統合としての「オレンジ色」、「パソコン」、「ごみ箱」などが典型であろう。第二には、カテゴリ間のあいまいな意味的関係としての類似性、上位／下位性などの導出機構のモデル化である。ν_A と ν_B 間の比較、合成操作が必要になる。さらに深いカテゴリ形成機構の理解のためには、P や ν の形成機構を明らかにしていく必要があろう。

3．複合カテゴリの形成機構のモデル

いま二つのカテゴリA，Bがある。これらを何らかの意味で結び付けて複合概念A＊Bが形成されているとする。このとき、特徴集合Pの上のファジィ測度分布 ν_A と特徴集合Q上の ν_B とからP∪Q上のファジィ測度 ν_{A*B} を合成するための情報処理モデルを構成したい。ここでは以下の2段階の処理モデルを提案する。

<第1段階>

任意のP、Qの部分集合をそれぞれπ、ρとする。このときπ∪ρを簡単化のためにπρとあらわすと、

$$\nu^{\#}_{A*B}(\pi\rho)=\nu_A(\pi)@\nu_B(\rho) \quad (2)$$

ここで複合化＊の意味に応じて具体的演算@が決まる。例えば＊がand系であれば@はt－ノルム、or系であればt－コノルムとするのが妥当であろう。この操作をすべての可能なπ、ρの組み合わせに対して行う。

<第2段階>

つぎに特徴π、ρの組み合わせπρが現実の世界の事象として意味のある組み合わせかどうかが評価され、十分に意味のある場合には数値1、意味のないときには0が、そして一般的には［0，1］の数値が割り付けられる。これを$\lambda(\pi\rho)$と表わす。その上で、

$$\lambda\nu^{\#}_{A*B}(\pi\rho)=\min\{\lambda(\pi\rho),\ \nu^{\#}_{A*B}(\pi\rho)\} \quad (3)$$

と置きその値のうちすべての組み合わせπρにおける最大値

$$\alpha=\max_{\pi\rho}\ \lambda\nu^{\#}_{A*B}(\pi\rho) \quad (4)$$

を求める。そして、任意のπρについて次式で$\nu^{\#}_{A*B}(\pi\rho)$をノルマライズしたものを最終的な$\nu_{A*B}(\pi\rho)$とする。

$$\nu_{A*B}(\pi\rho)=\min\{\nu^{\#}_{A*B}(\pi\rho),\ 1\} \quad (5)$$

［例］言語カテゴリAおよびBとして、Petとを取り上げる。すると複合カテゴリA＊BとしてPet Fishを考える。ここでは簡単にPetとFishのそれぞれの特徴としてp1:家で飼育可、P2:人になつく、およびc1:水中棲息、c2:泳ぐとして、それらに対するファジィ測度

$\nu_{Pet}(p1)=0.6,\ \nu_{Pet}(p2)=0.7,\ \nu_{Pet}(p1p2)=1.0,$

$\nu_{Fish}(c1)=0.0,\ \nu_{Fish}(c2)=0.3,\ \nu_{Fish}(c1c2)=1.0,$

が与えられたとする。

すると第1段階として次の$\nu^{\#}_{PetFish}(\pi\rho)$をすべての組み合わせπρについて取得する。@としてminを採用する。

表1　種々のπρに対する$\nu^{\#}_{PetFish}(\pi\rho)$

	Fish ρ			
	φ	q1	q2	q1q2
φ	0	0	0	0
Pet p1	0	0	0.3	0.6
π p2	0	0	0.3	0.7
p1p2	0	0	0.3	1.0

さらに第2段階として次の$\lambda(\pi\rho)$が与えられたとする。ここに、「なつく水中棲息動物」はほとんど意味のない特徴となり、「なつく泳ぐ動物」はラッコ位であまり意味がないとしたものである。

表2　種々のπρに対する$\lambda(\pi\rho)$

	Fish ρ			
	φ	q1	q2	q1q2
φ	—	1	1	1
Pet p1	1	1	1	1
π p2	1	0.2	0.5	0.2
p1p2	1	0.2	0.5	0.2

すると$\alpha=0.6$となり、最終的には次の合成された$\nu_{PetFish}$を得る。これによって$\mu_{PetFish}(guppy)>\min\{\mu_{Pet}(guppy),\ \mu_{Fish}(guppy)\}$が可能となる。

表3　種々のπρに対する$\nu_{PetFish}(\pi\rho)$

	Fish ρ			
	φ	q1	q2	q1q2
φ	0	0	0	0
Pet p1	0	0	0.5	1
π p2	0	0	0.5	1
p1p2	0	0	0.5	1

4．カテゴリ間の意味的関係の導出モデル

二つの言語カテゴリA，B間の類義関係、下位関係をファジィ関係としてν_A、ν_Bの比較操作により導出する。ここでは特徴集合の全体集合をP∪Qとして共通化しておき、ν_A、ν_Bもその上の部分集合πに対して導入されているとする。

<ファジィ類義関係>

AはBと類義であるというファジィ関係の度合を

$$S(A,B)=M\ (\min\{\nu_A(\pi),\nu_B(\pi)\})\ /M\ (\max\{\nu_A(\pi),\nu_B(\pi)\}) \quad (6)$$

ただし

$$M\ (\nu(\pi))=\Sigma_{\pi\subset P\cup Q}\ \nu_A(\pi) \quad (7)$$

すなわち、ファジィ測度の分布パターン$\nu_A(\pi),\nu_B(\pi)$が類似していれば言語カテゴリA，Bも類似しているとするものである。

<ファジィ下位関係>

AはBの意味的に下位にあるというファジィ関係の度合を

$$N(A,B)=M\ (\min\{\nu_A(\pi),\nu_B(\pi)\})\ /M\ (\nu_A(\pi)) \quad (8)$$

例えばP∪Qとして｛p，q，r｝があり、Aはp，rを共に有することがその意味であり、Bはq，rを共に有すること、Cは少なくともrを有することがその意味であるとする。すると、

$\nu_A(p)=\nu_A(q)=\nu_A(r)=\nu_A(pc)=\nu_A(qr)=0$、

$\nu_A(pr)=\nu_A(pqr)=1.0$、

$\nu_B(p)=\nu_B(q)=\nu_B(r)=\nu_B(pq)=\nu_B(pr)=0$、

$\nu_B(qr)=\nu_B(pqr)=1.0$、

$\nu_C(p)=\nu_C(q)=\nu_C(r)=\nu_C(pq)=0$、

$\nu_C(qr)=\nu_C(pr)=\nu_C(pqr)=1.0$、

と置けて、

$S(A,B)=S(B,A)=0.33$、$S(A,C)=S(B,C)=0.67$

$N(A,C)=N(B,C)=N(C,C)=1.0$、$N(C,A)=N(C,B)=0.67$

5．おわりに

ファジィ特徴統合モデルで特徴集合Pとそのファジィ測度νがどのように形成されるのかについて言及していないが、現実のカテゴリの形成モデルとしてはその獲得、構成機構のモデル化が望まれる。定性的には文献2)では、人間の知覚機構、生存、生活経験などによる形成機構の可能性を考察したが、今後その数理的モデル化を図りたい。

<参考文献>

1)中村和男、あいまいカテゴリの意味的構造に関する考察、第10回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ、1994.

2)中村和男、あいまいカテゴリの形成について、第5回ﾉﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞﾌｧｼﾞｨﾜｰｸｼｮｯﾌﾟ、1995.

連絡先

〒940-21　新潟県長岡市上富岡町1603-1

長岡技術科学大学計画・経営系

中村和男

TEL0258-46-6000ext.3119　　FAX 0258-46-6504

11th Fuzzy System Symposium (Okinawa,July 12～14,1995)

FF2-2

メジアンポリッシュによる多元ファジィデータの探索的解析

Exploratory Analysis of Multi-way Layout Fuzzy Data by Median Polish

長沢 伸也
Shin'ya NAGASAWA

立命館大学経営学部
Fac. of Bus. Admin., Ritsmeikan Univ.

Abstract: This paper argues the analysis model for subjective 'Kansei' data (fuzzy data) by absolute evaluation. The ordinal statistical models such as ANOVA (analysis of variance) model are not suitable because they suppose the normal distribution as error's distribution and are not robust to outliers. The author insists that the EDA (Exploratory Data Analysis) is appropreate to fuzzy data analysis and multi-way layout fuzzy data has been successfully analyzed by the median polish of EDA.

1．緒　言

最近は、快適性、使いやすさ、選好、満足度などの感性的な品質や、これが重要なウエイトを占める商品を問題にすることが多くなっている。このような人の感性による品質評価や商品評価は、人間が主観的に感じることであるから、あいまいな点数や言葉で表されることがほとんどであり、これを便宜的に通常の数値データとみなして収集および統計処理を行うことは当然適切ではない。そこで、感性品質や感性商品の評価に関する情報やデータを体系的に収集し処理・分析して、感性デザインの開発を支援するマーケティング情報システムを構築することを目的として、感性情報の計測ならびに解析のための統計手法や分析モデルの改良等を著者は試みている[1]。

通常の分散分析法では、正規分布を仮定したり、外れ値や異常値に敏感に反応したりするため、人の主観によるあいまいな感性評価データ（ファジィデータ）の解析には必ずしも適切でない。そこで、著者は、Tukey,J.W.らが提案している「探索的データ解析」の一手法であるメジアンポリッシュ（中央値精錬法）により二元分類ファジィデータを解析することを試み、その有効性を明らかにした[2]。

しかし、適用した例題のデータは本来は三元表の形をしているため、繰返しのない二元分類データのメジアンポリッシュを２回適用したが、解析の手間や厳密性の点で必ずしも適切ではない。

そこで、本論文では、Tukeyらが提案している「二元分類データのメジアンポリッシュ」を多元分類データに拡張した方法を提案し、三元ファジィデータへの適用例を示すことにより、その有効性を明らかにする。

2．ファジィデータへの探索的データ解析の適用

2.1 探索的データ解析

探索的データ解析（Exploratory Data Analysis，略してＥＤＡ）はTukey，J.W.らデータ解析派と呼ばれる統計学者によって主張されているデータ解析の考え方、手法の体系である。

ＥＤＡの目標は、①先入観や偏見を持たずにデータの示唆するところを抽出すると同時に、②その示唆の確かさの程度をできるだけ明らかにすることである。算術平均、標準偏差、相関係数といった通常用いられる要約統計量は、正規性の下では標本の全てを含む十分統計量ではあるが頑健性を持たない。ＥＤＡでは頑健な要約統計量（ロバスト推定値）と視覚に訴える図的表示を利用して、データの分布パターン・変数間の関連・反応変数の説明変数への依存性等を要約し、同時に単純なモデルによっては説明しきれないデータの挙動を摘出しようとする[3][4]。

2.2 ファジィデータへの探索的データ解析の適用

メンバーシップ関数値として表されるファジィデータは、人間一人一人の主観により決定されるため各人の気持ちを的確に表現することができる。しかしその反面、「蓼喰う虫も好きずき」といった主観の相違による外れ値や異常値といったものが通常の数値データよりも出やすく、その分布形も非対称となりやすいと考えられる。

ＥＤＡは、前述のように頑健な要約統計量を用い、通常の推測法のように分布の正規性を仮定せず、外れ値の混入などに対し頑健性があるため、上述の特徴を有するファジィデータの解析に適していると思われる。

3．メジアンポリッシュによる二元ファジィデータの解析

3.1 二元分類データと二元分析

二つの要因が与えられ、その要因のもとで観測されたデータを一般に二元分類データという。ＥＤＡにおける二元分析とは、このような二元分類データを対象として、データの変動を二つの要因によって説明しようとするものである。

第ｉ行、第ｊ列のセルの観測値をy_{ij}とする。二元分析の基本モデルは、列行和モデルと呼ばれ、y_{ij}を共通中央値m，(ｉ，ｊ)セルの観測値y_{ij}に対応するｉ行効果a_iとｊ列効果b_j，および残差r_{ij}の和で表現する。これを式で表せば、

$$y_{ij}=m+a_i+b_j+r_{ij} \qquad (1)$$

となる。ここで、共通中央値とは、二元分類表を構成するすべてのデータをまとめて一つのバッチとしたとき、その分布の位置に相当するものである。したがって、共通中央値は観測値の大きさの水準を表すことになる。また、行、列効果とは、同じ要因を共有する観測値、すなわち、同じ列または行に含まれる観測値の分布が、この共通中央値からどの程度はなれているかを表したものである。また、列行和モデルでは、要因の効果に加法性を仮定しており、共通中央値、行効果、および列効果の和でモデルによる予測値（モデル値）を求め、観測値とそのモデル値の差が残差となる。

ＥＤＡにおいてはメジアン（中央値）が重視されるが、これは二元分析でも同様であり、各効果の推定のためにメジアンを用いたメジアンポリッシュ（median polish，中央値精錬法）と呼ばれる方法が用いられる[5]。なお、メジアンポリッシュの計算手順については省略する。

3.2 適用例

ファジィデータとして、旅行プランの選好に関するアンケート結果を用いる。都市をロンドン、パリ、ローマおよびウィーンの４水準、滞在日数を５日、７日、９日および11日の４水準とし、４×４＝16通りの組合せをランダマイズして、それぞれの旅行プランに行きたいと思う度合いを大学生にメンバーシップ関数値で回答させた。任意の２名の回答者の結果を抜粋したものを表１に示す。

表１のデータは三元表の形となっているので、１つの因子を繰返しとみなし、二元表の形にして解析を行う。

人を繰返しとみなすと表２(a)のようになり、これをメジアンポリッシュしていく。反復計算は、行から開始する。行と列それぞれの中央値と残差行列を求めていき、行・列どちらかの中央値が全て０または十分小さくなったところで計算を終了し、共通中央値、行効果および列効果を求める。その途中経過は省略して、結果のみを表２(b)に示す。主効果および交互作用のグラフも省略する。モデルは式(1)であるから、例えばロンドンに５日間滞在する組合せのモデル値y_{11}は次のようになる。

表１　アンケート結果

都市	人	滞在日数 5日	7日	9日	11日
ロンドン	P_1	0.0	0.5	0.6	0.8
	P_2	0.6	0.9	0.9	1.0
パ　リ	P_1	0.3	0.7	0.8	1.0
	P_2	0.8	0.5	0.6	0.1
ロ ー マ	P_1	0.0	0.5	0.6	1.0
	P_2	0.5	0.4	0.1	0.4
ウィーン	P_1	0.0	0.5	0.6	0.8
	P_2	0.4	0.2	0.1	0.0

表２　人を繰返しとみなした場合の解析

(a) 二元表

都市＼滞在日数	5日	7日	9日	11日
ロンドン	0.30	0.70	0.75	0.90
パ　リ	0.55	0.60	0.70	0.55
ロ ー マ	0.25	0.45	0.35	0.70
ウィーン	0.20	0.35	0.35	0.40

(b) メジアンポリッシュの最終結果

都市＼日数	5日	7日	9日	11日	行効果
ロンドン	-0.2542	-0.0125	0.0125	0.0625	0.1792
パ　リ	-0.0708	-0.0375	0.0375	-0.0125	0.1042
ロ ー マ	-0.0209	0.2087	-0.1041	0.1459	-0.1042
ウィーン	0.0208	0.0125	-0.0125	-0.0625	-0.1958
列 効 果	-0.1708	-0.0125	0.0125	0.1125	0.5458

表３　都市を繰返しとみなした場合の解析

(a) 二元表

滞在日数＼人	P_1	P_2
5日	0.00	0.55
7日	0.50	0.45
9日	0.60	0.35
11日	0.90	0.40

(b) メジアンポリッシュの最終結果

滞在日数＼人	P_1	P_2	行効果
5日	-0.35	0.35	-0.2
7日	-0.05	0.05	0.0
9日	0.05	-0.05	0.0
11日	0.25	-0.25	0.1
列効果	0.075	-0.075	0.475

$y_{11}=m+a_1+b_1=0.5458+0.1792-0.1708=0.5542$

これに残差$r_{11}=-0.2542$を加えた0.3が観測値である。

次に、滞在日数と人を因子とし都市を繰返しとみなした場合の解析は、人を繰返しとみなした場合と同様であるので、二元表を表３(a)に示し、メジアンポリッシュの最終結果のみ表３(b)に示す。

なお、人と都市を因子とし滞在日数を繰返しとみなした場合の解析は省略する。

4．メジアンポリッシュによる多元ファジィデータの解析

4.1 2元分類ファジィデータ解析の問題点

これまで試みたメジアンポリッシュは、本来3つの要因（都市、滞在日数、人）で成り立っている三元分類のファジィデータを、要因の1つを繰り返しとみなすことにより、いわば強引に二元分類として解析してきた。

このため、二元分類データのメジアンポリッシュを2回適用する必要があるため、「二度手間」になる。しかも、繰り返しとみなす要因を代えると、本来同じであるはずの効果に差異を生ずる。例えば、人を繰返しとみなした場合と都市を繰返しとみなした場合とでは、滞在日数5日の効果をみると、表2(b)では-0.1708であるのに、表3(b)では-0.2となっている。

そもそも、人の主観に依存するファジィデータを扱う場合、人という要因は必ずと言っていいほど関係してくる。したがって、表1のように、この人という要因を含めて要因が3つ（あるいはそれ以上）あることは少なくない。要因の1つを繰り返しとみなすことにより「つぶす」ような便宜的な操作で済ましてしまっては、本当にファジィデータを解析したことにはならないといえよう。

4.2 多元分類データと多元分析

以上の観点により、要因が3つ以上ある多元分類データの場合に、これを二元分類として扱うための繰り返しとみなす処理を排除し、データをそのままの姿で多元分類としてメジアンポリッシュで解析する方法を提案する。

その方法は、基本的には二元分類のメジアンポリッシュを拡張した方法である。

例えば三元分類の場合、第i行、第j列、第k層のセルの観測値をy_{ijk}とする。三元分析の基本モデルは、y_{ij}を共通中央値m，(i，j)セルの観測値y_{ij}に対応するi行効果a_i，j列効果b_j，k層効果c_k，および残差r_{ijk}の和で表現する。これを式で表せば、

$$y_{ijk}=m+a_i+b_j+c_k+r_{ijk} \qquad (2)$$

となる。ここで、共通中央値、行、列、層効果とは、2元分析におけるものを拡張して考える。

4.3 適用例

以下、表1のデータの解析を例にとり説明する。

要因が3つある場合、これを二元分類としてメジアンポリッシュを行うときには、要因の一つを繰り返しと考え、その繰り返しとみなす要因のメジアンをとり、その組合せの複数のデータの代表値として解析を行っていた。例えば、人を繰り返しとみなす場合には、ロンドンに5日行く組合せの値はP_1の0.0とP_2の0.6であるから、これらを足して2で割り(0.0+0.6)/2=0.3というようにしてメジアン（中央値）をとっていた。しかし、三元分類のメジアンポリッシュではこれを行わず三元表のまま、つまり表1のままメジアンポリッシュしていく。

表4　行（都市）中央値

ロンドン	パリ	ローマ	ウィーン
0.70	0.65	0.45	0.30

表5　残差行列

都市	人	5日	7日	9日	11日
ロンドン	P_1	-0.70	-0.20	-0.10	-0.10
	P_2	-0.10	0.20	0.20	0.30
パ　リ	P_1	-0.35	0.05	0.15	0.35
	P_2	0.15	-0.15	-0.05	-0.55
ローマ	P_1	-0.45	0.05	0.15	0.55
	P_2	0.05	-0.05	-0.35	-0.05
ウィーン	P_1	-0.30	0.20	0.30	0.50
	P_2	0.10	-0.10	-0.20	-0.30

表6　列（滞在日数）中央値

5日	7日	9日	11日
-0.20	0.00	0.05	0.20

表7　残差行列

都市	人	5日	7日	9日	11日
ロンドン	P_1	-0.50	-0.20	-0.15	-0.10
	P_2	0.10	0.20	0.15	0.10
パ　リ	P_1	-0.15	0.05	0.10	0.15
	P_2	0.35	-0.15	-0.10	-0.75
ローマ	P_1	-0.25	0.05	0.10	0.35
	P_2	0.25	-0.05	-0.40	-0.25
ウィーン	P_1	-0.10	0.20	0.25	0.30
	P_2	0.30	-0.10	-0.25	-0.50

表8　層（人）中央値

P_1	P_2
0.050	-0.075

表9　残差行列

都市	人	5日	7日	9日	11日
ロンドン	P_1	-0.550	-0.250	-0.200	-0.150
	P_2	0.175	0.275	0.225	0.175
パ　リ	P_1	-0.200	0.000	0.050	0.100
	P_2	0.425	-0.075	-0.025	-0.675
ローマ	P_1	-0.300	0.000	0.050	0.300
	P_2	0.325	0.025	-0.325	-0.175
ウィーン	P_1	-0.150	0.150	0.200	0.250
	P_2	0.225	-0.025	-0.175	-0.425

表10　行（都市）効果

	ロンドン	パリ	ローマ	ウィーン	
和	0.744	0.633	0.467	0.367	→中央値0.550
行効果	0.194	0.083	-0.083	-0.183	←0.550を引く

表11　列（滞在日数）効果

	5日	7日	9日	11日	
和	-0.222	0.000	0.067	0.167	→中央値0.083
列効果	-0.305	-0.083	-0.016	0.083	←0.083を引く

表12　層（人）効果

	P_1	P_2	
和	0.050	-0.083	→中央値-0.017
層効果	0.067	-0.066	←-0.017を引く

表13　三元分類のメジアンポリッシュの最終結果

都市	人	滞在日数 5日	7日	9日	11日	人効果	都市効果
ロンドン	P_1	-0.572	-0.294	-0.261	-0.161	0.067	0.194
	P_2	0.161	0.239	0.172	0.172	-0.066	
パ　リ	P_1	-0.161	0.017	0.050	0.150	0.067	0.083
	P_2	0.472	-0.050	-0.017	-0.617	-0.066	
ロ ー マ	P_1	-0.294	-0.017	0.017	0.317	0.067	-0.083
	P_2	0.339	0.017	-0.350	-0.150	-0.066	
ウィーン	P_1	-0.194	0.083	0.117	0.217	0.067	-0.183
	P_2	0.189	-0.083	-0.250	-0.450	-0.066	
日数効果		-0.305	-0.083	-0.016	0.083	共通中央値	0.616

まず最初に行から横（都市）ポリッシュしていくわけであるが、このときP_1とP_2を合わせた合計８つのデータの中からメジアンをとる。例えば都市がロンドンならば、数値を大きい順に並べかえると、

1.0, 0.9, 0.9, 0.8, 0.6, 0.6, 0.5, 0.0

であるから、この４番目と５番目の数値を足して２で割り(0.8+0.6)/2=0.7とする。すると、都市に関するメジアンが４つ求まる。その結果を表４に示す。

ここで得られたデータ表４を表１から引いてこれを残差行列とする。この残差行列を表５に示す。

この残差行列を今度は列について縦（滞在日数）ポリッシュしていく。このときもP_1とP_2を足さずに別々で合計８つのデータとしてメジアンをとる。その結果を表６に示す。

得られた表６のメジアンを表５から引いて残差行列を求める。この残差行列を表７に示す。

二元分類のメジアンポリッシュでは、ここでまた行から横ポリッシュしていくことになる。しかし、提案する三元分類のメジアンポリッシュでは、表７の残差行列からP_1の数値16個、P_2の数値16個を取り出し、それぞれにメジアンをとる。これを高さ（人）ポリッシュと名付ける。この結果を表８に示す。

そして、得られた表８のメジアンを表７から引いて残差行列を求める。この残差行列を表９とする。

次にこれを縦ポリッシュしていく。以降の手順は二元分類のメジアンポリッシュと変わらず、縦、横あるいは高さのいずれかの中央値が全て0.0になるか、十分小さくなるまでポリッシュを続ければよい。そして、収束結果が得られたら共通中央値、行効果、列効果および層効果を求める。結果のみを表10～表13に示す。

4.4 考　察

上記の手順では、行の中央値を求めることから始めているが、列あるいは層から始めてもよい。また、順を替えてもよい。ただし、二元分析の場合と同様、これらの場合の結果が完全に一致するとは限らないし、反復が速く終了してくれるとも限らないが、実用的には数回の反復で十分であり、いずれから始めても、あるいは順を替えても、その差は大きくないと考えられる。

5．結　言

本論文では、絶対評価型のあいまいな感性評価データ（ファジィデータ）の解析方法について検討し、Tukeyらが主張している探索的データ解析を適用することを試み、多元分類ファジィデータにメジアンポリッシュ（中央値精錬法）を適用して解析する方法を提案した。また、これを適用した例を示し、その有効性を明らかにした。

提案方法では、各々の要因の効果が１つの表の中に出ているため、非常に分かりやすくなっている。また、正規分布を仮定する必要がなく、外れ値などに敏感に反応したりしないという通常の統計手法にはない利点がある。

謝　辞

実験および解析に御協力戴いた亜細亜大学経営学部森川謙治君（現、フジフューチャーズ㈱）に深謝します。なお、本研究は平成６年度文部省科学研究費補助金重点領域研究（課題番号：06212223）の補助を受けている。

参考文献

[１]長沢伸也(1995)：感性デザインのためのマーケティング情報システムの基礎的研究、文部省科学研究費補助金重点領域研究「感性情報処理の情報学・心理学的研究」平成６年度成果報告書、267/270

[２]長沢伸也(1994)：メジアンポリッシュによるファジィデータの探索的解析、第10回ファジィシステム・シンポジウム講演論文集、125/128

[３]Tukey, J.W.(1977)：Exploratory Data Analysis, Addison-Wesley

[４]三浦新、狩野紀昭、津田義和、大橋靖雄編(1985)：ＴＱＣ用語辞典、日本規格協会

[５]渡部洋、鈴木規夫、山田文康、大塚雄作(1985)：探索的データ解析入門、朝倉書店

［問い合わせ先］〒603-77 京都市北区等持院北町56-1
立命館大学経営学部　長沢　伸也
Tel.075-465-1111 Fax.075-465-7883

FF2-3

重複区間関数を用いるファジィ区間データの統計分布

Statistical Distributions of Fuzzy Interval Data Using Overlapping-interval Functions

古殿 幸雄 * 浅居 喜代治 * 奥田 徹示 ** 小西 幹彦 **
Yukio Kodono* Kiyoji Asai* Tetsuji Okuda** Mikihiko Konishi**

* 福山平成大学 ** 大阪工業大学
*Fukuyama Heisei University **Osaka Institute of Technology

We proposed several methods of statistical treatment of fuzzy interval data. To using Zadeh's probability of fuzzy events, their methods defined the fuzzy interval data that are obtained by fuzzy observations involving human vagueness. However, their methods have to fix the membership function even roughly. Therefore, we proposed a new method by using overlapping-interval functions instead of membership functions. In this paper, we investigate a distribution of fuzzy interval data. Especially, by using the new method, we make it that an expression of the distribution is very smooth obvious.

1．まえがき

観測データを整理する際に、近接した観測値をまとめてある階級の中に入れ、どのような分布をしているのかを、度数分布（ヒストグラムや度数分布表）などで表す場合がある。これにより、分布の中心はどこか、データのばらつきはどうか、分布は左右にひずんでいないか、分布は平らか、とがっていないか、などを調べることができる。この場合、すでに測定されたデータに対して、そのデータが、どの階級に属しているのかを判断することにより、データが整理され、加工される。度数分布では、整理されたデータの階級値を代表値として、度数と代表値から標本の平均や分散あるいは母集団の平均や分散を推定する。

このようにデータを整理、加工する立場から、あるいは大量のデータを簡単に処理する立場から、統計学の分野において、ある区間に事象が何件発生したかというようなグルーピングデータに関する分析が、Sheppardの補正[１]と関連して、古くから研究されている。この方法は、現在も十分に実用性があるものと考えられる。

ところで、人の意識調査やマーケティングにおける商品やサービスの選好調査などで得られるデータは、グルーピングデータのように、ある区間に属するデータの代表値が得られたものと考えることができるが、これは、明確な区間に事象が何件発生したと判断できるようなデータではない。すなわち、区間の境界がぼやけた状態でデータが得られるものと考えられる。したがって、グルーピングデータに関する研究と同じような立場から、このようなファジィ区間データに対するアプローチが必要である。このような方法として、人の主観的なあいまいさを伴うデータをファジィ区間データとして定義し、このファジィ区間データをファジィ事象と解釈して、ザデーの定義したファジィ事象の確率概念[２]を用いる事で、通常の統計的な処理方法と同様にファジィ区間データを処理する方法が提案されている[３],[４]。

この方法は、ファジィ区間データの中心値を代表値として、この代表値を通常の統計計算に用い、あいまいさの存在する幅とメンバシップ関数の形状とを考慮することで、観測時に生じるあいまいさの影響を補正する。これにより、ファジィ区間データが得られた場合でも、通常の観測によって得られるデータを処理して得られる推定値とほぼ同等の推定値を得ることができる。このとき、人の主観的なあいまいさを伴う観測をファジィ観測と呼び、このファジィ観測は、メンバシップ関数を用いて表現される。

ところで、このファジィ区間データの統計処理を、より簡単に適用するための方法が提案されている[５],[６]。この方法は、ファジィ観測を表現したメンバシップ関数の代わりに重複区間関数を用いることで、ファジィ観測時のメンバシップ関数を定める代わりに、(0,1]区間上の実数値を定めることで、ファジィ区間データの統計処理が可能となる。

本研究では、ファジィ区間データを用いて、その分布型を視覚的にとらえる方法について検討する。特に、重複区間関数を用いることで、その視覚的表現が非常にスムーズになることを明らかにする。

2．ファジィ観測と重複区間関数

ファジィ観測では、観測の段階で、人の主観的なあいまいさを伴い、ファジィ観測値x_iの周りのある幅２hにあいまいさが伴うとして、このファジィ区間データを区間$H_i=[x_i-h, x_i+h]$上のファジィ事象χ_iとして定義している。また、このときのファジィ観測のメンバシップ関数は、$-h\leq x \leq h$ を定義域として、次の３つのタイプのメンバシップ関数を基本形に議論される。

（三角形型） $$\chi(x)=-\frac{1}{h}|x|+1 \qquad (1)$$

（２次曲線型） $$\chi(x)=\frac{2}{h^2}(|x|-h)^2\left[\frac{1}{h}\left(|x|+\frac{h}{2}\right)\right]+\left(1-\frac{2x^2}{h^2}\right)\left(1-\left[\frac{1}{h}\left(|x|+\frac{h}{2}\right)\right]\right) \qquad (2)$$

（台形型） $$\chi(x)=max\left\{0,1\wedge\left(-\frac{1}{2e}|x|+\frac{h}{4e}+\frac{1}{2}\right)\right\} \qquad (3)$$

ここで、[]はガウス記号であり、eの範囲は$0<e\leq h/2$である。

ところで、ザデーが定義したファジィ事象の確率は、

$$P_i=\int_{x_i-h}^{x_i+h}\chi_i(x)f(x)dx \qquad (4)$$

である。ここで$f(x)$は母集団の確率密度関数であり，$\chi_i(x)=\chi(x-x_i)$となり，$x_{i+1}=x_i+h\,(i=0,\pm1,\pm2,\cdots)$である。

このようなファジィ観測におけるメンバシップ関数に対して、重複の目安$\alpha\in(0,1]$によって定まる、区間$H_{\alpha i}=[x_i-h/2\alpha,\ x_i+h/2\alpha]$上の重複区間関数$T(x_i)$を次のように定義する。

$$T(x_i)=\begin{cases}\alpha, & x_i\in\left[x_i-\dfrac{h}{2\alpha},x_i+\dfrac{h}{2\alpha}\right]\\ 0, & otherwise\end{cases} \qquad (5)$$

この重複区間関数における重複の目安αを定めることで、ファジィ観測におけるメンバシップ関数を決めることと同等の効果が得られる。例えば、この重複の目安αと上述の３つのタイプのファジィ観測との対応は、図１のように示すことができる[５]。なお、重複区間関数を用いる理論上の観測を、重複区間観測と呼ぶことにする。

3．重複区間関数を用いるファジィ区間データの統計処理

前章で定義した重複区間関数を用いて、ファジィ区間データ

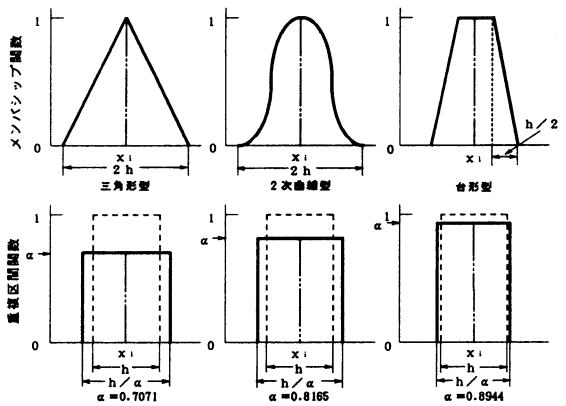


図1　ファジィ観測と重複区間観測

を統計的に処理するために、重複区間モーメントを求めておく。

まず、ファジィ観測におけるファジィ区間データのファジィモーメントd_rは、次式で定義される。

$$d_r=\int_{x_i-h}^{x_i+h}\chi_i(x)(x-x_i)^r dx \qquad (6)$$

そこで、このメンバシップ関数の代わりに、重複区間関数を用いて、重複区間モーメントg_rを次式で定義する。

$$g_r=\int_{x_i-h/2\alpha}^{x_i+h/2\alpha}T_i(x)(x-x_i)^r dx \qquad (7)$$

この式を展開して、次式を得る。

（rが奇数次の時）　$g_r=0$

（rが偶数次の時）　$g_r=\dfrac{h^{r+1}}{(r+1)(2\alpha)^r}$ (8)

この重複区間モーメントを用いることにより、ファジィ区間データの統計処理が、メンバシップ関数の代わりに、重複の目安αを用いることで可能となる。すなわち、(0, 1]上の実数値を任意に定めることにより、どのような形状のメンバシップ関数にも対応するファジィ区間データの統計処理が可能となる。

例えば、文献3で議論されたファジィモーメントの補正公式に代わる補正公式は、次式で表すことができる。

$$\bar{m}_r=\sum_{i=0}^{[r/2]}\binom{r}{2i}\frac{g_{2i}}{g_0}m_{r-2i} \qquad (9)$$

これらの議論は、文献4で議論されたファジィ最尤補正量にも当てはめることができる。

4．ファジィ区間データの統計分布

いま、100個の正規乱数データが得られたとする。この正規乱数は、平均が50標準偏差15の母集団からのランダムサンプリングである。このデータから通常のヒストグラムを作成すると図2のようになる。

さて、このデータが、何らかの理由で正確に観測できずに、三角形型のファジィ観測により得られたとする。ここでh=10として、このファジィ区間データは、0, 10, 20, ･･･, 100の離散データのみが得られることになる。このデータから図2のようなヒストグラムを作成するとすれば、図3のようになるであろう。しかしながら、重複区間関数の概念を用いれば、図4のようなヒストグラムを作成できる。図3のグラフが、うまく度数を表現できているかは疑問であるが、図4のようなグラフであれば、ファジィ区間データの分布の意味が読みとりやすい。すなわち、図2と比べて全体的に横方向の広がりをみせている。これは、観測時に生じるあいまいさの影響が、ばらつきに対して影響を与えていることを表す。また、ファジィ区間データの分布を考える場合、横方向だけではなく縦方向にも影響を受けていることがうかがえる。

したがって、今後は、重複区間関数の概念を用いることで、ファジィ区間データの分布を取り扱うことが可能となり、文献3、4で議論されてきた母集団のパラメータの点推定からさらに進んで、母集団のパラメータの区間推定に関する議論を行うことが可能になるものと考えられる。

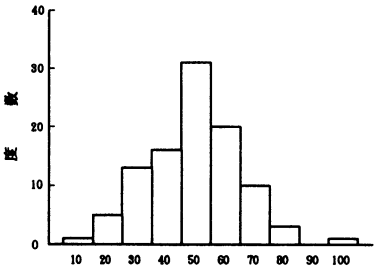


図2　ヒストグラム

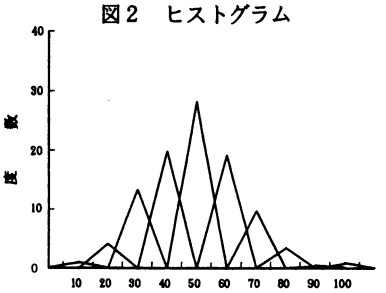


図3　三角形型ファジィ観測度数分布

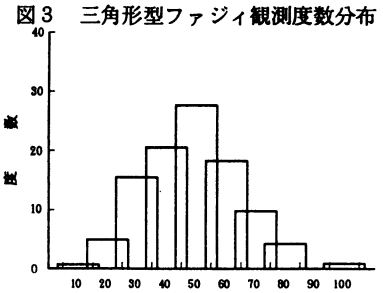


図4　重複区間ヒストグラム

参考文献

[1] W.H.Sheppard : On The Calculation of The Most Probable Values of Frequency-Constants, for Data Arranged According to Equidistant Divisions of A Scale, Proc. London Math. Soc., Vol.29, 353/380(1898)

[2] L.A.Zadeh : Probability Measures of Fuzzy Events, J. Math. Anal. Appl., Vol.28, 421/427 (1968)

[3] 奥田，古殿，浅居：ファジィ観測データに基づく統計的推定，計測自動制御学会論文集，Vol.26, No.5, 564/571 (1990)

[4] T.Okuda,Y.Kodono,K.Maehara and K.Asai : Maximum Likelihood Estimation from Fuzzy Observation Data, Proc. of 4th IFSA Congress, Vol. of Computer, Management & Systems Science, 185/188 (1991)

[5] 古殿，小西，奥田，浅居：重複区間関数を用いるファジィ観測データの統計的処理，第9回ファジィシステムシンポジウム，793/796 (1993)

[6] 古殿，奥田，浅居：ファジィ統計処理における重複区間関数の役割，第10回ファジィシステムシンポジウム，123/124 (1994)

連絡先：〒720　広島県福山市御幸町上岩成正戸
福山平成大学　経営学部　経営情報学科　古殿　幸雄
TEL 0849-72-5001, FAX 0849-72-7771
E-mail:i52902@jpnkudpc.bitnet & GEG06004@niftyserve.or.jp

FF2-4

ニューロ・ファジィ射影追跡による回帰と判別

Regression and Classification by Neuro Fuzzy Projection Pursuit

○三好　哲也，中尾　圭介，市橋　秀友，長坂　一徳（大阪府立大学）
Tetsuya Miyoshi, Keisuke Nakao, Hidetomo Ichihashi, Kazunori Nagasaka (University of Osaka Prefecture)

Abstract : In this paper, a neuro-fuzzy approach to the projection pursuit regression (PPR) is proposed for non-parametric regression and nonparametric classification. Our proposed method is based on the membership function and the eigenvector of the covariance matrix to avoid the local minimum of the projection indices. The radial basis function neural network is applied to function approximation in a projected low-dimensional space. The projection direction is also changed by the adaptive learning (steepest descent) method.

1. はじめに

Friedman と Tukey[1] により始められた射影追跡の目的は，高次元空間におけるデータ点を低次元空間に射影することよってデータの興味深い構造を発見することである．そのためにある目的関数，すなわち射影指標を最大化する線形射影をコンピュータを用いて自動探索する．線形和とシグモイド関数による3層のニューラルネットワークとの構造上の類似性から射影追跡学習ネットーワーク [2] という呼び方もされている．射影指標は，通常多くの極値を持つ関数であるのでランダムな探索と勾配法が用いられている [3, 4, 5]．

多次元空間におけるデータを低次元空間に射影するという考え方は，多変量解析で一般に用いられているもので，主成分分析や判別分析などは射影追跡の特別な場合であるとみなされている．Friedman と Stuetzle[6] によって拡張された射影追跡回帰は，低次元空間における非線形写像を発見するものである．射影追跡回帰の解法も DFP 法やニュートン法などの勾配法であり，固有値法による多変量解析的手法は用いられていない．本研究では，射影追跡回帰にファジィ集合のメンバシップ関数の考え方を採用することにより，ランダムな探索によらずに大域的な最小値を発見しやすい固有値法を提案する．

従来の射影追跡回帰では，残差に対する回帰を階層的に繰り返す．しかし，残差に対する射影データから低次元空間における特徴的な構造を発見することは難しい．そこで固有値法を利用した平面への射影追跡回帰を併せて提案する．また，平面への射影追跡回帰が判別分析に応用できることを Fisher の Iris データ [7] に適用することにより示す．

2. 固有値法による射影追跡

n 次元の説明変量 $\boldsymbol{x}_j$ と 1 次元の応答変量 z_j からなる J 個のデータがあり，この説明変量と応答変量との関係を RBF ネットワークにより近似することを考える．説明変量の次元が高くなれば RBF ネットワークを構成するパラメータの数が増加する．そこで，射影追跡回帰を用いて RBF ネットワークを構成するパラメータ数を削減する．まず，1 次元（直線）への射影追跡回帰について考える．

$\boldsymbol{x}_j (j = 1, \cdots, J)$ の集合をファジィ集合とする．ファジィ集合（ファジィクラス）を C と D の 2 つとし，それぞれ $\{(\boldsymbol{x}_j, \mu(z_j)) \ ; \ j = 1, \cdots, J\}$ と $\{(\boldsymbol{x}_j, 1-\mu(z_j)) \ ; \ j = 1, \cdots, J\}$ とする．ただし，$\mu(z_j)$ は j 番目のデータがクラス C に属する度合いを表すメンバシップ値を表しており，応答変量 z_j を [0,1] に基準化した値である．クラス C は応答変量の値の大きいデータのファジイ集合であり D は大きくないデータのファジイ集合である．また，y を単位ベクトル $\boldsymbol{p} = (p_1, \cdots, p_n)^T$ により定まる直線への $\boldsymbol{x}$ の正射影とすると

$$y = \boldsymbol{p}^T \boldsymbol{x} \tag{1}$$

となる．ただし，T は転置を意味する．ファジイクラス C 内のデータの y の標本分散を以下のように定義する．

$$\begin{aligned} \sigma_C^2 &= \frac{1}{J_C} \sum_{j=1}^{J} \mu(z_j)(y_j - \overline{y})^2 \\ &= \boldsymbol{p}^T \sum\nolimits_C \boldsymbol{p} \end{aligned} \tag{2}$$

ただし，

$$J_C = \sum_{j=1}^{J} \mu(z_j) \tag{3}$$

$$\overline{y} = \frac{\sum_{j=1}^{J} \mu(z_j) \cdot y_j}{J_C} \tag{4}$$

$$\sum\nolimits_C = \frac{1}{J_C} \sum_{j=1}^{J} \mu(z_j)(\boldsymbol{x}_j - \overline{\boldsymbol{x}})(\boldsymbol{x}_j - \overline{\boldsymbol{x}})^T \tag{5}$$

$$\overline{\boldsymbol{x}} = \frac{\sum_{j=1}^{J} \mu(z_j) \cdot \boldsymbol{x}_j}{J_C} \tag{6}$$

である．一方，ファジイクラス D の $\overline{y}$（クラス C 内の平均）からの変動を以下のように定義する．

$$\begin{aligned} \sigma_D^2 &= \frac{1}{J - J_C} \sum_{j=1}^{J} (1 - \mu(z_j))(y_j - \overline{y})^2 \\ &= \boldsymbol{p}^T \sum\nolimits_D \boldsymbol{p} \end{aligned} \tag{7}$$

とする．ただし，

$$\sum\nolimits_D = \frac{1}{J - J_C} \sum_{j=1}^{J} (1 - \mu(z_j)) \cdot (\boldsymbol{x}_j - \overline{\boldsymbol{x}})(\boldsymbol{x}_j - \overline{\boldsymbol{x}})^T \tag{8}$$

である．クラス C 内の分散（σ_C^2）を小さくし，一方でクラス D の y_j ができるだけ $\overline{y}$（クラス C 内の平均）から離れるような $\boldsymbol{p}$ を求める．ただし，本提案法ではクラス C とクラス

Dの2クラスに分けるため，射影後の関数は大まかには単峰形，単調増加，または単調減少であると仮定する．射影によってデータの構造を良く表現できる射影ベクトル$\boldsymbol{p}$を求めるための評価関数すなわち射影指標を

$$Q(\boldsymbol{p}) = \frac{\boldsymbol{p}^T \sum_D \boldsymbol{p}}{\boldsymbol{p}^T \sum_C \boldsymbol{p}} \tag{9}$$

とする．クラスCおよびDの2クラスに分ける射影ベクトル$\boldsymbol{p}$は，この$Q(\boldsymbol{p})$を最大化することによって求めることができる．$Q(\boldsymbol{p})$の最大値をλとする．$\partial Q(\boldsymbol{p})/\partial \boldsymbol{p} = 0$より

$$\sum_D \boldsymbol{p} = \lambda \sum_C \boldsymbol{p} \tag{10}$$

となり，$Q(\boldsymbol{p})$の最大化問題は(10)式で表される固有値問題に帰着される．この最大固有値に対応する固有ベクトルが求めるべき射影ベクトル$\boldsymbol{p}$である．2次元平面に射影する場合は第2固有値とそれに対応する固有ベクトルも求める．

3. RBFによる回帰

前節で求めた固有ベクトルを射影ベクトルとして，説明変量$\boldsymbol{x}$の射影yを求め，yと基準化された応答変量$\mu(z)$との関係を，RBFネットワークにより近似する．ガウス基底を用いるRBFネットワークの出力を

$$s(y) = \sum_{k=1}^{K} A_k(y) \cdot w_k \tag{11}$$

$$A_k(y) = \exp\left(-\frac{(y-a_k)^2}{b_k}\right) \tag{12}$$

とする．ただし，Kはガウス基底の数である．yを入力とするこのRBFネットワークにより，応答変量を回帰しようとする場合の近似度合を表す評価関数を

$$E = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{J} (s(y_j) - \mu(z_j))^2 \tag{13}$$

とする．(15)式を最小とするようなRBFネットワークの未知パラメータを最急降下法（学習）により求める．さらに，ある程度近似できた後，射影ベクトルの要素とRBFネットワークの未知パラメータを同時に学習し，近似精度をあげる．

2次元平面にデータを射影する場合は，前節で求めた最大固有値に対応する固有ベクトルを$\boldsymbol{p_1}$，第2固有値に対応する固有ベクトルを$\boldsymbol{p_2}$として，説明変量$\boldsymbol{x}$の射影y_1，y_2を求め，それらと基準化された応答変量$\mu(z_j)$を2次元RBFネットワークに与えて未知パラメータw_k，a_k，b_k，p_1，p_2を最急降下法により求める．2次元RBFネットワークは以下のように

$$s(y_1, y_2) = \sum_{k=1}^{K} A_k(y_1, y_2) \cdot w_k \tag{14}$$

$$A_k(y_1, y_2) = \exp\left(-\frac{(y_1 - a_{1k})^2}{b_{1k}} - \frac{(y_2 - a_{2k})^2}{b_2 k}\right) \tag{15}$$

とする．

4. 数値例

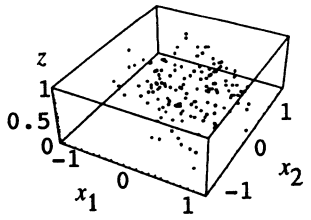


図1 説明変量(x_1, x_2)と応答変量zの散布図

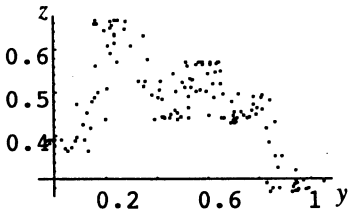


図2 固有値法によるy_jとz_jの散布図

4.1 直線に射影する場合

データの応答変量z_jがyについて大まかに単峰形である場合$(n = 4, j = 1, \cdots, 150)$の計算結果を示す．説明変量$(x_1, x_2)$と応答変量$z_j$との散布図を図1に示す．$(x_1, x_2)$以外のどの説明変量をとっても同様に，説明変量と応答変量の特徴的な関係は見いだせなかった．固有値法により求めた固有ベクトルによる射影y_jと応答変量z_jの散布図を図2に，学習後のデータ点(y_j, z_j)の散布図を図3に示す．また，学習後のRBF Fネットワークの出力を図4に示す．図3および図4から大まかに単峰形である場合でも本手法が有効であることがわかる．

RBFネットワークを用いて非線形回帰を行う場合，ガウス基底を構成する未知パラメータの初期値によって評価関数が局所最小値に陥ることがあり，初期値の決定は重要な問題である．本提案法では，固有値法による散布図からガウス基底の初期配置を適切に決定することができる．

4.2 平面に射影する場合

直線への射影のみでは十分に近似を行えないデータに対して2次元平面への射影追跡回帰を行った．一様乱数([0,1])によりデータ$\boldsymbol{x}_j$ $(n = 4, j = 1, \cdots, 200)$を作成し，応答変量を$z_j^* = \exp(-5(y_1^* + -0.3)^2) + \exp((y_1^*)^2) + \exp(-5(y_2^*)^2)$として計算した200個のデータに提案手法を適用した．ただし，$y_1^* = 0.5x_{1j} + 0.5x_{2j} - 0.5x_{3j} - 0.5x_{4j}$，$y_2^* = 0.5x_{1j} - 0.5x_{1j} + 0.5x_{1j} - 0.5x_{1j}$とした．図5に説明変量$(x_1, x_2)$と応答変量$z$との散布図を示す．他の説明変量を用いた場合も同様に説明変量と応答変量の特徴的関係は見いだせない．図6に学習後の2次元RBFネットワークの出力を示す．図6は，データを作成するために用いた上記の関数を良く表現している．

4.3 判別分析への応用

本節では，平面への射影による回帰手法を判別分析に応用する．用いるデータは，R.A.Fisherによる線形判別関数の研究に用いられたあやめの3群判別データ[7]である．

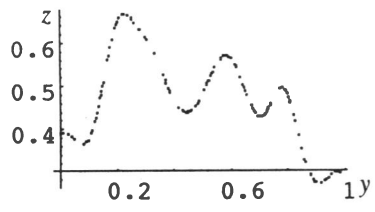


図 3 学習後の y_j と z_j の散布図

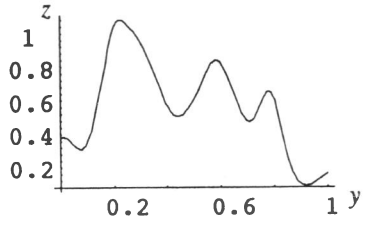


図 4 学習後の RBF ネットワーク出力

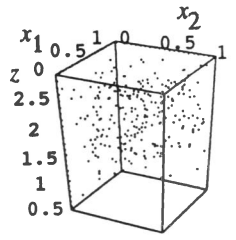


図 5 データの散布図

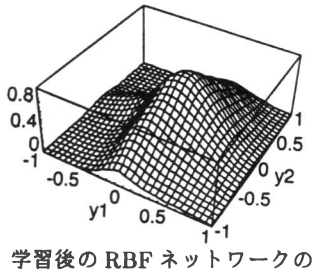


図 6 学習後の RBF ネットワークの出力

入力データとして四つの特徴量（がく片の長さ，がく片の幅，花弁の長さ，花弁の幅）と，クラスとしてあやめの品種（Iris setosa，Iris versicolor，Iris virginica) が与えられている．データ総数は 150 個で Iris setosa，Iris versicolor，Iris virginica のそれぞれが 50 個ずつ含まれている．データの出力値は数値データではないので，学習用データの出力値を Iris setosa のみを 1 として他を 0 とする場合をケース 1，Iris versicolor のみを 1 として他を 0 とする場合をケース 2，また Iris virginica のみを 1 として他を 0 とする場合をケース 3 とする．

150 個のデータすべてを学習用データとして提案の固有値法を適用し，平面へ射影した結果を図 7に，その後射影ベクトルについても学習した後の平面への射影を図 8に示す．図 7で用いた射影ベクトルはケース 3 の場合に求めた最大固有値に対する固有ベクトルと第 2 固有値に対応する固有ベクトルである．ケース 1 から 3 のそれぞれについて RBF ネットワークにより回帰を行った後，それぞれの出力の大きさを比較し，ケース 1 の出力が最大である領域，ケース 2 の出力が最大である領域，ケース 3 の出力が最大である領域の 3 つの領域に分割する．それぞれを Iris setosa の判別域，Iris versicolor の判別域，Iris verginica の判別域として求めた．その結果を図 9に示す．150 個のデータすべてを学習用データとした場合には，誤判別率は 0.00 であった．

150 個のデータからランダムに 75 個選んで，学習用データとし，残り 75 個のデータをチェッキングデータとして用いる two-fold CV 法の場合について述べる．ケース 2 に対して固有値法による最大固有値に対応する固有ベクトルと第 2 固有値に対応する固有ベクトルを用いて説明変量（Iris の四つの特徴量）を平面へ射影する．その結果を図 10に示す．

ケース 1 から 3 のそれぞれについて RBF ネットワークにより回帰を行った後，全データを用いた場合と同様に Iris setosa の判別域，Iris versicolor の判別域，Iris verginica の判別域を求めた．その結果を図 12に示す．この Iris の 3 品種の判別域を用いて 75 個のチェッキングデータに対して判別を行った．同様に学習用データとチェッキングデータを入れ換え判別を行った結果，それらの誤判別率の平均は 0.027 となった．

S.M.Weiss and I.Kapouleas は Iris データを用いて種々の判別分析手法の性能比較を行い，その結果を報告している [8]．その比較結果に提案手法の結果を付加して表 1に転載する．用いられている判別手法は，R.Duda and P.Hart による 5 つの統計的判別手法 [9]，ニューラルネットワークによる判別手法，3 つの機械学習による判別手法 [10, 11, 12] である．表 1において Method は用いた判別手法，Apparent は 150 個総てのデータをトレーニングデータとして学習した場合の誤判別率，第 3 列は Leaving-one-out 法を用いた場合の誤判別率である．ただし，提案手法の欄の第 3 列は two-fold CV 法を用いた結果である．Leaving-one-out 法は，J個のデータに対して，$J-1$ 個をトレーニングデータとし，残りの 1 個のデータで判別を行い，J回の平均を誤判別率とする手法である．そのため，Leaving-one-out 法による誤判別率は two-fold CV 法より小さくなる傾向がある．このことを考慮すると，提案した射影追跡回帰による判別分析手法は，他の手法と比べて良い結果を示している．

5. おわりに

本研究では，射影追跡によって説明変量の次元を 1 次元または 2 次元に低減し，回帰を行う射影追跡回帰手法を提案した．提案手法の特徴は，射影ベクトルを求めるにあたってファジイ集合のメンバシップ関数の考え方を導入し，固有値法を用いることである．そのために基底関数の初期配置を適切に行うことができる．また Fisher の Iris データを用いた判別分析に射影追跡回帰を適用し，その有用性を示した．

参考文献

[1] J.H.Friedman and J.W.Tukey: "A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis", IEEE Transactions on Computers, Vol.C-23, pp.881-890,(1974)

[2] J.N.Hwang et al.: "Reression modeling in back-propagation and peojection pursuit", IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.5, No.3, pp.342-353,(1994)

[3] P.J.Huber: "Projection pursuit", The Annals of Statics, Vol.13, No.2, pp.425-475,(1985)

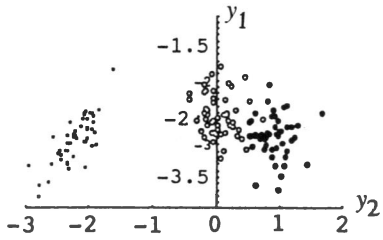


図 7 150 個全てのデータに対する固有値法による射影

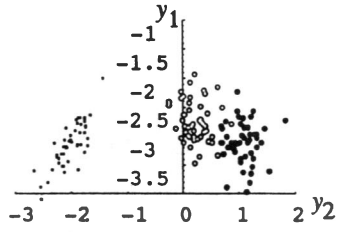


図 8 150 個全てのデータに対する学習後の射影

[4] 岩崎孝："射影追跡：その考え方と実際"，計算機統計学，Vol.4, No.2, pp.41-56,(1991)

[5] 今井英幸，佐藤義治："射影追跡法における感度分析"，計算機統計学，Vol.5, No.2, pp.101-106,(1992)

[6] J.H.Friedman and W.Stuetzle: "Projection pursuit regression", Journal of American Statistics Association, Vol.76, No.376, pp.817-823,(1981)

[7] R.A.Fisher: "The use of multiple measurements in taxonomic problems", Annals of Eugenics, Vol.7, pp.179-188,(1936)

[8] S.M.Weiss and I.Kapouleas: "An empirical comparison of pattern recognition,neural nets,and machine learning classification methods", Proceedings of the Tenth International Joint Conference on Artifical Intelligence, pp.781-787,(1987)

[9] R.Duda,and P.Hart: "Pattern Classification and Scene Analysis", NewYork,Wiley,(1973)

[10] S.Weiss,R.Galen and P.Tadepalli: "Optimizing the predictive value of diagnostic decision rules", Proceedings of the Sixth Annual National Conference on Arificiasl Intelligence, Seattle, Washington, pp.521-526,(1987)

[11] J.Quinlan: "Induction of decision tress", Machine Learning, Vol.1, No.1, pp.81-106,(1986)

[12] L.Breiman, J.Friedman, R.Olshen and C.Stone: "Classification and Regression Tress", Monterrey, Ca.: Wadsworth, (1984)

［問い合わせ先］

〒 593　大阪府堺市学園町 1 － 1

大阪府立大学工学部経営工学科

市橋 秀友

TEL : 0722-52-1161

FAX : 0722-59-3340

E-mail: ichi@center.osakafu-u.ac.jp

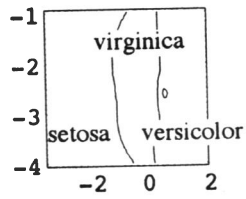


図 9 Iris の判別域（150 のデータを用いた場合）

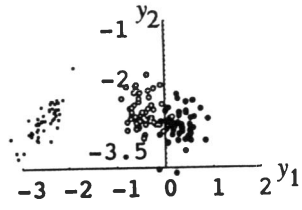


図 10 固有値法によるあやめのデータの射影

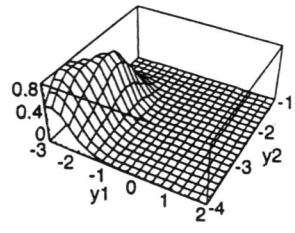


図 11 ケース 1 の場合の回帰曲面

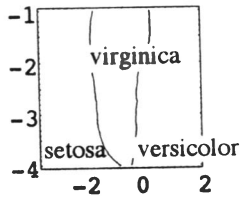


図 12 Iris の 3 品種の判別領域

表 1 Iris データによる誤判別率の比較結果 [8]

Method	Apparent	Leaving-one-out
Linear	.020	.020
Quadratic	.020	.027
Nearest neighbo	.000	.040
Bayes independence	.047	.067
Bayes 2nd order	.040	.160
Neural net(BP)	.017	.033
PVM rule	.027	.040
Optimal rule size 2	.020	.020
CART tree	.040	.047
平面への射影追跡回帰	.000	.027*

*: two-fold CV 法による結果

FF3-1

構造学習と忘却学習を用いたファジィ・ニューラルネットワークによるファジィ・ルールの抽出

Extraction of Fuzzy Rules Using Fuzzy Neural Network with Learning Vector Quantization and Backpropagation with Forgetting

馬野 元秀 Motohide UMANO　福中 寿朗* Toshiro FUKUNAKA　鳩野 逸生 Itsuo HATONO　田村 坦之 Hiroyuki TAMURA

大阪大学 基礎工学部 システム工学科
Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University

Abstract This paper attempts to extract fuzzy rules from data by fuzzy neural network without a prior information. First, we set the number of fuzzy rules from the number of learning data. Next, we generate initial fuzzy rule which has less wasteful membership functions using learning vector quantization. Finally, we prune and tune fuzzy rules using back-propagation learning with forgetting. We apply the method to problems of iris classification by Fisher and diagnosis of electric transformer by gas in oil, and we have very good results.

1. はじめに

ファジィ・ニューラルネットは、通常の階層型ニューラルネットと比較して学習後のネットワークの意味解釈が容易であるという利点があるが、その学習に関しては、いくつかの問題点がある。

その1つが初期ファジィルールをどのように設定するのかということである。従来は経験的な知識により、各変数の初期ファジィ集合を決め、それらのすべての組合せで初期ルールを作り、学習を開始していた。そのため、入力変数の増加に伴い、ルール数が指数関数的に増加していく問題点があった。

そこで、入力空間を自動的にファジィ分割し、初期ファジィルールを決定する研究も提案されている [1]。また、ルール数の増加に関する問題点を解決する手法として、分割等を逐次的に増加させてゆく方法が種々提案されている [2, 3, 4]。

本研究では、データ数から考えて十分と思われる初期ルール数を設定し、そのルール数の制限の下で、データから得られる情報のみで初期ファジィルールを生成し、この初期ファジィルールに対し、削除型学習を行うことでルールのプルーニングとチューニングを行う手法を提案する。

2. ファジィ・ニューラルネットワークの構造

本研究では簡略ファジィ推論を実行する図1に示すようなネットワーク構造を用いる。また、初期状態では各入力変数におけるメンバーシップ関数の数はルール数に等しい (図1は3ルールの場合)。また、メンバーシップ関数は Gauss 関数を用いる。すると、各層のユニットの出力は

$$O_{ji}^1 = \exp\left\{-\left(\frac{x_i - a_{ji}}{b_{ji}}\right)^2\right\} \tag{1}$$

$$O_j^2 = \frac{\prod_i O_{ji}^1}{\sum_k (\prod_i O_{ki}^1)} \tag{2}$$

$$O_k^3 = \sum_j w_{kj} O_j^2 \tag{3}$$

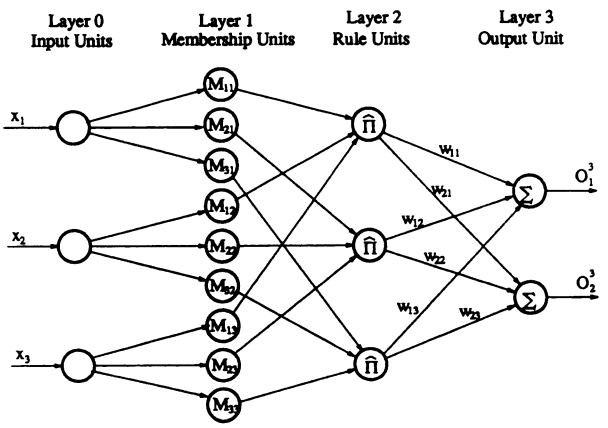


図1. ファジィ・ニューラルネットワーク

で示される。ここで、x_i は i 番目の入力変数、a_{ji} と b_{ji} はそれぞれ第 j ルールの i 番目の入力変数に関するメンバーシップ関数の中心値と幅、w_{kj} は第2層の j ユニットから第3層の kユニットへのリンクの重み (後件部実数値) であり、O_k^3 が最終的な出力になる。

3. ファジィ・ニューラルネットワークの学習

本研究では次の3つの段階、(1) 初期ファジィルール数の設定、(2) 初期ファジィルールの自動生成、(3) ファジィルールのチューニングとプルーニングからなる学習法を提案する。

3.1 初期ファジィルール数の設定

従来、初期ファジィ分割は、経験的な知識により各入力変数についてメンバーシップ関数を設定することで行っており、そのすべての組合せに対してファジィルールを生成していた。しかし、このような方法では、入力変数の増加にしたがって指数関数的にルール数

* 現在、三菱電機 (株) 勤務

が増加するため、実際の問題に適用した場合に問題となることが多かった。

しかし、データからのルール抽出を目的とする観点に立つと、ルール数の上限は学習用データの数に等しいと考えるのが妥当である。初期ルール数 r_0 は、(1) 次の段階で自己組織化学習によりファジィ分割が得られるので、少ないルール数で十分なモデリングが可能になること、(2) その次の段階で不要なルールを削除するため、十分に多いと思われる程度のルール数でよいことなどを考えると、その設定はあまり難しくない。例えば、r_0 を学習データ数の半分程度に設定すればよい。

3.2 初期ファジィルールの自動生成

次に初期ファジィルールを生成する。そのためには、どのようなファジィ分割を行うかを決定しなければならない。データの分布が偏っている場合、ファジィ集合を均等に配置してしまうと、効率的なルールが作成できない。

石原ら [1] の研究は、データの分布が均一でない場合にも適切なファジィ分割が行えるように、自己組織化学習によりメンバーシップ関数の中心値 ([1] ではノーマルポイントと表記) を決定するものである。しかし、この石原らの手法は、入力空間のみを入力変数ごとに個別に対象としているため、分割数の決定は人間が行う必要があり、また、従来の手法と同様、入力変数の増大に従ってルール数が指数関数的に増大してゆくという問題点は残っている。さらに、ファジィ分割を効率的に行うものとしては、他に幾つかの研究が挙げられる [5],[6]。

本研究では、学習用データの入力ベクトル $\boldsymbol{I}_p = [i_{p1}, i_{p2}, \cdots, i_{pn}]$ と出力ベクトル $\boldsymbol{O}_p = [o_{p1}, o_{p2}, \cdots, o_{pm}]$ を 1 つのベクトル $\boldsymbol{S}_p$ にまとめ、

$$\begin{aligned}\boldsymbol{S}_p &= [\boldsymbol{I}_p, \boldsymbol{O}_p] \\ &= [i_{p1}, i_{p2}, \cdots, i_{pn}, o_{p1}, o_{p2}, \cdots, o_{pm}] \end{aligned} \tag{4}$$

とする。この際、ベクトル $\boldsymbol{S}_p$ の各要素は、その平均と分散が等しくなるように正規化を行っておく。これは最終的なモデルに対し、各要素が等しい重要度を持つものと考えているからである。

このようにして生成したベクトル $\boldsymbol{S}_p$ に対して自己組織化学習を行う。このとき、Kohonen 型ネットワークの入力層のユニット数は $\boldsymbol{S}$ の次元、すなわち、$n+m$ となり、競合層のユニット数はあらかじめ定めた初期ルール数 r_0 として学習を行う。

例えば、**図 2** に示したように、4 入力 1 出力の学習用データを 24 個与えた場合、以下のようにして初期ファジィルールを生成する。まず、初期ルール数をデータ数の半分である 12 とする。すると、Kohonen ネットの競合層のユニット数は 12、入力層のユニット数は 5 となる。このネットワークの入力層の第 1 ユニットから第 4 ユニットに学習用データの入力側を、第 5 ユニットに出力側変数を入力し、自己組織化学習を行う。

学習後のネットワークの、学習用データの入力側を与えた入力層の第 i ユニットと競合層の第 j ユニットの重み w_{ji} を第 j ルールの前件部の入力変数 i に対応する値とする。また, 学習用データの出力側を与えた入力層の第 k ユニットと競合層の第 j ユニットの重み w_{jk} を第 j ルールの後件部の値とし、次のようなファジィでないルールを生成する。

Rule j: IF x_1 is w_{j1} and $\cdots$ and x_n is w_{j4} then y is $w_{j,n+1}$

次に、これをファジィ化する。各メンバーシップ関数の中心値 a_{ji} は、ルールの前件部の値 w_{ji} であるので、メンバーシップ関数の幅 b_{ji} を決定すればよい。まず、学習用データを各ルールの条件部の中心値とのユークリッド距離が最も近いルールにそのデータを帰属させる。すると、各ルールごとに帰属するデータの分布範囲が得られる。第 j ルールに帰属するデータの入力変数 x_i に関する最大値が u_{ji}で、最小値が l_{ji}であったとする。すると、このルールの入力変数 x_i に対応するメンバーシップ関数の中心値が a_{ji} とすると、$\max(|u_{ji}-a_{ji}|, |l_{ji}-a_{ji}|)$ をそのメンバーシップ関数の幅 b_{ji} とする。このようにして、最初に作成したルールの前件部の各条件の値をメンバーシップ関数に変えることで、ルールをファジィ化し、初期ファジィルールを生成する。

例えば、**図 2** の様に、4 入力 1 出力のデータの場合、第 4 データ (0.83, −0.23, 1.2, 0.36, 1.0)、第 14 データ (0.80, −0.19, 1.5, 0.32, 1.1) 、第 19 データ (0.88, −0.22, 1.95, 0.30, 0.9)、第 23 データ (0.82, −0.20, 1.6, 0.4, 1.4) という 4 つのデータが第 4 ルールに帰属したとする。また、第 4 ルールのファジィパーティションの中心は (0.84, −0.20, 1.3, 0.38) であるとする。まず、入力変数 x_1 については、4 つのデータの分布範囲は 0.80 ～ 0.88 である。そして、分布範囲に応じて、メンバーシップ関数の幅を決定する。入力変数 x_1 については、中心値が 0.84 であるので、幅は $\max(|0.84-0.80|, |0.84-0.88|)$、すなわち 0.04 となる。同様にして、入力変数 x_2、x_3、x_4 に対して、それぞれ 0.03、0.05、0.02 を得る。結局、この場合、, 第 4 ルールの前件部のメンバーシップ関数は $G_{41}(0.84, 0.04)$、$G_{42}(-0.20, 0.03)$、$G_{43}(1.30, 0.05)$、$G_{44}(0.38, 0.02)$ となる。ここで $G_{4i}(a,b) = \exp(-\frac{(x_i-a)^2}{b^2})$ である。

3.3 ファジィルールのチューニングとプルーニング

前節の過程により、効率的なファジィ分割をもつ限られたルール数のファジィルールが得られているが、まだまだルール数が多すぎる。そこで、削除型構造学習法に分類される忘却付き構造学習 [7] を基本とするアルゴリズムを用いて、不要なルールやメンバーシップ関数を削減しながら、前件部のメンバーシップ関数の中心値と幅、後件部実数値のチューニングを行う。

(1) ルールのプルーニング

本研究では第 2 層から第 3 層へのリンクの重み、すなわち、後件部実数値については通常の階層型ニューラルネットワークと同じく、第 2 層のユニットからの出力をリンクの値で重み付けし、その和をとっている (式 (3) および 図 1)。そのため、2-3 層間のリンクの重みが 0 になれば、そのユニットからの影響はなくなる。すなわち、通常の階層型ニューラルネットワークのようにリンク重みを 0 にするような付加項を評価関数に加えて、学習を行い、すべての 2-3 層間のリンクの重みが閾値以下になった第 2 層のユニット (1 つのルールに相当) を削除すれば、ルール数の削減が可能になる。そこで、2-3 層間のリンクの重みの更新には石川が提案したように更新のたびに一定量だけ重みを減少させるような評価関数を用いる。2-3 層間のリンクの重みを w_{kj}、教師信号を t_p、実際の出力を o_p とすると、評価関数 E_p は

$$E_p = \frac{1}{2}\sum_i (o_{pi} - t_{pi})^2 + \varepsilon \sum_{k,j} w_{kj} \tag{5}$$

であり、更新量 $\Delta w'_{kj}$ は、通常の BP 法による更新量をΔw_{kj} としたとき、

$$\Delta w'_{kj} = \Delta w_{kj} - \varepsilon \cdot \mathrm{sgn}(w_{kj}) \tag{6}$$

であり、繰り返し毎に一定量 ε だけ減少させる。

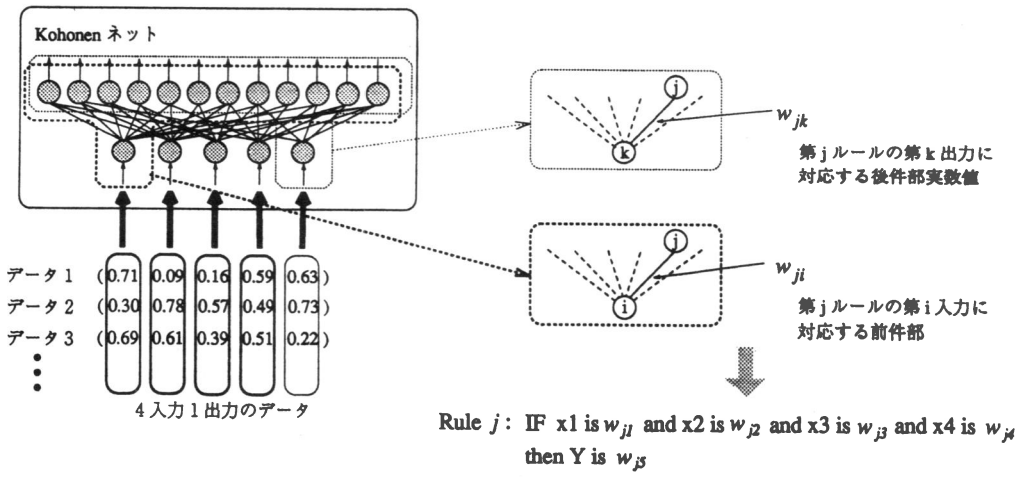


図 2. データの分布状況に応じた初期ルールの生成

(2) メンバーシップ関数のプルーニング

本研究のネットワークでは、入力ユニットからの信号はメンバーシップ関数を介してルールユニットに入る (図 1)。このルールユニットでは、積演算を行っているので、あるユニットからの入力が常に 1 である場合に、そのユニットからの影響を受けなくなる。そのため, メンバーシップ関数の学習において、常に 1 がでるような方向へ、すなわち幅 b を広げるような付加項をつけ加え、十分に幅の広がったメンバーシップ関数を削除すればよい。

また、先程の後件部実数値の場合、その値を 0 に近づけるのが目的であったので、その値の大小にかかわらず一定量だけ値を減少される手法が効果的であった。しかし、メンバーシップ関数の幅を対象とする場合, その値をできるだけ大きくすることが目的であるため、通常の BP 学習による更新後、その値を定数倍することにした。本論文ではこの倍率の事をメンバーシップ関数の忘却率と呼ぶ。結局、忘却率を ϕ としたとき, 幅 b_{ij} の更新量 $\Delta b'_{ij}$ は

$$\Delta b'_{ij} = \Delta b_{ij} + \phi(b_{ij} + \Delta b_{ij}) \tag{7}$$

となる。ここで、Δb_{ij} は通常の BP 法による更新量を示す。この式 (7) に従って学習を行い、すべての学習データについて、常に閾値以上の値を出力するようなメンバーシップ関数はネットワークのダイナミクスに影響を及ぼさないので削除する。

このようにして、ルールの削除とメンバーシップ関数の削除を組み合わせる事でネットワーク全体のプルーニングが可能となる。

4. アヤメの分類問題

前節で述べた手法を R.A.Fisher [8] のアヤメの分類問題に適用し、汎化能力等についての数値実験を行う。このデータは iris setosa、iris versicolor、iris verginica という 3 種類のアヤメの、がくの長さ (sepal length)、がくの幅 (sepal width)、花弁の長さ (petal length)、花弁の幅 (petal width) の 4 種類の特徴量を計測したものであり、各種類 50 個ずつ、合計 150 個存在する。

未学習の評価用データに対する汎化能力を調べるため、次のような 2-fold cross-validation 法を用いて数値実験を行った。

1. 各種類ごとの 50 個のデータをランダムに 2 つの部分集合に分け、一方を学習用データに、もう一方を評価用データとする。従って、全体では 75 個ずつに分けたことになる。
2. 学習用データを用いて学習を行い、評価用データの識別を行う。
3. 学習用データと評価用データを入れ換え、2 の手順を行い、正解率の平均をとる。

この 3 段階の手続きで 1 回の試行とみなす。

学習の条件は初期ルール数 $r_0 = 37$ (データ数 75 の約半分)、自己組織化学習に関しては、学習回数 3000 回、学習係数 0.2、近傍の初期値 19 であり、忘却学習に関しては、学習回数 3000 回、後件部実数値の学習係数が 0.4, メンバーシップ関数の中心値の学習係数が 0.2、メンバーシップ関数の幅の学習係数が 0.2、後件部実数値の忘却量 $\varepsilon_w = 0.0001$、削除の閾値が 0.0005、メンバーシップ関数の忘却率が $\phi_b = 1.00005$, 削除の閾値が 0.999999 である。この条件で試行を 20 回実行した場合の結果を表 1 に示す。表 1 には比較として、野崎ら [9] の手法と石渕ら [10, 11] の手法での結果を挙げておく。

表 1. Fisher のデータによる汎化能力の比較

手法	正解率 (%)	ルール数	備考
提案法	94.43	6.95	入力変数は 2 つ
野崎ら [9]	93.03	28.0	
石渕ら [10, 11]	69.27	16.00	通常型 $K = 2$
石渕ら [10, 11]	92.43	58.33	通常型 $K = 3$
石渕ら [10, 11]	90.03	115.45	通常型 $K = 4$
石渕ら [10, 11]	95.27	165.12	通常型 $K = 5$
石渕ら [10, 11]	95.57	242.85	通常型 $K = 6$
石渕ら [10, 11]	94.30	597.75	分散型 $K = 2 \sim 6$
GA	90.67	10.10	

※比較例の数値はいずれも文献 [9] による

正解率という観点から見た結果では、石渕らの手法の 95.57% (通常型 $K = 6$)、95.27% (通常型 $K = 5$) につぐ 94.43% という結果になっているが、ルール数で比較すれば, 提案法の 6.95 というルール数は、石渕らの手法の 1/35、1/24 程度であり、圧倒的に少なく、総合的には最も優れた手法だといえるであろう。また、提案法では 4 つの入力変数のうち、2 つのみに注目するルールが生成されている。

また、学習用データとして与える 75 個のデータの中で、いくつかのデータを本来の分類とは異なる分類に乱数で変更することでデータにノイズが入れる実験を行った誤りのデータの数は 5 個から 35 個までの 7 通りについて、2-fold cross-validation 法で数値実験

を行った。なお、評価用データに対しては変更を行っていない。その結果、誤データが 25 個までなら、正解率に大きな影響を及ぼしていないことが分かった。

5. 油中ガス分析診断

油中電気機器内部で異常が発生すると、放電や加熱などのために周囲の絶縁油や絶縁物を分解する。このとき、異常の状態や絶縁物の種類に応じて特徴的なガス成分を生成し、絶縁油中に溶解する。したがって、油中に溶解しているガスを分析する事で,外部から見えない異常を検出することができる。これが油中ガス分析診断である。分析するガスが 10 種類であり、それを異常内容別に 4 種類に分類したデータが 220 個存在する。

220 個のデータから、異状内容ごとに半数ずつランダムに選択することで合計 110 個のデータを選択し、その 110 個を学習用に、残り 110 個を評価用に用い、生成したルールの汎化能力を調べた。学習の条件は初期ルール数 60、自己組織化学習に関しては、学習回数が 3000 回、学習係数が 0.3、近傍の初期値が 30 であり、忘却学習に関しては、学習回数が 5000 回、後件部実数値の学習係数が 0.4、メンバーシップ関数の中心値の学習係数が 0.6, メンバーシップ関数の幅の学習係数が 0.6、後件部実数値の忘却量が 0.000008、その削除の閾値が 0.00001 メンバーシップ関数の削除の閾値が 0.99999 である。また、メンバーシップ関数の忘却率を 1.000006 とした場合 (条件 1)、と 1.0000006 とした場合 (条件 2) で試行を 10 回ずつ行った。結果を表 2 に示す。比較として、ファジィ ID3 に基づく手法による結果 [12] を挙げておく。この手法は専門家が設定したファジィ集合をもとにファジィ決定木を生成するものである。なお、ファジィ ID3 での葉節点数は FNN でのルール数にほぼ相当する数字である。文献 [12] ではいろいろな条件で試験を行っているが、そのうち、もっとも結果が良い葉節点へのクラス分けの際その節点に存在する全てのクラス名をその割合と共に割り付ける手法 ([12] では方法 3 と表記) と比較している。

正確にはファジィ ID3 での葉節点数は FNN でのルール数とは異なり, また, メンバーシップ関数も、ファジィ ID3 では 2 次曲線から構成された標準関数を用いているため、厳密な比較はできないが、ほぼ同等と言える結果が得られている。ファジィ ID3 は専門家の知識によるメンバーシップ関数を用いているのを考慮すると、本手法の、事前の知識なしにデータからのルール抽出という目的は十分に達成できていると考える。

表 2. 油中ガス分析での能力の比較

手法	ルール数/葉節点数		正解率 (%)	
	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.
提案法 (条件 1)	32.10	3.33	76.27	4.16
提案法 (条件 2)	16.10	3.42	71.10	3.58
ファジィ ID3 ($\theta_r = 0.6$)	9.2	3.45	70.6	4.74
ファジィ ID3 ($\theta_r = 0.7$)	17.6	5.32	73.0	4.93
ファジィ ID3 ($\theta_r = 0.8$)	32.1	7.93	77.8	3.85
ファジィ ID3 ($\theta_r = 0.9$)	52.2	8.86	78.1	3.56
ファジィ ID3 ($\theta_r = 1.0$)	115.2	13.55	77.7	3.85

6. おわりに

本論文では、ファジィニューラルネットワークを用いて、事前の知識なしに、データからファジィルールを抽出する手法の提案を行った。また、提案法をアヤメの分類問題に適用することで、従来の手法よりも優れたファジィルールが抽出できることを示した。また、油中ガス分析診断問題に適用することで、専門家による事前の知識を導入した場合と同程度の能力をもつファジィルールが抽出できることを示した。

しかし、現在のところ学習係数や、忘却量、忘却率、削除の閾値といった学習におけるパラメータをヒューリスティックに決定しているため、それらの決定法、もしくは決定に関する何らかの指標が必要である。今後、この問題に取り組みたい。

参考文献

[1] 石原, 高木, 中西: Kohonen 型ニューラルネットワークを用いたファジィ推論ルールの構成, 第 9 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 425–428, 1993.

[2] T. Takagi and M. Sugeno: Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern.*, Vol. 15, No. 1, pp. 116–132, 1985.

[3] 荒木, 野村, 林, 若見: ルールを逐次的に生成するファジィモデリングの一提案, 日本ファジィ学会誌, Vol. 4, No. 4, pp. 722–732, 1992.

[4] 増田, 夜久: ユニット生成機能をもつニューラルネットワークによるファジィ推論ルールの獲得手段, 日本ファジィ学会誌, Vol. 5, No. 2, pp. 348–357, 1993.

[5] 安川, 菅野: 数値データにも基づく言語モデリング, 第 7 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 83–86, 1991.

[6] 堀川, 古橋, 内川: ファジィニューラルネットワークによるファジィモデリング (IV), 第 10 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 697–700, 1994.

[7] 石川: 忘却を用いたコネクショニストモデルの構造学習アルゴリズム, 人工知能学会誌, Vol. 5, No. 5, pp. 595–603, 1990.

[8] R. A. Fisher: The use of multiple measurements in taxonomic problems, *Annals of Eugenics*, Vol. 7, No. 2, pp. 170–188, 1936.

[9] 野崎, 石渕, 田中: ファジィ識別システムのおける忘却によるファジィ if-then ルールの選択, 日本ファジィ学会誌, Vol. 6, No. 3, pp. 585–602, 1994.

[10] 石渕, 田中: 分散型ファジィルールを用いたパターン認識, システム制御情報学会論文誌, Vol. 4, No. 12, pp. 517–526, 1991.

[11] 石渕, 田中: ファジィルールを用いたパターン識別, 日本ファジィ学会誌, Vol. 5, No. 1, pp. 74–84, 1993.

[12] 馬野, 中山, 鳩野, 田村: ファジィ ID3 に基づくファジィ決定木の生成とその評価, 第 10 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 333–336, 1994.

[問い合わせ先]
〒 560 豊中市待兼山町 1 − 3
大阪大学 基礎工学部 システム工学科
馬野 元秀
TEL: 06–850–6376
FAX: 06–850–6341
Internet: umano@sys.es.osaka-u.ac.jp

FF3-2

ファジィ量限定子を含む自然言語命題の評価方法

Evaluation Method for Fuzzy Quantified Natural Language Propositions

馬野 元秀　岡田 貴祐　鳩野 逸生　田村 坦之
Motohide UMANO　Takahiro OKADA　Itsuo HATONO　Hiroyuki TAMURA

大阪大学 基礎工学部 システム工学科
Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University

Abstract In representation of our knowledge, it is often the case when we can represent it using only quantified propositions. Zadeh proposed an evaluating method for such quantified propositions that treats a quantifier as a fuzzy number and calculates a matching degree of fuzzy quantifier with cardinality of fuzzy set. But we can not get an agreeable result using usual fuzzy cardinality. In this paper, we propose a new method for calculating the fuzzy cardinality by an operation defined by fuzzy rules and evaluating fuzzy quantified propositions using this fuzzy cardinality.

1. はじめに

一般に知識をルールとして表現するとき，条件部の各条件はandで結合されているが，関係が“Most tall men are fat”や“Few old people are tall”のようにmostやfewなどのファジィ量限定子を用いてしか表現できないことも多い．

このようなファジィ量限定子を含む命題を処理する方法として，ファジィ量限定子を割合や個数を表すファジィ数として扱うものが提案されている[1][2]．このときファジィ集合の濃度(cardinality)をいかに決めるかが問題となり，シグマカウントや従来のファジィ濃度では直観に合う答えが得られない．そこで本研究ではファジィ濃度を求める新たな方法を提案し，それを用いたファジィ量限定子を含む自然言語命題の評価方法を示す．

2. ファジィ量限定子を含む命題

普通，我々は∀(すべての)や∃(存在する)という量限定子を用いて命題を表現する．これに対しmostやfewなどの一般的な量限定子はファジィ数として扱われ，ファジィ量限定子と呼ばれる．

ファジィ量限定子を含む命題を一般的に記述すると次のようになる．

$$QX \text{ are } F$$

ここで，Qはファジィ量限定子，Xは要素数Nの集合，Fは非ファジィ集合またはファジィ集合である．

ファジィ量限定子は意味的に考えて，絶対数を表すタイプ1と相対数を表すタイプ2に分類され，タイプ1は個数を表すファジィ数で，タイプ2は割合を表すファジィ数で表現される．

例えば“Most students are Japanese”という命題を考える．ファジィ限量子mostはタイプ2で，メンバーシップ関数は図1のように割合の上のファジィ数となる．この定義では，80 %のstudentがJapaneseの場合0.7のグレードで命題は正しいと言える．

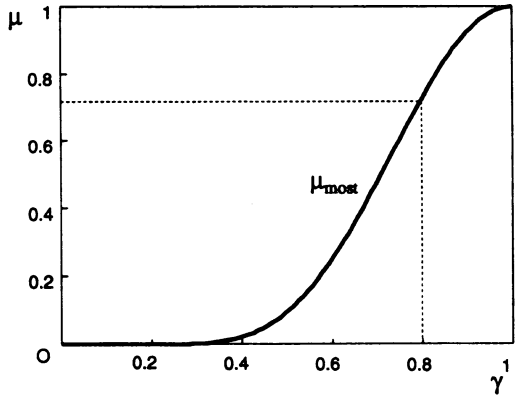


図1　mostのメンバーシップ関数

このようにXの中でFである個数，または割合と，ファジィ量限定子Qと適合する度合により，ファジィ量限定子を含む命題の真理値を求めることができる．

しかし“QX are F”においてFが非ファジィ集合の場合，Xの中でFである個数は簡単に求めることができるが，Fがファジィ集合の場合，その個数についてもあいまいである．したがって，ファジィ量限定子を含む命題を処理するためにはファジィ集合の要素数をどのようにして数えるか，すなわちファジィ集合の濃度をいかに決めるかという問題を解決しなければならない．

一般的にファジィ集合 $F=\{\mu_1/u_1,\mu_2/u_2,\ldots,\mu_n/u_n\}$ の濃度は次のようにメンバーシップのグレードを足したシグマカウントを使う場合が多い.

$$\Sigma Count(F)=\sum_i \mu_i \tag{1}$$

しかし, シグマカウントでは集合の濃度が低い場合, つまり several や few などのように小さいファジィ数を扱う時に適していない. そこで, Zadeh はα-レベル集合をもちいてファジィ濃度に関して次の 3 種類の方法を示している [3].

まず, 最も基本的な *FGCount* は次のように定義される.

$$FGCount(F)=1/0+\sum_\alpha\{\alpha/|F_\alpha|\} \tag{2}$$

ここで, $|F_\alpha|$ はα-レベル集合 F_αの要素数で, このファジィ濃度の要素 iのグレード $\mu_{FGCount(F)}(i)$ は, 命題「F である要素は少なくとも i 個である」の真値理と解釈することができる.

これを用いて, *FLCount* は

$$FLCount(F)=FGCouunt(F)'\ominus 1 \tag{3}$$

と定義される. ここで「'」は補集合を表し, $\ominus 1$ はファジィ数 $FGCouunt(F)'$から拡張原理により 1 を引くことを意味する. $\mu_{FLCount(F)}(i)$ は, 命題「Fである要素はせいぜい i 個である」の真理値と解釈することができる.

FECount は *FGCount* と *FLCount* より次のように定義される.

$$FECount(F)=FGCount(F)\cap FLCount(F) \tag{4}$$

$\mu_{FECount(F)}(i)$ は, 命題「Fである要素はちょうど i 個である」の真理値と解釈することができる.

簡単な例として

$$F = \{0.6/u_1,\ 0.7/u_2,\ 0.3/u_3,\ 1/u_4,\ 0.1/u_5\}$$

のファジィ集合を考えると次のようになる.

$$\begin{aligned} FGCount(F) &= \{1/0,\ 1/1,\ 0.7/2,\ 0.6/3,\ 0.3/4,\ 0.1/5\}\\ FLCount(F) &= \{0.3/1,\ 0.4/2,\ 0.7/3,\ 0.9/4,\ 1/5,\ldots\}\\ FECount(F) &= \{0.3/1,\ 0.4/2,\ 0.6/3,\ 0.3/4,\ 0.1/5\}\end{aligned}$$

しかし, 以上のファジィ濃度では直観に合う解が得られない場合がある. 例えば, 次のようなファジィ集合について考えてみる.

$$\begin{aligned} Y &= \{1/u_1,\ 1/u_2,\ 1/u_3,\ 0.5/u_4,\ 0.1/u_5\}\\ Z &= \{0.8/u_1,\ 0.7/u_2,\ 0.6/u_3,\ 0.5/u_4,\ 0.1/u_5\}\end{aligned}$$

この時, Y, Z についての *FGCount* は次のようになる.

$$\begin{aligned} FGCount(Y) &= \{1/0,1/1,1/2,1/3,0.5/4,0.1/5\}\\ FGCount(Z) &= \{1/0,0.8/1,0.7/2,0.6/3,0.5/4,0.1/5\}\end{aligned}$$

ここで, 直観的には$\mu_{FGCount(Y)}(4)>\mu_{FGCount(Z)}(4)$ であるが, 実際はともに 0.5 である.

3. 新たなファジィ濃度の計算方法

従来の *FGCount* はメンバーシップ関数のグレードが大きいものから i 番目の値をそのまま$\mu_{FGCount(F)}(i)$ の値としていた.

$$\mu_{FGCount(F)}(i)=\mu_{F\downarrow}(i) \tag{5}$$

ここで, $\mu_{F\downarrow}(i)$ をメンバーシップのグレードの大きい順に整列した時に i 番目にくるグレードとする.

しかし, $\mu_{FGCount(F)}(i)$ が命題「F である要素は少なくとも i 個である」の真値理を表していることを考えると, $\mu_{FGCount(F)}(i)$ は$\mu_{F\downarrow}(i)$ だけでなく$\mu_{F\downarrow}(1)$ ~$\mu_{F\downarrow}(i-1)$ にも影響を受けると考えられる.

そこで, ファジィ集合 Fの *FGCount* を次のように定義する.

$$\mu_{FGCount(F)}(i)=T[\mu_{FGCount(F)}(i-1),\mu_{F\downarrow}(i)] \tag{6}$$

ただし, $\mu_{FGCount(F)}(0)=1$ とする. また, Tは t-norm である. この Tを論理積で行うと従来の *FGCount* になる.

そこで Y, Z について, t-norm を代数積で行い *FGCount* を求めると,

$$\begin{aligned} FGCount(Y) &= \{1/0,\ 1/1,\ 1/2,\ 1/3,\ 0.5/4,\ 0.05/5\}\\ FGCount(Z) &= \{1/0,0.8/1,0.56/2,0.336/3,0.168/4,0.0168/5\}\end{aligned}$$

となり, 4 に対するグレードはそれぞれ 0.5 と 0.168 と受け入れやすい結果となる.

しかし, 次の Wについて考えてみる.

$$\begin{aligned} W &= \{0.9/u_1,\ 0.9/u_2,\ 0.9/u_3,\ 0.9/u_4,\ 0.9/u_5\}\\ FGCount(W) &= \{1/0,0.9/1,0.81/2,0.729/3,0.656/4,0.59/5\}\end{aligned}$$

クラス Wのそれぞれの要素のグレードは 1 に近いが, *FGCount* のグレードが極端に減少してしまう.

このように *FGCount* を計算する時の t-norm を論理積, 代数積をそのまま用いても望ましい結果を得ることができない.

そこで, t-norm の代わりに新たな演算 T'をファジィルールにより定義し, それにより *FGCount* を計算する.

$$\mu_{FGCount(F)}(i)=T'[\mu_{FGCount(F)}(i-1),\mu_{F\downarrow}(i)] \tag{7}$$

演算 T'についてのルール表を表 1 に, メンバーシップ関数を図 2 , 図 3 に示す.

ここでのファジィ推論の方法は簡略化推論方を用いている. 各ルールの前件部の適合度は, 各条件の適合度の掛算を使って与え, 最終的な結論は各ルールの結論を適合度で荷重平均することにより得られる.

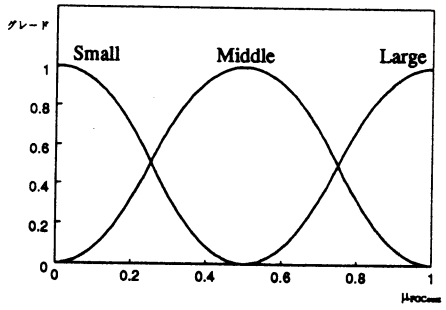


図 2 $\mu_{FGCount(F)}(i-1)$ についてのメンバーシップ関数

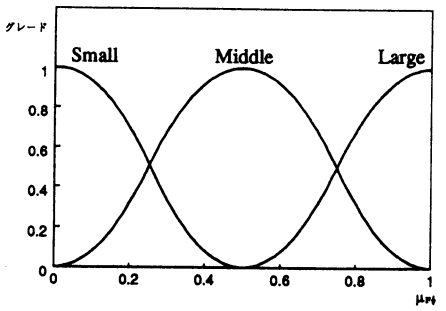


図 3 $\mu_{F\downarrow}(i)$ についてのメンバーシップ関数

表 1 演算 T' のルールテーブル

演算方法 T'		$\mu_{FGCount(F)}(i-1)$		
		Small	Middle	Large
$\mu_{F\downarrow}(i)$	Small	限界積	代数積	論理積
	Middle	代数積	代数積	論理積
	Large	論理積	論理積	論理積

演算 T' による演算結果を図 4 , 図 5 に示す. ただし図 4 , 図 5 はそれぞれ $\mu_{FGCount(F)}(i-1)$ の値を 0.7, 0.2 とした時の演算結果である. 演算 T' は $\mu_{FGCount(F)}(i-1)$, $\mu_{F\downarrow}$ のグレードの大きさにより論理積から限界積までの演算を行うことができる.

前の, Y, Z, W について演算 T' 使った $FGCount$ は次のように計算される.

$$
\begin{aligned}
FGCount(Y) &= \{1/0,\ 1/1,\ 1/2,\ 1/3,\ 0.5/4,\ 0.05/5\} \\
FGCount(Z) &= \{1/0, 0.8/1, 0.67/2, 0.46/3, 0.23/4, 0.006/5\} \\
FGCount(W) &= \{1/0, 0.9/1, 0.899/2, 0.899/3, 0.898/4, 0.897/5\}
\end{aligned}
$$

Y, Z については $\mu_{FGCount(Y)}(4) > \mu_{FGCount(Z)}(4)$ となり, W についても極端なグレードの減少もなくより直観に合った結果となっている.

そして, 以上の方法で求めた $FGCount$ から $FLCount$, $FECount$ を式 (3) , 式 (4) より求める.

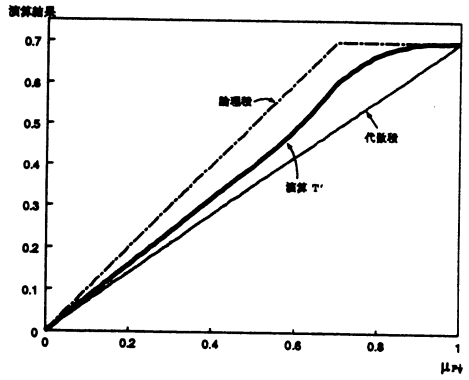


図 4 $\mu_{FGCount(F)}(i-1) = 0.7$ の時の T' の演算結果

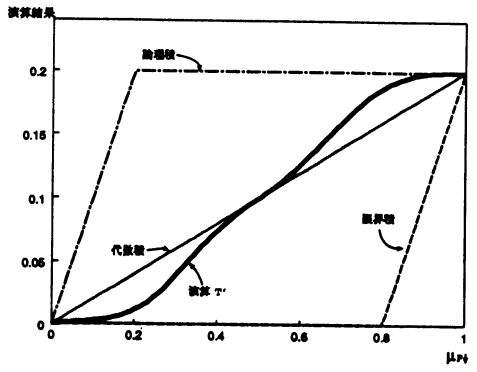


図 5 $\mu_{FGCount(F)}(i-1) = 0.2$ の時の T' の演算結果

4. ファジィ量限定子を含む命題の評価方法

4.1 主語が非ファジィ集合のとき

ここでは命題 "QX are F" の真理値の計算方法について述べる. ここで Q はファジィ量限定子, X は要素数 N の非ファジィ集合, F はファジィ述語とする. 前節で説明した 3 種類の $FCount$ をファジィ量限定子 Q のメンバーシップ関数の形によって使い分ける. つまり most などの単調非減少なものには $FGCount$ で, few などの単調非増加なものには $FLCount$ で, several などの三角型には $FECount$ でファジィ集合の濃度を求める. そして量限定子 Q のファジィ集合とのマッチ度により命題の真理値を求める. この命題の真理値 τ は次のようになる.
タイプ 1 のとき

$$\tau = \max_{i\in\{0,1,\ldots,n\}} [\mu_Q(i) \wedge \mu_{FCount(F)}(i)] \qquad (8)$$

タイプ 2 のとき

$$\tau = \max_{i\in\{0,1,\ldots,n\}} [\mu_Q(\frac{i}{n}) \wedge \mu_{FCount(F)}(i)] \qquad (9)$$

例えば, ファジィ量限定子 most とファジィ述語 fat が次のように定義されているとして "Most X are fat" の真理値τを考える.

$$\mu_{\mathrm{most}}(r) = \{0.1/0.4,\ 0.4/0.6,\ 0.9/0.8,\ 1/1\}$$
$$fat = \{0.6/x_1,\ 0.7/x_2,\ 0.3/x_3,\ 1/x_4,\ 0.1/x_5\}$$

ファジィ量限定子 most は単調非減少なので, *FGCount* により濃度を求める.

$$FGCount(fat) = \{1/0, 1/1, 0.7/2, 0.487/3, 0.146/4, 0.001/5\}$$

得られた *FGCount* とファジィ量限定子 most の共通集合の最大値を求め, 真理値が計算される.

$$\tau = \max[0.1 \wedge 0.7, 0.4 \wedge 0.487, 0.9 \wedge 0.146, 0.1 \wedge 0.001] = 0.4$$

4.2 主語にファジィ集合が含まれているとき

次に "Most fat men are tall" などのように, "Q(AX) are F" の主語がファジィである命題ついて考える. ただし A はファジィ述語である.

(1) 量限定子がタイプ 1 のとき

"Several tall X are fat" という命題を考えると, X について tall のうちの fat である数を考えることになる. これは, tall でかつ fat である数と同じであるので, 命題の真理値は, "Several X are tall and fat" の真理値と同じである. つまり, 命題 "$Q(AX)$ are F" は "QX are A and F" と等価であると考えることができる. そこで新たなファジィ述語 Hを $H = A \wedge F$と定義して, "$Q(AX)$ are F" を "QX are H" と主語が非ファジィ集合な命題として真理値を計算できる.

$$\tau = \max_{i \in \{0,1,\ldots,n\}} [Q(i) \wedge \mu_{FCount(A \wedge F)}(i)] \quad (10)$$

(2) 量限定子がタイプ 2 のとき

Q がタイプ 2 の量限定子のときは, 量限定子 Q は AX のファジィ集合内における Fというファジィ集合のあいまいに定義された割合について考える必要がある. AX の個数はすなわち Xのなかで A である個数なのでファジィ濃度, *FECount* により計算する.

例として "Most tall X are fat" を考えると以下のようになる.

$$fat = \{0.6/x_1,\ 0.7/x_2,\ 0.3/x_3,\ 1/x_4,\ 0.1/x_5\}$$
$$tall = \{0.5/x_1,\ 1/x_2,\ 0.2/x_3,\ 0.8/x_4,\ 0.4/x_5\}$$

$$FECount(tall) = \{0.2/|\{x_4\}|, 0.532/|\{x_4, x_1\}|, 0.468/|\{x_4, x_1, x_5\}|, 0.187/|\{x_4, x_1, x_5, x_2\}|, 0.012/|\{x_4, x_1, x_5, x_2, x_3\}|\} = \{0.2/1, 0.532/2, 0.468/3, 0.187/4, 0.009/5\}$$

これは「Xのなかで *tall* であるものが $\{x_4\}$ の 1 個である度合が 0.2, $\{x_4, x_1\}$ の 2 個である度合が 0.532, $\{x_4, x_1, x_5\}$ の 3 個である度合が 0.468, ...」, と解釈できる.

Xのなかで A である個数が i であるグレードを $\mu_{FECount(T)}(i)$, その時の i 個の要素は Xを部分集合で X_iとする. "Q X_i are F" の真理値は前節の方法で求められるのでそれをτ_iとすると "Q(AX) are F" の真理値τは

$$\tau = \{\mu_{FECount(T)}(i)/\tau_i : i = (1, 2, .., n)\} \quad (11)$$

となる.

5. おわりに

以上, ファジィ濃度を用いたファジィ量限定子を含む命題の評価方法を示した. またファジィ集合の濃度を求める時にファジィルールにより定義した演算を用いる方法を提案した. この演算を用いると直観にあったファジィ濃度を求めることができた.

この評価方法は, 我々が開発中のファジィ・シミュレーション言語 [4] に使用することを考えている. この言語は数学的モデルが構成しにくいようなシステムに対して, システムの特性をファジィif-then ルールにより記述し, ファジィ推論によってシミュレーションを行うことができるものであるが, ファジィ・ルールの条件部に量限定子を含む命題を記述できるように拡張する予定である.

参考文献

[1] L.A. Zadeh : "A Computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages", *Comp. and Maths with Appls.*, vol.9, pp.149–184 (1983)

[2] R.R. Yager: "Quantified propositions in a linguistic logic", *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol.19, pp.195–227 (1983)

[3] L.A. Zadeh : "Test score semantics for natural languages and meaning representation via PRUF", in *Empirical Semantics*, (B.B.Regier, Ed.), Brockmeyer, Bochum, pp.281–349 (1981)

[4] 馬野, 松岡, 鳩野, 田村 : 「連続型シミュレーション言語へのファジィ集合論の応用」, 第 10 回ファジィシステムシンポジウム, pp.555–558, (1994)

[問い合わせ先]
〒 560 豊中市 待兼山町 1-3
大阪大学 基礎工学部 システム工学科
馬野 元秀
TEL: 06-850-6376
FAX: 06-850-6341
Internet: umano@sys.es.osaka-u.ac.jp

FF3-3

ファジィ決定木のチューニング

Fuzzy Tuning for Fuzzy Decision Tree

馬野 元秀　北辻 佳憲　鳩野 逸生　田村 坦之
Motohide UMANO　Yoshinori KITATSUJI　Itsuo HATONO　Hiroyuki TAMURA

大阪大学 基礎工学部
Department of System Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University

Abstract　When a generated fuzzy decision tree does not fit the training data, it is not considered that the given fuzzy sets of each attribute are suitable. Therefore we propose a tuning method for a fuzzy decision tree using the training data. We tune up parameters of fuzzy sets of each attribute and t-norms for multiplication on each node with the gradient descent method. Then we apply it a four-variate function and diagnosis by gas in oil.

1. はじめに

人間から有用な知識を獲得することは難しい問題である. このような方法の1つとしてデータからファジィ決定木を生成するアルゴリズムであるファジィID3アルゴリズムを我々は提案している [1] . この方法はユーザーが与えたファジィ集合に基づいて, ファジィ決定木を生成するため, ファジィ集合をうまく与えないと生成されたファジィ決定木があまりよくないことがある. このとき, データを用いてファジィ決定木をチューニングすることを考える. まず, 最急降下法により各節点でのファジィ集合のパラメータをチューニングする [2] . これを適当な4変数関数と油中ガス分析データ [3] に適用する. さらに, 各節点で行っている積演算をパラメータつきt-normに変更し, このパラメータをチューニングする. この方法についても4変数関数と油中ガス分析データに適用した.

2. ファジィ決定木のチューニング

従来の決定木における推論は, ルート節点から出発して, 各節点における属性の値に応じて枝をたどっていき, 葉節点に到達すると, そこに付けられたクラス名が推論結果となる. ところが, ファジィ決定木ではグレード付きで複数の枝をたどっていき, 複数の葉節点に到達することになる. 各節点では, ファジィ集合から得られるグレードと伝搬してきたグレードとの積を下層の節点に伝搬させていく. そして, すべての葉節点で得られた各クラスのグレードを和でまとめる.

本稿では各節点の枝のファジィ集合と, 各節点におけるグレードの演算をそれぞれパラメータを用いて表し, チューニングによって, パラメータを調整し, よりよい決定木を得ることを試みる.

2.1 メンバーシップ関数のチューニング

(1) 定式化

メンバーシップ関数のチューニング [2] において我々は各枝が持つメンバーシップ関数を図1のようにパラメータで表現した. 具体的には, Z関数, S関数では2つ, Π関数では4つのパラメータを用いた.

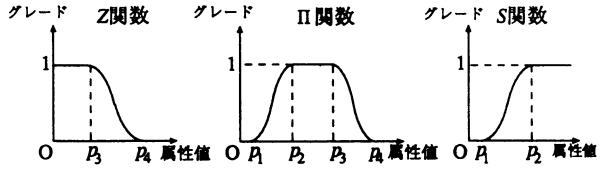


図1　メンバーシップ関数のパラメータ

得られた決定木をもとに推論する過程において, データの確信度がどのように伝搬するかを示すと図2のようになる. ただし図2は, それぞれ2つのファジィ集合を持った N 属性のデータに対する決定木である.

N属性のデータ x に対して, ある決定木で推論し, ある葉節点に到達したとする. このときに通った経路 r において, 各節点で調べる属性とデータを $A_1, A_2, \cdots, A_n$ と $x_1, x_2, \cdots, x_n$ とし, 葉におけるクラス C_i の確信度を c_i とすると, このデータに対するこの葉ノードにおけるクラス C_i の確信度は

$$\hat{y}_i^r = c_i \cdot \prod_{j=1}^{n} \mu_{A_j^r}(x_j) \tag{1}$$

となる. ここで, $\mu_{A_j^r}(x_j)$ は属性 A_j のテストで, 現在の経路 r の枝に付けられたファジィ集合の x_j に対するメンバーシップのグレードとする. これをすべての葉節点への経路に適用して, その和を求めるので

$$\hat{y}_i = \sum_r \hat{y}_i^r = \sum_r (c_i \prod_{j=1}^{n} \mu_{A_j^r}(x_j)) \tag{2}$$

となる.

最急降下法では, クラス C_I をもったデータが与えられた場合に, ファジィ決定木によって得られた確信度 $\hat{y}_i$ と与えられた確信度 y_i との差の2乗和 E を最小にするように調整する. E は次の式で与えられる.

この E を小さくするように経路の第 j 節点で式 (1) のメンバーシップ関数 $\mu_{A_j^r}$ のパラメータの修正量を求める. パラメータの微小変化に対する誤差 E の変化分 $\partial E/\partial p_k$ を, 次のように表す.

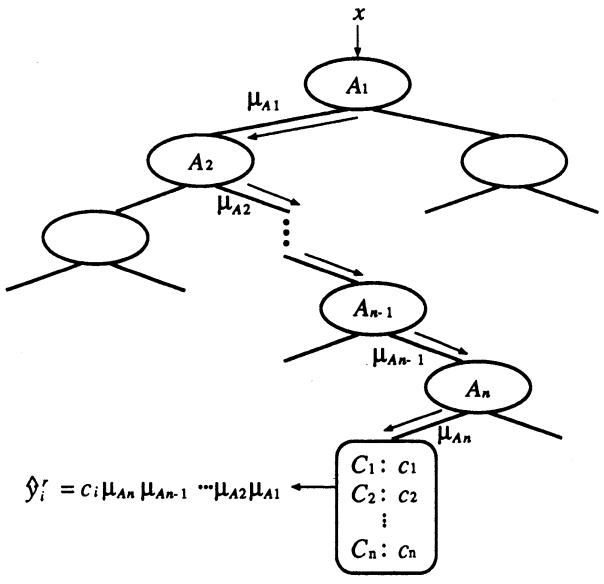


図 2　確信度伝搬のようす

$$E = \sum_i E_i = \sum_i \frac{1}{2}(y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{3}$$

この Eを小さくするように経路の第 j節点で式 (1) のメンバーシップ関数$\mu_{A_j^r}$のパラメータの修正量を求める．パラメータ p_kの微小変化に対する誤差 Eの変化分$\partial E/\partial p_k$を，次のように表す．

$$\frac{\partial E}{\partial p_k} = \sum_i \frac{\partial E_i}{\partial p_k} = \sum_i \frac{\partial E_i}{\partial \hat{y}_i} \cdot \frac{\partial \hat{y}_i}{\partial \mu_{A_j^r}} \cdot \frac{\partial \mu_{A_j^r}}{\partial p_k} \tag{4}$$

式 (4) の$\partial E_i/\partial \hat{y}_i$, $\partial \hat{y}_i/\partial \mu_{A_j^r}$, $\partial \mu_{A_j^r}/\partial p_k$ は次式で得られる．

$$\frac{\partial E_i}{\partial \hat{y}_i} = \hat{y}_i - y_i \tag{5}$$

$$\frac{\partial \hat{y}_i}{\partial \mu_{A_j^r}} = \sum_{r=1} \frac{c_i \cdot \prod_{j=1}^{N} \mu_{A_j^r}}{\mu_{A_j^r}}, \quad (\mu_{A_j^r} \neq 0) \tag{6}$$

$$\frac{\partial \mu_{A_j^r}}{\partial p_1} = \begin{cases} \frac{4(x_k-p_1)(x_k-p_2)}{(p_2-p_1)^3} & p_1 < x_k < \frac{p_1+p_2}{2} \\ -\frac{4(x_k-p_2)^2}{(p_2-p_1)^3} & \frac{p_1+p_2}{2} < x_k < p_2 \end{cases} \tag{7}$$

$$\frac{\partial \mu_{A_j^r}}{\partial p_2} = \begin{cases} -\frac{4(x_k-p_1)^2}{(p_2-p_1)^3} & p_1 < x_k < \frac{p_1+p_2}{2} \\ \frac{4(x_k-p_1)(x_k-p_2)}{(p_2-p_1)^3} & \frac{p_1+p_2}{2} < x_k < p_2 \end{cases} \tag{8}$$

$$\frac{\partial \mu_{A_j^r}}{\partial p_3} = \begin{cases} -\frac{4(x_k-p_3)(x_k-p_4)}{(p_4-p_3)^3} & p_3 < x_k < \frac{p_3+p_4}{2} \\ \frac{4(x_k-p_4)^2}{(p_4-p_3)^3} & \frac{p_3+p_4}{2} < x_k < p_4 \end{cases} \tag{9}$$

$$\frac{\partial \mu_{A_j^r}}{\partial p_4} = \begin{cases} \frac{4(x_k-p_3)^2}{(p_4-p_3)^3} & p_3 < x_k < \frac{p_3+p_4}{2} \\ -\frac{4(x_k-p_3)(x_k-p_4)}{(p_4-p_3)^3} & \frac{p_3+p_4}{2} < x_k < p_4 \end{cases} \tag{10}$$

式 (5) ～式 (10) を用いて式 (4) の$\partial E_i/\partial p_k$を計算し，$\partial E_i/\partial p_k$の負の方向にパラメータ p_kを変化させる．すなわち，p_kの更新量Δp_kを定数α(学習係数) を用いて，次式で与えられる．

$$\Delta p_k = -\alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial p_k} \tag{11}$$

(2) 数値実験

上で述べた定式化をもとにファジィ決定木のチューニングを行った．用いたデータは，4 変数関数の値により出力を 5 クラスに分けた数値データ 200 個と，油中ガス分析データ 220 個である．

各データとも半分に分け，訓練データでチューニングを行い，残りの半分で正解率を求めた．1 データごとにチューニングを行い，パラメータを変化させ，全訓練データについて行った．これを 1 回のチューニングと数える．このとき，それぞれの節点を伝搬するデータ数に著しい差ができる．すなわち，ファジィ決定木のルート節点に近い節点ほど，伝搬するデータが多くなり，葉節点に近付くに従ってデータ数が少なくなる．しかし，ファジィ決定木においてルート節点に近い節点ほど，葉節点に変化を与える影響が大きいため，枝を伝搬するデータ数を m として，第 q回目のチューニングの学習係数α_qを，次式で与えた．

$$\alpha_q = 0.9^q \times \frac{\alpha_0}{m} \tag{12}$$

ただし，初期学習係数をα_0とする．

(a) 4 変数関数

次の関数を考える．

$$f(p,q,r,s) = p^2(1+\cos\sqrt{q^2+4r^2}) + s^2 \tag{13}$$

$$0 \leq p,q,r,s < \pi$$

この結果を表 1 のように 5 つのクラスに分け，200 個のデータを用意し，100 個で関数を同定するファジィ決定木を生成し，チューニングを行い，残り 100 個で正解率を求める．初期のファジィ集合を図 3 に，そして，チューニングの結果を表 2 に示す．

表 1　データ 1 のクラス分け ($f_m = \frac{3\pi^2}{8}$)

クラス名	出力
C_0	$0 \leq f < f_m$
C_1	$f_m \leq f < 2f_m$
C_2	$2f_m \leq f < 3f_m$
C_3	$3f_m \leq f < 4f_m$
C_4	$4f_m \leq f < 5f_m$

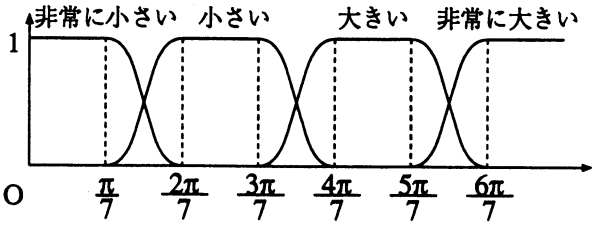


図 3　4 属性のファジィ集合

表 2　メンバーシップ関数のチューニング結果 (4 変数関数)

学習係数	平均誤差	訓練データ正解率	試験データ正解率	チューニング回数
初期決定木	0.0601	53.0%	51.0%	0
0.01	0.1110	53.0%	50.0%	4
0.001	0.0633	55.0%	51.0%	1
0.0001	0.0578	54.0%	52.0%	2
0.00001	0.0570	53.0%	52.0%	13

メンバーシップ関数のチューニングにおいて, 平均誤差の大きな減少は見られず, その結果として, 訓練データおよび試験データの正解率の大きな増加もなかった.

(b) 油中ガス分析データ

次に油中ガス分析診断に適用する. 油中ガス分析診断とは油入電気機器の絶縁油を小量抽出し, 油中に溶解しているガス成分を分析することで異常の状態や異常が発生したときの微小な変化を検出する診断法である.

今回扱うデータは, 廃棄処分となる油入電気機器をとり壊して, 異常内容を確かめた220個のデータである (表3). 具体的な異常内容は「加熱」や「放電」など大まかに4種類に分類したものである. これには確信度が付いていなかったので, すべて1とした. また, 各属性におけるファジィ集合は専門家が図4のように与えた.

表4にメンバーシップ関数のチューニング結果を示す.

表 3　油中ガス分析データ

ガス	データ1	データ2	データ3	データ4	···
CH_4	695	775	474	9	···
C_2H_6	214	335	120	21	···
C_2H_4	1878	912	858	64	···
C_3H_8	71	100	45	12	···
C_3H_6	967	693	541	171	···
C_2H_2	0	0	0	0	···
H_2	363	235	270	58	···
CO	10	46	280	529	···
CO_2	3544	1492	2476	6938	···
その他	438	122	0	0	···

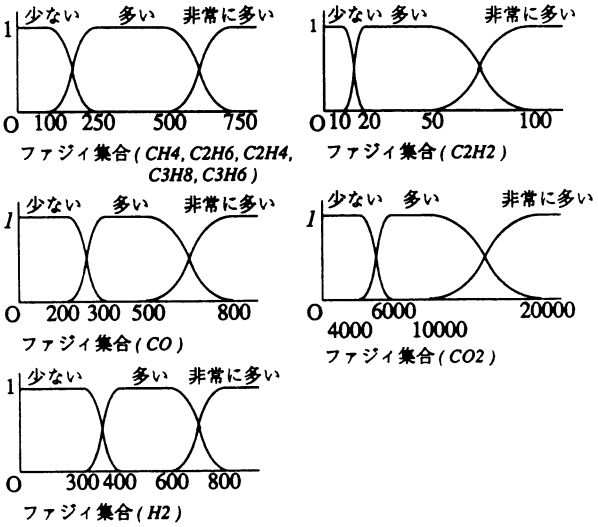


図 4　ファジィ集合

表 4　メンバーシップ関数のチューニング結果 (油中ガス分析)

学習係数	平均誤差	訓練データ正解率	試験データ正解率	チューニング回数
初期決定木	0.0540	66.4%	60.9%	0
0.1	0.0523	66.4%	60.0%	23
1	0.0521	66.4%	61.8%	19
10	0.0516	67.2%	61.8%	17
100	0.0413	66.4%	64.5%	50

4変数関数の同定と同様, 平均誤差はほとんど変化が見られない. また, 初期学習係数100では平均誤差が24%減少しているが, 訓練データの正解率に変化がない, これはノイズとなるデータが多く含まれていると考えられる.

2.2　ファジィ演算子のチューニング

(1) 定式化

ファジィ決定木生成過程において, データの確信度と各節点で得られるグレードとの演算をすべて代数積で行ってきた. 本節では, この演算を激烈積から論理積の範囲で演算できるパラメータ付のt-normを用い, このパラメータのチューニングを行う [4].

t-normとしては次のDombiのパラメータつき演算子を用いる.

$$T(p,x_1,x_2)=\frac{1}{1+\{(\frac{1-x_1}{x_1})^p+(\frac{1-x_2}{x_2})^p\}^{\frac{1}{p}}} \tag{14}$$

まず, 積演算を用いて, データからファジィ決定木を作成する. この出力を最急降下法を用いてチューニングする.

メンバーシップ関数のチューニングと同様, ファジィ決定木を伝搬するデータが葉節点において得られるグレード y_i^r は

$$\hat{y}_i^r=T_{n+1}^r(p_{n+1},c_i,T_n^r(p_n,\mu_{A_n^r}(x_n),T_{n-1}^r(\cdots))) \tag{15}$$

となる. ここで T_j^r は現在の経路 r の第j枝のパラメータつきt-normを表し, $\mu_{A_j^r}(x_j)$ は経路 r の第 j 節点における属性値 x_j のファジィ集合のグレードである. これをすべての葉節点への経路 r に適用してその和を求めるので

$$\hat{y}_i=\sum_{r=1}T_{n+1}^r(p_{n+1},c_i,T_n^r(p_n,\mu_{A_n^r}(x_n),T_{n-1}^r(\cdots))) \tag{16}$$

となる. 最急降下法では, クラス C_I をもったデータが与えられた場合に, ファジィ決定木によって得られた確信度 $\hat{y}_i$ と,min演算 (t-normのうちで最大のもの) による出力 y_i との差の2乗和 E を小さくするように調整する.

$$E=\sum_i E_i=\sum_i\frac{1}{2}(y_i-\hat{y}_i)^2 \tag{17}$$

ただし

$$y_i=\begin{cases}\min(c_i,\min(\mu_{A_{n+1}^r}(x_{n+1}),\cdots,\\ \qquad\min(\mu_{A_2^r}(x_2),\min(\mu_{A_1^r}(x_1),1))\cdots) & (i=I)\\ 0 & (i\neq I)\end{cases} \tag{18}$$

この E を小さくするように各演算子のパラメータの修正量を求める. 第 k 節点で $\mu_{A_k^r}(x_k)$ と上から伝搬してきたデータの確信度と

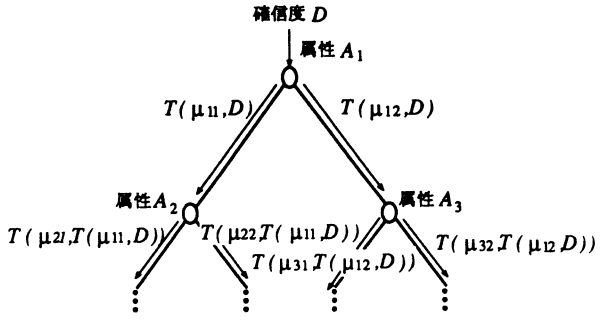


図 5　決定木を伝搬するデータと出力

の演算子のパラメータ p_kの修正を求める．パラメータ p_kの微小変化に対する評価関数 Eの変化分$\partial E/\partial p_k$は，次のように表すことができ，

$$\frac{\partial E}{\partial p_k} = \sum_i \frac{\partial E_i}{\partial p_k} = \sum_i \frac{\partial E_i}{\partial \hat{y}_i} \cdot \sum_{r=1}\{\prod_{j=k}^{n}(\frac{\partial T_{j+1}^r}{\partial T_j^r}) \cdot \frac{\partial T_k^{r*}}{\partial p_k}\} \quad (19)$$

ただし

$$T_{kp}^{r*} = T_k^r(p_k, \mu_{A_k^r}(x_k), \cdots, T_1^r(p_1, \mu_{A_1^r}(x_1), 1)\cdots) \quad (20)$$

式 (19) の$\partial E_i/\partial \hat{y}_i$, $\partial T_{j+1}^r/\partial T_j^r$, $\partial T_k^r/\partial p_k$はそれぞれ次のように得られる．

$$\frac{\partial E_i}{\partial \hat{y}_i} = \begin{cases} \hat{y}_i - y_i & (i = I) \\ \hat{y}_i & (i \neq I) \end{cases} \quad (21)$$

$$\frac{\partial T_{j+1}^r}{\partial T_j^r} = \frac{\{(\frac{1-T_p^r}{T_p^r})^{p_{j+1}} + (\frac{1-\mu_{A_j^r}(x_{j+1})}{\mu_{A_j^r}(x_{j+1})})^{p_{j+1}}\}^{\frac{1}{p_{j+1}}-1}}{[1+\{(\frac{1-T_j^r}{T_j^r})^{p_{j+1}} + (\frac{1-\mu_{A_j^r}(x_{j+1})}{\mu_{A_j^r}(x_{j+1})})^{p_{j+1}}\}^{\frac{1}{p_{j+1}}}]^2} \cdot \frac{(1-T_j^r)^{p_{j+1}-1}}{(T_j^r)^{p_{j+1}+1}} \quad (22)$$

$$\frac{\partial T_k^{r*}}{\partial p_k} = \frac{T_k^{r*}}{p_k}(1-T_k^{r*})\log\frac{1-T_k^{r*}}{T_k^{r*}} \quad (23)$$

ただし，$0 < T_j^r < 1$ かつ $0 < \mu_{A_j^r}(x_j) < 1$

式 (21) ～式 (23) を用いて式 (19) の$\partial E_i/\partial p_K$を計算し，学習係数 α_qをかけた分だけパラメータを変化させる．

(2) 数値実験

前節で述べたファジィ演算子のチューニングの定式化をもとにファジィ決定木のチューニングを行った．用いた試験方法およびデータは，メンバーシップ関数のチューニングと同様 4 変数関数からのデータ 200 個と油中ガス分析データ 220 個である．

(a) 4 変数関数

前節の (a) で行った 4 変数関数のファジィ決定木のファジィ演算子に関してチューニングを行った．表 5 にその結果を示す．

ファジィ演算子のチューニングに関しては，各学習係数とも 3 割以上減少しており，それに伴って正解率が大きく増加している．

表 5　ファジィ演算子のチューニング結果 (4 変数関数)

学習係数	平均誤差	訓練データ正解率	試験データ正解率	チューニング回数
初期決定木	0.4194	53.0%	51.0%	0
0.1	0.2686	58.0%	56.0%	7
0.01	0.2625	60.0%	58.0%	69
0.001	0.2625	60.0%	58.0%	96
0.0005	0.2586	59.0%	57.0%	1081

(b) 油中ガス分析データ

前節の (b) で行った油中ガス分析データのファジィ決定木のファジィ演算子に関してチューニングを行った．表 6 にその結果を示す．

ファジィ演算子に関しては平均誤差の変化が極めて小さく，結果的に正解率への変化にも影響が及んでいない．ユーザーにより与えられたファジィ集合が適切であることがわかる．

表 6　ファジィ演算子のチューニング結果 (油中ガス分析)

学習係数	平均誤差	訓練データ正解率	試験データ正解率	チューニング回数
初期決定木	0.2220	66.4%	60.9%	0
0.1	0.2077	66.4%	60.9%	100
0.01	0.2084	66.4%	60.9%	70
0.001	0.2089	66.4%	61.8%	192
0.0005	0.2084	66.4%	60.9%	103

2.3　比較・検討

適当な 4 変数関数から得たデータはノイズデータを持っていないため，少ないチューニング回数で平均誤差を減少させることができ，また，それに伴って訓練データの正解率が増加し，ほぼ同様のクラスの割合を持つ試験データに関しても，正解率が増加する．しかし，油中ガスデータのようにノイズを含んだデータに関しては平均誤差もあまり変化せず，正解率にも変化がない．

また油中ガスデータではエキスパートによるファジィ集合が非常に適切であるため，初期決定木の平均誤差が極めて小さい．

メンバーシップ関数とファジィ演算子とを比較すると，計算結果に確実に変化を与えるファジィ演算子の方が極小値を得やすく，またそれに伴って正解率が増加するようである．

3.　おわりに

ファジィ決定木に対する最急降下法を用いたチューニング手法について説明し，メンバーシップ関数とファジィ演算子のチューニング法を定式化した．そして，4 変数関数及び油中ガス分析データを用いて実際にチューニングを行った．

参考文献

[1] 馬野 元秀, 中山 学, 鳩野 逸生, 田村 坦之：「ID3 に基づくファジィ決定木の生成とその評価」第 10 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.333–336 (1995)

[2] 市橋秀友：「ニューロ的手法によるファジィルールの調整」日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.2, pp.191–203 (1993)

[3] 河内 二三夫, 松浦敏之：「油中ガス分析診断エキスパートシステムの開発と実用における評価」, 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM–90–40 (1992)

[4] 林 勲, 内藤 栄一, 若見 昇：「最急降下法を用いた学習型ファジィ結合演算子の提案」, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.5, pp.1132–1141 (1993)

[問い合わせ先]
〒 560　豊中市待兼山町 1-3
大阪大学 基礎工学部 システム工学科
馬野 元秀
TEL:　06–850–6376　(ext. 4629)
FAX:　06–850–6341
Internet:　umano@sys.es.osaka-u.ac.jp

FF3-4

ファジィ・プロダクション・システムを用いた酸塩基平衡異常診断システムの構築

A Diagnosis System for Acid-Base Disoders by Fuzzy Production System

馬野 元秀 片岡 忠彦 松下 光範 鳩野 逸生 田村 坦之
Motohide UMANO Tadahiko KATAOKA Mistunori MASTUSHITA Istuo HATONO Hiroyuki TAMURA

大阪大学 基礎工学部
Faculty of Engineering Science, Osaka University

Abstract In this paper, we propose a fuzzy expert system for acid-base disorders by Fuzzy Production System. Fuzzy Production System is a shell which can deal with fuzzy rules and data. This system can diagnose the condition of a patient, identify the cause, offer appropriate treatments and reflect these diagnosis by checking a patients condition after some treatments. For a reasoning with less data, we carry out first a forward chaining to diagnose using a few data and next a backward chaining to certify using a question and answer. We demonstrate the effectiveness of this system by comparing results of system and first data in a text book.

1. はじめに

エキスパート・システムとは，ある問題領域の専門家が持っている事実と知識を計算機上に表現し，それらの知識を用いて問題解決をはかるものである．しかし，専門家の知識の中にはあいまいなものも多くあり，得られるデータも正確であるとは限らない．しかし，従来のエキスパート・システムではあいまいな知識を十分に利用していなかった．

そこで，エキスパート・システムの記述に用いられる知識表現の一つであるプロダクション・システムにファジィ集合の観念を取り入れ，あいまいな知識を表現出来るように拡張したファジィ・プロダクション・システムを作成してきた[1]．

本研究では，このファジィ・プロダクション・システムの有効性を検証するために，酸塩基平衡異常という病態の診断とその治療を対象としたファジィ・エキスパート・システムの構築を試み，その有効性を検証する．本システムでは酸塩基平衡異常の特定，原因疾患の特定，治療指針の提示，再評価を1サイクルとする診断を行うことができる．また，できるだけ少ないデータで診断が行なえるように診断，治療のアルゴリズムを工夫した．

2. 酸塩基平衡異常とは

体液の H^+ 濃度は細胞内外の緩衝系，肺，腎により複雑に調節されているが，腎や肺に障害が生じたり，生体内の緩衝系に異常が生じると，酸塩基平衡状態を保てなくなる．この状態を酸塩基平衡異常という．H^+ 濃度が高くなるのがアシドーシスで，逆に H^+ 濃度が低くなるのがアルカローシスである．その発症原因が代謝性変化によるか呼吸性変化によるかにより，代謝性 (metabolic) アシドーシス・アルカドーシス，呼吸性 (respiratory) アシドーシス・アルカドーシスに分類される [2]．さらにこれらの合併した混合性酸塩基平衡異常がある．これらの病態の特定には血液 pH，炭酸ガス分圧 (pCO_2)，重炭酸イオン濃度 ($[HCO_3^-]$) を基本とした血液ガス分析を中心として，患者の身体所見，病歴等から総合的に判断することが必要である．以下，紙面の都合で代謝性アシドーシスのみ簡単に説明する．

表1 のように固定酸が体内に蓄積したり，または塩基が不足して体液の H^+ 濃度が上昇する状態を代謝性アシドーシスと呼ぶ．代謝性アシドーシスの特徴は血漿 HCO_3^- の低下と H^+ の増加，pH の低下である．組成代謝の結果，毎日 50mM という多量の固定酸が作られ，腎から排泄されているが，重症糖尿病やショックなどで異常な固定酸が作られたり，腎の障害で酸排泄が低下すると代謝性アシドーシスが起こる．

表1 代謝性アシドーシス

原因	身体所見	治療指針
ケトアシドーシス	呼吸が深い	原因療法
乳酸性アシドーシス	神経障害	重炭酸 Na
尿毒症性アシドーシス	低血圧	乳酸 Na
腎尿細管性アシドーシス	徐脈	血液透析
下痢	悪心	
尿管結腸		
薬剤投与		

3. システムの概要

本システムでは酸塩基平衡異常とその原因の特定，治療指針の提示，数回診断を行った後で診断，治療の妥当性を評価することを1サイクルとして行う．図1 が酸塩基平衡異常総合診断システムの概略を示したものである．

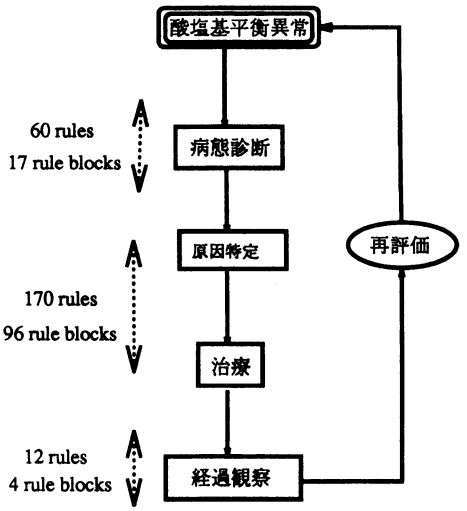


図 1　酸塩基平衡異常総合診断システム概略図

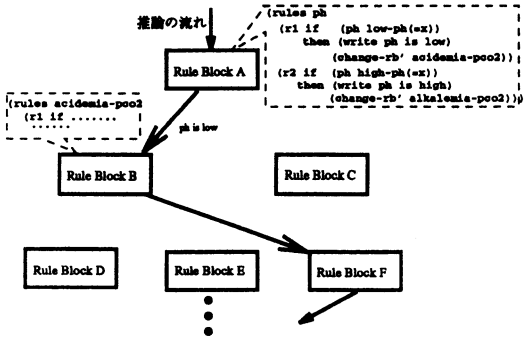


図 2　推論の流れの概略図

そして図 2 が推論の流れの概略図である．このようにルールブロックを細かく変えることによって，無駄のない推論を目指している．簡単な例では，pHが高いことが分かればルールブロックを変えてしまうことによって，pHが低い場合に用いるルールを参照することはなく，その場合に必要なデータも要らなくなる．また，医療診断では，治療後の経過を観察し，その後の治療指針等に反映させるのだが，本システムでも複数回の診断結果等を作業記憶に蓄積しておき，その後の診断，治療等に反映させることが出来る．

以下，図 1 にしたがって説明していく．

3.1　診断

酸塩基平衡異常診断を行う際に診断の決め手となるのは，1. 臨床検査，2. 病歴，3. 全身の身体所見の三つである．本システムでは，臨床検査結果に基づく診断を前向き推論で行い，特定された酸塩基平衡異常を病歴，身体所見を後向き推論によって問診形式で確認していく方法を採った．

(1) 前向き推論による診断

ファジィ・プロダクション・システムの前向き推論を用いて記述している．pHが low の時のルールの一部は次のようになる．

```
(rule
 pco2-hco3-acidemia
 (r1 if (pco2 high-pco2(=x))
     (hco3 normal-hco3(=y))
     then
     (write reason pco2 is high
            hco3 is normal(=match))
     (change-rb 'expected-hco3-acidemia))
 (r2 if (hco3 low-hco3(=y))
     (pco2 normal-pco2(=x))
     then
```

なお，データはH^+, pCO_2, HCO_3^-を基本とし，その他のデータは適宜必要に応じて入力できるようにした．

この部分だけの診断を実際に行ってみる．まず，作業記憶にデータをいれる．これは次のようであるとする．

```
(wm tadahiko
    (hco3 17)(ph unknown)
    (pco2 14.2)(cl 102)(na 130))
```

そして，診断を実行すると，次のような結果を得る．

```
>(start ph tadahiko)
reason ph is high (1.0)
reason pco2 is low hco3 is low
(0.9444444444444442)
reason the decrease of hco3 is
just that can be expected
(0.72915200000000002)
diagnosis he is respiratory alkalosis
(0.72915200000000002)
```

(2) 後向き推論による診断

診断は血液ガス分析の臨床検査結果のみに頼るのではなく，身体所見，病歴等から総合的に診断することが重要である．そこで，臨床検査結果に基づいて特定した酸塩基平衡異常を身体所見，病歴に基づいて後向き推論で確認することにした．次の例は代謝性アシドーシス診断のルールの一部である．

```
(backward-rules
 b-metabolic-acidosis
 ;; 問診
 (q1 deepbreezeing
     :- (*q deep-breezeing))
 ;; 診断用ルール
 (r1 0.9 metabolic-acidosis
     :- deep-breezeing)
```

そして，実際の診断は次のような問診形式で行われる．

```
deep-breezeing(y/n)? y
0.90000000000000002 : metabolic-acidosis
```

3.2　原因疾患の特定

酸塩基平衡異常の治療のほとんどが原因疾患の治療であるので，原因疾患の特定は治療の前段階として非常に重要である．

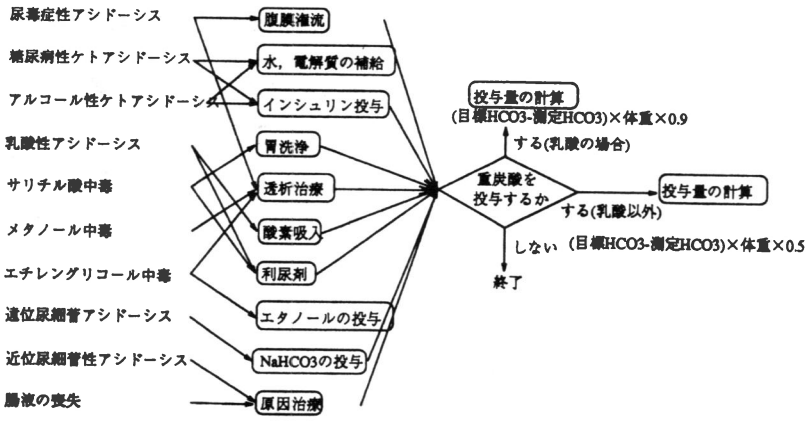


図 3　代謝性アシドーシスの治療

3.3　治療方法の提示

図 3 は一例として本システムで提示できる代謝性アシドーシスの治療指針を表したものである．

3.4　原因疾患の特定と治療法の提示の実例

以下に原因疾患の特定と治療法の提示の実行の様子をしめす．

```
(wm p1 (ph 6.89)(pco2 15)
    (hco3 3.3)(na 134)(cl 98))
anion gap is 32.7 large (1.0)
non-volatile acid is increasinig (1.0)
bun ? 16
creatinine ? 0.9
reason bun is normal (1.0)
beating-disorder(y/n)? y
0.59999999999999998 : metabolic-acidosis
blood-sugar ? 960
reason blood-sugar is high (1.0)
diagnosis the patient is diabetic-asidosis
treatment administration of insulin
treatment supply of water and an electrolyte
some l of intravenous administration of water
are necessary
supply of k is important even if it looks
enough
ph is so low administration of medicine is
needed to raise ph
weight ? 43
445.05000000000001 mmol of hco3
should be administered
```

3.5　経過観察と再評価

酸塩基平衡異常の診断においては，一度の診断で病態や治療法を決定するのではなく，何度となく検査と治療を繰返し，患者の病態の変化に注意しながら治療を進めていかねばならない．本システムでは pH，$[HCO_3^-]$，pCO_2のそれぞれについて，その経過の観察と再評価を行なうこととした．例として，pHの経過の種類を図 4 に示す．

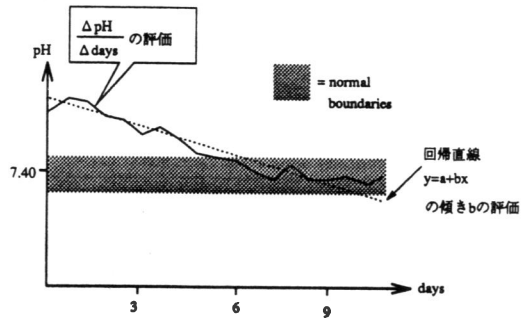


図 4　経過の評価方法

図 4 のように二つの判断基準を用いて経過を観察することにした．前回との変化量を観察することにより短期的な経過を知ることができ，回帰直線の傾きを観察することにより長期的な経過を知ることができる．

再評価の実行結果は次のようになる．

```
the change of ph is moderate in a short
term (1.0)
the ph is getting better in a long term (1.0)
```

4.　診断結果

本章では本研究で構築した酸塩基平衡異常診断システム有効性を文献 [2] の患者データをもとに確かめる．

4.1　酸塩基平衡異常の特定

文献 [2] に記載されていた患者のデータとその診断結果をもとに，本システムの酸塩基平衡異常を特定する診断を行なう．患者の病態は単純性だけでなく，混合性の酸塩基平衡異常を含む．また本システムの大きな特徴の一つは知識のあいまいさを許した点にある．その効果を確かめるために，ファジィ・プロダクション・システムで記述したメンバシップ関

表 2　酸塩基平衡異常の特定

患者	pH	HCO_3^-	pCO_2	病態	F診断	C診断
患者 A	7.70	17.0	14.2	R-alka	正解	不正解
患者 B	7.50	53.0	15.9	RM alka	正解	正解
患者 C	7.20	15.0	39.5	RM acid	正解	正解
患者 D	7.70	27.0	25.0	RM alka	正解	正解
患者 E	6.98	3.3	15.0	M acid	正解	正解
患者 F	7.11	23.2	74.1	RM acid	正解	正解
患者 G	7.29	40.4	86.0	R acid	正解	正解
患者 H	7.25	47.0	110.0	R acid	正解	正解

数をファジィでないものに戻し同様に酸塩基平衡異常特定の診断を行なった．その結果を表 2 にまとめた．

結果は，クリスプ関数で推論した場合，8 症例中 1 例に対して誤った診断 (単純性の呼吸性アルカローシスを混合性の呼吸性・代謝性アルカローシスと診断した) を行なった．文献 [2] に例として載っている病態は典型的な症例であるため，比較的良好な結果が得られた．

4.2　酸塩基平衡異常の総合診断

文献 [2] に記載されていた症例について，治療，経過を含めた総合的な診断を行ない，本システムの治療指針，経過観察，再評価の有効性を確かめる．次のような患者を診断する．表 3 に文献の記載と本システムでの診断結果を示す．

> 65 歳の女性で夜間就寝後激しい呼吸困難をきたし，救急車で来院した．外来での酸塩基平衡は以下のようであった．
>
> pH=7.11, pCO_2=74.1mm Hg, HCO_3^-=23.2m mol/ℓ

表 3　症例を対象とした本システムの総合診断 (その 1)

比較項目	文献の記載	本診断
酸塩基平衡異常の特定	R acid	正解
診断理由	pHの低下 pCO_2の減少	正解
代謝性障害はあるか	ある	正解
診断理由	HCO_3^-が小さい	正解
O_2吸入が必要か	あり (低濃度)	正解
この状態を説明せよ	ほぼ正常軽度の M alka	正常

さらに，この症例のその他の所見とその後の経過を示し，同様に表 4 に文献の記載と本システムでの診断結果を示す．

> 激しい呼吸困難を訴え，意識はやや混沌としており，呼吸数は 22/min で呼吸の延長と激しい喘鳴があり，聴診上も全肺野に乾性ラ音を認めた．心疾患はなく，1 年前に 1 度喘息発作があり，胸部 X 線は肺の過膨脹のみで異常陰影や心拡大はない．心電図上右軸偏位と肺性 P を認めた．酸素 0.5l/min の吸入したが，入院後意識障害が進行し，以下のような酸塩基平衡異常のデータを得られた．
>
> pH=6.99, pCO_2=123.1mm Hg, HCO_3^-=27.2m mol/ℓ

表 4　症例を対象とした本システムの総合診断 (その 2)

比較項目	文献の記載	本診断
原因疾患	気管支喘息	正解
診断理由	ラ音,X 線所見, 呼気延長	ラ音，呼気延長のみ
CO_2ナルコーシス	ある	正解
治療指針	人工呼吸, ステロイド剤	正解
経過観察	総合的に悪化	個々のデータを判断
アルカリ剤の投与	なし	正解

5.　おわりに

本論文ではファジィ・プロダクション・システムを用いた酸塩基平衡異常診断システムを提案し，文献のデータをもとにその有効性を確かめた．その診断結果からある程度専門家の知識を表現できたと言える．また，出来るだけ少ないデータで，診断理由を表示しながら診断を行うことができる．また患者の経過を監察することができる．今後は患者の経過が悪い時用のルールを記述し，自動的に診断，治療の間違いを指摘できるようにしたい．また，今回は出来るだけ少ないデータで診断を行うことを優先したため，推論の手順を予め決めておいた．これは「定式化しにくい知識を用いて推論が行える」ことを長所とするエキスパート・システムにとってはいささか「宝の持腐れ」である．定式化しにくい事象を取り扱うことと少ないデータで推論を行う，あるいは高速で推論を行うことの両立には様々な工夫が必要である．

参考文献

[1] 馬野元秀: ファジィ・プロダクション・システムとその実現, SICE 関西支部シンポジウム あいまい情報処理と知的システム制御, pp.75–80, 1988

[2] 福井俊夫: 酸塩基平衡異常トレーニング, 中外医学社, 1982

[問い合わせ先]

〒 560　豊中市待兼山町 1-3
大阪大学 基礎工学部 システム工学科
馬野 元秀
TEL:　06-850-6376
FAX:　06-850-6341
Internet:　umano@sys.es.osaka-u.ac.jp

著者名索引

索引	氏　名	頁
英名	Ario Ohsato	561
	E. T. Fujito	561
	F. El A. F. Ali	555
	Hua Wang	787
	I.B.Turksen	177
	Katsumi Uezato	567
	Makoto Iguchi	559
	Marta Molinas	567
	Masao Mukaidono	697
	Masaya Kinjo	575
	Midori Takashibu	555, 557
	Mike Griffin	787
	M. Romzi	75
	Rui-Ping Li	697
	Runwei Cheng	257
	S.BEHRENDT	225
	Shuta Murakami	571
	Takeshi Tengan	575
	T. Senjyu	567
	V. C. Zambenedetti	571
	Yasuyuki Kina	557
	Yen-Wei Chen	555, 557, 559, 575
	Zensho Nakao	555, 557, 559, 575
	ZHANG Miaokang	565
	トムソンシリンゴリンゴ	371
	ペロスパシッチ	321
	マティアスケッペン	67
	ヤリ・ワーリオ	465
	ユーディ・アグスタ	703
ア	阿部保	329
	芦田隆次	71, 487
	安次嶺伸吾	611
	安藤彰記	551
	秋月影雄	483
	秋山孝正	551
	秋田幸治	615
	浅居喜代治	809
	足立学	167
	朝倉大輔	595
	東崇史	549
	有川晴彦	339, 369
	有田清三郎	683
イ	伊藤英則	757
	伊藤健	247
	伊藤堅	83
	伊藤修	323, 779
	井上修一	187
	井上博行	171
	井上和夫	171, 673, 699
	井田憲一	201, 243
	井田博哉	109
	磯部光朗	393
	磯本征雄	119
	稲田晃穂	269

索引	氏　名	頁
	岩津賢	619
	岩田昌也	453
	岩田満	645, 667
	今井英幸	43
	今井正文	753
	今泉忠	275
	今村佳世	279
	市橋秀友	9, 123, 141, 235, 277, 737, 741, 775, 811
	市川銀一郎	677
	市村匠	197
	石井博昭	247
	石丸伊知郎	333
	石亀篤司	363
	石原永伯	17
	石崎俊介	727
	石川勉	31, 319
	石田健一	629
	石島英	15
	石畑清	23, 27
	石渕久生	177
	泉めぐみクリスチーナ	589, 709
	泉本和俊	531
	池永美智子	709
	池田貴幸	351
	入江寿弘	83
	板垣朝子	217, 475
	礒本征雄	509
ウ	右田博久	323
	上村龍太郎	733
	上田傑	315, 681
	上木ホセリカルド	179
	上里勝実	347, 611
	植村和正	113
	畝村暢一	71
	内川嘉樹	167, 205, 207, 211, 225, 285, 333, 479, 581, 749, 767
	内野英治	361, 663, 745
	馬野元秀	101, 815, 819, 823, 827
エ	遠藤真一郎	97
	遠藤聡志	215
	海老沼拓史	361
	五百旗頭正	719, 747, 759
	江原義郎	677
	江澤義典	113
オ	奥田徹示	269, 417, 809
	王硯玉	357
	岡崎崇	795
	岡田貴祐	819
	岡田浩之	67
	岡本茂樹	737
	鬼沢武久	645, 657, 667, 679

索引	氏　名	頁
	小山雅也	759
	小山健	577
	小山研一	239
	小倉久和	75, 193
	小田哲久	409
	小澤順	137
	大舘裕章	629
	大森成暁	289
	大西真一	659
	大谷崇	741
	大谷正幸	71, 487
	大谷忍	179
	大竹章裕	179
	大塚和彦	27, 343
	大坪英昭	673
	大坪昭文	375
	大内東	215
	大北正昭	527, 537, 623
	大木誠	527, 537, 623
	大野研	549
	大林吉次	585
	尾山卓也	307
	老松建成	163
カ	加賀昭和	637
	加藤義人	17, 355
	加藤康記	535
	加藤信之	131
	加藤裕一	159
	夏秋義広	541
	嘉数侑昇	449, 457, 459, 463
	歌代誠	101
	河口至商	659
	河口万由香	35
	河辺照之	15
	鎌野琢也	95
	乾口雅弘	253, 265
	韓虎剛	63
	亀井且有	171, 673, 699
	亀井正博	545
	橘桂孝	235
	金子隆臣	589, 709
	金杉友子	319
	金澤直幸	615
	兼高巌	363
	勝又保雄	517, 521
	上久保典昭	9
	神原浩	423, 427
	神長裕明	357
	神田大和	607
	川口将顧	785
	川崎慎一	71
	川瀬真	55
	川西利昌	83
	川村仁	83
	川本俊治	363
	柏木法仁	637

索引	氏　名	頁
	片井修	151, 619
	片岡忠彦	827
	片岡雄	95
	柯トウ	753
キ	喜田義宏	141
	菊池浩明	39, 51, 179, 297, 385, 733
	吉川伸一	269
	吉川大弘	211
	吉川歩	405
	金城寛	175
	北垣郁雄	505
	北口嘉亮	141
	北崎幸子	667
	北川善也	9
	北辻佳憲	823
	北澤雅之	91
	木村哲也	131
	木本隆	711, 715
	李銀秀	291
	李九炯	235
	李瑞平	729
	李相球	483
ク	久保剛弘	325
	久保正男	459
	久保田えりか	249
	久保田直行	229
	熊本洋	721
	栗栖啓光	321
	桑原強司	629
	桑田晶彦	363
	黒宮明	285
	黒沢正明	385
	黒田賢一	395
	黒柳幸男	513
	蔵本俊男	659
ケ	研直宏	119
	玄光男	201, 243, 249, 257, 291, 727
コ	河野大輔	283
	駒形真樹	513
	古殿幸雄	809
	小高知宏	75, 193
	小松直樹	355
	小杉正貴	535
	小菅義夫	325
	小西幹彦	809
	小泉達也	87
	小幡賢三	207
	小林弘明	101
	呉俊彦	413
	後藤堅治	779, 323
	醍醐元正	633
サ	佐久間岳	145
	佐山隼敏	13

索引	氏　名	頁
	佐藤義治	693
	佐藤秀樹	601
	佐藤章	401, 513, 517
	佐藤博	503
	佐藤美佳	693
	佐藤友彦	769
	佐藤和明	279
	佐伯徹郎	159, 163
	斎藤史倫	337
	坂口聡	683
	坂和正敏	253, 261, 265
	阪井和男	601
	堺敏明	87
	酒井義郎	87, 91, 491
	斉藤英樹	333
	樫木哲夫	151, 619
シ	下原勝憲	465, 467
	下島康嗣	149, 229, 337
	柴山秀雄	795
	柴田修吾	527
	柴田崇徳	329
	謝孟春	193
	城田暁伸	127
	信定裕二	301
	清水正	131
	清水誠一	497, 517, 521
	清水静江	753
	清水透	707
	清水敏雄	719
	椎塚久雄	187, 283
	嶋津謙治	17
	島田一雄	795
	島田行恭	13
	島田道彦	399
	島内正裕	123, 689
	白上貞三	87
	白浜成希	605, 661, 155
ス	須田宏	511
	杉浦敏文	759
	杉江浩之	275
	杉本光公	671
	菅野直敏	595
	菅野道夫	45, 133, 389, 431, 445, 599, 641, 779
	澄田貢	681
	鈴木恵二	463
	鈴木茂行	95
	鈴木和彦	13
セ	関口俊宏	799
	石岩	59, 487
	千住智信	347, 611
ソ	外山薫	773, 775
	候徳字	413
	宋正永	483
	孫永倹	657

索引	氏　名	頁
タ	玉江寛志	721
	玉城史朗	175
	高橋一清	357
	高橋和浩	595
	高嶋守	217, 475
	高萩栄一郎	435, 439
	高椋真司	799
	高木英行	183
	高木久弥	285
	高木昇	51, 297
	高木繁則	535
	高野猛	197
	高柳浩	383
	滝田正寿	449
	滝野勝彦	363
	瀧本巌	295
	谷口經雄	363
	谷江和雄	329
	谷村弘	683
	谷哲次	101
	谷野哲三	725
	竹村和久	413
	田口雄章	201
	田崎栄一郎	197, 647
	田村坦之	273, 815, 819, 823, 827
	田中一男	79, 101, 351, 469, 607, 773, 787
	田中英夫	239, 267, 443
	田中雅博	725
	田中幹浩	527
	田中恭治	87
	田中裕幸	363
	田中洋	545
	田野俊一	307
	平良直之	631
	立花啓	35
	伊達惇	35, 43
チ	千葉大輔	679
	陳啓浩	55
ツ	津田栄	517, 521
	塚原泰明	39
	辻村泰寛	249, 727
	辻本賢司	725
	土田賢省	513
テ	寺野寿郎	109, 651, 799
	照屋比呂子	5
	寺邊正大	151
	手島昌一	383
ト	戸田正章	97
	杜澤達美	257
	鳶敏和	637, 773, 775
ナ	永井栄一	417
	永森光晴	19
	成川康男	431

索引	氏　名	頁
	生井仁	231
	中園邦彦	175
	中岡謙	205
	中森義輝	241, 273, 279
	中西祥八郎	39, 179, 217, 297, 385, 475, 733
	中川友紀子	655
	中村剛士	757
	中村誠	87, 91
	中村和男	651, 803
	中津山幹男	357
	中田典規	115
	中島恭一	51
	中島信之	633
	中島洋一	501
	中尾圭介	811
	仲田明紀	339
	長坂一徳	141, 741, 811
	長沢伸也	805
	長町三生	279
	長峰伸明	733
ニ	新宮清志	83
	新原淳一	363
	新沢洋太	27, 343
	西崎一郎	261
	西守克己	17, 355
	西川智登	753
	西村武	405
	西尾チヅル	217, 475
	西野順二	591, 599
ノ	登川誠	49
	野崎勝彦	757
	野崎大輔	141
	野上ナオエ	663
	野瀬松男	329
	野村淳二	279
	野村竜也	221
	野本弘平	325
ハ	羽根義	427
	花田真一	175
	橋山智訓	225
	原田寛信	95
	原田裕二	311
	早川武	737
	長谷川貴史	333
	長谷川聖美	119
	長谷川泰久	149, 337
	吐合隆拡	175
	波多野伸次	289
	鳩野逸生	815, 819, 823, 827
	般若裕子	633
	服部陽一郎	749
	林義人	97
	林勲	137
	林健一郎	375
	林浩之	279

索引	氏　名	頁
	濱田辰巳	315, 681
ヒ	樋口哲也	453
	平川克己	663
	平尾友二	453
	平野勲	389
	廣田薫	71, 321, 487, 629, 655
フ	古河靖之	725
	古橋武	167, 205, 207, 211, 225, 285, 333, 479, 581, 749, 767
	古川栄一	767
	古川修文	399
	古津悟	389
	古田均	545
	藤吉誠	585
	藤田得光	763
	藤田裕輝	527
	藤田和之	379
	藤波敦	745
	藤本勝成	641
	藤本正克	91
	藤本太郎	133
	藤本大助	405
	藤本和則	31
	藤野昭典	151
	福見淳二	95
	福中寿朗	815
	福田敏男	149, 229, 337
ヘ	邊見均	467
ホ	保田敬一	541
	北條暉幸	687
	堀義己	683
	堀内匡	151
	本多中二	145
マ	松浦克昌	19
	松永隆昌	491
	松下光範	827
	松下政親	757
	松下聖一	285
	松下泰弘	545
	松下裕	419, 423, 427
	松山敏剛	663
	松川英夫	781
	松田浩	473
	松田修三	501
	松尾勝	647
	松本義之	395
	松澤和光	31, 319
	箭内顕彦	517
	前田幹夫	63, 311, 375, 781
	前田博	127, 301
	前田豊	443
	前田陽一郎	627
	増井重弘	109, 321, 799
	馬庭芳朗	683
	牧野弘	131
	枡田行央	645

索引	氏　名	頁
ミ	宮岡政夫	445
	宮腰淳一	427
	宮腰政明	43
	宮城隼夫	49, 631
	宮沢正明	385
	宮地功	525
	宮田仁志	527, 537, 623
	宮田裕次郎	479
	宮内肇	17
	宮武直樹	399, 501
	宮本章広	323, 779
	宮本定明	703
	宮里裕	347
	三井和男	83
	三好哲也	9, 123, 141, 235, 277, 737, 741, 811
	三好力	221
	三村紀中	501
	神酒勤	495, 785
	水沼充	357
	水沼洋人	473
	水本雅晴	59, 339, 365, 369, 379, 531
	水野敬文	449
	水野勇一	591
	南谷峰子	279
	満田基温	417
ム	向台茂	541
	向殿政男	27, 51, 231, 297, 305, 343, 601, 677, 729
	室伏俊明	431, 445, 641
	村井泰仁	105
	村上周太	63, 311, 375, 781
	村田昌司	747, 759
	村田忠	289, 295
	村田忠彦	177
	武者利光	601
	武藤憲司	795
	武藤章	487
モ	森下巌	629
	森戸健一	113
	森川大昭	589
	森雄一郎	27, 343
	杢屋銑一	667
ヤ	安井浩之	305
	安信誠二	105, 371, 671
	安田恵一郎	763
	山ノ井高洋	383
	山岡充昌	285
	山下元	401, 497, 513, 517, 521
	山下勝己	49, 631

索引	氏　名	頁
	山口亨	615, 769
	山口克人	637
	山口静馬	159, 163
	山崎束	791
	山川宏	711, 715
	山川烈	361, 495, 663, 745, 785
	山中建二	241
	山田孝治	457
	山田恒嗣	699
	山田水城	399
	山本幸一	105
	山本哲彦	175
	山本茂史	707
	八木透	749, 767
	矢鳴虎夫	155, 503, 605, 661, 689
	矢野幸重	589, 709
	柳原二郎	55
	柳沼義典	711, 715
	鑓田威	23
	藪内賢之	241
ユ	行松徹	581
	湯場崎直養	71, 487
ヨ	易建強	71, 487
	横井浩史	449, 457
	横山清子	119
	横山隆一	763
	横川壽彦	591
	横田孝雄	201, 291
	吉岡啓輔	79, 469
	吉原道宏	615, 769
	吉根勝美	119, 509
	吉田均	541
	吉田香	155, 603, 661
	吉本富士市	123
	吉野一	321
	世木博久	757
	米澤好司	719
	米盛裕二	1
	楊旭華	207
	楊宗胥	13
リ	劉偉傑	45
	梁青	729
	領家美奈	273
ワ	渡部英生	495
	渡辺寿美子	663
	渡辺則生	275
	渡辺辰巳	183
	渡辺諭	189
	渡辺隆男	763
	和多田淳三	241, 395, 473
	鷲巣悟	719

第11回ファジィシステムシンポジウム実行委員会

実行委員長	村田　忠	プログラム委員長	宮城 隼夫
総務・会計	仲尾 善勝		千住 智信
会場担当	瑞慶覧長定		陳　延偉
広報担当	山本 哲彦		長堂　勤
	玉城 史朗		遠藤 聡志
	金城　寛		山田 孝治

第11回ファジィシステムシンポジウム講演論文集

1995年7月12日発行

発行　日本ファジィ学会(SOFT)

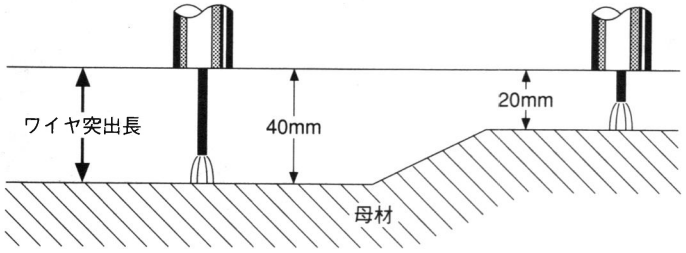
〒160 東京都新宿区西新宿1-24-1
エステック情報ビル24F
日本エステック情報協会内
電話　(03) 5322-3607

編集　第11回ファジィシステムシンポジウム実行委員会

Panasonic

ファジィ制御だから溶接ビードがキレイ。

特長 ●ファジィ制御により、突出長の変動に強く、どなたでも安定した溶接が可能。●脚長(溶込み深さ)制御により、突出長が変動してもビードの脚長、溶込み深さを補償。●突出長を長くしてもアーク切れせず、安定したアークを実現。●長い突出長でのアークスタート性を向上。●ロボットの電源としても最適。



ファジィ技術で出力電流・電圧を制御。ワークによってワイヤ突出長が大きく変化(500A機の場合20～40mm、350A機の場合15～35mm、200A機の場合10～30mm)しても、安定したビードが得られます。

ファジィ制御 CO2/MAG自動溶接機 パナスターAAシリーズ

AA200

適応板厚 薄板用 0.9～6mmt

一定したビード幅に！



AA350

適応板厚 薄・中板用 0.9～12mmt

一定したビード幅に！



AA500

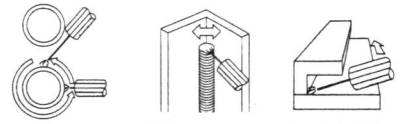
適応板厚 厚板用 1.2～25mmt

一定した溶け込みに！



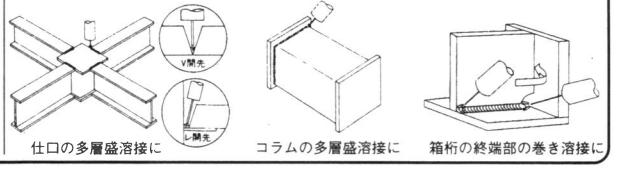
従来、熟練を必要とした複雑な溶接が簡単にこなせます。

〈AA200, 350の場合〉



パイプの狭い箇所の回り込み溶接に　難しい立向き上進溶接に　トーチの入らない狭い箇所の溶接に

〈AA500の場合〉



仕口の多層盛溶接に　コラムの多層盛溶接に　箱桁の終端部の巻き溶接に

松下電器・松下産機

お問い合わせは…〒561 大阪府豊中市稲津町3-1-1 松下産業機器(株)／溶接システム事業部宣伝係 ☎(06)866-8556又は、松下電器産業(株)／インダストリー・FA営業所へ

■●北海道(011)207-7747 ●東北(022)225-4111 ●東部(03)3438-5067 ●関東〈大宮〉(048)652-0131 〈宇都宮〉(0286)37-2231 ●神奈川(0462)27-6651 ●新潟(025)245-9421 ●中部(0561)63-9111 ●長野(0263)26-5144 ●静岡(054)247-5127 ●西部(06)821-8031 ●兵庫(078)391-7827 ●北陸(0762)23-1590 ●中国(082)248-1946 ●東中国(086)243-7660 ●四国(0878)26-1822 ●九州(092)481-1131 ●沖縄(098)869-2926 ●海外FA(06)282-5945

■FAテクニカルセンター／各種サンプルの施工・実験を承ります。■松下産機FAテクニカルセンター(06)821-8022 ●北海道(011)762-6422 ●東北(022)244-8244 ●東部(03)3697-1421 ●厚木(0462)27-5341 ●新潟(025)245-9421 ●中部(0561)63-1644 ●西部(06)821-8021 ●四国(0878)79-1480 ●九州(092)963-0052



POWERTRONICS
MECHATRONICS
ELECTRONICS

明電舎は、パワートロニクス、メカトロニクス、エレクトロニクスの３つの技術力を結集した総合的なシステムエンジニアリングで、豊かで可能性に満ちた未来を実現するために挑戦を続けていきます。
昨日よりも今日、今日よりも明日がもっと輝くように…。

明電のシステムエンジニアリング

株式会社 明電舎 〒103 東京都中央区日本橋箱崎町36-2(リバーサイドビル)☎(03)5641-7000 支社・支店●関西支社(06)203-5261●中部支社(052)231-7181●九州支店(092)771-7041●北海道支店(011)261-5531●東北支店(022)227-3231●北陸支店(0764)33-0445●中国支店(082)221-4255●四国支店(0878)22-3437